

Introducción a la Edafología

uso y protección del suelo



J. Porta
M. López-Acevedo
R. M. Poch



INTRODUCCIÓN A LA EDAFOLOGÍA

Uso y PROTECCIÓN DEL SUELO

INTRODUCCIÓN A LA EDAFOLOGÍA

USO Y PROTECCIÓN DEL SUELO

Jaume Porta Casanellas

Catedrático de Universidad de Edafología

Marta López-Acevedo Reguerín

Profesora Titular de Edafología

Rosa M. Poch Claret

Profesora Titular de Universidad de Edafología

Departamento de Medioambiente y Ciencias del Suelo
Universitat de Lleida (Cataluña, España)



Ediciones Mundi-Prensa

Madrid • Barcelona • México

2008

Grupo Mundi-Prensa

- **Mundi-Prensa Libros, s. a.**

Castelló, 37 - 28001 Madrid
Tel. +34 914 36 37 00 - Fax +34 915 75 39 98
E-mail: libreria@mundiprensa.es

- Internet: www.mundiprensa.com

- **Mundi-Prensa Barcelona**

- **Editorial Aedos, s. a.**

Aptdo. de Correos 33388 - 08080 Barcelona
Tel. +34 629 26 23 28 - Fax +34 933 063 499
E-mail: barcelona@mundiprensa.es

- **Mundi-Prensa México, s. a. de C. V.**

Río Pánuco, 141 - Col. Cuauhtémoc
06500 México, D. F.
Tel. 00 525 55 533 56 58 - Fax 00 525 55 514 67 99
E-mail: mundiprensa@mundiprensa.com.mx

© 2008, Jaume Porta Casanellas
© 2008, Ediciones Mundi-Prensa
Depósito Legal: M. 7.954-2008
ISBN: 978-84-8476-342-0

PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M. y POCH, R. M.
**Introducción a la Edafología: uso y
protección del suelo.** Madrid: Ediciones Mundi-
Prensa. 2008. 451 pp.; 17 x 24 cm.
ISBN: 978-84-8476-342-0
Materia: 631.4

Portada: Suelo de la Conca de Tremp (Catalunya, España). La baja calidad de este suelo condiciona el crecimiento de la masa forestal (foto J. Porta, 2008).

Nota bibliográfica: Porta, J., López-Acevedo, Marta y Poch, Rosa M.: *Introducción a la Edafología: uso y protección del suelo.* Ediciones Mundi-Prensa, 451 pp. Madrid, 2008.

Los comentarios y sugerencias, que se agradecen de antemano, pueden hacerse llegar a: jporta@macs.udl.cat

No se permite la reproducción total o parcial de este libro ni el almacenamiento en un sistema informático, ni la transmisión de cualquier forma o cualquier medio, electrónico, mecánico o fotocopia, registro u otros medios sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

Imprime: Artes Gráficas Cuesta, S. A. Seseña, 13. 28024 Madrid

En estos tiempos «líquidos» actuales, que diría Zygmunt Bauman, donde lo cuantitativo envuelve y enmascara a lo cualitativo y donde la solidez del concepto bien trabado y meditado se disuelve en un conjunto fluido de múltiples iniciativas que apenas tienen tiempo para consolidarse ¿donde se situaría al libro de texto universitario como base y referente de una enseñanza de calidad? Sobre todo al denominado libro de «autor», donde uno o un pequeño grupo de docentes universitarios se reúnen para ofrecer su visión particular de una materia científica. Probablemente, entre los innumerables *items*, que se diseñan continuamente para evaluar esa supuesta calidad de la enseñanza ocuparía (si lo ocupa) un pequeño recuadro donde sólo se daría cuenta de si existe o no ese libro. Otras cuestiones, como el grado de experiencia que se acumula en él, la originalidad y claridad de conceptos, la accesibilidad del lenguaje o simplemente el estilo literario, suponemos que son temas que desbordarían por todas partes las normas habituales de las encuestas al uso y, por lo tanto, no podrían ni sabrían como encajarlos en ellas. Y, sin embargo, la existencia de los textos de autor puede ser un indicador muy adecuado sobre el nivel cultural en materia docente, pues nos mostraría que en el cuadro de profesores existen todavía personas con criterios, puntos de vista propios y no una simple docilidad o emulación frente a lo que nos traducen. Por otra parte, el libro de texto, que debe merecer tal nombre, no resulta de la simple adición de datos de última hora, a los que somos tan aficionados en ciencias, sino que caben también citas clásicas (en muchos casos todavía no superadas) y, sobre todo, una manera personal de interpretar las experiencias y los conceptos centrales que deben nutrir cualquier asignatura.

En España no existe mucha tradición de libros de texto con criterios propios. Se llevaba, sobre todo, la traducción o la copia más o menos velada de textos extranjeros o bien, en los últimos tiempos, el libro colectivo donde un conjunto variable (pero siempre bastante amplio) de profesores se repartían el trabajo de la redacción. En este último tipo de libros podría encontrarse un buen compendio de todo lo que puede abarcar una materia científica, pero difícilmente aparecería esa unidad de estilo y de criterio que distinguiría al libro de uno o muy pocos autores. En la edafología española (o de habla hispana) después de los libros de Albareda y Hoyos de Castro que cubrían las exigencias de aprendizaje de las pocas personas que en las décadas de los cincuenta y sesenta se interesaban por esta materia, así como los de Artigas Durán, en Uruguay y Nicolás Aguilera, en México, vino una larga época donde sólo algún texto menor de autor español o iberoamericano o, sobre todo, las traducciones de los libros de Duchaufour parecían satisfacer estas necesidades. Eran, estos últimos, textos de lectura cómoda y sugerente, como acostumbraban a desarrollar los autores franceses, y muy válidos para el conocimiento de las propiedades y procesos del suelo. Pero que cuando se trataban de aplicar a los factores de formación y, sobre todo, a las tipologías de los suelos de otros ámbitos geográficos, mostraban sus evidentes deficiencias.

Tuvo que ser la aparición en el año 1994 de la primera edición de la *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente* de Porta, López-Acevedo y Roquero la que nos permitió disponer de un libro «pensado en español» y de «autor» y, donde, con planteamientos de actualidad se ofrecía un texto donde se recogían, en amplitud y profundidad, los diferentes ámbitos de desarrollo y aplicación de la edafología. El éxito de este libro en España e Iberoamérica demostró, por una parte, la necesidad que se estaba sintiendo de este tipo de tratados y, por otra, de las cualidades intrínsecas que la publicación ofrecía. Las correspondientes reediciones (todas convenientemente revisadas y actualizadas) vinieron a demostrar la oportunidad y la calidad de estos textos. Después vino la *Agenda de Campo*, en el 2005, que trataba de completar todos aquellos detalles prácticos que se necesitaban para desarrollar adecuadamente los trabajos fuera del aula que precisa la edafología y que, obviamente, no podía ser tratados con la amplitud necesaria en los libros teóricos. Si a estos textos fundamentales se une aquel libro de *Técnicas y Experimentos en Edafología*, del año 1976 y otros trabajos de clara orientación didáctica y divulgativa, nos encontraremos con el resultado de una labor profesional donde la enseñanza de la edafología se convierte en uno de sus ejes fundamentales de trabajo. El otro, sin duda, como corresponde a todo profesor universitario, sería el de la investigación teórica y aplicada, donde Porta destacó, entre otros temas, como estudioso de los suelos españoles desarrollados sobre yeso. Pero, creo que me atrevería a decir, que fueron, sobre todo, los aspec-

tos relacionados con la enseñanza de la edafología los que se han convertido, en los últimos años, en el tema central de sus preocupaciones. A ellos dedicó lo mejor de su tiempo y, con sus libros, pasará, sin duda, a la historia de la edafología española.

Y en un paso más, en ese camino hacia el apoyo total de la docencia edafológica con publicaciones, aparece ahora esta *Introducción a la Edafología: uso y protección del suelo*. Un texto pensado para dar respuesta a las directrices del Sistema de Transferencia de Créditos Europeo (ECTS) que, como es bien sabido, se articula a partir de unas unidades docentes específicas: el «crédito europeo» o el «crédito ECTS». Sobre la base de este tipo de créditos y no sobre las titulaciones, es sobre los que se tratarán de organizar la convergencia de los diferentes sistemas de enseñanza superior en el espacio común universitario europeo, y por eso el autor quiso dejar muy claro, que este nuevo libro no es más de lo mismo, sino un enfoque totalmente nuevo, de temas ya tratados en los textos anteriores, inspirados por el espíritu de Bolonia y el nuevo concepto de crédito.

Estos créditos son unas unidades docentes complejas que agrupan tanto las actividades en el aula, como en el seminario, en el campo o el laboratorio y , lo que es la mayor novedad, en la labor personal, individualizada o en grupos, del alumno. Se podría hablar de estos créditos como de unidades espacio-temporales de docencia, porque utilizarían diferentes espacios (aula, despacho, laboratorio, biblioteca, casa, etc.) para dedicarles a cada uno de ellos un tipo de tiempo y una tarea específica hasta completar la totalidad de los créditos asignados.

Organizar con estos criterios una asignatura tan amplia en sus contenidos como la edafología supone un primer reto, a la hora de la selección de los temas a tratar. Los criterios del autor sobre lo que es esencial y nuclear de una materia ya quedan bien reflejados en esta primera etapa. Tarea difícil, pero que Porta y colaboradores realizaron sin complejos prescindiendo de lo que estimaban que no era estrictamente esencial. El paso siguiente sería el tratamiento que se le debe dar a cada unidad docente, pensando en cada uno de los diferentes tipos de espacio y tiempo en que se deben aplicar. Ningún recurso docente importante queda sin formular en este libro y la unidad docente se transforma, como el suelo, en un sistema abierto que debe sobrepasar, en alas de la iniciativa e imaginación de alumnos y profesor, los límites físicos que, obviamente, debe de tener un texto impreso.

El espíritu de renovación de la docencia universitaria que introduce Bolonia podría ser interpretado como un conjunto de normas (objetivos, planificaciones, desarrollos, evaluaciones , etc.) que deberían cumplirse de la forma más estricta posible y esta sería una de las lecturas posibles, aunque no la recomendable, de esta *Introducción a la Edafología*. Pero existiría también la posibilidad de que se utilice como un conjunto de sugerencias (bien organizadas y documentadas) para que el profesor pueda desarrollar a partir de ellas sus propios criterios y estilos de docencia. El profesor no es sólo un técnico docente que aplica a la letra las normas que dictan los pedagogos, sino que debería de tener también, mucho de artista, en el sentido de poder transmitir al alumno sus propias convicciones y formas de interpretación de la ciencia y la naturaleza. Y en este sentido el libro ofrece un amplio y variado material para que el profesor seleccione, matice e introduzca también, sus propias aportaciones. Creo que Porta y colaboradores, cuando concibieron y redactaron el libro estaban pensando, fundamentalmente, en esta forma de utilización de su *Introducción a la Edafología*. Después de todo, las universidades también tienen patria, y si existe un estilo «mediterráneo» de esta docencia, sería más en la línea de esos enfoques abiertos e imaginativos, donde el talante personal del profesor se mueve con libertad, más que en una visión demasiado cerrada y mecánica del trabajo en las aulas, el seminario, el laboratorio o el campo. Y creo que el alumno en sus momentos de soledad, que también debe de tener en su casa o en la biblioteca, frente al aprendizaje de teorías o la resolución de problemas, agradecería esa corriente de humanidad que también lo alcanzaría a él y lo haría partícipe de un proyecto ilusionante y colectivo.

Francisco Díaz-Fierros Vigueira

Catedrático de Edafología
Universidad de Santiago de Compostela

Prólogo	5
Introducción	9
Cómo utilizar este libro	11
1. Los suelos: enfoques, funciones del suelo y organizaciones edáficas	19
2. Porque son distintos los suelos: factores ecológicos de formación	33
A. <i>Información complementaria:</i> Minerales y rocas	57
3. Cómo se transforma una roca en suelo: meteorización de rocas y minerales y edafogénesis	67
B. <i>Información complementaria:</i> Horizontes del suelo	91
4. Estudio de suelos en el campo: morfología y descripción de suelos	101
5. Propiedades físicas y comportamiento del suelo	117
5.1. Composición granulométrica y textura	123
5.2. Color del suelo	131
5.3. Estructura del suelo	137
5.4. Densidad real, densidad aparente y porosidad	145
5.5. Consistencia, sellado, encostramiento y tixotropía	151
6. Componentes inorgánicos del suelo	159
7. Componentes orgánicos del suelo	177
8. Propiedades químicas y fisico-químicas y comportamiento del suelo	191
8.1. Reacciones de superficie: floculación y dispersión de arcillas	199
8.2. Reacciones de superficie: procesos de adsorción	206
8.3. Capacidad de intercambio catiónico	211
8.4. Adsorción e intercambio aniónico	221
8.5. Reacción del suelo	228
8.6. Salinidad, sodicidad y alcalinidad del suelo	239
8.7. Potencial de oxido-reducción	252
8.8. Contaminación de suelos	263
9. Ecología del suelo y ciclos de los elementos	271
10. Agua del suelo: contenido, potenciales y movimiento	285
11. Clasificación de suelos: sistemas de referencia mundial	307
11.1. <i>Soil Taxonomy</i>	312
11.2. Base de Referencia Mundial para Recursos de Suelos (WRB)	327
C. <i>Información complementaria:</i> Procesos formadores	333
12. Información de suelos: mapas de suelos, bases de datos georreferenciados y sistemas de información de suelos	343
13. Calidad del suelo, procesos de degradación y bases para su control	363
14. Estudio del suelo en el laboratorio: análisis químicos, mineralógicos y micromorfología de suelos ..	395
Claves	413
Bibliografía sucinta	441
Índice alfabético	443



INTRODUCCIÓN

Jaume Porta Casanellas

Este es un libro que llama al estudiantado a implicarse en su propia formación desde el primer día de clase. Para facilitarlo, combina contenidos teóricos, con numerosos ejercicios prácticos de tipología diversa. No cabe duda que allí donde se introduzca el *Sistema de Transferencia de Créditos Europeo* (ECTS) o allí donde se plantee una docencia más activa, ello implicará menos horas de clase en la modalidad de clase magistral. Por consiguiente, habrá que repensar el modelo de docencia, **innovar**, en el sentido de hacer planteamientos que permitan dar mejores respuestas a lo que se demanda de la Universidad actual: formar personas con capacidad para aplicar conocimientos, diseñar y realizar experimentos para generar nuevos conocimientos, trabajar en equipos multidisciplinares, saber comunicarse, ser capaces de tomar decisiones, tener un espíritu crítico y estar preparadas para asumir responsabilidades profesionales y éticas. Todo ello va más allá de una mera asignatura, es labor de toda la Universidad o de un Centro en concreto. En tal sentido, con la voluntad de afrontarlo, algunas universidades han planteado la integración de diversas asignaturas y profesores en una enseñanza por proyectos orientados a la resolución de problemas, como en la Universidad de Aalborg en Dinamarca.

El modelo que propone este libro supone replantear la **forma de trabajar los contenidos**, dando mucha mayor entrada a la participación del estudiantado en las clases y en su formación. Para ello se fragmenta el desarrollo de los contenidos teóricos con distintas **piezas de actividad**. No obstante, no se trata de un libro de autoaprendizaje, sino de un libro con voluntad de servir de base a la actividad docente prevista por el profesorado en cada universidad, que tendrá su propio estilo, sus propias convicciones e interpretaciones de la Ciencia del suelo. Por consiguiente, la labor de cada docente resultará fundamental para orientar el proceso, trabajar contenidos y tutorar a los estudiantes en su educación, ya sea en el marco del *Espacio Europeo de Educación Superior*, o en otros. Para facilitar esta labor se plantea este libro.

Las asignaturas con muchas horas de clase se reducen día a día, plan de estudios tras plan de estudios. Ello obliga a trabajar los contenidos de otro modo, para no dejar de lado aspectos y contenidos básicos. Quizás se requiera asociar actividades de diversas asignaturas o repensar las clases, tutorías y seminarios, generalizando el uso de Internet para relacionarse de forma más directa e inmediata con cada estudiante y poder, de este modo, disponer de más tiempo para otras actividades educativas. Allí donde se introduzca el *Sistema de Transferencia de Créditos Europeo* se está proponiendo pasar de créditos que medían las horas de actividad del profesor en clase (1 crédito igual a 10 horas de clase), a un modelo que toma como referente el trabajo de los estudiantes, globalmente considerado.

En este libro sólo se desarrollan catorce **Unidades** que se han considerado básicas, se incorpora **Información Complementaria**, para aquel estudiantado que pueda requerirla, y numerosos ejercicios y casos prácticos. Las Unidades ofrecen una gran diversidad de modelos de **piezas de actividad**, entre los que cada docente podrá encontrar dónde seleccionar, introduciendo material docente propio, según su criterio y según dónde imparta su docencia.

Al acabar sus estudios, los futuros profesionales deben estar preparados para saber buscar información, analizarla, entenderla, gestionarla, ordenarla, jerarquizarla, sintetizarla, así como saber extraer de ella conocimientos para la toma de decisiones en el ámbito en el que desarrollen su actividad profesional. Con estos objetivos, y teniendo en cuenta que **no todos los estudiantes aprenden al mismo ritmo**, ni necesitan la misma información para ello, se ha estructurado este libro. Para reforzar o ampliar los conocimientos teóricos se propone trabajar, tanto **individualmente**, como en **equipo**, ya sea en clase, en la biblioteca con bibliografía y con Internet y en el campo. Los contenidos teóricos se segmentan voluntariamente, de forma que los estudiantes los trabajen y puedan hacer sus propias aportaciones, en un modelo de educación centrada en el aprendizaje. La actitud del estudiantado en el aula se quiere mucho más activa, lo que deberá incidir en el dimensionado de los grupos.

Para adaptarse a múltiples situaciones, el libro presenta más **piezas de actividad** de las que se requieren para un curso de un cuatrimestre. Será el criterio de cada docente el que llevará a un dimensionado realista, de manera que el estudiantado pueda alcanzar los objetivos en el tiempo previsto, de acuerdo los créditos asignados en el plan de estudios, con el modelo de ECTS u otro.

En cualquier proceso educativo, el **sistema de evaluación** condiciona todo el aprendizaje. Por ello, y más en una materia como la Edafología, en la que en cada clase se introduce una gran cantidad de terminología nueva para el estudiantado, debería considerarse la conveniencia de una evaluación continuada a lo largo del cuatrimestre. Ésta se integraría con la evaluación del conjunto de actividades que vaya realizando el estudiantado a lo largo del curso. Con ello se marcará el ritmo de trabajo, se evitarán las desconexiones y cada profesor podrá enfatizar más aquellos aspectos que quiera subrayar en el proceso educativo.

Jaume Porta Casanellas

Lleida, 2008

CÓMO UTILIZAR ESTE LIBRO

Jaume Porta Casanellas

1. AL ESTUDIANTADO

ALGO PARA LEER ANTES DE EMPEZAR, NO TE LO SALTES

En el marco europeo, Bolonia, ¿qué es? Una ciudad de Italia, un sitio arqueológico romano en el Sur de España... sí, pero algo más. Con la Declaración de Bolonia (1999) se han sentado las bases para crear el **Espacio Europeo de Educación Superior** que va a permitir que un título universitario tenga un reconocimiento en otros países de la Unión Europea, sin necesidad de que se tenga que recurrir a convalidaciones siempre farragosas, como ocurría hasta ahora y que resulte fácil conocer a qué corresponden los estudios realizados en un país concreto. Con ello la movilidad profesional será mucho más amplia.

Por otro lado, se plantea un modelo en el que la educación debe permitir alcanzar unos conocimientos y unas habilidades a las que se prestaba menos atención hasta ahora: disponer de herramientas de comprensión (*aprender a conocer*), conocer idiomas comunitarios, saber utilizar las tecnologías de la información y documentación (TIC), saber buscar, gestionar, organizar y sintetizar información (*aprender a hacer*), aprender a trabajar en equipo y comunicar en público (*aprender a vivir juntos*), con el objetivo de *aprender a ser*. Todo ello para dar mejores respuestas a las necesidades de la sociedad.

Ello conlleva innovar en docencia, invitándote a responsabilizarte de tu propia formación desde el primer día, implicándote en el Curso desde el inicio del cuatrimestre.

Las Universidades no pretenden ser uniformes, sino tener un sistema homologado con criterios de calidad, y para ello se ha introducido en la Unión Europea el Sistema de Transferencia de Créditos Europeo (ECTS), que no toma ya como unidad de medida las horas de clase del profesorado, como hasta ahora. El crédito ECTS se refiere a tus horas de dedicación para alcanzar los objetivos educativos que se te proponen.

Deberás ir mentalizándote que con «Bolonia» se pasa ya definitivamente, de un modelo muy centrado en la *clase magistral*, así se denomina la clase en la que el profesorado es el protagonista, a un modelo en el que se ve el aula como un lugar a donde se va a aprender, con una actitud mucho más participativa, tanto en clase como fuera de ella. Ello requiere incuestionablemente un cambio de actitud. Esta es la andadura que se te propone.

ESTE LIBRO ES UNA INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DEL SUELO

El libro se plantea como complemento a las actividades académicas previstas por tu profesorado para el Curso de Edafología. Está organizado con partes dedicadas a *contenidos teóricos*, segmentados por *piezas de actividad*, para estimular tu implicación. El planteamiento educativo que se hace va más allá de aprender Edafología, buscando que aprendas habilidades que te serán útiles en tu actividad profesional. Al preparar el conjunto de actividades no se ha olvidado que aprender es más efectivo cuando es divertido, por ello hay palabras cruzadas, crucigramas y juegos de rol. En el texto se va indicando una breve bibliografía, adecuada para ampliar conceptos en cada Unidad. Como instrumento de consulta cabe citar el libro *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente* (3.^a edición) de Ediciones Mundi-Prensa, 2003 y la *Agenda de Campo de Suelo* de Ediciones Mundi-Prensa, 2005; así como el sitio web accesible por Internet: www.icc.cat/mapasols accesible en español, catalán e inglés, que contiene numerosos enlaces y documentos de interés.

INTENSIDAD DE TRABAJO: ACTIVIDAD A DESARROLLAR

De acuerdo con el número de créditos ECTS asignados a esta materia en el plan de estudios, deberás dedicar entre 2 a 3 **horas de calidad** fuera de clase por cada hora de clase, de manera que puedas alcanzar satisfactoriamente los objetivos propuestos para el cuatrimestre.

CLAVES PARA ORIENTAR EN LA REALIZACIÓN DE LOS EJERCICIOS

El libro se ha planteado para combinar los aspectos teóricos con un entrenamiento mediante diferentes tipos de ejercicios. Al final del libro hay una **Clave para orientar** a los desorientados. **Primero habrá que intentar abordar la realización de cada ejercicio sin recurrir a la Clave**, por integridad intelectual. Este trabajo se realizará a partir de lo aprendido en las explicaciones de clase, con la consulta de la Unidad correspondiente y de la bibliografía y por medio de Internet. Un entrenamiento va ligado siempre a un esfuerzo personal en todos los ámbitos.

La Clave constituye, pues, un último recurso para cuando no se sepa como plantear un tema a resolver. Por ello **no se trata de una clave de soluciones**, sino de un **conjunto de sugerencias** a trabajar y ampliar.

ALGUNOS ASPECTOS A NO OLVIDAR

Integridad académica

Al tener que elaborar un informe, si se toma información de un libro, revista, Internet o de un curso anterior, si se transcribe o resume de forma directa, sin una reelaboración propia, que implique expresarlo con palabras propias, incluyendo conocimientos propios, se deberá diferenciar el texto, dejando clara la cita o entrecomillando la parte transcrita, y citar adecuadamente la fuente de donde procede la información, lo que se refleja tanto en el texto como en la bibliografía al final del trabajo.

Bajo ningún concepto se deberá consultar a otra persona durante las evaluaciones y exámenes, ni se deberá consultar ningún tipo de material, a no ser que esté previsto que así se haga.

Cuando una cosa salga mal, tener integridad intelectual significa saber reconocer que se ha hecho mal, lo que se valora más, que lo contrario.

Trabajo en equipo

El aprender a trabajar en equipo tiene como objetivo estimular la discusión de conceptos, ideas y puntos de vista con otros estudiantes. Supone compartir información buscada en la biblioteca o por Internet, analizarla conjuntamente, aportar los propios conocimientos para resolver problemas, redactar informes conjuntamente o preparar presentaciones de trabajos, de manera que se creen sinergias, que enriquecerán a todos los miembros del equipo.

Cada equipo deberá saber organizarse, repartiendo (*saber delegar*) de forma equitativa los roles y la parte del trabajo a realizar por cada uno (*interdependencia positiva*, todos los miembros son necesarios). Deben realizarse reuniones presenciales durante la realización de un trabajo (para que haya *interacción*), de las que uno de los miembros redactará el acta de acuerdos (*dejar constancia* de los compromisos). En el momento de la exposición de un trabajo realizado en equipo, cualquier miembro escogido al azar por el profesorado, puede ser requerido para ser la persona que exponga el trabajo (*exigibilidad individual*), si bien los otros miembros pueden dar detalles más precisos de algún aspecto realizado por él.

Los equipos de trabajo deben ser heterogéneos y, a criterio del profesorado, pueden ser *grupos semiestables*, renovándose dos o tres veces a lo largo del cuatrimestre, o bien ser *grupos mezcla*, de manera que al final del cuatrimestre cada estudiante haya tenido ocasión de trabajar con casi todos los restantes componentes de la clase.

El profesorado en clase orientará acerca de cómo resolver conflictos cuando se trabaja en equipo. Puede resultar de interés transcribir algunos comentarios de Oakley *et al.* (2004) en su trabajo *Cómo enfrentarse a los jetas y a las pasotas, cuando se trabaja en equipo*.

Estos autores afirman que cuando alguien de un equipo no cumpla, el *jeta*, no hay que tragar con el problema, ni hacer el trabajo por él. Por ello debe haberse dejado muy claro desde el principio la forma en que trabajará el equipo, reflejándolo en el acta de acuerdos de la correspondiente reunión, de manera que se disponga de un documento al que referirse. En posibles discusiones posteriores con el *jeta*, deberá mantenerse firme la posición. Hay que demostrarle que no estamos dispuestos a hacer el trabajo por él. Los *síntomas jeta* son fáciles de detectar: el *jeta* no asiste a las reuniones o no encuentra nunca el momento para que puedan tener lugar, llega tarde y tiene prisa por marcharse, con excusas inconsistentes, y no entrega su parte, o bien lo que entrega es de mala calidad y lo hace fuera de los plazos acordados. Desde el primer síntoma, debe decirsele que encuentre tiempo o que hable con el profesor para exponerle su caso; y dejarle claro que, si no hace su parte o si su contribución es deficiente, no se incluirá en el trabajo, ni su nombre figurará en el trabajo a entregar. Hay que mantener firme la posición. En la Universidad, por un compañerismo mal entendido, se suele tragar, pero es un mal precedente para la actividad profesional.

En la vida profesional tendrás que saber colaborar en trabajos en equipo, siendo importante saber hacerlo, por su efecto multiplicador. **Saber delegar** en otras personas trabajos concretos, no es una cosa que todo el mundo sabe hacer. Encontrarás tanto *pasotas* (relativamente benignos, y que suelen entender mejor los límites a no superar y las reglas de trabajo en equipo establecidas), como *jetas* (que pueden hacerte daño, si entregas trabajos con partes deficientes o fuera de plazo, por ejemplo). Por esto es importante no dejarse manipular ahora, ni hacer el trabajo de los otros. Tu comportamiento firme es importante para que el *jeta* y el *pasota*, como mínimo, reflexionen y no vayan así por la vida, por lo menos contigo. Estas son las opiniones de Oakley y su equipo.

Entrega de los trabajos dentro del plazo

Las fechas de entrega son para ser cumplidas. La fecha límite para presentar la documentación para participar en una determinada convocatoria pública o para la entrega de un trabajo es siempre importante en la vida profesional, a veces presentar algo fuera de plazo puede hacer que seamos excluidos de un concurso, perdiendo oportunidades o teniendo que asumir responsabilidades frente al equipo, la institución o la empresa en la que trabajas. Por ello es importante acostumbrarse a cumplir las fechas límite. Por algo será que el término inglés es *deadline*. Las excepciones en el Curso deberán tratarse con el profesorado-tutor, previamente a la *deadline*.

Asistencia a las actividades académicas

Dado el planteamiento, basado en tu implicación en el curso y en que las horas de clase magistral habrán disminuido, se invita a la participación en las distintas actividades formativas: clases, actividades fuera de clase, laboratorio, campo, entre otras. Por consiguiente, resulta importante estar presente y dedicarse al estudio. Las excepciones deben plantearse con el profesorado-tutor, con quien siempre será posible encontrar alguna solución a causas justificadas.

Recursos educativos e informáticos

A principio del cuatrimestre el profesorado especifica las facilidades que te ofrece la universidad en laboratorios, biblioteca, acceso a Internet, entre otras y las condiciones de acceso.

UNA COSA QUE NUNCA SE HACE: PREPARAR UNA CLASE ANTES DE QUE TENGA LUGAR, QUIZÁS VALGA LA PENA

Por lo general, ningún estudiante tiene tiempo para preparar una clase antes de asistir a ella, a pesar de lo útil que te podría resultar. Es como si antes de emprender un viaje uno se documenta acerca de los sitios que va a visitar.

Por **si tienes este tiempo** o te propones buscarlo, se sugiere el siguiente orden de prioridades:

- Leer los objetivos y el esquema de la Unidad.
- Intentar realizar el último ejercicio de la Unidad con lo que verás qué términos nuevos se van a introducir y comprobarás cuántos de ellos serías capaz de definir en este momento. Anota aquello que te llame más la atención.
- Si todavía te queda tiempo, lee contenidos de la Unidad y subraya las palabras clave que vayas identificando.

No hay duda que si lo haces, las explicaciones en clase serán más provechosas y cuando el profesor diga: ¿alguien quiere alguna aclaración?, seguramente te atreverás a pedir que te aclare alguna de tus dudas.

2. AL PROFESORADO

SUGERENCIAS PARA DAR MÁS ÉNFASIS AL APRENDIZAJE

☞ PROPUESTA para estimular a profundizar, motivar e implicar al estudiantado

El objetivo es hacer que el estudiantado, en clase y fuera de ella, se implique en *aprender desde el primer día*, intentando conseguir que los estudiantes estén en una posición activa. En tal sentido, el libro propone una metodología y modelos de material docente, intercambiable con el del profesorado, para llevar a cabo diversos tipos de actividades. El libro está estructurado en catorce **Unidades**, cada una de las cuales se compone de un conjunto de **piezas de actividad** de distintos tipos a modo de *puzzle*. En el texto se diferencian por un código de colores:

- Pieza tipo 1: **Objetivos de la Unidad**.
Al inicio de cada Unidad se exponen los objetivos que se proponen alcanzar.
- Pieza tipo 2: **Esquema de la Unidad**
Qué van a aprender los estudiantes y como está estructurada la Unidad.

Con la finalidad de afianzar el aprendizaje se plantean a lo largo del texto un conjunto de actividades que deben permitir fomentar el trabajo en equipo y la discusión entre el estudiantado, ya sea en clase (actividades **G2** y **GM**) o fuera de ella (actividades **E3**), así como el estudio individual (actividades **CA** y **A1**). Evidentemente, cada profesor las utilizará o las sustituirá por material elaborado por él, según sus propios criterios. El desarrollo de distintas clases de actividades y preguntas se ha intentado estructurar según la jerarquía de niveles de pensamiento establecida por Benjamin Bloom: conocimiento, comprensión, aplicación, análisis, evaluación y síntesis, a ejercitar por el estudiantado a lo largo del curso.

- Pieza tipo CA: **Conexiones de aprendizaje**. Actividad a realizar individualmente.
Conectar con lo aprendido previamente constituye un prerrequisito esencial para mejorar y acelerar el aprendizaje, ya que permite construir a partir de ahí e integrar nueva información.

Este tipo de ejercicios permiten verificar que se ha entendido lo previamente explicado, no necesariamente en la Unidad inmediatamente anterior. Son piezas que se proponen al principio de cada Unidad, para que sean trabajadas de forma individual fuera de clase, al ritmo que cada estudiante necesite y utilizando la información que requiera para revisar conceptos aprendidos en unidades anteriores y que se van a utilizar en la Unidad que se va a empezar a trabajar. Consisten en seleccionar de entre cuatro términos propuestos, aquel que mejor encaje en el contexto

Se sugiere que sea una actividad que se proponga al estudiantado para que la realice y pueda ser corregida en clase, previamente a iniciar cada Unidad. Con ello toda la clase pondrá al día sus conocimientos y podrá seguir mejor las explicaciones que vayan a seguir. Se puede complementar la actividad con estrategias de revisión participativa: hacer describir tres aspectos que cada alumno considere importantes de la Unidad anterior y comentarlas en clase, o bien las cuestiones más útiles o a seleccionar con cualquier otro criterio y hacer una puesta en común.

- Pieza tipo CT: **Contenidos teóricos**. Actividad en clase.
Los contenidos teóricos expuestos en clase constituyen sólo una parte de la enseñanza, en el enfoque ECTS.

Seguramente, el enfoque ECTS llevará a cambiar el esquema actual de clases, por un **modelo de clases – tutoría**, que integre ambas actividades, para poder llevar a cabo con más tiempo ambas cosas.

No obstante, ya desde ahora habrá que irse mentalizando en que los contenidos expuestos en clase deberán aligerarse, de manera que en el tiempo disponible de clase sea posible:

- Explicar los contenidos.
- Trabajar *piezas de actividad* en grupos, actividad que el profesorado suele comentar para toda la clase inmediatamente después de realizadas.
- Dejar tiempo a los estudiantes para que puedan organizarse para realizar *piezas de actividad* en equipo (**E3**), puedan repartirse las tareas a realizar, y dispongan de un momento de coincidencia para integrar las distintas partes realizadas por cada miembro del equipo.

Ello requiere un dimensionado realista, alcanzable por el estudiantado en el tiempo disponible. Una disminución de programa siempre ha creado dificultades a muchos docentes. No obstante, no debería olvidarse que lo

importante no es tanto el volumen de materia impartida, como la forma de trabajar los contenidos y, en definitiva, la cantidad de materia apprehendida. Suficiente materia, trabajada con profundidad.

En el libro se han seleccionado catorce **Unidades**, seguramente algunas de ellas suprimibles, para trabajar y profundizar más otras. Los **contenidos** en el texto constituyen una **guía básica**, que cada docente adaptará a su forma personal de enfocar la asignatura.

Una bibliografía básica de referencia permite evitar que el estudiantado se vea obligado a tomar demasiadas notas en clase. No obstante, está comprobado que tomar notas, en especial la estructura de lo que se está explicando, contribuye muy positivamente al aprendizaje.

- **Actividades de posible realización en clase.**

Fomentar habilidades de pensamiento y discusión acerca de lo que se está explicando.

- Pieza tipo **G2**: en grupos de dos estudiantes.
- Pieza tipo **GM**: en grupos múltiples.

En las piezas **G2** se proponen cuestiones cortas, para ser trabajadas en grupos de dos estudiantes en un primer momento y, posteriormente, realizar una discusión con el conjunto de la clase, debiendo procurar que intervengan todos los estudiantes en ella. Se puede proponer que se realicen algunos ejercicios de forma voluntaria fuera de clase, actividad que harán los de mayor iniciativa, los más interesados. La corrección en clase puede llegar al resto menos participativo.

Las piezas **GM** se proponen para grupos de un mayor número de estudiantes, se trata de juegos de rol u otro tipo de debates a realizar en el aula, previa una preparación fuera de ella.

- **Actividades a realizar fuera de clase**

- Piezas tipo **A1**, para realizar de forma individual.
- Piezas tipo **E3**, para realizar en equipos de tres estudiantes.
- Estudios de casos, que figuran al final de las Unidades, a trabajar a partir de mediado el curso.
- Piezas para trabajar los contenidos teóricos expuestos en clase (**CC**).

No se olvida que aprender es más efectivo cuando es divertido o cuando se estudia un problema real. Se proponen y se dejan abiertas actividades que induzcan al estudiantado a aplicar los conocimientos aprendidos, para verificar si realmente se han entendido. Se pretende que el estudiantado adquiera habilidades para buscar, analizar, organizar, utilizar y sintetizar información en condiciones reales, aprenda a analizar problemas reales, a proponer soluciones y a tomar decisiones. Igualmente, debe aprender a exponer en público. El trabajo en equipo enseña a marcarse objetivos, distribuir el trabajo, a aceptar responsabilidades, a cumplir plazos, a respetar las opiniones de los demás, a aceptar críticas y a desarrollar el espíritu crítico, así como a resolver conflictos dentro de un equipo.

Las actividades propuestas son de diversas modalidades, ya que no todos los estudiantes tienen el mismo estilo de aprendizaje, ni adquieren conocimientos del mismo modo, ni a partir de la misma información.

Los resultados de este tipo de *piezas de actividad* pueden reflejarse en informes que el estudiantado debería ir entregando a lo largo del cuatrimestre, en las fechas previamente fijadas, con exposiciones en público o no.

Para que las actividades logren sus objetivos deben estar basadas en un **esquema actividad–respuesta**. El estudiantado debe recibir una respuesta, ya sea en forma de corrección individualizada, presencial o por correo electrónico, o bien realizada con el conjunto de la clase. El ritmo debe ser tal que la respuesta se produzca dentro de un plazo prudencial y siempre antes del encargo de una nueva actividad, ya que es importante que los estudiantes puedan comprobar de forma muy inmediata el resultado de su trabajo.

Según la materia de que se trate, los informes realizados en equipo pueden hacerse **exponer en público**, cada vez por un determinado número de equipos, de manera que todos ellos hayan tenido ocasión de hacer más de una presentación a lo largo del cuatrimestre. La simulación de situaciones reales, realizando presentaciones en soporte electrónico, con asistencia de los demás estudiantes a modo de público con posibilidad de intervenir, puede despertar interés y a veces expectación según el tema propuesto.

Se incluyen tres bloques de **Información Complementaria**, en previsión que en el curso no habrá tiempo para explicarlos. Puede resultar útil tenerlos a mano, éstos, y aquellos que el profesorado haya detectado de interés según la formación previa del estudiantado.

- Pieza tipo **CC: Actividades para trabajar los contenidos teóricos.**

Esta actividad a realizar individualmente tiene por objetivo contribuir a fijar conocimientos y verificar la comprensión de lo expuesto en clase, con diversos niveles de abstracción. Se destacan las cosas más importantes y se verifica su comprensión, lo que debe inducir al estudio individual a un ritmo distinto para cada estudiante, enfrentándose con las dificultades, creando hábitos de esfuerzo y trabajo intelectual.

Se utilizan diversas modalidades, una consiste en ir seleccionando de entre cuatro términos, aquel que mejor encaje en un texto propuesto; otra, en identificar las palabras clave que se han introducido a lo largo de la Unidad y, finalmente, se propone al estudiante que se proponga un nombre distinto para la Unidad estudiada, que refleje igualmente su contenido.

Sugerencias para el primer día de clase: expresar expectativas acerca del curso a comenzar

Al empezar las clases, en grupos de seis o siete estudiantes, se puede proponer a los miembros de cada grupo que expresen sus expectativas y preocupaciones acerca del curso a iniciar (en un tiempo de unos 10 minutos). Uno miembro de cada grupo actúa de relator y va anotando las aportaciones de cada miembro. Al acabar, se puede hacer una puesta en común, en la que cada relator exponga lo anotado y otro alumno haga de relator general, anotando las distintas aportaciones, que se leerán en clase y se pueden distribuir posteriormente a todos.

Sugerencias para la formación de equipos de trabajo

Se suele sugerir que resulta conveniente que los equipos sean **heterogéneos** y que, a criterio del profesorado, pueden ser *grupos semiestables*, renovándose dos o tres veces a lo largo del cuatrimestre, o bien ser *grupos mezcla*, de manera que al final del cuatrimestre cada estudiante haya trabajado con casi todos los restantes componentes de la clase.

Un procedimiento para comenzar la integración de la clase consiste en conocerse mutuamente. Para ello se puede proponer que cada estudiante durante unos cinco minutos entreviste a la persona que tiene a su lado y anote sus datos en una hoja de papel. Una vez realizado esto, cada miembro de la clase hace la presentación de la persona entrevistada, nadie hará su propia presentación. Cada persona verificará la presentación y, una vez acabadas las presentaciones, puede comentar la presentación realizada, si lo cree oportuno. El profesorado puede recuperar las hojas de papel y con ello podrá establecer criterios para la formación de los equipos de trabajo, para que sean verdaderamente heterogéneos.

SUGERENCIAS PARA LA EVALUACIÓN

No hay duda que el procedimiento de evaluación condiciona todo proceso de aprendizaje. Al diversificar las actividades docentes y fomentar la participación e implicación del estudiantado, las evaluaciones deberían ir más allá de verificar si se han adquirido unos conocimientos determinados, por importantes que éstos sean. Habría que valorar globalmente el trabajo que va haciendo cada estudiante a lo largo del cuatrimestre y verificar el grado de formación que va adquiriendo en conocimientos, en su comprensión y aplicación, análisis y síntesis de información y en criterios para la toma de decisiones. Resulta importante que los estudiantes puedan comprobar de forma muy inmediata el resultado de su trabajo con las evaluaciones que vaya habiendo. La corrección supone un estímulo inmediato, así como el entender los componentes de una nota.

A modo de ejemplo, se proponen criterios y pesos que pueden tenerse en cuenta en una evaluación integradora. Se comparan dos sistemas de calificación el clásico en España, con el sistema basado en la graduación.

Criterios posibles

Actividades a puntuar	Puntos
1. Actividad CA: conexiones de aprendizaje	25
2. Actividades E3 realizadas fuera de clase: Informes a realizar en equipo de tres personas, a entregar a lo largo del cuatrimestre. Se tomarán en consideración las (n-2) mejores puntuaciones de entre los n informes a entregar, siendo obligatorio entregarlos todos.	75
3 Actividades G2 realizadas en clase, en el caso en que se entreguen y se corrijan. Se tomarán en consideración las (n-2) mejores puntuaciones de entre las n actividades a entregar.	10
4. Evaluación continuada a lo largo del cuatrimestre. Se tomarán en consideración las (n-2) mejores puntuaciones de entre las n evaluaciones realizadas, siendo obligatorio participar en todas.	150
5. Actividades de laboratorio. Se tomarán en consideración las (n-2) mejores puntuaciones de entre los n informes de las prácticas realizadas, siendo obligatorio realizarlas todas.	60
6. Actividades en campo con tutor. Salida al campo, en la modalidad que se establezca. Entrega de un informe individual.	30
7. Actividad de corta duración alrededor de preguntas motrices, estudio de casos, estudio de suelos en el campo u otros. En equipos de tres. Entrega de un informe. Se les asignará el peso que considere adecuado. Puede ser una actividad opcional puntuable.	
8. Otras actividades, según el planteamiento docente de cada departamento. Se les asignará el peso que considere adecuado y se puntuarán.	
9. Examen final. Puede que no se plantee su realización, según los casos.	75
PUNTUACIÓN TOTAL	425

Puntuación en un sistema basado en una gradación y nota según el sistema español

Sistema basado en una gradación			Nota según el sistema español
GRADO	%	PUNTOS	
A	≥ 93	≥395	SOBRESALIENTE
A –	90-92	382-394	
B +	87-89	370-381	
B	83-86	353-369	
B –	80-82	340- 352	
C +	77-79	327-339	
C	73-76	310-326	
D	70-72	297-309	
F	< 70	< 297	SUSPENSO

AGRADECIMIENTOS

Este libro tiene tras de sí unos cuantos años de actividad docente e investigadora y unos años de ensayos de una propuesta con los estudiantes, lo que ha permitido hacer un cierto rodaje. Agradecemos las interacciones y sugerencias recibidas. El texto original, escrito y reescrito como es costumbre, ha sido sometido a revisión de especialistas de distintos ámbitos de Ciencia del Suelo. Queremos dejar constancia de nuestro agradecimiento a Gonzalo Almendros, J. Carles Balasch, Jaume Boixadera, Ángela Bosch, Francisco Díaz-Fierros, José Manuel Hernández Moreno, Luis Hernández (NRCS-USDA), Pavel Vladimirovich Krasilnikov (UNAM), José A. Martínez-Casasnovas, M. Carmen Rodríguez, Peter Schad (Universidad Técnica de Múnchen) y a Josep M. Villar cuyas sugerencias han permitido mejorar el texto, si bien como autores asumimos la responsabilidad de las posibles imprecisiones que puedan haberse escapado. También nuestro agradecimiento a las personas que han cedido material gráfico para ser reproducido, entre ellas los profesores: Carlos Roquero, José Aguilar, Carlos Dorronsoro, Juan Sánchez, G. Stoops, G. Eswaran, E.A. FitzPatrick, G. Spósito, J. Herrero, Bigham, así como al National Resource Conservation Service (USDA), a la American Society of Soil Science, al CSIRO (Australia). Igualmente a Xavier Goñi del Servei de Reproducció d'Imatge de la UdL. Por último manifestar el interés en recibir cualquier sugerencia y comentario (jporta@macs.udl.cat) que permita mejorar la obra. También agradecemos al personal de Artes Gráficas Cuesta y a Maribel Hernández e Isabel Hernández, de Ediciones Mundi-Prensa, por la cuidada edición.

CONEXIONES DE APRENDIZAJE

El estudio del suelo está relacionado con temas de ciencias naturales estudiados en secundaria, en especial los referentes a minerales, rocas y su meteorización, los dedicados a la geomorfología, al estudio del ciclo del agua, así como los de medio ambiente, bosques y agricultura.

OBJETIVOS

Al finalizar el estudio de este tema se debe ser capaz de:

Entender el concepto de suelo desde diferentes perspectivas.

Saber cuáles son los factores ecológicos de formación del suelo, lo que permite introducir la idea de la variabilidad de los suelos.

Comprender la multifuncionalidad de los suelos

Conocer la diversidad de las organizaciones edáficas, escalas de observación y algunos enfoques metodológicos para cada escala.

Introducir la Edafología como ciencia que estudia los suelos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

El suelo como ente natural: enfoques conceptuales

El suelo desde una perspectiva ecológica y agroforestal.

El suelo desde la perspectiva de su formación.

El suelo como elemento multifuncional de un ecosistema.

Concepto de territorio o de tierras (ing. *land*)

Organizaciones edáficas: escalas de observación y enfoques metodológicos en el estudio de los suelos.

Edafología o Ciencia del Suelo.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, Marta y Roquero, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, 3.^a edición. Ediciones Mundi-Prensa, cap. 1. Madrid, 2003.

En Internet: [www.iec.cat/mapasols/Documentos de interés/Enlaces de interés](http://www.iec.cat/mapasols/Documentos%20de%20inter%C3%A9s/Enlaces%20de%20inter%C3%A9s)

1. EL SUELO COMO ENTE NATURAL: ENFOQUES CONCEPTUALES

1.1. El suelo desde una perspectiva ecológica y agroforestal

Los suelos constituyen una cubierta delgada en la superficie terrestre, de unos pocos centímetros a varios metros. Como cuerpo natural, el suelo constituye una **interfase** que permite intercambios entre la litosfera, la biosfera y la atmósfera.

Los suelos permiten el enraizamiento de las plantas (anclaje), con lo que éstas pueden obtener agua, oxígeno y nutrientes. Gracias al suelo y a la radiación solar, las plantas, por medio de la fotosíntesis, producen alimentos, forrajes, fibras, masas forestales y energías renovables. Los suelos son la base de todos los ecosistemas terrestres, por lo que hacen posible la vida en el planeta.

A efectos de clasificación, el límite inferior del suelo se establece de forma arbitraria en dos metros (NRCS, 2006), a pesar de que en zonas tropicales cálidas y húmedas los suelos pueden tener un espesor considerablemente mayor. Por otro lado hay que tener en cuenta que muchas de las funciones en las que interviene el suelo, especialmente las relacionadas con el régimen hídrico y la transferencia de fluidos, afectan a un espesor considerablemente mayor.

1.2. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Al estudiar en el campo el suelo de una plantación de avellanos (*Corylus avellana*) en ladera y el de una pradera se han tomado las siguientes imágenes. Establezca un mínimo de cuatro diferencias.



J. Porta



J. Porta

1.3. El suelo desde la perspectiva de su formación

Los suelos son unidades funcionales resultantes de la acción combinada de diversos **factores ecológicos de formación** o factores formadores, que varían de un lugar a otro:

- **Roca**, material originario o material parental a partir del cual se forma el suelo.
- **Clima**: aporta agua y energía al material originario.

- **Organismos vivos:** actúan sobre la roca o material originario contribuyendo a su disgregación y mezcla.
- **Geomorfología:** posición que ocupa el suelo en el relieve (sitio).
- **Tiempo:** la acción de los distintos factores se prolonga a lo largo de cientos o miles de años.

En muchos lugares habrá que añadir las acciones antrópicas, lo que ha llevado a introducir el concepto de suelos antrópicos (Anthrosol^{WRB}) y de suelos tecnogénicos (Technosol^{WRB}).

El suelo no es un medio inerte ni estático, sino que se desarrolla a lo largo del tiempo bajo la influencia de los factores ecológicos de formación. Las múltiples formas de combinarse estos factores hacen que los suelos presenten una gran **variabilidad espacio-temporal**.

El tiempo necesario para la formación de un suelo es suficientemente largo como para tener que considerar que el suelo es un **recurso natural no renovable** a escala humana. De ahí la importancia de proteger los suelos frente a su posible degradación, como ha venido a reconocer la Directiva del Parlamento y Consejo de Europa (2006).



Fuerteventura, Islas Canarias, España.

J. Porta

Primeros colonizadores de una roca: los líquenes (asociación de un alga y un hongo, en este caso Dimelaena radiata sobre andesita) y los musgos inician la formación de un suelo.

1.4. El suelo como elemento multifuncional de un ecosistema

Los suelos son cuerpos naturales, dinámicos, vivos, que **desempeñan múltiples funciones** y papeles clave en los ecosistemas terrestres, por lo que son un componente crítico de la biosfera. Entre las principales funciones de los suelos cabe destacar las siguientes:

- Producción de biomasa: alimentos, forrajes, fibras, biocombustibles, masas forestales.
- Mantenimiento y mejora de la calidad de las aguas que lo atraviesan: filtrado, intercambios iónicos, almacenamiento y posible transferencia a otro compartimento ambiental.
- Regulación del ciclo hidrológico: almacenamiento y transferencia de agua.
- Transformación de las sustancias que reciba.
- Fijación de gases de efecto invernadero: secuestro de carbono.
- Regulación del microclima, al absorber la radiación solar e intervenir en la evaporación.
- Hábitat biológico y reserva genética al ser un medio poroso, por lo que supone una reserva de biodiversidad.
- Soporte físico de actividades humanas: viviendas, industrias, infraestructuras lineales, conducciones enterradas, etc.

- Fuente de materias primas: arcilla, grava, arena, yeso, caliza, turba, aluminio, hierro, etc.
- Mantenimiento del paisaje.
- Protección de restos arqueológicos: registro de actividades humanas del pasado.
- Fuente de información geológica y geomorfológica.

Debido a la **variabilidad espacial**, las funciones que potencialmente pueden desempeñar los suelos serán distintas de unos a otros. Por consiguiente, para diseñar con una base científica políticas de ordenación y gestión territorial, así como políticas agrarias y medioambientales se requiere conocer qué suelos hay en un determinado lugar, qué características tienen, cómo se distribuyen, qué comportamientos y cambios son esperables con diversas **estrategias de uso** para evitar su degradación.

2. OBSERVAR Y DISCUTIR

G2. Observar las cuatro imágenes siguientes tomando dos de ellas por grupos de a dos para discutir los aspectos que se indican. Después de haberlo hecho, con la participación de todos los grupos, realizar un debate. Al finalizar, cada alumno debería haber recopilado y ordenado las funciones identificadas.

1. Se nos consulta qué puede haber sucedido en este cultivo. Para poder realizar un diagnóstico se hace trabajo de campo, en el que se pone de manifiesto que el agricultor tiene una granja de cerdos, y que ha venido vertiendo en este suelo de forma descontrolada y repetidamente a lo largo del invierno y primavera estiércol líquido de cerdo (purín). Sabemos que con ello se aporta $N-NO_3^-$ que, si bien es un nutriente para las plantas, si se superan las necesidades de éstas se produce un consumo de «lujo». Este exceso induce un crecimiento vegetativo que hace que el trigo tenga un tallo muy alto y, por otro lado, puede provocarse una contaminación de las aguas freáticas.

Discutir los aspectos siguientes:

- Funciones que realizan los distintos suelos de la imagen.
- ¿Qué puede haberle sucedido al trigo?
- ¿Qué riesgos ambientales pueden existir?

Formular alguna conclusión.



Empordà, Girona, España.

J. Porta-N. Teixidor

Clave a leer después de haber estudiado el caso y redactado las propias conclusiones

- Funciones del suelo:* Soporte de edificios, producción de biomasa, y mantenimiento y restauración de la calidad de las aguas que lo atraviesan.

- b) *Diagnóstico*: en primer término un campo de trigo encamado tras una lluvia, debido a que los aportes de nitrógeno han superado las necesidades del cultivo, que ha crecido en altura en exceso, lo que ha hecho aumentar el riesgo de encamado.
- c) *Riesgos ambientales*: El exceso de nitrógeno, $N-NO_3^-$, puede haber sido transferido a otro compartimento ambiental: una capa freática, pudiendo provocar su contaminación.

Bases para unas conclusiones

El suelo no es un vertedero.

El aporte de purín al suelo incorpora nutrientes.

Los nutrientes disponibles no deben superar las necesidades de los cultivos.

Desequilibrios nutricionales.

Riesgos ambientales.

Gestión económica.

2. ¿Qué funciones realizan los suelos de esta parcela? Priorizarlos



Granada, España.

J. Porta – A. Martínez-Raya

3. ¿A qué función se destina este suelo? Indicar si se puede intuir algo acerca de si el clima de esta zona puede ser húmedo, sabiendo que un componente importante de este suelo es el yeso.

4. ¿Qué características pueden tener estos suelos que condicionen alguna de sus funciones? ¿Podría citar una característica del clima de la zona?



San Luis Potosí, México
J. Porta – J.C. Soria



Zonienbos, Bélgica.

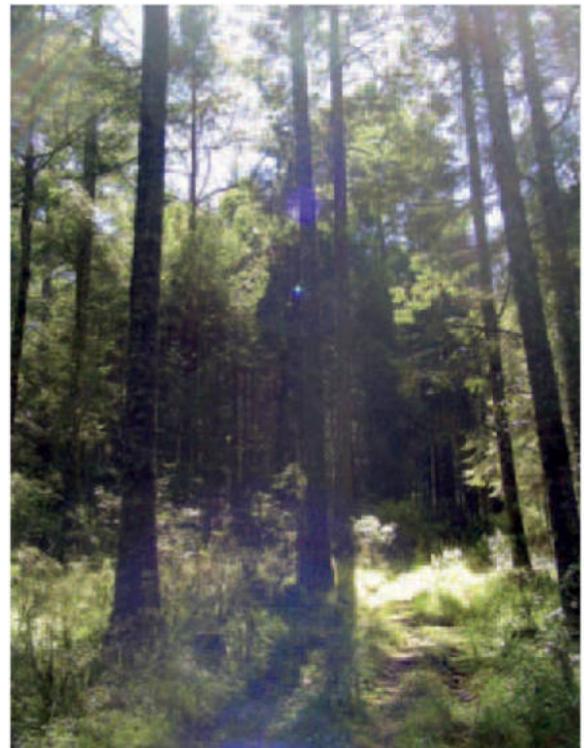
R. M. Poch

3. JUEGO DE ROL

E3. Estudiar esta imagen y redactar un informe acerca de las funciones que desempeñan los suelos de esta zona. Por grupos se defenderá una de las siguientes posturas: la del propietario del bosque, que lo quiere talar; la de la Agencia del Agua de la Cuenca, que debe aplicar la legislación vigente en el país (realizar un supuesto al respecto); y la de grupos ecologistas que defiende la permanencia del bosque.

Información complementaria:

- Localización: Se halla a 19°39'50" N, 98°05'40" W y entre 2.800 y 3.080 m de altitud, en la parte alta de la cuenca hidrológica del río Atoyác (Tlaxco, México).
- Vegetación: Bosque de *Pinus patula*, *Pinus montezuma*, *Abies religiosa*, *Arbutus sp.*
- Clima: Templado frío.
- Pluviometría: Promedio de 900 mm al año.



Tlaxco, Mx.

J. Porta – N. García-Calderón

4. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. En cualquier dirección, identificar un mínimo de diez términos, que hagan referencia a las funciones que pueden desempeñar los suelos, agrupándolos según se propone: *a)* Función: producción. *b)* Función: medioambiental. *c)* Función: fuente de alimentos de materias primas.

c	a	y	e	s	o	j	d	i	i	u
a	a	g	u	a	i	r	e	n	n	e
p	n	l	z	x	s	m	p	f	a	c
o	i	b	c	l	a	y	u	i	l	o
r	t	i	a	i	t	v	r	l	l	r
o	r	o	f	s	o	f	a	t	i	t
s	o	m	a	x	p	d	c	r	c	s
i	g	a	r	e	n	a	i	a	r	e
d	e	s	t	a	r	r	o	c	a	u
a	n	a	s	i	g	t	n	i	q	c
d	o	l	o	m	i	a	b	o	n	e
r	o	t	u	r	b	a	o	n	i	s

5. CONCEPTO DE TIERRAS O TERRITORIO

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) utiliza el concepto de tierras o territorio (ingl. *land*), más amplio que el de suelo.

TIERRAS o TERRITORIO

El concepto *tierras* refleja la integración natural de características que comprenden el ambiente físico, incluido el clima, relieve, paisaje, suelo, hidrología y vegetación, en la medida en que estos factores influyen en el potencial de uso del suelo. El concepto incluye los resultados de las actividades humanas pasadas y presentes, por ejemplo, la rehabilitación de marismas, desbroce de la vegetación, y también los resultados adversos, como por ejemplo, la salinización del suelo. Sin embargo, las características puramente económicas y sociales no se incluyen, formando parte del contexto económico y social.

6. ORGANIZACIONES EDÁFICAS: ESCALAS DE OBSERVACIÓN Y ENFOQUES METODOLÓGICOS EN EL ESTUDIO DE LOS SUELOS

Al estudiar el suelo se pone de manifiesto que hay propiedades que cambian en distancias muy cortas, submilimétricas, en un espacio que constituye un **micrositio**, mientras que en otras el intervalo de variación es muy amplio, de varios kilómetros, como por ejemplo en el caso de un paisaje de suelos o **edafopaisaje** (ingl. *soil(land)scape*). En este amplio intervalo espacial es posible diferenciar un conjunto de **organizaciones edáficas**, que constituyen un *continuum* de observación. Se puede afirmar que el suelo está organizado de forma multiescalar.

SITIO

El sitio en el que se halla un suelo hace referencia a un área de poca extensión, que se considera representativa de la forma y superficie del terreno, la vegetación y otros rasgos asociados con el suelo objeto de estudio. Todos estos aspectos que definen el sitio determinan la edafogénesis actual.

MICROSITIO

Un micrositio es un espacio muy pequeño (microambiente), submilimétrico, en el que pueden tener lugar procesos diferenciados de los de su entorno: una reacción química, el comportamiento de microorganismos u otros procesos que sólo serán apreciables en observaciones de mucho detalle. Las condiciones en un micrositio son muy uniformes.

EDAFOPAISAJE (ing. *soil(land)scape* → *soilscape*)

Se denomina edafopaisaje a cada una de las unidades en que se puede dividir la cubierta de suelos de un territorio muy extenso, atendiendo a las relaciones funcionales e interrelaciones mutuas que mantienen los suelos. Para establecer las divisiones se utilizan como criterios: la forma del terreno, la litología de los materiales, entre otros. Los estudios de edafopaisajes se esfuerzan en mejorar la comprensión de las interrelaciones paisaje – suelo – seres humanos. La variabilidad de los suelos en un edafopaisaje es de esperar que sea grande.

El tamaño de la **unidad mínima** que refleja el intervalo de variación de un conjunto de propiedades varía según que se considere un microsítio, que define un microambiente, o se haga referencia a los cambios en una cubierta edáfica de un edafopaisaje.

La unidad mínima que incluye los cambios que presenta un suelo individual se denomina **pediÓN** (NRCS, 2006). Sus características se repiten espacialmente a lo largo de una cierta distancia desde el punto considerado, hasta allí donde el intervalo de variación de las propiedades define ya un pediÓN distinto. La agregación de un conjunto de suelos o pediones iguales (isopediones) constituye una unidad espacial de mayor tamaño, denominada **polipediÓN**.

En muchos casos, para entender el comportamiento de un suelo y poder llegar a interpretaciones correctas, se requerirá aumentar o disminuir la escala de estudio, y adquirir así una visión de conjunto o llegar a un análisis más detallado. Ello obliga a integrar diferentes enfoques y metodologías de trabajo y explica la concurrencia de especialistas de muy diferente procedencia académica en la Ciencia del Suelo y que el estudio del suelo se pueda abordar a partir de organizaciones edáficas diferentes.

Las **organizaciones edáficas** que se pueden establecer y algunos enfoques metodológicos para su estudio son las siguientes:

Escalas de observación Orden de magnitud	Tipo y secuencia de organizaciones edáficas	Enfoques metodológicos
km	Cuenca de drenaje o cuenca hidrológica: influencias del uso del territorio y del mesoclima en los suelos en grandes superficies.	Enfoque integrador Teledetección Sistemas de Información Geográfica
km - hm	Modelos de distribución de suelos. Paisaje de suelos o edafopaisaje : organización espacial que permite estudiar una cubierta edáfica. Secuencia de suelos relacionados al estar situados en una ladera: toposecuencia.	Estudio de las relaciones entre el relieve y la Edafogénesis Teledetección Fotointerpretación Análisis digital del terreno.
m	Suelo individual. Sitio : área pequeña, representativa de donde se halla un suelo individual. Perfil : corte vertical del terreno que permite observar cómo se halla organizado un suelo. PediÓN : unidad mínima de descripción y muestreo de un suelo individual.	Estudio del perfil del suelo por medio de calicatas Prospección de suelos Descripción macroscópica a simple vista, con un cuchillo y con una lupa de mano Ensayos de campo Toma de muestras para análisis de laboratorio
cm – mm	Capas más o menos paralelas dentro de un suelo (horizontes), que son el resultado de los procesos formadores. Partes de un horizonte: materiales, agregados, elementos gruesos ($\varnothing > 2$ mm), entre otros.	
submilimétrica: 50 μ	Partes de un agregado: revestimientos de arcilla, acumulaciones, microagregados, granos minerales, etc. Microsítio	Análisis de laboratorio Lupa binocular Estudios micromorfológicos:
10 ⁻⁸ μ m 10 ⁻¹⁰ m = 1 Å	Estructuras moleculares: minerales de arcilla, compuestos orgánicos, etc. Elementos químicos	microscopio petrográfico Espectroscopía Difracción de rayos X Microscopía Submicroscopía Microanálisis

7. OBSERVAR E INTERPRETAR

E3. 1. Elaborar un informe acerca de las siguientes organizaciones edáficas, indicando en cada caso, la escala de observación, la organización edáfica, uso del suelo y alguna metodología de trabajo utilizable para el estudio según la organización edáfica de que se trate:



a)

J. Porta



b)

Túnez

J. Porta



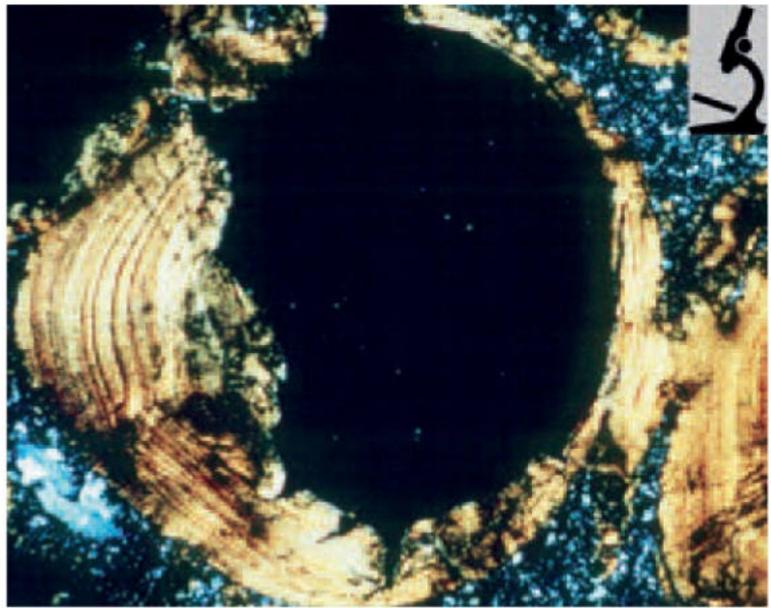
c)

J. Porta



Lupa: revestimiento de arcilla.

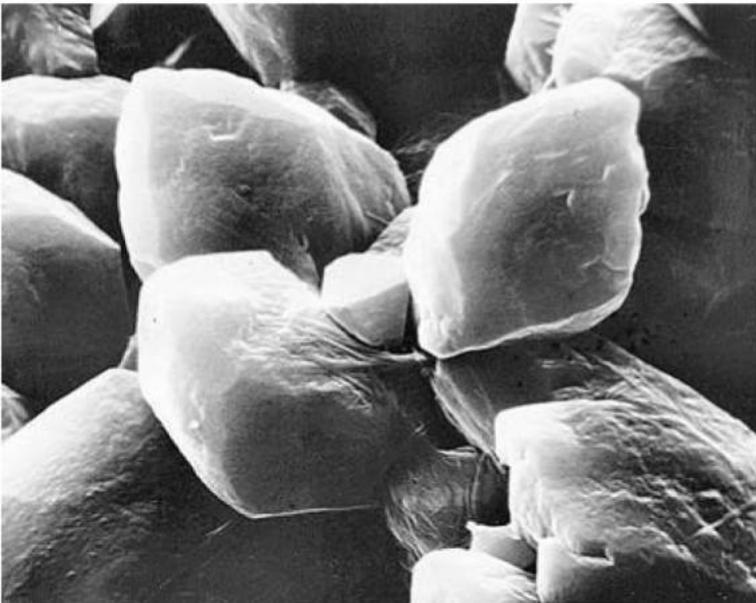
NRCS – USDA d)



e)

Microscopio petrográfico: revestimiento de arcilla.

J. Aguilar



f)

Microscopio electrónico de barrido (SEM): cristales de calcita. E. A. FitzPatrick

2. El estudio de la pérdida de suelo por erosión puede abordarse a diversas escalas. Un enfoque puede consistir en evaluar por medio de modelos las pérdidas de suelo a escala regional; otro, en estudiar el problema a escala de parcela de agricultor; y otro a escala de un suelo concreto, por medio de una calicata. Discutir y establecer las ventajas, inconvenientes y posible complementariedad de los tres enfoques.

8. JUEGO DE ROL

GM. Se proponen las siete actividades que se indican en el cuadro siguiente, para que se seleccionen aquellas que puedan resultar de mayor interés para la clase.

- Un grupo de estudiantes será el promotor de una de las actividades y los restantes actuarán a modo de usuarios del territorio con intereses que pueden ser concurrentes o contrapuestos con los del grupo promotor de la actividad.
- Durante cinco minutos el grupo promotor anotará en un papel lo que va a exponer para defender la actividad que propone, indicando el objetivo y las funciones del suelo que prioriza. Puede ser un caso general, o bien contextualizado para un caso concreto.
- Durante cinco minutos el portavoz del grupo promotor deberá exponer a los restantes estudiantes los argumentos defendidos por el grupo.
- Acabada la exposición, se abrirá un debate entre los miembros del grupo promotor y los restantes estudiantes, para que argumenten a favor o en contra de lo expuesto.
- Uno de los miembros del grupo promotor deberá ir anotando los argumentos que surjan a lo largo del debate.
- Con todo este material, el grupo promotor deberá formalizar en un informe su propuesta, mejor fundamentada tras el debate e intentar rebatir los argumentos planteados en contra.

Nota: Uno de los estudiantes actuará de moderador en cada debate, anotando las peticiones de palabra, fijando los tiempos de intervención, ordenando los turnos de las intervenciones y velando en todo momento para que se mantenga la adecuada corrección, estableciendo los turnos de réplica, entre otros aspectos.

Grupo promotor de la actuación	Objetivo	Función del suelo relevante para el usuario	Argumentos de otros usuarios en pro o en contra
Arqueólogo/a que quiere conocer el uso del territorio alrededor de un yacimiento para su ampliación.			
Técnico/a de extensión agraria en una ONG de los trópicos húmedos que quiere ampliar la superficie de cultivo.			
Director/a de parque natural que quiere restringir las actividades ganaderas.			
Ingeniero/a de una empresa minera de carbón a cielo abierto que quiere abrir una nueva área de explotación.			
Concejal/a de gestión de residuos en un ayuntamiento que quiere localizar un vertedero controlado			
Técnico/a de una empresa de desarrollo de regadíos que debe transformar en riego una zona.			
Profesor/a de secundaria de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente que quiere fomentar la educación ambiental.			

9. EDAFOLOGÍA o CIENCIA DEL SUELO (ing. *soil science*; al. *bodenkunden*)

La ciencia que estudia los suelos fue creada a finales del siglo XIX por un equipo de científicos rusos liderados por **Vassili V. Dokuchaev** (1846–1903). Este ámbito del conocimiento recibió en 1927 el nombre de **Ciencia del Suelo**. En España fue introducida por **Emilio Huguet del Villar** (Granollers, 1871–Rabat, 1951), que la denominó **Edafología** (*edafos*, suelo en el que crecen las plantas y *logos*, ciencia). El término *Edafología* es el que se ha generalizado en español en España e Hispanoamérica. Se trata de una ciencia independiente.

El término inglés *Pedology* y sus equivalentes en otros idiomas, en palabras de Joffe (1949), designa una rama de la Ciencia del Suelo que se centra en dilucidar las leyes naturales que rigen el origen, formación y distribución de los suelos; mientras que la Ciencia del Suelo o Edafología abarca un ámbito científico mucho más amplio, que incluye los siguientes aspectos:

- Cómo se forman: **génesis** de suelos o edafogénesis.
- Qué aspecto tienen: **morfología** de suelos y la relación con su comportamiento.
- Cuáles son sus componentes: **mineralogía** de suelos y **materia orgánica**.
- Cuáles son sus propiedades, atributos y comportamiento: **física** de suelos, **química**, **biología**, **ecología**, **hidrología**, **fertilidad**, entre otros.
- Cómo se denominan: **clasificación** de suelos, que permite organizar y estructurar los conocimientos y facilitar la transferencia de conocimientos y tecnología.
- Cómo se distribuyen en el territorio y en el mundo: **cartografía** y **geografía** de suelos.
- Cómo manejarlos para evitar su degradación: **calidad**, **evaluación**, **protección** y **tecnología de suelos**.

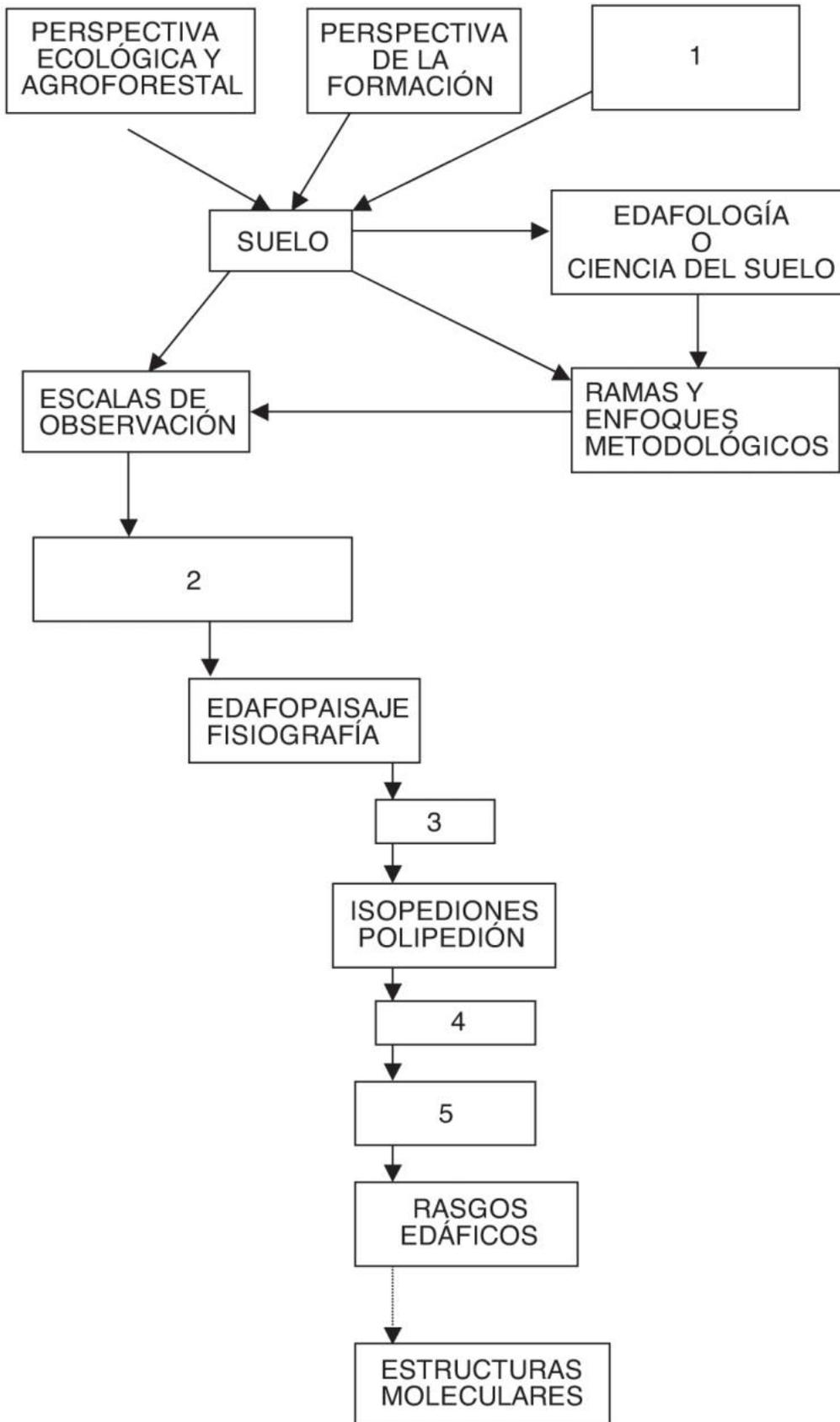
10. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

E3. Buscar en Internet y en la bibliografía existente en la biblioteca información para redactar informes acerca de los siguientes aspectos:

- a) El significado de los siguientes términos: litosfera, cuenca de drenaje o hidrográfica, ecosistema, biomasa, interfase, microscopio petrográfico.
- b) Importancia que tuvieron para el desarrollo de la Ciencia del Suelo: V.V. Dokuchaev, Emilio Huguet del Villar, José M. Albareda, W. Kubiena, Hugh H. Bennet y otros edafólogos y edafólogas relevantes en el país en que nos encontramos.
- c) Equivalencia de un Angstrom (Å, ingl. *Angstrom*) en el Sistema Internacional (SI) y de 1 mm de lluvia.
- d) La «Directiva de Parlamento Europeo y del Consejo sobre Protección del suelo» COM (2006)232, que se trabajará más adelante.

11. COMPLETAR LA INFORMACIÓN

A1. Completar el siguiente esquema conceptual:



12. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos:

La/El (1) _____ como ente natural constituye un/a (2) _____, de unos pocos milímetros a (3) _____, si bien a efectos de clasificación del suelo, el límite inferior de éste se ha fijado arbitrariamente en (4) _____. Se halla en el límite entre la litósfera y la atmósfera, por lo que actúa como un/a (5) _____ entre ambas. El concepto de desarrollo del suelo a partir de una roca lleva implícito que el suelo es un elemento (6) _____ de un ecosistema. El estudio del suelo constituye un/a (7) _____ de observaciones, ya que se puede abordar a diferentes (8) _____ y con diferentes metodologías de estudio. Así, por ejemplo, al referirse al (9) _____ como (10) _____, el orden de magnitud de la observación es (11) _____.

La (12) _____ es una ciencia independiente, diferenciada en distintos ámbitos (13) _____, _____, _____ de suelos, entre otros.

La importancia de los suelos en la (14) _____ de un país reside en que son imprescindibles para una producción eficiente de (15) _____, ya que proporcionan agua, nutrientes, (16) _____ y _____ a las plantas. Si se dedican a la agricultura los suelos de mejor calidad se requerirán menos (17) _____, mientras que si se cultivan suelos muy degradados, con el mismo trabajo el agricultor tendrá menores rendimientos y menores beneficios. El suelo también es importante para la salud humana y para el medio ambiente, ya que mantiene y mejora la calidad de (18) _____ que lo atraviesa. No obstante, debe tenerse en cuenta que el suelo no es un/a (19) _____, por lo que habrá que tener en consideración sus características y los requerimientos de los cultivos, antes de realizar cualquier aporte de forma indiscriminada, para evitar producir desequilibrios fisiológicos en los cultivos, degradar el suelo o que haya transferencias a otro/a (20) _____.

- | | | | | |
|------|--------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| (1) | a) roca | b) paisaje | c) horizonte | d) suelo |
| (2) | a) capa | b) cubierta vegetal | c) cubierta delgada | d) factor |
| (3) | a) < 1 m | b) varios metros | c) dos metros | d) cualquier profundidad |
| (4) | a) 1 m | b) depende | c) dos metros | d) no se fija |
| (5) | a) interfase | b) volumen | c) frontera | d) reactor |
| (6) | a) estático | b) rocoso | c) dinámico | d) abiótico |
| (7) | a) continuum | b) serie | c) análisis | d) conjunto |
| (8) | a) posiciones | b) escalas | c) tiempos | d) momentos |
| (9) | a) suelo | b) paisaje | c) horizonte | d) edafopaisaje |
| (10) | a) modelo | b) organización edáfica | c) modelo | d) secuencia |
| (11) | a) kilométrico | b) micrométrico | c) submicroscópico | d) milimétrico |
| (12) | a) física | b) química | c) edafología | d) biología |
| (13) | a) astronomía | b) física | c) fertilidad | d) ecología |
| (14) | a) salud | b) población | c) estabilidad | d) economía |
| (15) | a) arena | b) alimentos | c) energía | d) salud |
| (16) | a) oxígeno | b) anclaje | c) hidrógeno | d) arcilla |
| (17) | a) semillas | b) horizontes | c) agua | d) fertilizantes |
| (18) | a) aire | b) ambiente | c) alimentos | d) agua |
| (19) | a) cuerpo estático | b) vertedero | c) elemento dinámico | d) cuerpo artificial |
| (20) | a) suelo | b) nivel | c) planta | d) compartimento ambiental |

2. Con lo explicado en clase y el estudio de esta Unidad, identificar entre diez y quince palabras clave que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Comprender en qué consiste la génesis de suelos.

Aprender a distinguir entre factores y procesos formadores.

Entender por qué los suelos pueden presentar una variabilidad espacial sistemática y una variabilidad determinada por el uso del suelo.

Entender y saber describir la contribución de cada factor ecológico en la formación de un suelo.

Aprender a interpretar las formas del terreno, los suelos asociados a ellas y las funciones potenciales de éstos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Génesis de suelos: factores y procesos.

Variabilidad espacial del suelo.

Horizonación.

Factores ecológicos de formación del suelo.

Relaciones entre el material originario y el suelo.

Relaciones entre el suelo y el clima.

Relaciones entre el suelo y las formas del terreno.

Factores bióticos y antrópicos de la edafogénesis.

El suelo como elemento dinámico de un ecosistema.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª edición, cap. 18. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2003.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de campo de suelos*. Cap. 2 y 3. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2005

Birkeland, P. W.: *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press, 430 pp. New York, 1999.

Schaetzl, R. y Anderson, Sh.: *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 817 pp. Cambridge, 2005.

En Internet: www.iec.cat/mapasols → Protecció de sòls → Documentos de interés / Enlaces de interés

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos.

Resulta previsible que los suelos de un determinado territorio sean (1) _____ debido a la acción combinada de los factores ecológicos de formación. Éstos son la roca o material originario, los organismos vivos, la geomorfología, el tiempo y (2) _____. Ello explica que los suelos de un mismo edafopaisaje (3) _____ realizar las mismas funciones. El concepto de (4) _____ hace referencia a un área de poca extensión, que se considera representativa de la forma y superficie del terreno, la vegetación y otros rasgos asociados con el suelo objeto de estudio.

Un sólido de origen natural, homogéneo, de composición química definida, estructura atómica ordenada y, generalmente de origen inorgánico, constituye un/a (5) _____. El sulfato potásico (6) _____ lo es. De entre los que se citan puede serlo (7) _____, uno de los criterios para saberlo es que, por lo general, el nombre de los minerales acaba en (8) _____.

- | | | | | |
|-----|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|
| (1) | a) muy semejantes | b) distintos | c) similares | d) análogos |
| (2) | a) el relieve | b) el material parental | c) la fauna | d) el clima |
| (3) | a) puedan | b) no puedan | c) a veces puedan | d) suelen |
| (4) | a) sitio | b) paisaje | c) lugar | d) suelo |
| (5) | a) roca | b) mineral | c) cristal | d) esquistos |
| (6) | a) — | b) no | c) evidentemente | d) raramente |
| (7) | a) la caliza | b) la calcita | c) el basalto | d) el granito |
| (8) | a) -iza | b) -ita | c) -to | d) -ito |

2. GÉNESIS DE SUELOS: FACTORES Y PROCESOS

La **génesis de suelos** o edafogénesis es aquella parte de la Edafología que se dedica a investigar y explicar la formación de suelos, a partir de observaciones morfológicas, del estudio de los factores ecológicos de formación y de los procesos edafogénicos.

FACTORES ECOLÓGICOS DE FORMACIÓN DE SUELOS

Son los **componentes** (abióticos y bióticos) del medio que desencadenan, orientan y controlan la intensidad de los procesos que dan lugar a la formación de los suelos. Determinan el estado del suelo como sistema en un momento concreto. La combinación de factores y su distinta intensidad permiten explicar la gran diversidad de suelos, es decir, la **edafodiversidad**. No obstante, dado que una misma combinación de factores puede darse en distintas partes del mundo, será posible encontrar en ellas una misma clase de suelos.

Los factores formadores principales son: material originario o parental, clima, seres vivos, posición en el relieve y tiempo. Pueden existir otros según el emplazamiento.

PROCESOS FORMADORES DE LOS SUELOS O PROCESOS EDAFOGÉNICOS

Son aquellos **cambios** que ocurren en el sistema que dan lugar al desarrollo de un suelo. Pueden ser de tipo físico (por ejemplo, fragmentación, movimiento de materia en suspensión) y de tipo biogeoquímico (por ejemplo, reacciones químicas). Se suelen distinguir unos diecisiete procesos (Información Complementaria C), que se pueden agrupar en cuatro procesos básicos: adiciones, transformaciones, translocaciones y pérdidas.

La roca madre, material parental o **material originario** constituye la masa mineral de la que se parte en la formación de un suelo, y sobre la que actúan los restantes factores formadores a lo largo del tiempo. El **clima** proporciona energía al sistema y, por ello, determina la orientación de la edafogénesis a nivel mundial, de manera que, en mapas a pequeña escala, se puede identificar una influencia del clima en la distribución de los suelos del mundo, si bien, al estudiar la distribución de suelos con mayor detalle, se observa que la influencia de los demás factores llega a difuminar la del clima. La **posición del suelo en el relieve** condiciona la energía solar recibida y la transferencia de materia y energía en el paisaje. Los **organismos vivos** aportan materia orgánica al suelo e intervienen en su transformación y mezcla. Por otro lado, cabe destacar que el desarrollo del suelo tiene una

dimensión temporal, lo que hace de él un **sistema dinámico**, que cambia, si bien lo hace de forma muy lenta, imperceptible. El **tiempo** es el quinto factor ecológico de formación. Se pueden identificar otros factores según el sitio. Entre ellos ocupa un lugar destacado el **factor antrópico**, que ha influido en gran manera en el desarrollo de muchos suelos. Ello ha llevado a establecer una clase para agrupar aquellos suelos que presentan modificaciones debidas a prácticas agrícolas prolongadas e intensivas, los *Anthrosoles*^{WRB} y otra para aquellos que contengan muchos artefactos, los *Technosoles*^{WRB}, lo cual no quiere decir que la influencia antrópica no se deje sentir en otros muchos suelos.

Dado que los factores formadores presentan una gran variabilidad, tanto en el espacio, como a lo largo del tiempo, se puede afirmar que los suelos presentan una **variabilidad espacio-temporal**, que explica la gran diversidad de suelos y de propiedades, lo que ha llevado a establecer el concepto de **edafodiversidad**.

3. VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS SUELOS

Las diferencias en la morfología de los suelos están asociadas a la posición que ocupan en el paisaje y a los restantes factores ecológicos de formación. Con un enfoque determinista, la **teoría general de la edafogénesis** permite una cierta previsión acerca de las características de los suelos, su comportamiento y su distribución. De este modo se puede intentar explicar la **variación sistemática** que presentan los suelos en un territorio determinado (edafopaisaje) y poder predecir qué suelos será posible encontrar en territorios comparables, cuando se tiene la experiencia suficiente. Ello es así porque las propiedades y modos de funcionamiento de la cubierta edáfica siguen el **principio causal**:

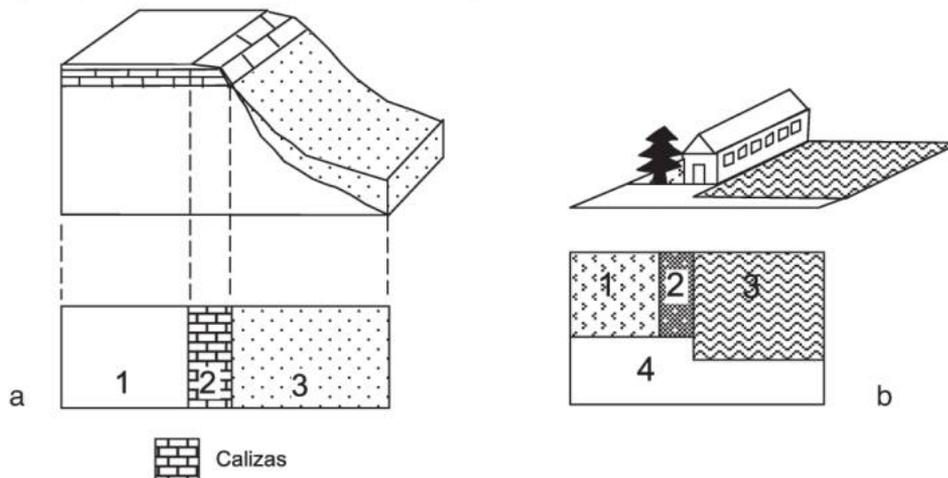
medio (factores, entradas) → procesos → caracteres (salidas) y comportamiento

Por el contrario, aquellas propiedades relacionadas con las actividades humanas, tales como el uso del suelo en agricultura, los movimientos de tierras, los vertidos, las contaminaciones, las ocupaciones con infraestructuras urbanas e industriales, entre otras, determinan una variación que no resulta directamente explicable a partir de la teoría general de la edafogénesis. Puede hablarse en estos casos de una **variación ligada al uso**. Para poder llegar a conclusiones en el estudio de las características y propiedades de estos suelos, se requieren muestreos sistemáticos de alta densidad (en malla, p.e.), tratamientos estadísticos de los datos y estudios geoestadísticos.

4. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Estas dos imágenes (a y b) muestran dos bloques diagrama y el correspondiente mapa de suelos derivado de cada uno de ellos.

- Describa con sus propias palabras estas dos imágenes.
- Identifique por orden de importancia dos factores que pueden haber actuado de forma predominante y que permiten explicar la variabilidad espacial que se observa y se refleja en cada mapa.
- Indique qué tipo de variación se presenta en uno y otro caso.



5. HORIZONACIÓN

Los suelos como sistemas ecológicos son **sistemas termodinámicos abiertos**, ya que intercambian materia y energía con el exterior, lo que les permite aumentar su grado de organización (disminución de entropía).

HORIZONACIÓN

Hace referencia a la progresiva diferenciación de capas más o menos paralelas a la superficie del terreno, denominadas **horizontes del suelo**. Se debe a la acción de los procesos formadores.

La identificación de horizontes genéticos en un suelo en el campo y su estudio en el laboratorio constituyen metodologías para estudiar y poder inferir los factores y procesos formadores que han actuado y han dejado sus signos en el suelo, en forma de rasgos específicos.

6. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras el aspecto de este suelo.
b) Indique cuántos horizontes genéticos pueden haberse formado.
c) ¿Puede extraer alguna conclusión?



J. Porta

7. FACTORES ECOLÓGICOS DE FORMACIÓN DEL SUELO

Partiendo del enfoque propuesto por Dokuchaev, según el cual el suelo es el resultado de la acción combinada de los factores formadores, Jenny (1941) orientó la investigación en génesis de suelos a partir del estudio de dichos factores. Estableció funciones de tipo factorial de carácter geográfico, que relacionan cuantitativamente los suelos (o algunas de sus características) con el medio como fuente de variación. Para expresar estas relaciones propuso una **ecuación general de la edafogénesis**, enfoque conceptual cuyo interés sigue vigente. La forma inicial de la ecuación general expresa que el suelo (S) es función de los factores ecológicos de formación:

$$S = f(\text{clima, roca, organismos, relieve, tiempo, ...})$$

Esta expresión se basa en las **hipótesis** siguientes:

- La formación de un suelo se debe a un **ciclo único** (monogénesis) a lo largo del cual las condiciones de medio se supone que no han cambiado. Si bien esto es cierto para suelos jóvenes, esta hipótesis no resulta aceptable para suelos viejos, ya que pueden ser policíclicos o poligénicos.
- Las variables consideradas (factores formadores) son **variables independientes**, lo que es cierto para la roca madre y el tiempo, pero no suele serlo para los demás factores en la mayoría de sitios.

Por otro lado, se ha comprobado que establecer relaciones de este tipo resulta bastante **complejo**, especialmente en sitios en los que la variación de todos los factores tenga incidencia en la formación del suelo. Por ello se ha intentado buscar emplazamientos (sitios) en los que la influencia se deba esencialmente a **uno de los factores**, que resulte determinante para establecer diferencias entre los suelos o sobre algunas propiedades. En estas situaciones el estudio es menos complejo y las relaciones establecidas resultan más claras y, por ello, más útiles.

En el supuesto de que la edafogénesis venga condicionada por uno de los factores y que la variación de los restantes factores no tenga incidencia sobre ella, se puede establecer según que el factor determinante sea:

- **Clima**: se pueden establecer **climofunciones** y los suelos relacionados por ellas integran una climosecuencia. Por ejemplo, los suelos a lo largo de un meridiano.
- **Roca madre**: las relaciones establecidas se denominan **litofunciones** y los suelos relacionados constituyen una litosecuencia.
- **Posición en el relieve**: las relaciones se denominan **topofunciones** y los suelos forman una toposecuencia. Las relaciones suelo-paisaje son de especial importancia en trabajos de cartografía de suelos, ya que permiten predecir la presencia de un clase de suelos en una determinada forma del relieve y, de este modo, poder establecer modelos suelo-paisaje para la distribución de los suelos. Como ejemplo, suelos relacionados por estar situados a lo largo de una ladera.
- **Organismos vivos**: las relaciones establecidas se denominan **biofunciones**. Los suelos relacionados constituyen una biosecuencia. Como ejemplo, suelos contiguos, si bien formados bajo distintos tipos de vegetación (bosque-pradera).
- **Tiempo**: las relaciones se conocen como **cronofunciones** y los suelos constituyen una cronosecuencia. Por ejemplo, los suelos en las distintas terrazas de un río.

La formulación inicial de Jenny ha sido modificada sucesivamente con diferentes criterios, siempre intentando reflejar una realidad compleja de una manera sencilla. Una forma de hacerlo ha sido introducir dos escalas de tiempo, un tiempo t_1 largo, que corresponde a la acción de los factores ecológicos de formación (factores no antrópicos) y un tiempo mucho más corto, t_2 , a escala humana, que toma en consideración los factores de uso y manejo (factores antrópicos). De este modo se puede escribir:

$$S = f(\text{factores formadores})_{t_1} + f(\text{uso y manejo})_{t_2}$$

De manera que, en un suelo fuertemente antropizado, la primera función tenderá a cero. También es posible tener en cuenta el estado del sistema en el momento cero, L_0 , que incluye el material originario, materia orgánica y la posición en el relieve; así como los factores externos, clima y organismos vivos, integrados en P_x . En este caso, para un tiempo t , la ecuación se puede expresar como:

$$S = f(L_0, P_x, t)$$

El enfoque basado en los factores ecológicos de formación se denomina de **caja negra**, ya que no profundiza en las causas, ni en la estructura interna del sistema. Sólo permite conocer los factores (*inputs* = entradas) y los resultados (*outputs* = salidas) y no los procesos que han tenido lugar durante la edafogénesis. No obstante, por su simplicidad ha resultado útil, es muy didáctico y ha contribuido positivamente al avance del conocimiento en génesis de suelos. Además, con el uso de modelos matemáticos y la posibilidad de tratar gran cantidad de información con ordenador, este enfoque ofrece nuevas posibilidades.

8. RELACIONES ENTRE MATERIAL ORIGINARIO Y SUELO

ROCA MADRE, MATERIAL ORIGINARIO o MATERIAL PARENTAL

Se denomina **roca madre** a una roca dura o blanda a partir de la cual se forma un suelo. Los términos **material originario** o material parental resultan preferibles, ya que tienen una significación más general: estado inicial del sistema (momento cero), cualquiera que sea la naturaleza del material.

Las rocas y materiales que integran la superficie terrestre (litosfera) constituyen el material de partida, precursor en la formación de los suelos. En una etapa inicial, un suelo presenta unos rasgos muy próximos a los del material, si bien a lo largo del tiempo, según las condiciones de medio, se producirá una diferenciación más o menos marcada. La intensidad de los restantes factores formadores determina, por ejemplo, que los componentes de los suelos de clima cálido y húmedo sean muy distintos de los del material originario. Por el contrario, los suelos de clima cálido y seco vendrán condicionados durante mucho tiempo por las características del material originario.

Pueden actuar de material originario:

- Una **roca consolidada *in situ*** y los productos de su meteorización que no hayan sufrido transporte (material **autóctono**).
- Un **material no consolidado, transportado y depositado** (material **alóctono**), por lo general distinto de la roca subyacente sobre la que se depositó. Puede tratarse de:
 - **Material coluvial**: material detrítico, poco clasificado (heterométrico), grueso, anguloso, poco consolidado y transportado a corta distancia por acción de la gravedad, con posible intervención de la acción del agua en estado líquido, así como del hielo. Ejemplo: un coluvio al pie de una ladera o en un cono de deyección.
 - **Material aluvial**: material detrítico, granoclasificado (homométrico), más bien redondeado, transportado y depositado por un río al disminuir la velocidad del flujo y, por ello, su capacidad de transporte. Ejemplo: materiales en llanuras aluviales, deltas, estuarios o terrenos ganados al mar.
 - **Complejo coluvial-aluvial**: zona de imbricación entre las dos anteriores. Por ejemplo el contacto glaci-terrazza.
- Un **depósito de tillitas**, material heterométrico con predominio de material fino, que ha sido transportado por el hielo y que corresponde a morrenas glaciares (till).
- Un **material transportado por el viento**: depósito de loess, dunas y polvo.
- Un **suelo preexistente** que empiece a evolucionar bajo unas condiciones de medio diferentes.
- Un **material preedafizado**: erosionado, transportado y depositado, que puede contener rasgos heredados, así como permitir que los procesos edafogénicos sean mucho más rápidos, una vez depositado.

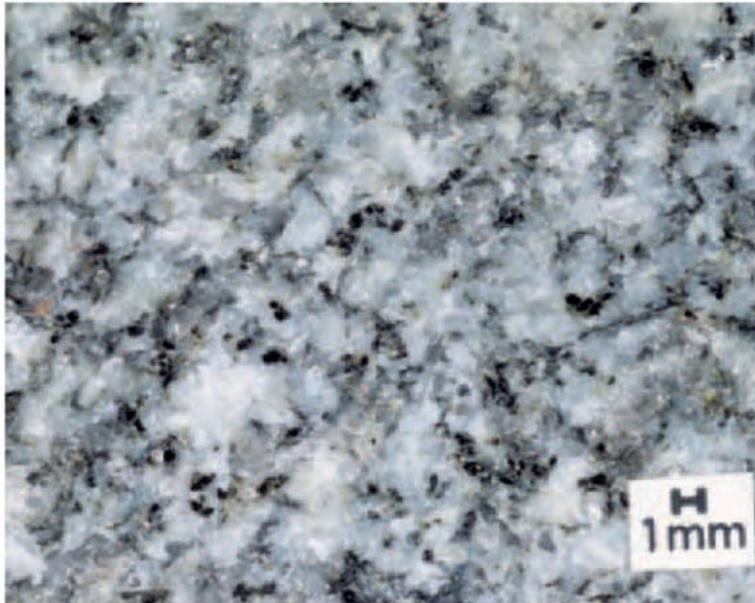
Puede haber materiales parentales de otros orígenes: los transportados por el aire (cenizas volcánicas); los depósitos orgánicos (turba), etc.

METEORIZACIÓN o INTEMPERISMO

La **meteorización** o intemperismo consiste en la transformación parcial o total de las rocas y minerales al entrar en contacto con la atmósfera, por aflorar o por estar muy cerca de la superficie. En los procesos de meteorización intervienen procesos de disgregación física y de alteración biogeoquímica.

Las características de las rocas condicionan la **tasa de meteorización** y los productos potenciales resultantes de la misma, influyendo además en los procesos edafogénicos. Entre ellos cabe citar:

- **Tipo de roca y su mineralogía**: ígneas (granito, basalto, entre otras), metamórficas (esquistos, entre otras) y sedimentarias (calizas, areniscas, lutitas, entre otras).
- **Tamaño de grano y color de los minerales**.
- **Acidez de la roca**: se refiere al porcentaje de sílice (SiO_2) que contiene y **no hace** referencia al pH, ni de la roca, ni del suelo resultante.
- **Estado de fracturación** y resistencia de la roca: condiciona la liberación de elementos, entre otros aspectos.
- **Comportamiento frente a los fluidos**: favorece o impide las reacciones químicas y el transporte de sustancias (translocaciones), así como las pérdidas por lavado de materia sólida en suspensión o de elementos en disolución.



Granito en muestra de mano: los minerales claros son cuarzo y feldspatos, mientras que los oscuros son de mica negra, principalmente. C. Dorronsoro.



A partir de este material originario se forman suelos con elevado contenido en arcillas expansibles. Columnata basáltica, San Miguel Regla, México. J. Porta

9. MANEJO DE DATOS

E3. Redactar un informe acerca de los aspectos que se indican. Siguiendo el enfoque planteado por Jenny, se estudiaron los primeros 25 cm de un gran número de suelos desarrollados a partir de un tipo de lutita, en una región de clima templado. Se obtuvo una expresión que relaciona la precipitación anual media (P), expresada en litros por metro cuadrado, con el contenido de arcilla en tanto por ciento (a): $a = 0,036 P + 1,33$.

- Indicar las características de la roca madre y cómo habrán condicionado la formación de estos suelos.
- Representar esta ecuación, indicar de qué tipo de curva se trata y discutir el intervalo de existencia, atendiendo a criterios edáfico-climáticos.
- ¿Cómo variaría el resultado si se dispusiese de datos de precipitación en mm? Deducir la ecuación de dimensiones que justifica la respuesta.

10. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Discutir los siguientes aspectos:

Se recibe una consulta acerca de la idoneidad de llevar a cabo una excavación en una ladera formada por material coluvial, con el fin de disponer de una superficie plana para construir en ella una granja-escuela. En un informe previo se indica que «de hacerse la excavación, deberá construirse un muro de contención». Dado que ello encarece considerablemente la obra, se pide su asesoramiento acerca de la validez de tal informe. Justificar la respuesta. Se dispone de esta imagen de la zona.



J. Porta

11. CONSOLIDACIÓN DE CONOCIMIENTOS

E3. Estudiar los siguientes aspectos consultando la *Información complementaria A*, bibliografía en la biblioteca y documentación en Internet.

- La denominación de areniscas, limolitas y arcillitas para rocas sedimentarias hace referencia al tamaño del grano, pareciendo indicar que cada una de ellas presenta granos que se hallan en un intervalo estrecho de tamaño de partículas. Verificar si ello es así.
- ¿El término lutita a cuáles de los anteriores incluye?

12. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. Completar con el término que mejor se ajuste al contexto.

- En una llanura aluvial, las inundaciones aportan intermitentemente materiales procedentes de la (1) *erosión/edafogénesis* de los suelos de la cuenca hidrográfica. Los suelos desarrollados a partir de estos materiales (2) *alóctonos / autóctonos* tendrán unas características muy (3) *próximas / diferentes* a las del material (4) *originario / transportado*, resultando (5) *difícil / fácil* distinguir el material originario del resultante de (6) *transporte / procesos formadores*. Los suelos de la llanura aluvial (7) *tendrán/no tendrán* niveles significativos de materia orgánica debido a la procedencia del material originario y ésta se distribuirá de forma (8) *irregular / regular* en el perfil. Por lo general se tratará de (9) *suelos poco productivos / muy fértiles* a no ser que tengan una capa freática próxima a la superficie o se inunden demasiado frecuentemente.
- Los suelos existentes en un delta se caracterizan por formarse a partir de una roca (1) *ígneas / metamórficas / sedimentarias*, es decir, un material (2) *aluvial / coluvial*. En el delta (3) *habrá/no habrá* una capa freática vinculada al curso del río, por lo que debe considerarse que se trata de una zona (4) *muy vulnerable/no vulnerable* frente a vertidos que puedan ser transferidos a dicha capa freática.

13. RELACIONES ENTRE EL SUELO Y EL CLIMA

El clima (atmósfera e hidrósfera) se puede caracterizar por: las **precipitaciones**, la radiación solar, la **temperatura**, el viento, etc. El agua resulta imprescindible para las reacciones químicas y el crecimiento de las plantas y microorganismos, que se ven además influenciados por la temperatura. El agua y la temperatura ejercen acciones directas e indirectas sobre los procesos edafogénicos.

PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva es la fracción del agua de lluvia que entra en el suelo, por consiguiente, la que es eficiente para las reacciones químicas, los procesos y la vida en el suelo y de las plantas.

INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso por el cual el agua atraviesa la superficie del suelo y entra en él.

ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La escorrentía superficial es la diferencia entre la precipitación y el agua infiltrada, constituye un excedente que, en terrenos inclinados, se desplaza ladera abajo (escorrentía superficial) y, en los llanos, puede producir encharcamiento.

En los procesos que tienen lugar en el suelo desempeña igualmente un papel importante la **temperatura** del suelo con:

- **Efectos directos** sobre la velocidad de las reacciones químicas (Ley de Arrhenius), los procesos evaporativos, la actividad biológica y procesos de hielo-deshielo.
- **Efectos indirectos** debido a su influencia en el crecimiento de las plantas, que protegen al suelo del impacto directo de las gotas de lluvia y determinan la cantidad y el tipo de materia orgánica incorporada al suelo, entre otros aspectos.

Al querer establecer relaciones entre el clima y las características de los suelos deben tenerse en cuenta algunos aspectos relevantes del comportamiento del clima, para que las conclusiones sean correctas.

En **primer lugar**, que **el clima cambia** a lo largo del tiempo. Dado que las series climatológicas más largas en el mundo no van mucho más allá de unos 150 años, las relaciones que se puedan establecer entre los valores de los índices climáticos y los suelos sólo serán correctas si se toman en consideración características edáficas que se hayan podido formar en intervalos de tiempo relativamente cortos, lo que es cierto para suelos jóvenes (**monocíclicos**). Los suelos más antiguos (policíclicos) pueden presentar caracteres debidos al clima actual, que se habrán añadido a rasgos derivados de edafogénesis pasadas (caracteres heredados o **relictos**), lo que debe tenerse en cuenta al intentar interpretar los rasgos identificados en un suelo.

En **segundo lugar**, al hablar del **clima** como factor formador, se hace referencia a los **macroclimas**, que definen tendencias regionales y determinan la distribución geográfica de los suelos a escala mundial. No obstante, el **clima del sitio** en el que se halla un suelo (**microclima**) puede tener una influencia directa sobre la humedad y la temperatura, y una acción indirecta, a través de la vegetación, y por ello mayor incidencia en la edafogénesis, resultando de mayor relevancia que el clima general.

En **tercer lugar**, hay que tener en cuenta que, si bien los valores medios de P y T son los que se suelen utilizar para la caracterización del clima, y que pueden permitir explicar los contenidos y tipos de materia orgánica en un suelo, los valores medios tienen escasa significación en muchos procesos.

En la edafogénesis de algunos suelos pueden haber tenido mayor influencia los **valores extremos de precipitación efectiva o de temperatura**, más que sus valores medios. Como ejemplo se puede indicar que en zonas áridas, unas lluvias extremas ocasionales, que hayan llegado a saturar de agua el suelo, pueden haber provocado translocaciones e incluso pérdidas de sustancias. Ello permite explicar la presencia de ciertos horizontes genéticos en suelos de estas zonas, cosa que no sería esperable a partir de los datos climáticos referidos a precipitaciones medias.

Por otro lado, no son los valores medios de la precipitación (mm caídos en 24 h) los que permiten explicar ciertos procesos erosivos, sino las lluvias de alta intensidad en períodos de tiempo muy cortos.

En zonas templadas frías, lo que resultará significativo para explicar la fragmentación de una roca por efecto del hielo (meteorización física), será el número de veces que los cambios de temperatura hayan dado lugar a secuencias hielo-deshielo, y no el hecho de que la temperatura media se mantenga por debajo de cero grados de forma continuada.

El **régimen de humedad** del suelo permite precisar el efecto de la precipitación, ya que condiciona la translocación y pérdida de sustancias, entre otros aspectos.

RÉGIMEN DE HUMEDAD DEL SUELO

Hace referencia a la presencia o ausencia de agua en un cierto espesor de un suelo a lo largo del año.

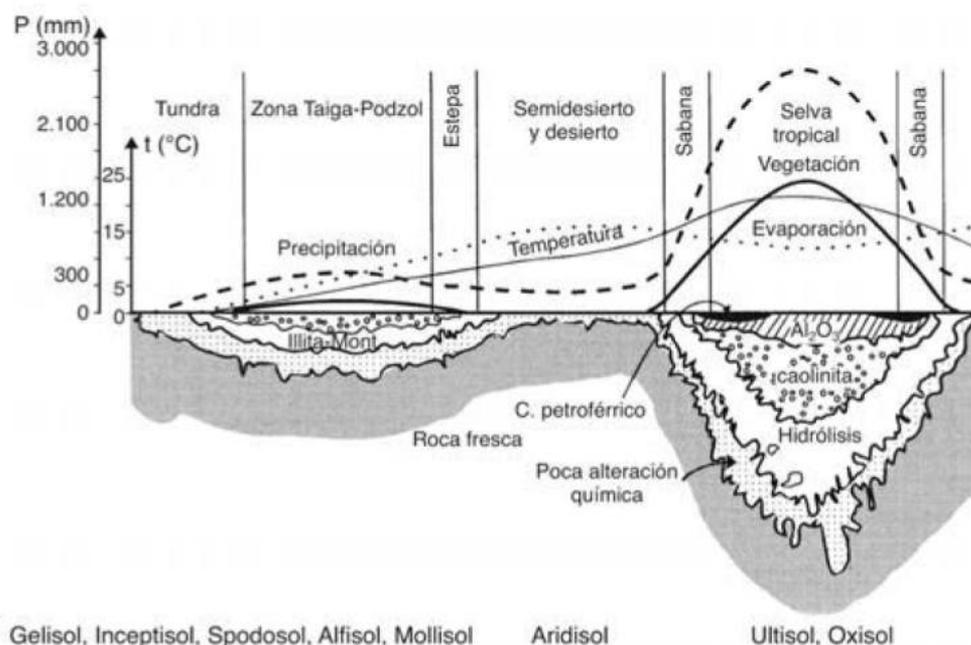
FRENTE DE HUMECTACIÓN

En un suelo seco en proceso de humectación se puede distinguir dos zonas, la superior humedecida y la inferior todavía seca. El contacto entre ambas zonas se denomina frente de humectación.

Se pueden distinguir diferentes tipos de regímenes de humedad: percolante, no percolante, ascensional y estagnante. El régimen de humedad más húmedo se denomina **údic**, se caracteriza por tener una precipitación que supera a la evapotranspiración, con lo que el agua aportada por la lluvia llega a mojar todo el perfil y todavía hay un exceso que se pierde por drenaje. Por ello puede haber un lavado con pérdida de sustancias solubles, por lo que es un régimen **percolante**. Por el contrario, en suelos de zonas en las que la evapotranspiración supera a la precipitación, según cual sea la cantidad de lluvia y su distribución a lo largo del año, el frente de humectación se detiene a una cierta profundidad. Por consiguiente, si bien es posible que haya translocaciones dentro del suelo, el material movilizado se acumulará dentro del propio suelo. Puede tratarse de un régimen **arídico** (zonas muy áridas), de un régimen **xérico** (zona mediterránea) o de un régimen **ústico** (las lluvias coinciden con el período de crecimiento de las plantas), los tres son regímenes **no percolantes**. Por otro lado, existen suelos con régimen de humedad **ascensional**, que son aquellos en los que tienen lugar translocaciones capilares ascendentes durante los períodos secos, y lavados descendentes durante los períodos de lluvias. Por último, los suelos con exceso de agua, y con dificultades para dejarla salir (mal drenaje), tienen régimen **estagnante**, caracterizado por una falta de oxígeno, anoxia y procesos de oxidación-reducción: condiciones ácidas.

En **cuarto lugar** debe tenerse en cuenta que las correlaciones establecidas entre parámetros climáticos y características de los suelos actuales, al igual que cualquier otra relación de carácter empírico, sólo tendrán validez para suelos de la región geográfica en la que hayan sido establecidas.

Gerasimov estableció una secuencia a lo largo de un meridiano, yendo de norte (izquierda de la figura) a sur (derecha) que ofrece una panorámica mundial en función de diversos macroclimas:



La influencia de los macroclimas a escala mundial hizo formular el principio de zonalidad para explicar la distribución de suelos en función de zonas climáticas. Sin embargo, al estudiar los suelos a escalas más detalladas se ha podido comprobar que tal principio no tiene la validez general que se pretendía, por lo que se ha abandonado en clasificación de suelos. Duchaufour habla de suelos climax climáticos (edafogénesis determinada por el clima) y suelos climax estacionales (edafogénesis determinada por las condiciones ecológicas del sitio o estación).

14. RELACIONES ENTRE EL SUELO Y LAS FORMAS DEL TERRENO

14.1. Conceptos básicos

FISIOGRAFÍA

La fisiografía describe los atributos característicos de la superficie terrestre, es decir, los rasgos físicos generales del relieve, especialmente relacionados con la topografía. Puede utilizarse para estratificar los paisajes y organizar las observaciones de suelos, cuando se trabaja a escalas pequeñas.

RELIEVE

El relieve hace referencia a aquellas formas de la superficie terrestre que determinan y definen las elevaciones más altas y más bajas dentro de un territorio, en el que es posible diferenciar distintos modelos de relieve. Ejemplos: Tierras altas onduladas, altiplano, montañas y cerros, valles de montaña, entre otros.

PAISAJE (ing. *landscape*)

Este término se ha venido utilizando de una manera genérica como sinónimo de fisiografía o de relieve, así se habla de relaciones-suelo paisaje o de la posición que ocupa un suelo en el paisaje, considerándolo como uno de los factores ecológicos de formación del suelo; también como el aspecto que presenta el territorio. Ahora bien, con el desarrollo de la ciencia del paisaje, este término ha enriquecido su contenido. De manera que ha pasado a reflejar la realidad ambiental de un lugar, integrando tanto aspectos de medio (clima, suelos, geología, biología, entre otras), como los derivados de la acción antrópica (agronómicos, urbanísticos, sociales, económicos, políticos, entre otros). En tal sentido se habla de un paisaje tropical, un paisaje mediterráneo, un paisaje mediterráneo, entre otros muchos posibles. El enfoque actual ha permitido construir un edificio cognoscitivo que permite interpretar mejor la realidad territorial, de manera que el término paisaje expresa un concepto socioecológico (Folch y Paris, 1999).

MORFOLOGÍA DEL SITIO

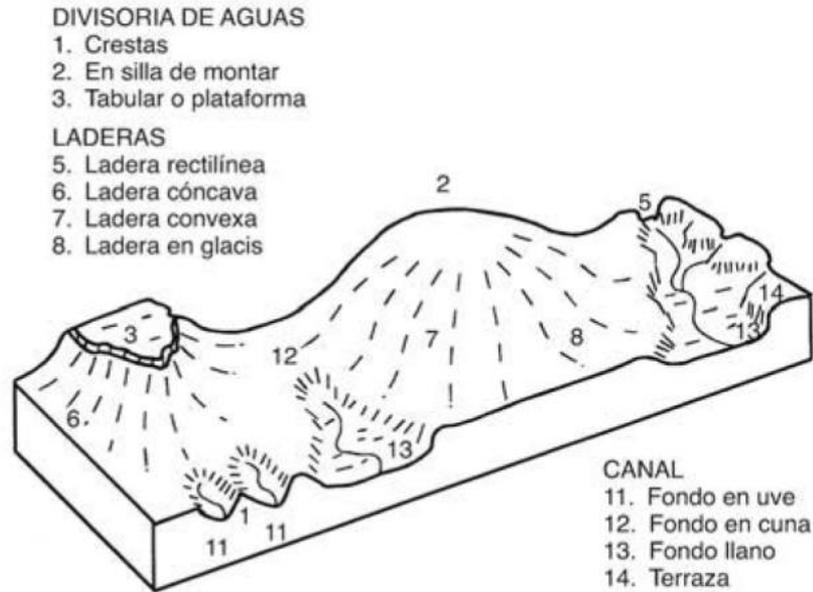
La división del relieve permite establecer los múltiples sitios de que se compone. Al describir un suelo se caracteriza la morfología del sitio el que se encuentra. La forma del sitio está relacionada de forma directa con la edafogénesis, constituyendo un factor ecológico de formación del suelo.

La fisiografía y el relieve controlan la **redistribución de masa** (materiales que pueden haber sufrido desplazamientos a lo largo del tiempo) y **del agua**, que fluye de los puntos más altos a los más bajos, con elementos en disolución y en suspensión. También controlan la **energía** que recibe la superficie del suelo, según sea su orientación; y la posición de las **capas freáticas**.

Por otro lado hay que tener en cuenta que las formas del terreno varían a lo largo del tiempo, principalmente por erosión de unas partes (superficies de erosión), el transporte en otras, y el depósito de materiales erosionados y recepción de flujos en otras. Esta evolución de las formas del relieve depende, entre otros factores, de los suelos existentes en ellas y éstos, a su vez, dependen de la forma en la que se encuentren. Además, hay que considerar las acciones antrópicas que inciden en la construcción del paisaje (cambios de cursos de agua, drenajes, nivelaciones, entre otras).

14.2. Estudio de la morfología del sitio

Una manera simplificada de describir la morfología del sitio o **formas del relieve** a escala detallada consiste en segmentarlo en tres elementos básicos: **divisoria de aguas, laderas y fondos**.

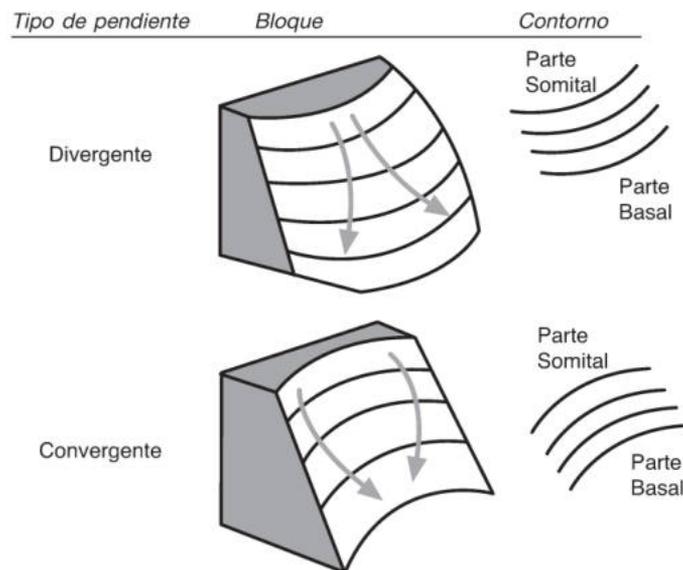


La **divisoria de aguas** es la línea imaginaria que delimita la zona de contribución de las aguas de lluvia a una determinada cuenca hidrográfica. Puede ser de diferentes tipos: crestas, en silla de montar y plataformas.

Las **plataformas** constituyen superficies estables, planas o prácticamente horizontales, en las que los procesos formadores pueden actuar de forma continuada a lo largo de mucho tiempo, con lo que la diferenciación de horizontes puede llegar a expresarse mejor, a igualdad de las demás condiciones.

Las **laderas** son superficies inclinadas, comprendidas entre una divisoria de aguas y un fondo. Al describirlas se atiende a:

- **Tipo de ladera**, que puede ser rectilínea, cóncava, convexa o en glacis. Se pueden diferenciar en simples y complejas. En este último caso, pueden presentar resaltes o rellanos.
- **Inclinación** o pendiente, que se expresa por el ángulo que forma la ladera con la horizontal o por la tangente de dicho ángulo, en cuyo caso se expresa en porcentaje.
- **Geometría**, que tiene en cuenta el tipo de ladera y el hecho de si es convergente, divergente o lineal (NRCS, 2006).



- **Orientación**, que determina la radiación solar recibida, pudiendo existir un efecto solana-umbría, según que la ladera esté orientada en el hemisferio norte, al sur (solana) o al norte (umbría).

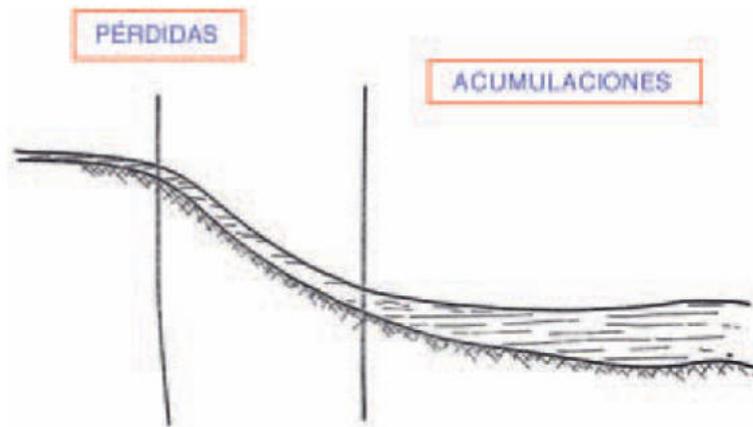
- **Longitud**, que determina, entre otros aspectos, el recorrido máximo del agua de lluvia no infiltrada (agua de escorrentía superficial) y, por consiguiente, el riesgo de erosión.
- Las **laderas** están integradas por tres elementos: parte proximal, central y distal.

La **parte superior**, también denominada somital o proximal es convexa. En climas áridos y semiáridos es muy susceptible a la erosión, por lo que los suelos estarán sometidos a un rejuvenecimiento. La **parte central** es rectilínea y suele ser una zona de tránsito de materiales y flujos. La **parte basal** o distal es cóncava y se trata de una superficie deposicional que se caracteriza por ser receptora de materiales (coluvios) y flujos. Dependiendo de la zona climática, cada uno de estos elementos adquiere un mayor o menor desarrollo. En zonas áridas y semiáridas predominan las laderas cóncavas, al estar más desarrollado el elemento basal.

Los suelos situados a lo largo de una ladera están relacionados funcionalmente, constituyendo una **toposecuencia**, que, en el caso de los suelos que se hayan formado a partir del mismo material originario, se denomina **catena**. Algunos autores utilizan ambos términos como sinónimos. Este *continuum* topográfico reconoce la continuidad de la humedad en un paisaje, por lo que las acciones en las partes altas tendrán incidencia en las partes bajas, pudiendo llegar a crear problemas en ellas.

Los **fondos** corresponden a posiciones topográficas más bajas que las circundantes. Pueden estar asociados a un canal de desagüe con un curso de agua, ya sea activo o bien seco, o puede tratarse de fondos cerrados, constituyendo en este caso depresiones endorreicas, es decir, sin un canal de salida de las aguas que reciben. Un fondo recibe flujos y materiales. Si los materiales proceden de las laderas circundantes se denominan **coluvios** y si han sido aportados por un curso de agua, **aluviones**, pudiendo existir una zona de imbricación de unos y otros.

En los fondos puede existir una **capa freática** poco profunda. En los fondos mal drenados de regiones húmedas el exceso de agua en los suelos da lugar a rasgos de hidromorfismo (colores grises, moteados), problemas de anoxia para las raíces (falta de oxígeno). Son suelos hidromorfos, denominados *Gley*^{WRB}, *Pseudogley*^{WRB} o suelos con condiciones ácuicas de *Soil Taxonomy*. En fondos húmedos de zonas frías se puede desarrollar una vegetación de musgos (*Sphagnum*) y llegar a formarse una turbera. En los fondos en zonas áridas y semiáridas, la capa freática de un fondo puede contener sales disueltas, dando lugar a procesos de salinización del suelo.



14.3. Drenaje: salida del agua del suelo

Debe evitarse confundir drenaje, término aplicado al suelo, con el drenaje de una ciudad para eliminar las aguas residuales o con permeabilidad o conductividad hidráulica del suelo.

DRENAJE

Expresa la facilidad con la que un suelo elimina el agua con relación a los aportes.

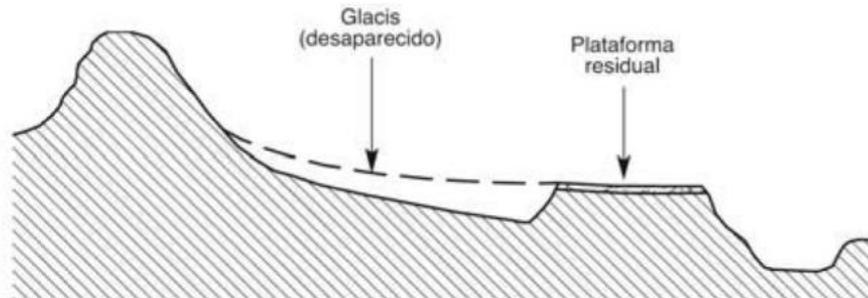
PERMEABILIDAD

Velocidad de circulación del agua dentro del suelo. Se mide y se expresa de forma cuantitativa como una velocidad y su ecuación de dimensiones es: $[LT^{-1}]$.

Para evaluar el grado de facilidad con que se elimina el agua de un suelo se han establecido diferentes **clases de drenaje**, utilizando criterios cualitativos basados en la morfología del perfil. Los suelos bien drenados tienen colores rojizos o parduzcos, mientras que aquellos que presentan un drenaje deficiente presentan rasgos redoximorfos: colores grises, verdosos y moteados debidos a la precipitación de óxidos de hierro y manganeso ligados a procesos redox, con condiciones anaerobias temporales o permanentes.

14.4. Interpretación de las formas del pasado

En muchos casos las formas actuales del terreno no se corresponde con aquellas que dieron lugar a la formación de suelo tal como lo observamos en la actualidad. Para poder llegar a entender sus características y unos procesos de formación que ya no son operativos en la actualidad, habrá que intentar reconstruir el relieve de la zona en el pasado.



En el ejemplo de la figura sería imposible entender las características de los suelos situados en la plataforma, si no se viese ésta como parte de una antigua superficie en glacis, actualmente separada del área madre de los materiales, por el encajamiento de la red de drenaje, que ha dado lugar a las formas actuales.

15. INTERPRETAR Y COMUNICAR

E3. Estudiar este edafopaisaje y redactar un informe.

- Describa las formas de este edafopaisaje.
- Interprete los usos actuales y las funciones de los suelos según la posición que ocupan en los distintos elementos del paisaje.
- Formule posibles interacciones entre los suelos de una toposecuencia en esta zona.



Edafopaisaje.

J. Porta

16. INTERPRETAR INFORMACIÓN

G2. Estudiar y discutir lo se que enuncia.

Como responsable de jardinería hizo adquirir una serie de macetas idénticas. Todas ellas se rellenaron con el mismo tipo de arena (mineralogía y tamaño de grano), que es un material que deja circular el agua con facilidad. Se plantaron con ejemplares de una misma variedad en buen estado sanitario y se regaron a lo largo de un mes, con agua de la misma calidad y dosis abundante, igual en todos los casos. Al cabo del mes una serie de plantas había muerto.

- Formule alguna hipótesis acerca de lo ocurrido, en relación con el agua aportada (en todos los casos la misma).
- ¿Al hablar de la arena a qué propiedad hidráulica se ha hecho referencia?

17. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Observar la fotografía y formular alguna hipótesis acerca del porqué de las diferencias en la distribución de la vegetación y sobre la incidencia que ello puede tener sobre las características de los suelos.



Valle del Ebro, España

J. Porta

18. ANALIZAR E INTERPRETAR INFORMACIÓN

A1. Analizar las distintas situaciones presentadas y elegir el término más adecuado según el contexto:

Los suelos situados a lo largo de una ladera pueden estar relacionados y por ello constituir una (1) *litosecuencia / toposecuencia*. En una posición de (2) *fondo / ladera* con pendientes pronunciadas, los suelos tienen un (3) *gran espesor / poco espesor*, debido a procesos de (4) *erosión / diferenciación de horizontes*. Al disminuir la inclinación de la ladera (5) *disminuirá / aumentará* la profundidad del suelo, por lo que los suelos situados en la parte basal serán (6) *más profundos / menos profundos*.

En algunos casos ha sido posible establecer una relación entre el espesor del suelo y la distancia a la divisoria de aguas, especialmente en laderas (7) *simples / complejas*, de manera que se puede afirmar que el espesor del suelo (8) *disminuye / aumenta* a lo largo de la ladera, si la pendiente de ésta se va haciendo más suave. Por ello, las posiciones más favorables para el crecimiento de un viñedo serán las correspondientes a las partes (9) *somiales / basales* de una ladera. Un flujo lateral hacia (10) *arriba / abajo* en una ladera puede transportar elementos en solución que irán a acumularse en los suelos situados en (11) *la parte somital / un fondo* que reciban tales flujos, pudiendo crear problemas según sea la naturaleza de lo movilizado. Este proceso puede verse (12) *aumentado / disminuido* si se riegan suelos situados en una plataforma que enlace con la parte (13) *proximal / basal* de la ladera.

19. FACTORES BIÓTICOS Y ANTRÓPICOS DE LA EDAFOGÉNESIS

La interacción entre los organismos vivos (plantas, animales y seres humanos) y el suelo resulta compleja y puede haber ido cambiando a lo largo de la edafogénesis, por ejemplo, por efecto de una deforestación o de un cambio de especie forestal. Las plantas superiores, la microflora (bacterias, hongos, actinomicetos, algas, líquenes), así como la mesofauna (mamíferos roedores, artrópodos, lombrices de tierra, entre otros), la microfauna (protozoos) y los seres humanos dan lugar a efectos directos e indirectos sobre la formación del suelo.

En la superficie de una roca dura, los líquenes (asociación simbiótica de un alga y un hongo) pueden actuar como colonizadores primarios, atacando la roca al estar adaptados a vivir en medios con nutrientes limitados, iniciándose de este modo un proceso de formación de suelo (pág. 21).

En otras situaciones menos extremas, la **vegetación** encuentra un medio más favorable para implantarse, aportando materia orgánica (hojas, raíces, ramas, troncos, etc.) al material originario, produciendo el oscurecimiento de la parte afectada por tales incorporaciones. La importancia del **efecto directo** dependerá de:

- **Tipo de vegetación**, según sea arbórea (caducifolia o perenne), herbácea o se trate de una zona cultivada o muy antropizada.
- **Cantidad y tipo** de materia orgánica aportada al suelo, que puede caracterizarse por el valor de la relación entre el contenido de carbono orgánico y el de nitrógeno: C/N. Cuanto mayor es su valor, más lenta será su descomposición, por falta de nitrógeno. Las coníferas y, en general aquellas plantas que producen restos orgánicos con altos contenidos en celulosa o en lignina tienen relaciones C/N altas, mientras las leguminosas y otras plantas herbáceas dan origen a materias orgánicas con C/N bajos.
- **Forma de incorporación** de la materia orgánica al suelo. Puede tener lugar en la superficie del suelo, como ocurre cuando la fuente es una masa arbórea, que aporta hojas y ramas. En este caso se forma un mantillo de restos orgánicos con distinto grado de descomposición encima del suelo mineral. El resultado es un horizonte O que, al descomponerse la materia orgánica, va dando lugar debajo a un horizonte A cuyo espesor irá aumentando con los años. Por el contrario, en el caso de una pradera, la materia orgánica se incorpora a partir de las raíces finas de fácil descomposición, dando lugar a un horizonte A de mayor espesor que en el caso del bosque.



Los aportes de materia orgánica por las raíces en una pradera oscurecen la parte superior del suelo. J. Porta

- **Actividad biológica**: los microorganismos intervienen en la descomposición, mineralización y evolución de la materia orgánica. Si el medio es ácido habrá un predominio de hongos frente a bacterias, que

se desarrollan mejor en medios básicos. Por ello la evolución de la materia orgánica variará de unos a otros suelos, según las condiciones de medio.

— **Productos resultantes** de la evolución de la materia orgánica en el suelo.

Por todo ello son de esperar grandes diferencias en el tipo y contenido de materia orgánica de unos suelos a otros a escala global. Para tener una idea del orden de magnitud, en zonas áridas habrá menos de un 1%, mientras que en prados puede haber un 8% y en turberas más de un 24%.

El **papel indirecto** de la vegetación en los procesos formadores se debe: a las **raíces**, que crean vías de circulación preferente de agua; a la **protección frente al impacto directo de las gotas de lluvia** sobre el suelo y del viento, evitando el desprendimiento de partículas y la erosión, que se ve favorecida en suelos desnudos; a que disminuye la **velocidad del viento**, efecto importante de las masas forestales, con lo que disminuye la evaporación; a la **respiración de las raíces**, con lo que aumenta el contenido de CO₂ del suelo, entre otros aspectos.

Con un enfoque mucho más detallado, se puede estudiar la influencia de una **planta aislada** (un árbol) sobre el suelo que tiene justo debajo de su copa. Se observan diferencias entre este suelo y el del área circundante que queda entre los árboles, en el sentido de que el contenido de materia orgánica, nutrientes y de humedad serán distintos, y otras plantas buscarán beneficios debajo de los árboles.

También habrá diferencias según sea la estructura arquitectónica del árbol, debido a la forma en que el agua percola. Así por ejemplo, en un haya, lo hace por el tronco (flujo cortical), mientras que en un abeto, el agua percola principalmente por la periferia del árbol.

La **fauna excavadora**, por su parte, tritura y mezcla materiales orgánicos, dando lugar a procesos de **bioturbación** en el suelo. Dependiendo de las condiciones ecológicas, habrá un predominio de unos organismos u otros en el suelo. Así, por ejemplo, las lombrices de tierra requieren medios básicos, no tolerando la acidez, de manera que por debajo de pH 5 serán muy escasas, mientras que en medios básicos serán muy eficaces en la mezcla de materiales orgánicos y minerales. Tras ingerirlos, los excretan como materia fecal estructurada y enriquecida en microorganismos. Por otro lado, crean gran cantidad de galerías que favorecen la aireación y el movimiento del agua.

Las actuaciones de los **seres humanos** sobre los suelos pueden tener efectos positivos (protección de los suelos) y negativos (aceleración de los procesos de degradación, contaminación, entre otros). La introducción de la agricultura en tiempos remotos, o en la actualidad la agricultura itinerante practicada por comunidades indígenas, ha provocado y provoca **cambios antropógenos** en el desarrollo de los suelos, pudiendo resultar irreversibles en una dimensión temporal a escala humana. Igualmente, una inadecuada asignación de usos al territorio puede hacer perder de forma irreversible suelos de alta calidad, como ocurre con el sellado de suelos por ocupación con infraestructuras, viviendas, industrias, entre otras. La mayor concienciación social de la necesidad de preservar los suelos frente a la degradación, en un marco de un desarrollo sustentable, ha hecho que la Unión Europea haya elaborado (CE, 2006) una **Directiva para la protección de los suelos**, que deberán cumplir los Estados miembros y muchos países se ocupen igualmente del tema.

20. EL SUELO COMO ELEMENTO DINÁMICO DE UN ECOSISTEMA: LOS CAMBIOS EN LOS SUELOS A LO LARGO DEL TIEMPO

20.1. Ámbito de los cambios en el suelo

Los cambios en el suelo presentan diferentes **escalas de tiempo**. Algunas propiedades y características cambian de forma significativa:

- **A lo largo del día**: como por ejemplo la temperatura de la superficie del suelo, el contenido de anhídrido carbónico, la actividad biológica, entre otros.
- **A lo largo del año**: como el contenido de humedad del suelo en distintas estaciones del año, la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad, el contenido de sales solubles a diferentes profundidades, entre otros.
- **A lo largo de años, decenios o siglos**: debido a factores antrópicos ligados al uso y manejo del suelo, como puede ser la agricultura, las transformaciones en regadío, el aporte continuado de camas de ganado,

entre otras; o derivadas del uso del territorio para implantaciones urbanas, entre otros. Algunos de estos cambios pueden tener efectos positivos, como ha sido la construcción de bancales, el ganar tierras al mar para su puesta en cultivo o el estercolado durante siglos. En otros casos han provocado procesos regresivos acelerados, conducentes a la degradación de los suelos, como por ejemplo, la pérdida de suelo por erosión en unos pocos años, la transformación de un bosque a una zona de sabana o la salinización de perímetros regados mal gestionados. Este tipo de cambios afectan a las funciones del suelo a escala humana.

- **A lo largo de miles de años:** esta dimensión temporal muy dilatada es a la que se hace referencia cuando se habla del tiempo como factor formador del suelo. En este caso los cambios resultan imperceptibles a escala humana. Por ejemplo, la diferenciación de horizontes en un suelo.

20.2. Edad del suelo y duración ecológica

Cabe distinguir entre la edad de un suelo y su grado de desarrollo.

EL TIEMPO COMO FACTOR FORMADOR: EDAD DE UN SUELO

La edad de un suelo expresa el tiempo (años) transcurrido desde el momento cero y el momento actual. Esta **edad cronológica** está relacionada con la edad de la superficie geomorfológica sobre la que se desarrolla el suelo considerado, y no con la edad del material geológico a partir del cual se ha formado dicho suelo.

DURACIÓN ECOLÓGICA: GRADO DE DESARROLLO

La duración ecológica hace referencia al intervalo de tiempo durante el cual un proceso formador ha sido activo, hasta alcanzar un estadio de equilibrio dinámico con las condiciones de medio imperantes. Mientras dichas condiciones no cambien, el proceso dejará de progresar, a pesar de que el tiempo siga transcurriendo, por lo que la edad del suelo seguirá aumentando. El **grado de desarrollo** se identifica investigando caracteres morfológicos.

La **tasa de formación de un suelo** expresa la cantidad de suelo generado a partir de un material originario en un determinado tiempo. Conocer su valor resulta difícil, si bien tiene interés para poder acotar la pérdida de suelo máxima aceptable por erosión (**pérdida tolerable** de suelo), sin que llegue a degradarse el recurso, ya que la formación del suelo compensa, en este caso, las pérdidas por erosión.

SUELOS MONOGENÉTICOS O MONOCÍCLICOS

Los suelos recientes son **monogénicos** o **monocíclicos**, ya que se han formado bajo unas condiciones relativamente uniformes, muy semejantes a las actuales, en concreto en lo referente al clima. Por ejemplo, los suelos formados tras una erupción volcánica, tras el depósito de materiales por un río, o tras la retirada de los glaciares, entre otros.

SUELOS POLIGÉNICOS O POLICÍCLICOS

Son aquellos suelos que han seguido por lo menos dos ciclos de desarrollo consecutivos al haber cambiado las condiciones de medio, en especial las condiciones de clima que han sido diferentes a las actuales. Por ello el suelo puede presentar características debidas al clima actual y otras derivadas de condiciones del pasado, es decir, heredadas o relictas.

Un cambio gradual en las condiciones ambientales, por ejemplo, de un clima húmedo a otro progresivamente más seco, o un incremento en las temperaturas, pueden afectar al desarrollo de suelos preexistentes en una zona. Pueden transformarse gradualmente en unos suelos distintos, conservando algunos caracteres, como podría ser un contenido alto de materia orgánica en el horizonte de superficie, A, muy superior al que sería esperable con el clima y vegetación actuales. Cuando el modelo de factores formadores se prolongue suficientemente en el tiempo, se producirán cambios en la morfología de los suelos y quedarán registrados en él como indicadores de condiciones distintas a las del pasado.

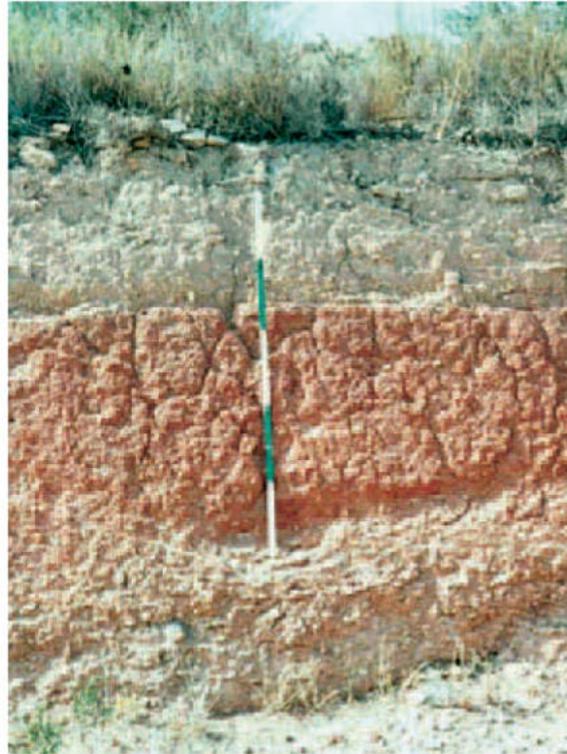
PALEOSUELOS

Los **paleosuelos** son suelos de edafogénesis antigua, formados en paisajes del pasado, bajo unas condiciones, principalmente climáticas, diferentes a las actuales, y que conservan constituyentes y morfologías ligadas a las condiciones pasadas.

Los **suelos fósiles** son paleosuelos enterrados por depósitos más recientes y que no se ven afectados por procesos edafogénicos actuales.

SUELO ENTERRADO

Un **suelo enterrado** es aquel que ha sido recubierto por una capa de material aportado, cuyo espesor sea de por lo menos 50 centímetros.

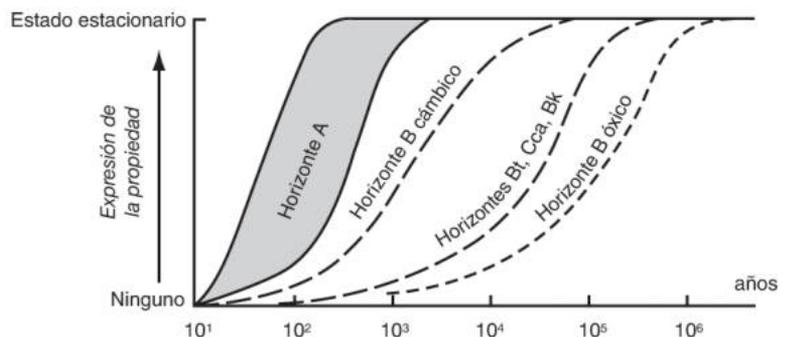


*Paleosuelo: Secuencia de horizontes: A B_k 2B_t 2B_k.
Almería, España. J. Porta*

21. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. 1. De acuerdo con la información de la figura (Birkeland, 1999):

- Indicar cuál ha sido la duración ecológica mínima y máxima de los procesos conducentes a la formación de un horizonte A, que es el que se origina en la superficie del suelo y cuyo color oscuro se debe a la materia orgánica que contiene.
- ¿La edad del suelo será necesariamente mayor o menor que la duración ecológica de uno de los rasgos de un suelo?



2. Observar la imagen e inferir ante qué situación nos encontramos



Girona, España.

J. Porta – N. Teixidor

22. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. De acuerdo con el contexto, seleccionar el término más idóneo de entre los propuestos:

Los cambios climáticos son siempre (1) _____, por lo que resultará (2) _____ fijar el momento cero de la transformación de un suelo preexistente en otro. Por el contrario, una erupción volcánica puede considerarse un suceso (3) _____, de manera que, si ha tenido lugar en época histórica, se podrá datar con toda precisión. En este caso, en zonas húmedas el desarrollo de los suelos a partir de cenizas volcánicas (lapilli (ital. piedras pequeñas) o picón) depositadas desde el aire tendrá una escala de tiempo relativamente (4) _____, por tratarse de un material (5) _____ y muy (6) _____, con una superficie específica (m^2g^{-1}) (7) _____, favoreciendo el contacto con el agua y por ello la desagregación de la roca. Lo contrario ocurrirá en el caso de las coladas basálticas, a pesar de tratarse igualmente de una roca (8) _____. La colonización de estos materiales por la vegetación supondrá un cambio importante (9) _____. Con ello se inicia la diferenciación del perfil en horizontes, formándose un horizonte (10) _____ caracterizado por (11) _____. Los suelos previamente existentes en la zona pasarán a ser suelos (12) _____. En el caso en que haya formas del paisaje semejantes, pero que correspondan a erupciones en distintos momentos, los suelos que sólo se diferencien por este factor constituirán una (13) _____.

- | | | | | |
|------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| (1) | a) frecuentes | b) graduales | c) instantáneos | d) constantes |
| (2) | a) fácil | b) posible | c) interesante | d) difícil |
| (3) | a) temporal | b) catastrófico | c) del pasado | d) reciente |
| (4) | a) lenta | b) rápida | c) uniforme | d) constante |
| (5) | a) compacto | b) joven | c) muy poroso | d) de color negro |
| (6) | a) fragmentado | b) reciente | c) agrietado | d) resistente |
| (7) | a) muy baja | b) muy ancha | c) muy alta | d) larga |
| (8) | a) metamórfica | b) extrusiva | c) sedimentaria | d) ígnea |
| (9) | a) paisajístico | b) económico | c) de color | d) por aporte de m.o. |
| (10) | a) A | b) O | c) inicial | d) edáfico |
| (11) | a) su color | b) su oscurecimiento | c) poco espesor | d) gran espesor |
| (12) | a) enterrados | b) policíclicos | c) paleosuelos | d) fósiles |
| (13) | a) litosecuencia | b) toposecuencia | c) climosecuencia | d) cronosecuencia |

23. TEMAS PARA EL DEBATE

E3. Estudiar los siguientes temas y preparar un debate.

- Teniendo en cuenta que la precipitación favorece el crecimiento de la vegetación y que en zonas intertropicales húmedas puede haber además elevadas temperaturas, discutir las posibles diferencias en la aportación de m.o. al suelo y su acumulación, en relación con lo que ocurrirá en una zona templada húmeda.
- Se suele afirmar que, a igualdad de las demás condiciones, los suelos más jóvenes suelen ser menos profundos que los más viejos. Discutir la validez de esta afirmación en el caso de suelos formados a partir de una roca dura y los formados en una llanura aluvial.
- Discutir qué importancia tendrá la escala temporal de cambio de una propiedad del suelo para plantear correctamente un estudio de suelos, su muestreo e interpretación de resultados. Considerar algún ejemplo.
- A partir de los resultados de una investigación para datar los suelos de una región, resulta posible comparar suelos de edades semejantes. Discutir y justificar si estos suelos deberán presentar el mismo grado de desarrollo.

24. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Estudiar esta imagen.

- Describa con sus propias palabras las formas de este edafopaisaje.
- ¿Se pueden identificar algunas de las rocas que lo integran?
- ¿Qué riesgos medioambientales pueden presentar las distintas formas descritas?



Puebla, Mx.

J. Porta

25. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

- A1.** Identificar un mínimo de 15 términos referentes a los factores ecológicos de formación del suelo. Crear un esquema conceptual con ellos.

r	d	o	k	u	c	f	a	i	e	v	b	t
n	o	i	d	m	l	o	i	n	p	l	a	o
o	s	v	a	l	i	n	g	o	e	c	s	p
i	p	u	t	l	m	d	o	i	r	a	a	o
c	a	l	a	a	a	o	l	c	c	l	l	s
a	l	o	c	c	o	n	o	a	o	c	t	e
n	e	c	i	i	a	o	f	b	l	i	o	c
o	o	s	o	m	c	a	r	r	a	c	t	u
z	s	s	n	o	i	n	o	u	n	o	i	e
i	u	y	n	s	f	a	m	t	t	l	n	n
r	e	b	a	s	a	l	o	o	e	a	a	c
o	l	i	m	o	m	o	e	i	s	o	r	i
h	o	l	o	c	e	s	g	b	i	o	g	a

26. RELACIONES ESENCIALES

- A1.** Establecer relaciones entre ambas columnas:

- | | |
|---|---|
| 1. Basalto | |
| 2. Rocas ácidas | |
| 3. Régimen de humedad xérico (no percolante) | a. Tendencia a formar suelos pedregosos, poco profundos. Función: producción de masas forestales |
| 4. Interfluvio | b. Facilidad con que un suelo deja salir el agua en relación a los aportes |
| 5. Gabro | c. pH menor de 7.0 (ácido) |
| 6. Divisoria de aguas | d. Suelos neutros o básicos. Sin sequías ni heladas |
| 7. Drenaje | e. Línea que delimita una cuenca hidrográfica |
| 8. Roca caliza dura | f. Roca ígnea félsica, caracterizada por un contenido en sílice (SiO ₂) superior a un 66% |
| 9. Régimen de humedad údico (percolante) | g. Lluvias en otoño y primavera. Región mediterránea |
| 10. Cuesta | h. Velocidad de circulación del agua en un suelo |
| 11. Hábitat más favorable para las lombrices de tierra: <i>Lumbricus terrestris</i> | i. Suelos de regiones áridas y semiáridas |
| 12. Presencia de caliza o de yeso en un suelo | |

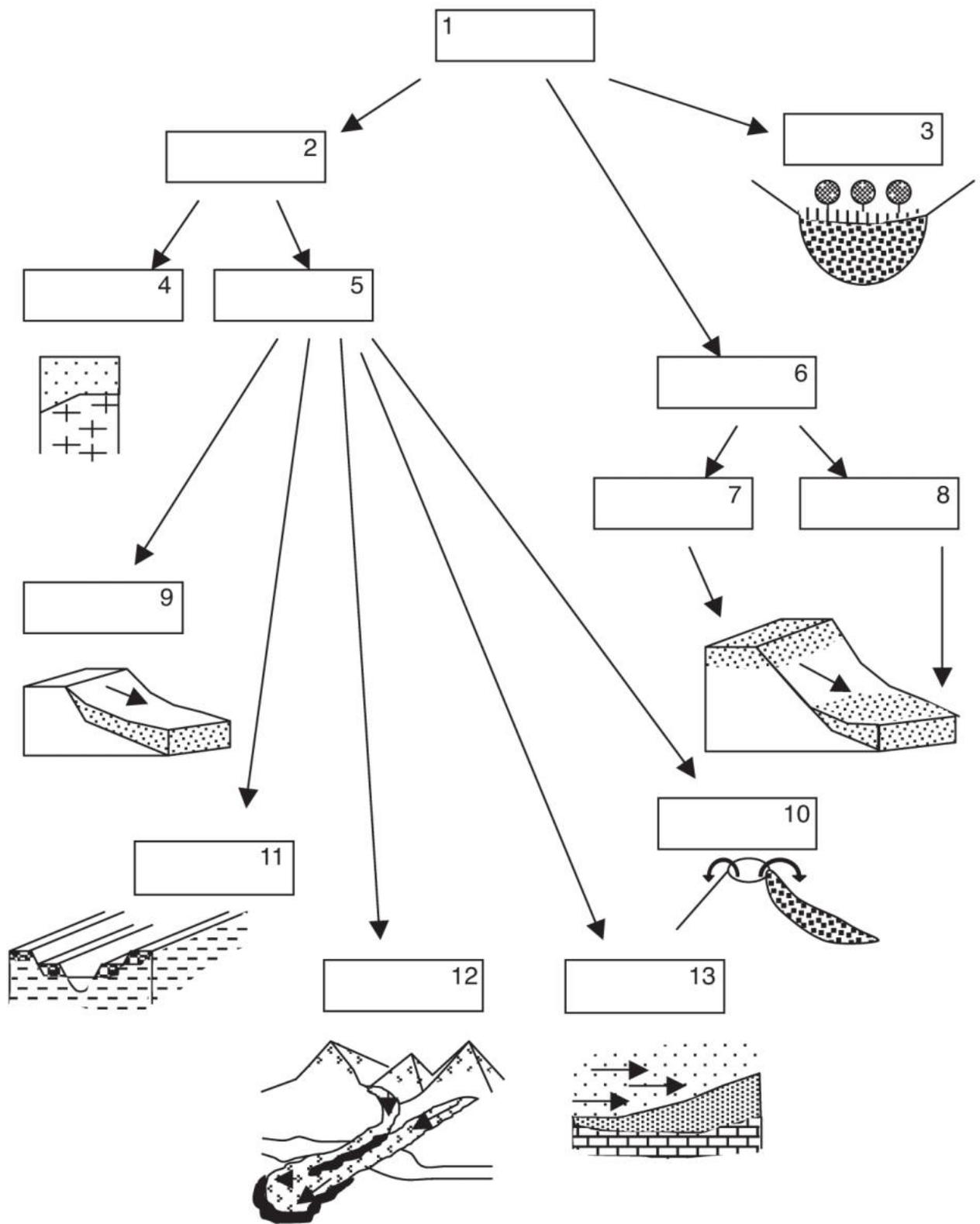
27. INTERPRETAR Y COMUNICAR

- E3.** A partir de los factores ecológicos de formación predominantes en los suelos de la zona en que nos encontramos, inferir que características son esperables en los suelos. Redactar un informe y preparar una presentación en público.

28. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

- G2.** Completar el esquema conceptual de la página siguiente, utilizando los siguientes términos:

material preedafizado / material eólico / material aluvial / suelo orgánico / material parental / material autóctono / material alóctono / material volcánico / till / suelo mineral / material coluvial / material autóctono / suelo mineral



29. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Una vez revisado lo explicado en clase y los contenidos de esta Unidad, seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos.

Lo que orienta y controla la génesis de suelos o edafogénesis y su intensidad son (1) _____ formadores, que determina el estado del suelo como sistema en un momento determinado. Los factores formadores son: el material originario, el clima, (2) _____, los organismos vivos y (3) _____. La edafogénesis será (4) _____ intensa cuanto más baja sea la temperatura media anual, de acuerdo con la ley de Arrhenius. En el paisaje hay un continuum en la humedad, de manera que los suelos que forman parte de una (5) _____ están funcionalmente relacionados, de manera que los que ocupan zonas bajas se verán influenciados por las actuaciones en las partes altas. El suelo es un sistema (6) _____ con una variabilidad (7) _____ muy grande. La teoría general de la edafogénesis permite explicar (8) _____ la variabilidad de los suelos, ya que las propiedades y modos de funcionamiento de la cubierta edáfica siguen el principio causal, de acuerdo con el cual se puede formular: factores → (9) _____ → caracteres del suelo. La ecuación general de la edafogénesis supone que los suelos son (10) _____ y los parámetros considerados son variables (11) _____. Este enfoque en edafogénesis se denomina de caja (12) _____.

La corteza terrestre está constituida mayoritariamente por rocas ígneas, principalmente (13) _____ (intrusiva) y (14) _____ (volcánica). No obstante, los suelos se desarrollan mayoritariamente a partir de rocas sedimentarias y formaciones superficiales, entre ellas (15) _____ y (16) _____, ya que éstas recubren del orden del 75% de la superficie terrestre. Los afloramientos de rocas (17) _____, también resultan minoritarios a escala global.

- | | | | | |
|------|-------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| (1) | a) procesos | b) factores | c) agentes | d) elementos |
| (2) | a) el relieve | b) la erosión | c) roca madre | d) las plantas |
| (3) | a) tiempo | b) el relieve | c) material parental | d) la fauna |
| (4) | a) más | b) poco | c) muy | d) igual de |
| (5) | a) climosecuencia | b) cronosecuencia | c) toposecuencia | d) litosecuencia |
| (6) | a) estático | b) estable | c) natural | d) dinámico |
| (7) | a) espacial | b) espacio-temporal | c) temporal | d) superficial |
| (8) | a) siempre | b) con claridad | c) generalmente | d) a veces |
| (9) | a) inputs | b) salidas | c) entradas | d) procesos |
| (10) | a) monocíclicos | b) policíclicos | c) viejos | d) poligénicos |
| (11) | a) dependientes | b) independientes | c) aleatorias | d) temporales |
| (12) | a) abierta | b) gris | c) negra | d) blanca |
| (13) | a) granito | b) basalto | b) calizas | d) esquistos |
| (14) | a) granito | b) basalto | b) calizas | d) esquistos |
| (15) | a) granito | b) calizas | c) mármol | d) gabro |
| (16) | a) lutitas | b) riolita | c) pizarras | d) areniscas |
| (17) | a) metamórficas | b) eruptivas | c) plutónicas | d) volcánicas |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Proporcionar unas bases sobre rocas y minerales en que fundamentar los estudios de suelos.

ESQUEMA

Minerales y rocas.

Principales minerales en los suelos.

Ciclo de las rocas. Materiales originarios: tipos de rocas.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de campo de suelos*. Cap. 3. Materiales originarios. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 2005.

Klein, C. y Hurlbut, C.S.: *Manual de Mineralogía*. Ed. Reverté, S. A. 368 pp. Barcelona, 2001.

Riba, O. (Dir.): *Diccionari de Geologia*. Institut d'Estudis Catalans. Enciclopedia Catalana. Barcelona, 1997

Schumann, W. *Guía de rocas y minerales*. Omega. Barcelona, 2004.

Internet: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés/Enlaces de interés
www.brgm.fr

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

Revise el texto de ciencias naturales o de geología que haya estudiado previamente.

2. MINERALES Y ROCAS

MINERAL

Es un sólido, de origen natural, homogéneo, de composición química definida, estructura atómica ordenada y de origen inorgánico. Esto significa:

Sólido: en estado sólido, excepto en el caso del mercurio y el petróleo.

Origen natural: se excluyen las sustancias de síntesis.

Homogéneo: por ningún método físico de separación, tal como la disolución, destilación fraccionada u otros, es posible aislar compuestos más simples.

Composición química definida: las variaciones de composición dentro de un cierto intervalo se deben a la existencia de soluciones sólidas dentro de un mineral. Ejemplo: serie del olivino $(Mg,Fe)_2SiO_4$.

Estructura atómica ordenada: a veces se manifiesta por una forma cristalina macroscópica (cristales).

Origen inorgánico: Existen unas pocas excepciones, tales como la calcita biogénica, los fosfatos, el nitrato sódico y los oxalatos.

MINERALES IMPORTANTES EN LOS SUELOS

Silicatos:

- Minerales de arcilla (filosilicatos): caolinita, halloisita, ilita, montmorillonita, vermiculita, clorita, entre otros.
- Cuarzo (SiO_2) (tectosilicato): muy estable y resistente a la meteorización.
- Micas (filosilicatos): moscovita y biotita.
- Anfíboles (hornblenda) y piroxenos (augita) (inosilicatos).
- Feldespatos (tectosilicatos): ortosa (Ft-K), albita (Ft-Na), plagioclasa (Ft-Ca-Na).

Carbonatos: calcita ($CaCO_3$), dolomita $CaMg(CO_3)_2$.

Oxidos: goetita (α - $FeOOH$), hematita (Fe_2O_3).

Sulfatos: yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), tenardita (Na_2SO_4), mirabilita ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$).

Otros minerales: gibbsita $Al(OH)_3$, apatito (P), turmalina (B), pirolusita (Mn), zircón (Zr).

3. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

Buscar en Internet y en la bibliografía existente en la biblioteca el significado de los siguientes términos referidos a un mineral: escala de Mohs, raya, relieve, color, hábito, exfoliación, fractura, maclas.

4. DENOMINACIÓN DE LOS MINERALES Y CLASES MINERALÓGICAS

Los minerales por lo general tienen un nombre acabado en *ita*, añadido a palabras griegas o latinas que hacen referencia a sus características: albita (de *albus* = blanco); a su composición química: calcita (carbonato cálcico). La terminación *clasa* hace referencia a la exfoliación: ortoclasa (también denominada ortosa). Dado que estos criterios permiten diferenciar pocos minerales, al tener que dar nuevos nombres se ha recurrido a nombres de científicos, propietarios de minas, políticos y al lugar donde se encontró por primera vez el mineral: montmorillonita (Montmorillon, Francia), jarosita (Mina La Jarosa, Jaén, España), goetita (goethe), schwertmanita (Schwertmann).

Los minerales se clasifican agrupándolos según la naturaleza de su grupo aniónico, si bien también se tiene en cuenta la estructura cristalina. Se han establecido ocho clases, algunas de las cuales no tiene interés en Edafología, ya que no incluyen minerales petrogenéticos. Los minerales que se pueden encontrar en los suelos son:

Clase mineralógica	Ejemplos con importancia en Edafología	
I. Elementos nativos		
II. Sulfuros	Pirita (FeS ₂)	En medios reducidos, suelos inundados permanentemente
III. Óxidos e hidróxidos	Hematita: Fe ₂ O ₃ Lepidocrocita: FeO(OH) Goetita: FeOOH Rutilo: TiO ₂ Pirolusita: MnO ₂ Brucita: Mg(OH) ₂ Gibbsita: Al(OH) ₃	Muy abundantes en el suelo. Los óxidos de Fe colorean al suelo.
IV. Halogenuros	Halita: NaCl	Suelos salinos
V. Carbonatos, nitratos, boratos y yodatos	Calcita: CaCO ₃ Magnesita: MgCO ₃ Dolomita: CaMg(CO ₃) ₂ Nitrato: NaNO ₃ Bórax: Na ₂ B ₄ O ₅ (OH) ₄ ·8H ₂ O	Suelos calizos Abono Fuente de boro
VI. Sulfatos, cromatos, molibdatos y wolframatos	Celestita: SrSO ₄ Anhidrita: CaSO ₄ Yeso: CaSO ₄ ·2H ₂ O Jarosita: KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Suelos yesosos Suelos de sulfatos ácidos
VII. Fosfatos, arseniados y vanadatos	Vivianita: Fe ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O Serie del apatito: Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	No abundan pero son una fuente importante de fósforo
VIII. Silicatos	TECTOSILICATOS: Grupo de la sílice: Cuarzo: SiO ₂ Ópalo: SiO ₂ ·nH ₂ O Grupo de los feldespatos Ortosa Albita Plagioclasa Grupo de los feldespatoides Grupo de las zeolitas	Son los más importantes en el suelo por su abundancia y por las propiedades que le confieren. Abunda en la arena. Muy resistente a la meteorización. Forma caolinita al meteorizarse Proporciona sodio Proporciona calcio y sodio
	FILOSILICATOS: Minerales de arcilla Grupo de las micas: biotita y moscovita	De gran importancia en los suelos Liberan potasio. La biotita se meteoriza más rápidamente. Forman arcillas al meteorizarse
	INOSILICATOS: Anfiboles: Hornblenda Piroxenos: Augita	Fácilmente meteorizables: liberan Ca, Mg, Na y Fe.
	CICLOSILICATOS: Berilo Turmalina Grupo de la epidota	Libera boro
	NESOLISILICATOS: Serie del Olivino Circón	Altamente meteorizable Muy resistente a la meteorización, por lo que se puede utilizar como índice de la edad de un suelo: acumulación relativa en suelos con un grado de desarrollo muy avanzado.

Las clases mineralógicas se subdividen en **subclases**, éstas en **grupos** y éstos en **especies** o en **series** minerales, existiendo además las **subespecies** y las **variedades**. Cada especie mineral se designa con un solo nombre y no con dos, como en la taxonomía botánica propuesta por Linneo y que sigue vigente.

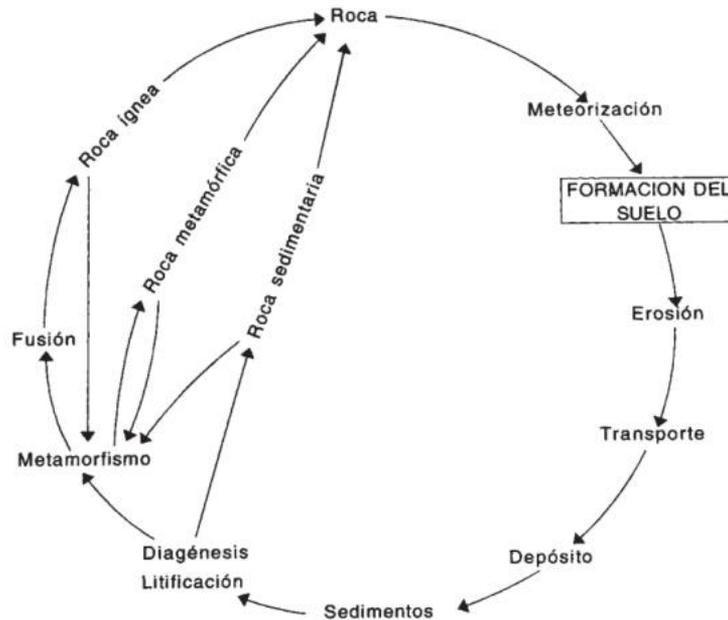
5. PRINCIPALES MINERALES

Los principales minerales en el estudio de los suelos son los que se indican, de los que se podrá encontrar información en Internet, entre otras en la siguiente web:

http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/casado/GERED/Comienzo.htm (verificada en 2007)

Albita	Glauconita	Oligisto
Anfibol	Goetita	Olivino
Apatito	Hematita	Ortosa
Augita	Hornblenda	Pirita
Biotita	Ilita	Pirolusita
Calcita	Ilmenita	Piroxeno
Caolinita	Jarosita	Plagioclasa
Clorita	Magnetita	Rutilo
Cuarzo	Micas	Turmalina
Esmeclita	Microclina	Vermiculita
Feldespato	Montmorillonita	Zircón, circón
Gibsitita	Moscovita	

6. CICLO DE LAS ROCAS



7. MATERIALES ORIGINARIOS: TIPOS DE ROCAS

ROCA

Material que constituye la corteza terrestre, de origen natural, en estado sólido, formado generalmente por una asociación de minerales (existen rocas monominerales, p.e. yeso, mármol, etc.). Su composición presenta una cierta homogeneidad estadística, aun cuando sea heterogénea en el detalle.

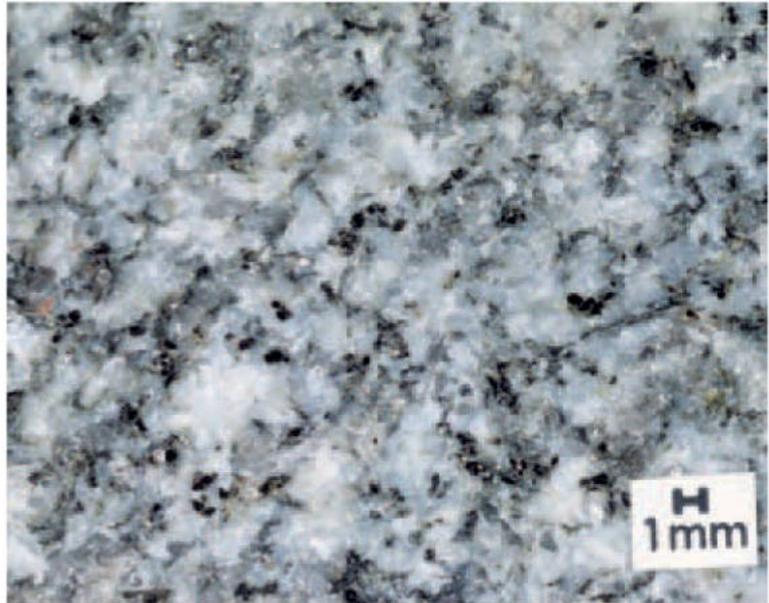
Rocas ígneas

Rocas formadas por enfriamiento y solidificación de un magma, lo que puede tener lugar muy lentamente en el interior de la litosfera, dando lugar a las rocas **ígneas = intrusivas = plutónicas**.

Si el magma solidifica de forma súbita en la superficie terrestre, se forman rocas **ígneas extrusivas (= volcánicas)**.

También pueden formarse en diques y cavidades cerca de la superficie, originando rocas **filonianas y pegmatitas**.

La composición porcentual de una roca se expresa en forma de óxidos, lo que no significa que éstos existan como tales en ella. La acidez de una roca hace referencia al contenido de silicio de la roca, expresado en forma de sílice (SiO_2) y no se refiere al pH de la roca, ni al de los suelos que puedan formarse a partir de ella.



Roca ígnea intrusiva: Granito, muestra de mano. Se pueden observar los granos de gran tamaño de los minerales debido a un enfriamiento lento: cuarzo (translúcido), plagioclasa (Ft-Ca-Na) (blanco) y minerales accesorios (mica): 50% Ftos, 30% Q, 20% minerales ferromagnesianos. Cortesía C. Dorronsoro



Roca ígnea extrusiva o volcánica: No se observan granos minerales a simple vista. Se aprecia una gran cantidad de cavidades debidas a una desgasificación rápida al haberse enfriado el magma muy rápidamente en superficie. J. Porta

Rocas metamórficas

Rocas formadas a partir de una roca preexistente (ígneas, metamórficas o sedimentarias) que ha sufrido cambios químicos, mineralógicos y estructurales en estado sólido, debido a elevadas temperaturas, presiones o a ambas. En estas condiciones termodinámicas los minerales preexistentes no serían estables, por lo que tiene lugar una reorganización y recristalización, que da origen a minerales más estables. Al ser característicos del metamorfismo, la presencia de estos minerales permite distinguir una roca metamórfica de una sedimentaria, en caso de duda.

Las areniscas al metamorfizarse dan lugar a cuarcitas, las arcillitas a esquistos y los granitos a gneissos.



Roca metamórfica foliada: Esquisto con segregaciones de hierro y manganeso en las superficies de las láminas.

J. Porta.

Rocas sedimentarias

Rocas formadas en la superficie de la corteza terrestre que resultan de:

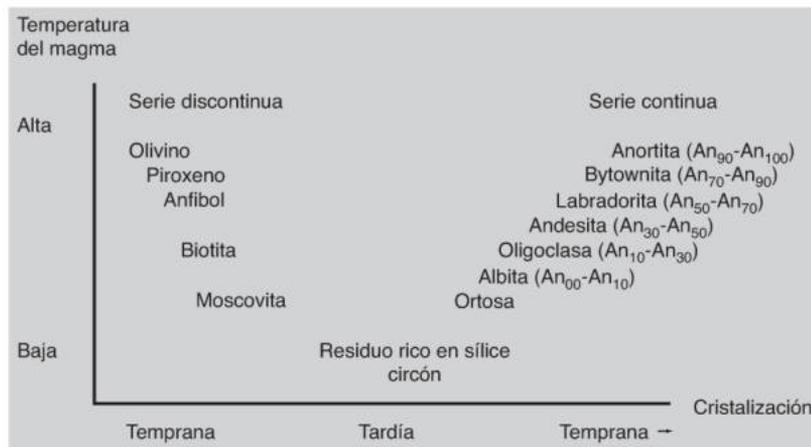
- Una acumulación de fragmentos o de granos de diversos tamaños (clastos) y posteriores procesos de litificación. Se denominan rocas detríticas, terrígenas o clásticas. Ejemplos: conglomerados, areniscas, lutitas, entre otras.
- Una precipitación química de sustancias en solución, que tiene lugar en la propia cuenca, por actividad química o por evaporación. Ejemplos: calizas ortoquímicas, yeso, halita, entre otras. Rocas no terrígenas.
- Una cementación de elementos calizos (pelets, oolitos, nódulos, fósiles, etc.), formados en la propia cuenca, pero que han sufrido un cierto transporte antes de su cementación por carbonato cálcico. Se denominan calizas aloquímicas. Ejemplo: rocas carbonatadas fosilíferas. Rocas no terrígenas.
- La acumulación de restos orgánicos: turbas y carbones.



Roca sedimentaria: Calcilita. Grano de tamaño limo y arcilla y con calcita.
J. Porta.

8. ROCAS ÍGNEAS

El enfriamiento progresivo y lento de un magma da lugar a una cristalización fraccionada, origen de distintos minerales, en función del tipo de magma y de la temperatura de cristalización, que forman una sucesión de minerales (Serie de Bowen). La roca ígnea resultante es función de la composición química del magma y de la tasa de enfriamiento. Para un magma de composición basáltica, la secuencia de cristalización es la siguiente:



Las Series de Bowen se corresponden con la susceptibilidad a la meteorización, de manera que las rocas formadas por minerales de alta presión y temperatura se meteorizan antes, por ello difícilmente se encontrarán en los suelos. Así por ejemplo, el olivino no se encontrará en la fracción arena de los suelos, en la que por el contrario abundará el cuarzo.

Tipo de roca ígnea según su composición	Composición expresada en porcentaje de sílice (SiO ₂)	Rocas representativas	
		Plutónicas o volcánicas	Volcánicas extrusivas
Félsica o ácida	> 66	Granito	Riolita
Intermedia	52-66	Diorita	Andesita
Máfica	45-52	Gabro	Basalto
Ultramáfica o ultrabásica	< 45	Peridotita	Komatiíta

Los minerales que cristalizan primero (olivino) lo hacen en un fluido, por lo que pueden adquirir forma propia (minerales idiomórficos, forma propia), mientras que los del final del proceso vienen a rellenar los huecos dejados por los primeros, por lo que toman la forma de los huecos. Un enfriamiento lento, característico de las rocas intrusivas, permite un gran crecimiento de los cristales, dando lugar a rocas de grano grueso, visible a ojo desnudo (p.ej. granito). Con un enfriamiento rápido, típico de las rocas extrusivas, los granos serán muy finos o microcristalinos, no siendo perceptibles a simple vista (p. ej., basalto).

Cabe indicar que para referirse de forma genérica a una roca del tipo del granito se habla de granitoide. La composición promedio de las rocas ígneas (Sopher y Baird, 1978) es la siguiente:

Roca	Componentes minerales
Granito y riolita	50% feldespatos 30% cuarzo 20% minerales ferromagnesianos
Basalto y gabro	50% feldespatos 50% minerales ferromagnesianos
Diorita y andesita	75% feldespatos 25% minerales ferromagnesianos
Obsidiana	60% feldespatos 30% cuarzo 10% minerales ferromagnesianos

9. ROCAS METAMÓRFICAS

Tipos	Rocas representativas
Foliadas (esquistosas, en láminas)	Pizarras Filitas Esquistos Gneis
No foliadas (homogéneas o macizas)	Cuarcita Mármol

Existen además, las corneanas, los metaconglomerados, las serpentinas y las tactitas.



Crestón formado por cuarcitas, roca metamórfica muy resistente a la meteorización. J. Porta

10. ROCAS SEDIMENTARIAS

Grupo	Tamaño partícula mm	Clase	Sedimento	Rocas representativas
Rocas terrígenas, detríticas o clásticas	2-256	Ruditas	Bloques Cantos	Conglomerado: partículas redondeadas Brecha: partículas angulosas
	1/16-2	Arenitas	Arena	Areniscas
	1/256-1/16	Lutitas	Limo Arcilla	Limolitas Arcillitas
Rocas no terrígenas	Rocas carbonatadas: Calizas: CaCO_3 Dolomías: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ Evaporíticas Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Halita: NaCl Tenardita: Na_2SO_4 Mirabilita: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Carbón: turbas, lignito, hulla y antracita			

Existen además, las arcosas, las calcilitas, la carnalita, la creta, las grauvacas, entre otras.



Yeso: Roca sedimentaria evaporítica. Se raya con la uña.

J. Porta

11. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

11.1. Completar el texto con los términos que correspondan:

Al estudiar el perfil de un suelo evolucionado se pueden identificar (1) _____ que, a pesar de que puedan parecer iguales o semejantes, no deben confundirse con los estratos o capas que caracterizan una roca (2) *sedimentaria / ígnea / metamórfica*. Los primeros son debidos a procesos (3) _____ que actúan en el conjunto de un (4) _____, mientras que los estratos son el resultado del depósito de materiales transportados, generalmente por el agua y su posterior litificación. Por consiguiente, la estratificación consiste en una superposición de materiales diferentes, depositados por orden cronológico riguroso, de manera que los más antiguos serán los de la parte (5) *superior / inferior* si no han sido plegados. Los trastornos tectónicos pueden plegar los estratos y cambiar la posición, pero existen criterios para determinar la polaridad de los estratos (por ejemplo, la existencia de gradación granulométrica dentro del estrato) e identificar cuál es la superficie que estaba en la base y cual en la parte superior en el momento de la formación. Este criterio estratigráfico (6) *es / no es* aplicable en el caso de los suelos.

- 11.2.** Desde el punto de vista de la edafogénesis, una de las características importantes de un mineral del suelo es su susceptibilidad a meteorizarse, que depende de propiedades tales como la solubilidad, dureza y superficie específica.

Ordene las siguientes listas de minerales de acuerdo a las propiedades que aparecen en la primera línea del cuadro.

	Solubilidad	Dureza	Superficie específica
	Calcita Halita Feldespato Yeso	Biotita Cuarzo Aragonito Zircón	Caolinita Ilita Esmectita Vermiculita
1 (menor)			
2			
3			
4 (mayor)			

- 11.3.** Relacione cada suelo de la primera columna con la mineralogía más probable en su fracción arena de la segunda columna.

1. Turbera (Histosol)	a) Calcita, cuarzo, feldespato, ilita
2. Suelo tropical (Oxisol)	b) Cuarzo
3. Suelo mediterráneo calizo	c) Halita, bloedita, mirabilita
4. Suelo volcánico	d) Olivino, piroxeno, anfíbol
5. Suelo salino	e) Cuarzo, goetita, zircón

- 11.4.** Identifique y corrija los 11 errores del siguiente texto:

El cuarzo es uno de los minerales más frecuentes en los suelos, ya que es un carbonato muy poco meteorizable. Por el contrario, minerales como la calcita o el yeso sólo aparecen en suelos bajo climas áridos, que no permiten que se pierdan por disolución y lavado. Minerales más meteorizables, como el piroxeno o el zircón, sólo se encuentran en suelos jóvenes, como los formados sobre materiales volcánicos recientes. En el otro extremo del grado de meteorización se hallan los Oxisoles, suelos de zonas frías, muy antiguos con minerales residuales como la goetita (un tipo de óxido de aluminio) y el yeso. En suelos con edades intermedias, la meteorización de feldespatos proporciona nutrientes como el calcio, potasio y fósforo. El olivino puede observarse en una colada basáltica, destacando por su color verde, al tratarse de un mineral de baja presión y baja temperatura pasa al suelo que se forma a partir de esta roca, que además será un suelo rico en arcillas de tipo caolinítico. Por su color verde el olivino se utiliza en joyería, con el nombre peridoto.

3

CÓMO SE TRANSFORMA UNA ROCA EN SUELO METEORIZACIÓN DE ROCAS Y MINERALES Y EDAFOGÉNESIS

OBJETIVOS

- Entender el paso de material originario a suelo.
- Conocer el enfoque y procesos básicos de la edafogénesis.
- Conocer la correspondencia entre procesos y horizontes genéticos.
- Introducir el concepto de fondo geoquímico.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

- Meteorización.
- Tipos y procesos de meteorización.
- Enfoque general de la edafogénesis.
- Modelo conceptual: procesos básicos en el desarrollo del suelo.
- Procesos básicos y horizontes resultantes.
- Meteorización y fondo geoquímico.

LECTURAS RECOMENDADAS

- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa. 3.ª edición, 2003. Cap. 17.
- Schaetzl, R. y Anderson, Sh.: *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 817 pp. Cambridge, 2005.
- Van Breemen, N. y Buurman, P.: *Soil Genesis*. Kluwer Academic Press, 377. Dordrecht, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. a) Después de haber revisado un texto dedicado a rocas y minerales o la Información Complementaria A, seleccione el término que mejor se adapte en el contexto, entre los propuestos.

Una roca (1) _____ contener varios minerales, y un mismo mineral (2) _____ estar en distintas rocas. Cuando se dice que una roca aflora se está haciendo referencia a que (3) _____. Las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y (4) _____. Estas últimas (5) _____ a partir de una roca preexistente que ha sufrido cambios químicos, mineralógicos y estructurales en estado sólido, debido a elevadas temperaturas, presiones o a ambas, por lo que pueden ser (6) _____. En este tipo de procesos una arenisca (7) _____ dar lugar a una cuarcita, un granito a un gneis, y una arcillita a (8) _____. Un granito, que es una roca ácida, procede de (9) _____, mientras que un basalto, que es una roca básica, se forma por (10) _____. Una fractura en una roca, sin desplazamiento relativo de las partes, de superficie generalmente plana se denomina (11) _____, su existencia es importante, ya que favorece la circulación del agua y aumenta la superficie de contacto del agua con la roca. Un till es un material no consolidado formado por material heterométrico, si bien con predominio de materiales finos, que ha sido transportado y depositado por (12) _____.

- | | | | | |
|------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------|
| (1) | a) puede | b) no puede | c) debe | d) requiere |
| (2) | a) puede | b) no puede | c) debe | d) requiere |
| (3) | a) florece | b) aparece en superficie | c) rompe | d) mana agua |
| (4) | a) volcánicas | b) plutónicas | c) intrusivas | d) metamórficas |
| (5) | a) no se forman | b) sedimentan | c) se forman | d) suelen |
| (6) | a) conglomeráticas | b) granudas | c) evaporíticas | d) foliadas |
| (7) | a) no puede | b) puede | c) debe | d) no debe |
| (8) | a) lutita | b) calcilita | c) esquisto | d) arcilla |
| (9) | a) sedimentación | b) un magma | c) explosiones | d) emisiones volcánicas |
| (10) | a) sedimentación rápida | b) emisiones volcánicas | c) metamorfismo | d) diagénesis |
| (11) | a) diaclasa | b) rotura | c) falla | d) clasto |
| (12) | a) el agua | b) el viento | c) el hielo | d) el hombre |

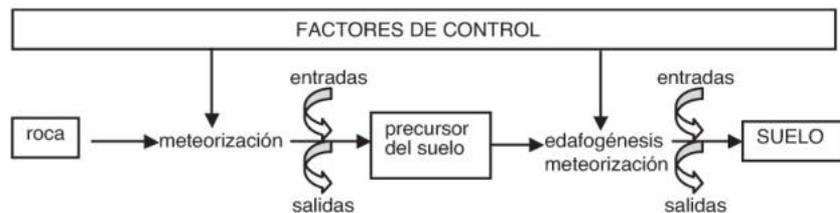
b) Defina las rocas y minerales citados en el texto.

2. METEORIZACIÓN: TIPOS Y PROCESOS

METEORIZACIÓN o INTEMPERISMO

La meteorización consiste en la transformación parcial o total de rocas y minerales al entrar en contacto con la atmósfera, hidrosfera y biosfera, por aflorar o por estar cerca de la superficie.

Una roca o material originario se convierte en suelo debido a procesos de **meteorización** o **intemperismo** (en inglés, *weathering*). El suelo empieza a formarse tan pronto como se establecen organismos que aportan materia orgánica al sistema, de manera que los procesos de edafogénesis vienen a sumarse a los de meteorización, que seguirán activos en los minerales del suelo. Pueden proporcionar una parte significativa de los requerimientos nutricionales de los biota del suelo, a partir de las partículas más finas del suelo.



La zona de contacto entre la roca fresca y el material resultante de la meteorización (**saprolita**) constituye el **frente de meteorización**. En unos casos puede ser prácticamente una superficie (caso del basalto o de una roca caliza dura), mientras que en otros se trata de una zona de un cierto espesor (caso del granito). El frente de meteo-

rización está integrado por micrositos o microambientes en los que pueden existir unas condiciones fisico-químicas diferentes a las del suelo al que dé lugar, debido al tipo de elementos que se liberen en ellos.

Se pueden diferenciar procesos de meteorización físicos y biogeoquímicos. Se estudian por separado a efectos didácticos, si bien hay que tener en cuenta que en la naturaleza pueden actuar simultáneamente, predominando unos u otros según las condiciones ecológicas.

METEORIZACIÓN FÍSICA

La meteorización física consiste en el fraccionamiento de una roca en fragmentos o **resistatos**, sin que se produzcan cambios químicos o mineralogógicos significativos. Puede ser debida a:

- Efectos de descarga en rocas plutónicas, al erosionarse el material suprayacente, con lo que disminuye la presión litostática y tiene lugar una descompresión, con lo que la roca se fragmenta según planos más o menos horizontales y verticales (diaclasas y microfallas). La existencia de microfallas verticales puede contribuir a que se forme una malla de planos de debilidad, favoreciendo la circulación del agua, la llegada de oxígeno y, por consiguiente, la meteorización química posterior, con formación de bolos de grandes dimensiones muy típicos en granitos.
- Efectos debidos a cambios de temperatura.
- Efectos debidos a secuencias de de hielo-deshielo.
- Efectos de la cristalización de sales en los poros de una roca, lo que genera grandes tensiones y contribuye a disgregar la roca, con formación de oquedades (alveolos y taffonis).
- Efectos mecánicos debidos al crecimiento de las raíces una vez han entrado en huecos preexistentes.
- Abrasión debida a los glaciares o al efecto del viento que transporte arena.
- Actividades antrópicas.



Meteorización física.

J. Porta

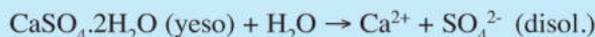
La disgregación física de una roca aumenta su superficie específica ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) y con ello la superficie de contacto con los fluidos que la atraviesan, lo que favorece las reacciones químicas y la acción de los organismos vivos, es decir, la meteorización biogeoquímica.

METEORIZACIÓN BIOGEOQUÍMICA

La meteorización biogeoquímica se debe al efecto del agua pura o que contenga disueltos oxígeno, anhídrido carbónico o ácidos orgánicos. Se pueden distinguir distintos tipos de procesos:

• Disolución:

- En **agua pura**: Como ejemplo cabe citar la disolución del yeso y de sales más solubles que él:



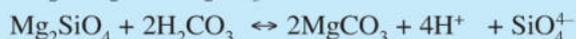
En este tipo de rocas, la circulación del agua de lluvia por su superficie da lugar a unas acanaladuras conocidas como lenar o lapiaz (también en las rocas calizas).

- En **medio básico o alcalino**: en la zona de contacto entre la roca fresca y el material meteorizado (frente de meteorización), pueden existir microambientes básicos, debido a la liberación de cationes basificantes, incluso en suelos ácidos.
- En forma de **quelatos**: formación de complejos organo-minerales, que pueden hacer variar el comportamiento del catión complexado, que puede ser insoluble como ión libre (por ejemplo el Fe^{3+}), mientras que puede ser movilizado en disolución al entrar a formar parte de un complejo soluble o pseudo-soluble.

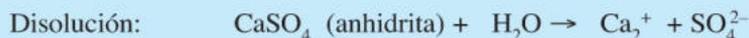


- En **medio ácido**: la carbonatación implica la disolución de minerales (principalmente los silicatos) en agua que contenga anhídrido carbónico disuelto, procedente principalmente de la respiración de microorganismos y raíces, con precipitación de carbonatos:

Disolución de **forsterita** Mg_2SiO_4 por carbonatación:



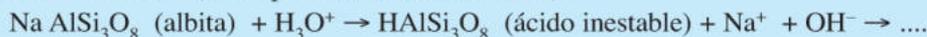
- **Hidratación**: absorción de agua, lo que da lugar a otra especie mineral. Afecta especialmente a rocas ferruginosas, a la anhidrita (CaSO_4) y otras sales solubles, tales como el sistema tenardita-mirabilita. Provoca incrementos de volumen, lo que crea tensiones dentro de la roca y favorece su fragmentación o deformación:



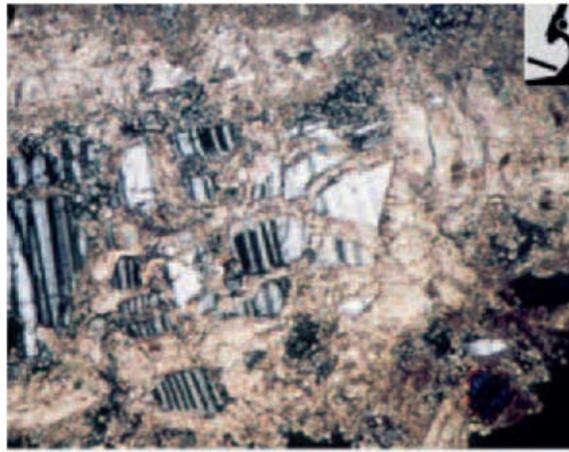
- **Hidrólisis**: reacción de un mineral con el agua para dar un ácido y una base. Provoca una reorganización importante de las redes cristalinas, dando lugar a la neoformación de minerales más estables bajo las condiciones termodinámicas predominantes. La importancia de los procesos de hidrólisis reside en que afectan a un gran número de minerales, especialmente a los silicatos. La actividad de los microorganismos puede hacer que la hidrólisis sea ácida (acidólisis) o básica (alcalinólisis). Las reacciones básicas son:



En el caso de una albita (feldespato sódico, tectosilicato):



La forma como prosiga la reacción dependerá de las condiciones de medio, pudiendo dar lugar a minerales de arcilla de distinta naturaleza (Unidad 6).



Estudio en lámina delgada: meteorización de una plagioclasa por hidrólisis. En la zona de puntos se observan las maclas polisintéticas que caracterizan a las plagioclasas (E. A. FitzPatrick).

- **Oxidación-reducción:** La transferencia de electrones caracteriza los procesos redox. Se produce una pérdida de electrones en el elemento que se oxida y una ganancia en el que se reduce. Afecta a aquellos **elementos que pueden actuar con más de una valencia:** nitrógeno, manganeso, hierro, azufre, etc. La mayoría de estas reacciones son realizadas o catalizadas por microorganismos del suelo (aerobios y anaerobios).

En medios con exceso de agua (saturación de agua), la falta de oxígeno provoca la reducción del hierro, entre otros elementos:



El paso de Fe(II) a Fe(III) supone un incremento de volumen del 22%, lo que genera tensiones dentro de la roca que favorecen su disgregación física.

Al drenar un medio (un estuario, por ejemplo) que haya estado saturado de agua de forma continuada y que contenga sulfuros, se inducirá la oxidación de éstos:



- **Acción biológica sobre la meteorización:** Los líquenes actúan como colonizadores primarios de las rocas. La acción de la biota (conjunto de especies de plantas y animales) del suelo en la meteorización se debe a:

- *Efecto mecánico:* como puede ser la fragmentación de la roca por crecimiento axial de las raíces, una vez éstas han penetrado en un espacio preexistente.
- *Efecto indirecto:* debido al cambio en el equilibrio de la solución, ya que los organismos consumen ciertos cationes y aniones. El resultado puede ser la disolución o el colapso de minerales que contengan dichos elementos. Este es el caso de las micas que, si bien se consideran muy resistentes a la meteorización, se descomponen rápidamente en el suelo, debido a que las plantas consumen potasio. Esto acelera la salida de potasio interlaminar de las micas, lo que produce su degradación, con formación de illita.

- *Efectos directos*: algunos biota del suelo producen ácidos orgánicos a partir de su metabolismo, lo que acelera la tasa de meteorización y favorece la solubilización mineral. La formación de complejos con los elementos liberados en las reacciones químicas que tienen lugar en el frente de meteorización puede movilizarlos en forma soluble y aumentar con ello la velocidad de las reacciones en la roca. También las plantas y animales pueden producir compuestos que pueden precipitar e inmovilizar productos de la meteorización (intemperismo). Uno de estos productos es el ácido carbónico, que puede precipitar en forma de carbonato cálcico biogénico.

3. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Observar esta imagen e identificar los procesos que han tenido lugar en este esquistos, relacionándolos con la meteorización y la edafogénesis.



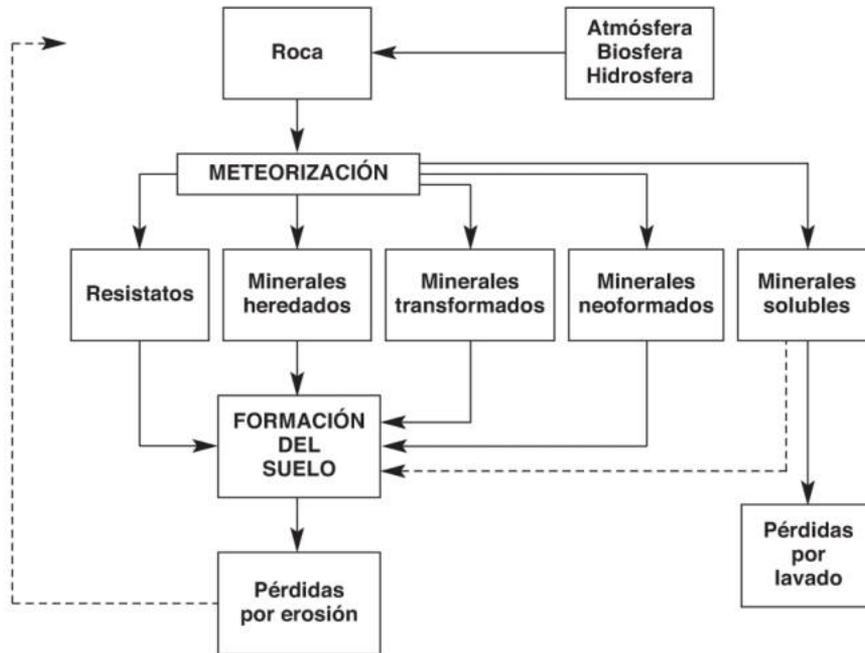
J. Porta

4. PRODUCTOS DE LA METEORIZACIÓN

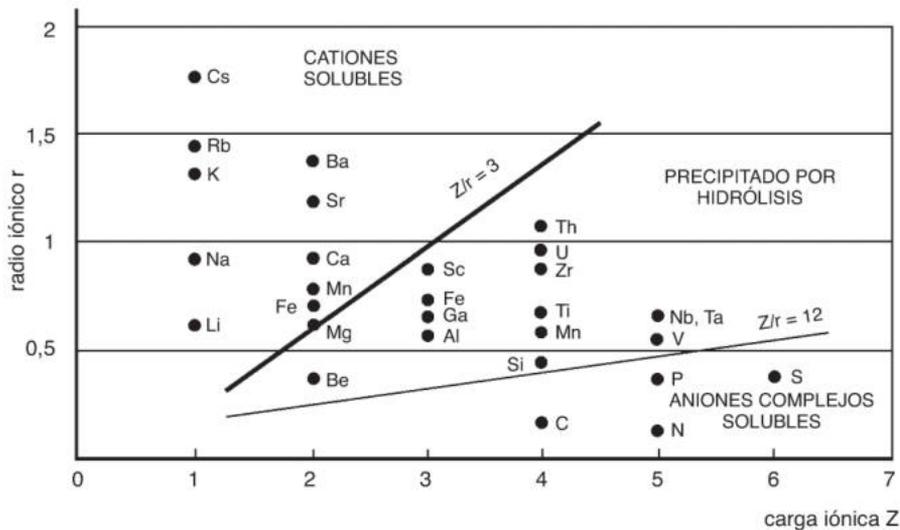
Los productos resultantes de la meteorización constituyen el material precursor del suelo, sobre el que actuarán los procesos edafogénicos. Éstos darán lugar a la diferenciación del perfil en horizontes: proceso de **horizontación**. La meteorización puede proseguir durante la edafogénesis, contribuyendo a una lenta liberación de nutrientes.

Entre los productos resultantes de la meteorización cabe distinguir:

- Resístatos: fragmentos de la roca, que conservan su composición mineralógica de partida.
- Minerales heredados liberados directamente de la roca, sin transformaciones sensibles.
- Minerales transformados, alteraciones en las redes cristalinas.
- Minerales neoformados a partir de los productos de la meteorización, por colapso de las estructuras minerales existentes en el material originario.
- Elementos solubles, que pueden acumularse o perderse por lavado, dependiendo del clima y de las condiciones de drenaje (libre o impedido).



Entender el comportamiento de los productos de meteorización resulta muy importante para la comprensión de los procesos, los suelos que se forman y su comportamiento. El **diagrama de Mason** permite interpretar el comportamiento de los distintos elementos en los suelos en función de la carga iónica (Z) y el radio iónico (r) de cada uno de ellos, que definen el **potencial iónico** (Z/r). Unos elementos permanecen en solución como cationes solubles o como aniones complejos solubles, por lo que presentarán gran movilidad, mientras que otros precipitan por hidrólisis:



5. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Observar el afloramiento de yeso roca de la figura:

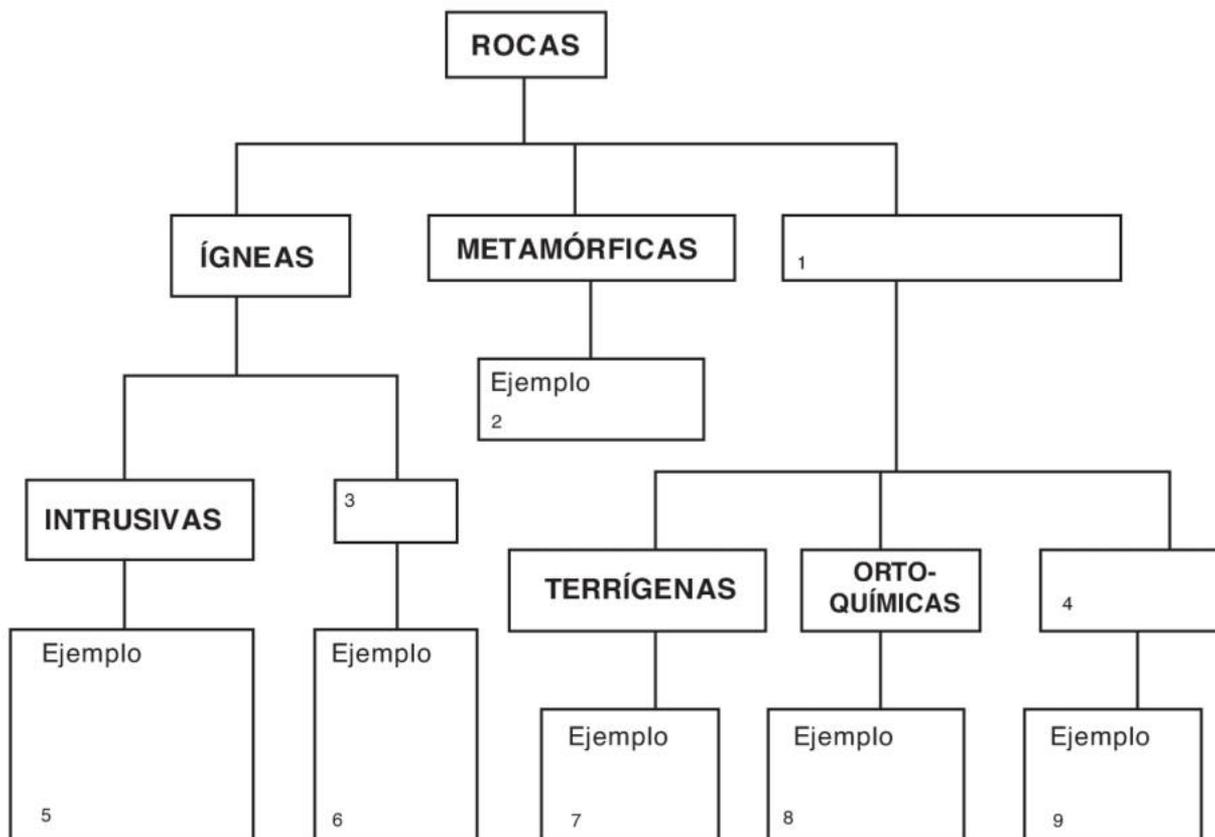
- Describa con sus propias palabras lo que observa en la imagen.
- Formule alguna hipótesis acerca de cómo pudo haberse formado, relacionándolo con los procesos de meteorización.
- Indique los productos esperables de este proceso y cuál será su comportamiento de acuerdo con el diagrama de Mason.



J. Porta

6. ESQUEMA CONCEPTUAL: ORDENAR INFORMACIÓN

A1. Completar el siguiente esquema conceptual:



7. INTERPRETAR INFORMACIÓN

A1. Seleccionar el término que mejor se adapte al contexto:

Las rocas, al entrar en contacto con el agua y el aire, se (1) *meteorizan / alteran*, lo que constituye una etapa previa para que se pueda (2) *formar / erosionar* un suelo. La zona donde está teniendo lugar la meteorización se denomina (3) *saprolita / frente de meteorización*. Las condiciones físico-químicas en ella / él (4) *son idénticas / pueden ser muy distintas* de las del suelo suprayacente al que dan lugar. (5) *Se pueden / no se pueden* encontrar suelos con un espesor de varios metros de material meteorizado (saprolita), lo que puede ocurrir en zonas (6) *templadas húmedas / tropicales cálidas y húmedas*. Los minerales de arcilla son unos de los productos de meteorización, pudiendo ser heredados o neoformados. La liberación de sodio de una (7) *albita/ortosa*, (8) *enriquece / no enriquece* el suelo en este elemento, ya que de acuerdo con el diagrama de Mason es un elemento (9) *difícil / fácil* de movilizar en el agua que atraviesa el suelo, mientras que ocurre (10) *lo mismo / lo contrario* con el Fe(III).

8. ENFOQUE GENERAL DE LA EDAFOGÉNESIS

En la edafogénesis actúan diversos tipos de procesos que se pueden agrupar en:

- **Físicos:** movimientos de sustancias en suspensión (por ejemplo, arcilla), turbaciones y otros.
- **Químicos:** disoluciones, precipitaciones, hidrataciones, hidrólisis, formación de complejos órgano-metálicos (denominados quelatos, en el caso en que el ligando sea bidentado) y reacciones redox.
- **Biológicos:** descomposición de la materia orgánica, mezcla de materiales por la fauna, entre otros.

Las reacciones químicas que tienen lugar producen la ruptura de enlaces en los materiales que reaccionan, dando origen a nuevos productos. Por lo general, las **velocidades de reacción** son muy bajas en los procesos edafogénicos. La secuencia de pasos mediante los cuales los reactivos se transforman en productos (**mecanismos de reacción**) puede llegar a ser muy compleja, con diferentes puntos de llegada (productos). Ello es así ya que se trata de sistemas abiertos, sobre los que pueden actuar **factores externos** (aporte de agua, temperatura, entre otros) e **internos** (precipitación de productos, estado de oxido-reducción del sistema, entre otros). Los productos resultantes, por consiguiente, variarán de unos suelos a otros, ya que los valores de los factores ecológicos de formación son muy distintos en los diferentes ambientes edáficos a escala global e incluso a veces a escala local.

9. PROCESOS BÁSICOS EN LA FORMACIÓN DE SUELOS

La diferenciación de horizontes y sus propiedades se deben a procesos que se pueden agrupar a modo de síntesis en: **adiciones, pérdidas, transformaciones y translocaciones** de materia, que tienen lugar en una escala de tiempo muy prolongada, por lo general miles de años. Un suelo será el resultado del efecto integrado de diferentes procesos, debiendo destacar, además, que los procesos interaccionan entre sí. Por otro lado, los horizontes edáficos que se forman pueden condicionar procesos posteriores, de manera que pueden incluso hacer cambiar la ruta en el desarrollo de un suelo, debido a factores internos sobrevenidos. Así por ejemplo, un cambio de tipo de bosque puede frenar procesos actuantes, e incluso dar lugar a rutas de desarrollo regresivo. No obstante, en un nivel introductorio se omiten situaciones de gran complejidad como éstas. Se estudiarán seguidamente los principales procesos básicos de la edafogénesis. Unos ocurren en todos los suelos (aporte de materia orgánica), mientras que otros dependen de las condiciones de medio (en zonas semiáridas y áridas, la translocación y acumulación de carbonato cálcico).

10. ADICIONES

Los aportes pueden tener lugar en la superficie del suelo, por la base del perfil y, teniendo en cuenta la continuidad de los flujos de agua en un paisaje, pueden haber aportes laterales subterráneos de aguas arriba.

ADICIONES

- Agua: aporte por la lluvia, la escorrentía y a partir de una capa freática.
- Gases: oxígeno procedente de la atmósfera.
- **Materia orgánica:** hojas, raíces, ramas. Este aporte implica pasar de una saprolita a un suelo.
- Materiales liberados durante la meteorización.
- Aporte de sales solubles por ascenso capilar a partir de una capa freática y por aerosoles salinos transportados por el viento en zonas próximas al mar.
- Solutos procedentes de las partes altas de una ladera con flujo lateral.
- Materiales transportados por escorrentía superficial procedentes de la erosión.
- Materiales aportados por el viento.
- Materiales coluviales: pueden llegar a enterrar un suelo preexistente.
- Materiales aluviales: pueden llegar a enterrar un suelo preexistente.

11. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras esta imagen tomada a vista de pájaro en un suelo de bosque.
b) Atendiendo a diversos criterios, interprete a qué tipo de proceso corresponde y a qué da lugar.



J. Porta

12. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras el perfil de la figura, que corresponde a un suelo de alta montaña (Alpes, Suiza) desarrollado a partir de una roca caliza dura.
b) Atendiendo a diversos criterios, interprete el tipo de proceso y a qué ha dado lugar.



J. Porta

13. PÉRDIDAS

Las **pérdidas** pueden tener lugar en superficie por erosión, mientras que las sustancias solubles se pueden perder por la base del suelo y lateralmente; también puede haber pérdidas en forma de gases.

PÉRDIDAS

a) Sustancias solubles:

- Elementos disueltos, perdidos por la base del suelo o lateralmente: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Fe^{2+} , Si^{4+} entre otros.
- Quelatos solubles o pseudosolubles perdidos por lavado de Fe^{3+} , entre otros.
- Pérdidas de hierro (Fe^{2+}) y manganeso (Mn^{2+}) en condiciones reductoras, lo que da lugar a un empobrecimiento y decoloración.
- Pérdida de sílice (en suelos de zonas tropicales, entre otros).

b) Partículas sólidas

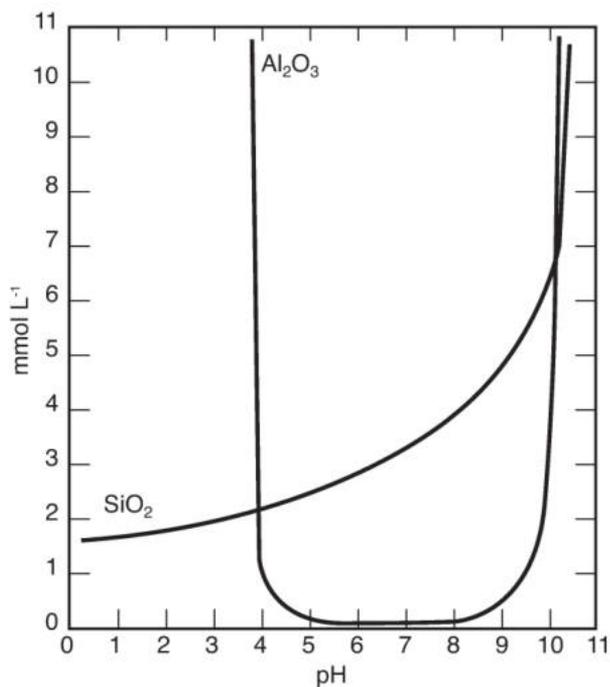
- Materiales de superficie arrastrados fuera del suelo por el agua de escorrentía superficial (erosión hídrica) y por el viento (erosión eólica).

c) Elementos biodisponibles: nutrientes absorbidos por las plantas, y elementos tóxicos absorbidos por plantas tolerantes.

d) Gases

- Pérdidas de nitrógeno en forma de N_2 por desnitrificación.
- Pérdidas de anhídrido carbónico desprendido por la respiración de los microorganismos del suelo y por la descomposición de la materia orgánica.

La movilidad de los distintos elementos depende, entre otros factores, del potencial iónico (diagrama de Mason) y del pH. En el caso del aluminio, el Al_2O_3 se halla precipitado entre 5,5 y 8,5, mientras que la movilidad de la sílice, SiO_2 , aumenta con el pH, siendo máxima en condiciones alcalinas (Mason, 1966).



14. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2. a) Describa con sus propias palabras esta imagen.
b) Infiera qué tipo de proceso edafogénico está teniendo lugar.



J. Porta

15. TRANSFORMACIONES

Las **transformaciones** implican modificaciones y destrucciones de constituyentes, con formación de otros nuevos.

TRANSFORMACIONES

Entre ellas cabe citar:

- Meteorización de rocas y minerales, que al disgregarse liberan distintos elementos, entre ellos hierro, que es el principal elemento que da color a los suelos.
- Descomposición de la materia orgánica por microorganismos del suelo.
- Neoformación de minerales a partir de productos de la meteorización.
- Formación del complejo arcillo-húmico, que constituye una de las características singulares de los suelos.
- Precipitación de carbonato cálcico (CaCO_3), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y de sales más solubles que el yeso (halita, tenardita, mirabilita, entre otras) a partir de soluciones saturadas.
- Procesos redox allí donde haya exceso de agua temporal o permanentemente.
- Procesos de expansión-retracción, debido a la presencia de arcillas expansibles (del grupo de las esmectitas).

16. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras estas imágenes.
b) Infiera de qué tipo de proceso se puede tratar.

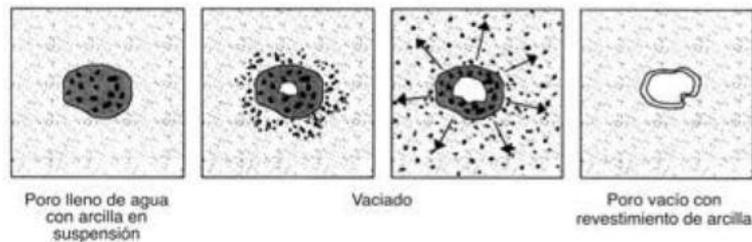


17. TRANSLOCACIONES

Las translocaciones son procesos mediante los cuales tiene lugar una **movilización selectiva** de sustancias (inorgánicas u orgánicas) en un suelo, ya sea en suspensión o en disolución. El movimiento puede ser lateral dentro de un horizonte o bien vertical desde la parte superior del suelo a una inferior o de acumulación, donde se agregan a los materiales edáficos preexistentes.

TRANSLOCACIONES

— **Arcilla:** la translocación de arcilla = iluviación de arcilla o argiluvación es un proceso mediante el cual la arcilla fina dispersa, que puede ser puesta en suspensión al aportar agua al suelo, es transportada una cierta distancia dentro del suelo. Cuando la suspensión atraviesa un horizonte seco, el agua de los macroporos es succionada por los microporos y las láminas de arcilla se depositan en las paredes, quedando orientadas paralelamente a ellas (Dorronsoro y Aguilar, 1988). Análogamente, la existencia de cationes a una cierta profundidad puede hacer flocular la arcilla, produciéndose igualmente su depósito sobre las paredes.



- **Coloides orgánicos** de bajo peso molecular que pueden formar quelatos con el hierro solubles o pseudosolubles. Tiene lugar en suelos ácidos.
- **Carbonato cálcico:** en solución en forma de Ca^{2+} , HCO_3^- y CO_3^{2-} . Estos iones pueden ser translocados, reprecipitando dentro de propio suelo.
- **Yeso:** en solución en forma de Ca^{2+} y SO_4^{2-} . Translocación y reprecipitación en el propio suelo.
- **Sales solubles:** movimiento capilar ascendente o bien descendente.
- Por el ciclo biológico de **nutrientes**.

Las **turbaciones** consisten en el movimiento de materiales dentro del suelo de forma indiferenciada.

- **Bioturbación:** proceso por medio del cual la fauna del suelo crea galerías, remueve y mezcla el material del suelo. Puede desplazarlo de un horizonte a otro, lo que se puede identificar por la diferencia de color entre el del material aportado y el el horizonte que lo recibe. Los roedores pueden rellenar sus galerías con material de otro horizonte y dar lugar a las krotovinas.
- **Crioturbación:** proceso de movilización de material en el suelo o en su superficie por acción del hielo-deshielo. Uno de los criterios de identificación es la posición de los elementos gruesos movidos por acción del hielo.
- **Argiloturbaición:** procesos movilización de material del suelo debidos a la expansión-retracción de arcillas expansibles (grupo de las esmectitas). Se identifican por la presencia de grietas, caras de deslizamiento (slikensides) y planos de deslizamiento. Típicos de los Vertisoles.



*Planos de deslizamiento debidos a procesos de expansión-retracción.
Texas, EE.UU.*

J. Porta

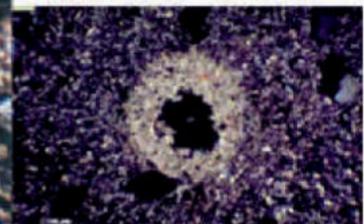
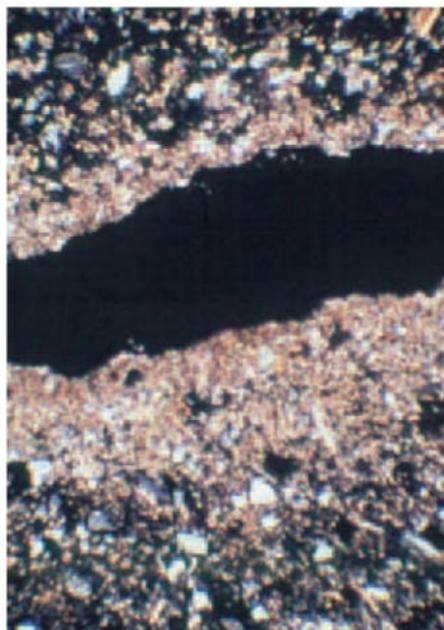


*Grietas debidas a la presencia de arcillas expansibles.
Texas, EE.UU.*

J. Porta

18. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras las dos imágenes correspondientes a dos láminas delgadas de un horizonte de un suelo.
- b) Infiera de qué tipo de proceso edafogénico se puede tratar. Suponga que el componente de color blanco es calcita, en concreto micrita.
- c) ¿Se puede extraer alguna conclusión acerca del clima de la zona y del régimen de humedad del suelo?

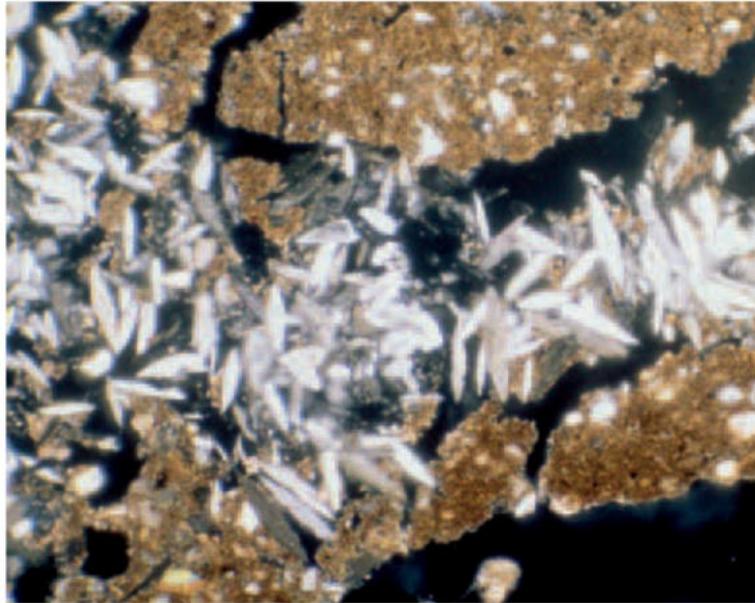


G. Stoops

19. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Al observar al microscopio petrográfico una lámina delgada de un horizonte de un suelo se ve la imagen que se incluye.

- Describa con sus propias palabras lo que aparece en la imagen.
- Formule alguna hipótesis acerca del origen del componente de color blanco y relaciónelo con alguno de los tipos de procesos edafogénicos. Busque información en Internet acerca de minerales lenticulares.
- ¿Se puede hacer alguna especulación acerca de las condiciones ecológicas de la zona donde se ha formado este suelo?



J. Porta

20. ESTUDIAR Y COMUNICAR

E3. Estudiar el comportamiento de un material originario con elevado contenido de calcita, según que el proceso de meteorización tenga lugar bajo condiciones de semiaridez o bien en clima húmedo. Formular las correspondientes reacciones químicas en las que se verá implicado este componente. Redactar un informe a exponer en público.

21. INTERPRETAR INFORMACIÓN

A1. Seleccionar el término más adecuado según el contexto:

De acuerdo con la ley de Arrhenius, la velocidad de una reacción química se (1) *duplica / triplica* al aumentar (2) *veinte / diez* grados la temperatura. En zonas (3) *templadas / tropicales* con elevadas precipitaciones y altas temperaturas, la meteorización será (4) *muy escasa / muy intensa*, lo que confiere coloraciones (5) *azuladas / rojizas* al suelo, debido a la liberación de hierro y formación de óxidos de hierro (6) *Fe(II) / Fe(III)*. Pueden perderse gran parte de las sustancias liberadas en la meteorización por (7) *translocación / lavado*, entre ellas los nutrientes de las plantas, lo que (8) *favorece / deteriora* la fertilidad de los suelos de estas zonas. Los aportes de materia orgánica serán grandes debido a la vegetación de selva, y los suelos tendrán un contenido de materia orgánica (9) *muy alto / no muy alto*, ya que en estas condiciones ecológicas la materia orgánica (10) *se mineralizará rápidamente / se irá acumulando* en el suelo. Los suelos de zonas tropicales tenderán a ser (11) *muy profundos / muy superficiales*, si bien (12) *poco fértiles/muy fértiles*.

22. ESPIRITU CRÍTICO

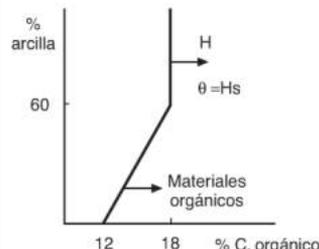
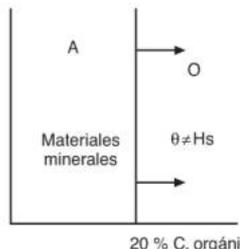
A1. Le pasan para que corrija el título «SUELO» para una Gran Enciclopedia Universal. Indique si hay que realizar alguna corrección en él. El texto que recibe dice:

«La roca madre original sufre fenómenos de erosión por el hielo y deshielo o la acción del viento; erosión química, como el ataque con aguas cargadas de sales o de gas carbónico que dan lugar a la formación del suelo».

23. PROCESOS EDAFOGÉNICOS BÁSICOS Y HORIZONTES GENÉTICOS RESULTANTES

Algunos de los procesos edafogénicos básicos descritos dan lugar a horizontes genéticos específicos, en otros casos los procesos de horizonación resultan mucho más complejos. Se pueden establecer las siguientes relaciones:

Proceso	Horizonte genético resultante
Adiciones	
Adición de materia orgánica a la superficie del suelo por parte de vegetación arbórea (principalmente coníferas). Bosque.	O (o = <i>orgánico</i>) Horizonte orgánico de un suelo mineral. Color oscuro
Adición de m.o. a la parte superior del suelo, por raíces finas o a partir de un O.	A_h , A_h (h = <i>humus</i>) Horizonte organomineral
Adición de materiales que entierran un suelo anterior.	A_b (b = <i>buried</i> , enterrado) Horizonte enterrado
Adiciones de materia orgánica en condiciones de exceso de agua muy prolongadas todos los años. Turbera.	H (de <i>histos</i> , tejido) Horizonte orgánico de un suelo orgánico.
Pérdidas	
Pérdida de material de la parte superior del suelo. Por lo general de elementos que daban color al horizonte en el que se encontraban (arcilla, materia orgánica, hierro, etc.).	E (e = <i>eluvial</i>) Horizonte de color blanco debido a la arena y limo residuales
Transformaciones	
La estructura, composición o color de la roca cambian en la mayor parte del volumen por meteorización de la roca y los minerales que la componen y por acción de la fauna.	B_w (w = <i>weathering</i> , meteorización) Horizonte con una estructura edáfica típica y sin acumulaciones
Procesos redox que afectan al hierro y al manganeso, principalmente.	A_g , B_g , C_g (g = <i>glei</i>) Suelos con exceso de agua
Procesos de expansión-retracción debido a la presencia de arcillas expansibles (montmorillonita, del grupo de las esmectitas)	B_{ss} (s = <i>slickenside</i> , cara de deslizamiento)
Laboreo de un horizonte con independencia de cual haya sido el proceso edafogénico que le haya dado origen	A_p (p = <i>plow</i> , labrar)

Denominación	Definición
H (histos, tejido)	<p>Horizonte orgánico de un suelo orgánico. Formado por acumulación <i>in situ</i> de materia orgánica en superficie, en un medio saturado de agua durante períodos prolongados. Horizonte de turberas. La denominación FAO (Driesen <i>et al.</i>, 1991) es:</p>  

Translocaciones	
Iluviación de arcilla fina de la parte superior del suelo (zona de eluviación) a una parte inferior (zona de iluviación). El transporte de la arcilla tiene lugar en suspensión en el agua que circula por el suelo.	B_t (t = ton, arcilla)
Queluviación de materia orgánica, hierro y aluminio de la parte superior del suelo a una parte inferior. En zonas templadas húmedas.	B_h (h = humus) B_s (s = sesquióxidos)
Disolución del carbonato cálcico y translocación de los iones Ca^{2+} , HCO_3^- y CO_3^{2-} y reprecipitación en forma de $CaCO_3$ dentro del suelo. Zonas áridas y semiáridas.	B_k (k = kalk, caliza) B_{km} (cementado)
Disolución del yeso en la parte superior del suelo y translocación de los iones Ca^{2+} y SO_4^{2-} y reprecipitación dentro del suelo. Zonas áridas y semiáridas.	B_y (y = yeso)

24. OBSERVAR Y DESCRIBIR

G2. Describa con sus propias palabras esta imagen e infiera qué tipo de procesos pueden haber tenido lugar.

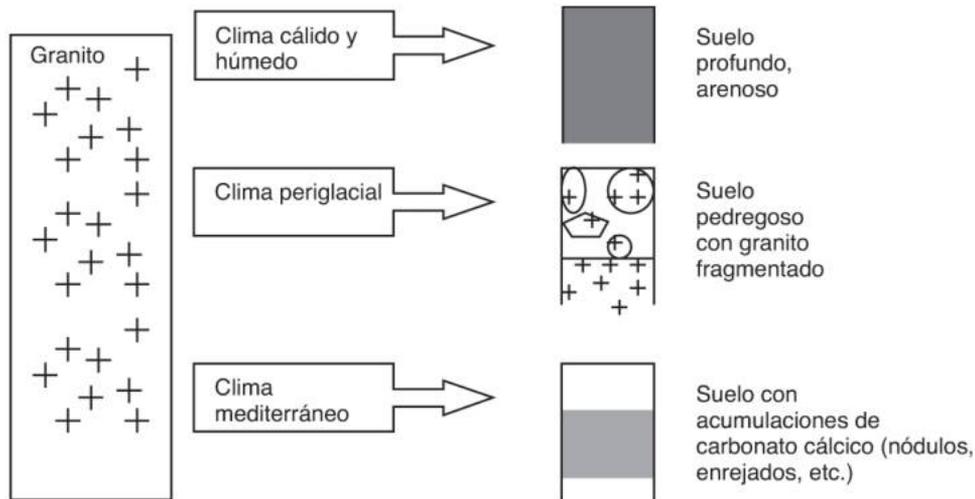


Bretaña (Francia)

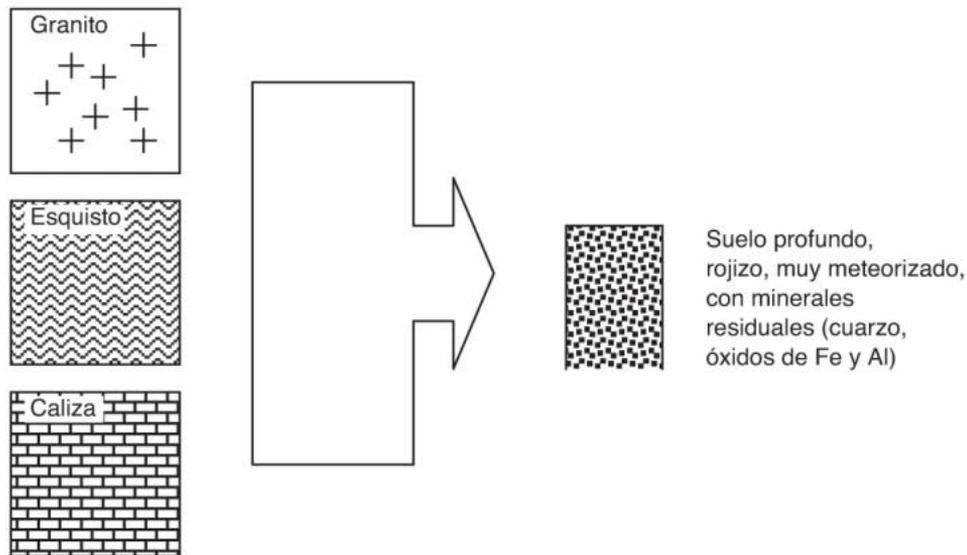
J. Porta

25. ESTUDIAR Y COMUNICAR

E3. 1. Al consultar la bibliografía se ha encontrado que a partir de un granito se pueden formar los tres suelos que se indican. Estudiar el tema y aportar alguna explicación en base a la teoría general de la edafogénesis. Redactar un informe a presentar en público.



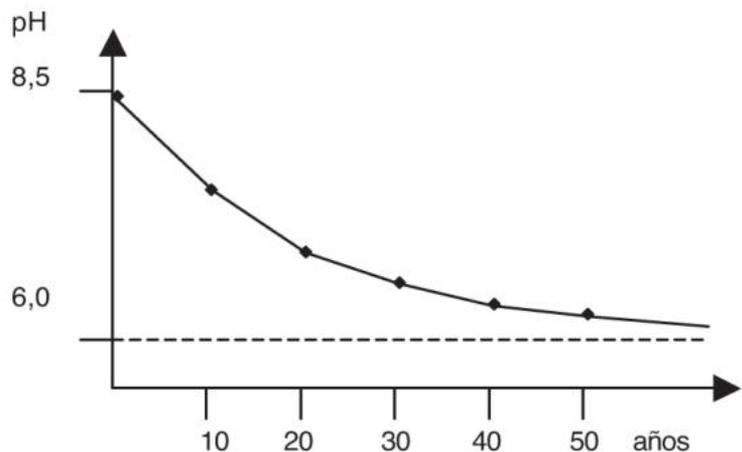
2. Discutir la posibilidad de que a partir de tres materiales originarios distintos se forme un mismo suelo.



3. A partir de la prospección y análisis de unos suelos formados de un mismo material originario con carbonato cálcico, se ha construido la gráfica que relaciona la edad del suelo con el pH.

Se desea saber:

- ¿Qué ha sucedido en estos suelos?
- ¿En qué tipo de clima evolucionan estos suelos?
- ¿Cuál es el régimen de humedad del suelo?
- ¿Qué reacción ha ocurrido con el carbonato cálcico?
- ¿Qué se puede inferir acerca del tiempo de formación de este suelo?



26. METEORIZACIÓN Y FONDO GEOQUÍMICO

En investigaciones sobre contaminación de suelos, interesa poder diagnosticar si la presencia de un elemento químico objeto de estudio puede deberse a las características mineralógicas del material originario, que lo libera durante la meteorización, o bien si puede tener su origen en una contaminación por actividades antrópicas. Para ello se ha introducido el concepto de **fondo geoquímico** de un elemento.

Fondo geoquímico

Se refiere a la concentración de un elemento en un determinado medio, en ausencia de cualquier aporte externo específico derivado de la actividad humana. Para un mismo elemento, el valor de la concentración variará según cuál haya sido el material originario del suelo.

El estudio de los posibles minerales fuente pone de manifiesto cuál puede ser el aporte esperable al fondo geoquímico para cada elemento para un determinado suelo.

27. MANEJO DE DATOS

E3. Estudiar la siguiente información y redactar un informe al respecto:

La meteorización de una roca da lugar a un material que difiere de ella por su color, estructura, granulometría, mineralogía, etc., y que se denomina **regolita**. Diversos factores condicionarán los procesos. No obstante, en climas húmedos, los suelos se diferencian más de la roca a medida que pasa el tiempo, que en climas áridos y semiáridos. En cualquier caso, la roca a partir de la que se haya formado un suelo marcará las características del suelo resultante.

Conociendo los contenidos medios de rocas ígneas de distintas procedencias (Fuster *et al.*, 1954):

	Granito de dos micas (Segovia)	Granito (Barcelona)	Basalto ultrabásico (C. Real)	Andesita (Almería)	Composición media (Clarke y cols., 1924)
SiO ₂	72,39	71,53	38,24	63,75	59,12
Al ₂ O ₃	14,91	13,93	19,90	17,62	15,34
Fe ₂ O ₃	0,75	1,16	5,50	3,00	3,08
FeO	0,59	0,84	9,54	3,26	3,80
MgO	0,15	0,58	9,70	3,41	3,49
CaO	1,25	2,25	14,05	2,50	5,08
Na ₂ O	3,59	3,11	2,47	1,75	3,84
K ₂ O	5,22	5,76	0,55	2,40	3,13
H ₂ O ⁺	0,72	0,71	2,52	2,77	1,15
H ₂ O ⁻	0,13	-	0,10	-	-
TiO ₂	0,13	0,08	4,39	-	1,05
P ₂ O ₅	0,10	-	0,72	-	0,30
MnO	0,03	-	0,22	-	0,12

y los criterios de clasificación de las rocas ígneas y el diagrama de Mason, dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Cómo se expresan los resultados del análisis de una roca?
- ¿En el caso de los basaltos, el 38% corresponde al cuarzo que tiene esta roca?
- ¿Cuál es la causa principal del tamaño del grano de los minerales en una roca? Poner dos ejemplos de rocas de grano fino y sus equivalentes de grano grueso, de entre los de la tabla anterior.

- d) ¿Qué rocas darán lugar a suelos más arcillosos, de entre las indicadas en la tabla, a igualdad de las demás condiciones?
- e) Utilizando el diagrama propuesto por Mason, interpretar la tendencia en el comportamiento de los distintos elementos liberados en la meteorización en el caso de un granito. ¿Qué influencia tendrán: el régimen de humedad del suelo según sea percolante o no percolante? ¿Y las condiciones de drenaje?
- f) ¿Al indicar que un granito es una roca ácida y un basalto una roca máfica, a qué se está haciendo referencia? ¿Tiene relación con el pH y la acidez del suelo?

28. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. Identificar términos referentes a meteorización y edafogénesis y estructurarlos según se indica:

z	h	o	r	i	z	o	n	a	c	i	o	n
s	o	d	i	f	i	c	a	c	i	o	n	o
c	a	c	o	3	o	a	t	i	r	i	p	i
s	i	l	o	d	a	r	r	e	t	n	e	c
o	n	o	i	c	a	i	v	u	l	e	c	a
4	b	r	u	n	i	f	i	c	a	d	a	z
n	i	l	u	v	i	a	c	i	o	n	c	i
a	n	l	c	a	o	z	g	m	2	l	c	l
c	o	m	p	a	c	t	a	c	i	o	n	o
h	u	m	i	f	i	c	a	c	i	o	n	s
h	c	e	m	e	n	t	a	c	i	o	n	d
g	l	e	i	f	i	c	a	c	i	o	n	o
m	e	t	e	o	r	i	z	a	c	i	o	p

- Meteorización de la roca.
- Formación de horizontes.
- Procesos que afectan: a la materia orgánica; en zonas templadas húmedas; en zonas áridas y semiáridas; en la base de una ladera con aporte de coluvios; en suelos cultivados; en suelos con exceso de agua; en suelos afectados por sales solubles; suelos con propiedades físicas muy desfavorables y toxicidad por sodio.

29. ESPIRITU CRÍTICO

A1. En una *Gran Enciclopedia* leemos el texto que se transcribe, realizar la corrección termonológica que proceda y, una vez corregido el texto, completarlo si fuese necesario:

«La génesis de un suelo depende esencialmente de tres factores: descomposición de la roca; acumulación de materia orgánica; y migraciones de elementos transportados por el agua».

30. RELACIONES ESENCIALES

A1. Establecer relaciones entre ambas columnas, referentes a procesos formadores (algunas pueden ser correctas en más de un caso y otras no tienen correspondencia):

1. Hidrólisis	a) Llueve en otoño y primavera, principalmente, mientras que los veranos son secos y calurosos.
2. Régimen de humedad xérico (mediterráneo)	b) Procesos de expansión-retracción ligados a los cambios de humedad del suelo. Efectos sobre las edificaciones, infraestructuras y las raíces de los árboles.
3. Crioturbación	c) Proceso de meteorización química que afecta a rocas y minerales. Se caracteriza por la reacción con el agua disociada (OH^- y H^+).
4. Materiales sulfurados	d) Acidificación al eliminar el exceso de agua por drenaje artificial, si el medio no contiene carbonato cálcico. Riesgo de ignición si se trata de una escombrera de carbón con pirita

31. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Tras revisar el contenido de la Unidad, seleccionar el término más ajustado según el contexto, de entre los cuatro propuestos:

La transformación parcial o total de rocas y minerales al entrar en contacto con la atmósfera, hidrósfera y biosfera comprende un conjunto de procesos que se denominan (1) _____. Estos procesos (2) _____ a los de edafogénesis a partir de un determinado momento. De entre los productos resultantes, aquellos que tienen mayor probabilidad de perdurar en un suelo son los (3) _____. La acción del agua en la meteorización se ejerce de varias formas, por disolución, hidratación y (4) _____. Las reacciones de meteorización son (5) _____ y una misma reacción de meteorización (6) _____ da lugar a los mismos productos, ya que se trata de un sistema (7) _____. A partir de una ortosa (plagioclasa) se pueden originar diferentes minerales (8) _____ por hidrólisis y (9) _____, es decir reorganización de tetraedros de sílice.

En medios donde el drenaje esté impedido, las reacciones de meteorización tienden a (10) _____. Un elemento frecuentemente liberado durante los procesos de meteorización de las rocas es el Fe(III) que, de acuerdo con el diagrama de Mason, (11) _____ y da color al suelo. Los procesos básicos de la formación de un suelo son: adiciones, (12) _____, transformaciones y pérdidas. La formación de un horizonte B_1 se debe a un proceso (13) _____. La presencia de grietas profundas, más de 50 cm, en un suelo puede ser un indicio de la presencia de (14) _____, lo que debe ser tenido en cuenta en plantaciones arbóreas y en construcciones. Un horizonte H es un horizonte (15) _____ de un suelo (16) _____.

- | | | | | |
|------|------------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|
| (1) | a) meteorización | b) hidrólisis | c) alteración | d) erosión |
| (2) | a) preceden | b) preceden y se solapan | c) necesitan | d) se solapan |
| (3) | a) solubles | b) heredados | c) transformados | d) neoformados |
| (4) | a) hidrólisis | b) lavado | c) erosión | d) evaporación |
| (5) | a) rápidas | b) lentas | c) reversibles | d) isotermas |
| (6) | a) nunca | b) siempre | c) — | d) no siempre |
| (7) | a) cerrado | b) abierto | c) independiente | d) interconectado |
| (8) | a) carbonáticos | b) tectosilicáticos | c) de arcilla | d) edáficos |
| (9) | a) herencia | b) neoformación | c) carbonatación | d) argilización |
| (10) | a) acelerarse | b) bloquearse | c) aumentar | d) ser de hidrólisis |
| (11) | a) precipita | b) es soluble | c) tiene carga 2^+ | d) forma aniones complejos |
| (12) | a) meteorización | b) hidrólisis | c) translocaciones | d) acumulaciones |
| (13) | a) rápido | b) translocación | c) transformación | d) queluviciación |
| (14) | a) sequía | b) mucho limo | c) mucha arcilla | d) arcillas expansibles |
| (15) | a) orgánico | b) mineral | c) inorgánico | d) hídrico |
| (16) | a) mineral | b) orgánico | c) natural | d) de zona árida |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

32. ESTUDIO DE CASOS: GESTION DE INFORMACIÓN

- a) Describa con sus propias palabras este paisaje.
- b) Estudie los efectos pueden tener las actuaciones agrícolas (puesta en riego, uso de fitosanitarios, aporte de purines u otras) en los suelos de la zona alta que se ve al fondo.



OBJETIVOS

Ampliar información referente a horizontes genéticos y horizontes de diagnóstico.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Horizontes genéticos.

Denominación de los horizontes genéticos.

Horizontes de diagnóstico: epipediones y endopediones.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de campo de suelos*. Cap. 6 y 7. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2005.

Acceso a *Soil Taxonomy* y a la *WRB*: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés.

1. HORIZONTES GENÉTICOS

HORIZONTE GENÉTICO

Un horizonte es una capa que forma parte del suelo, con una disposición horizontal o subhorizontal. Traduce la organización del suelo. Cada horizonte de un mismo suelo tiene propiedades y características diferentes, de ahí la importancia en identificarlos para su estudio, descripción y muestreo por separado. Puede tener una dimensión centimétrica e incluso métrica. Los horizontes son el resultado de la edafogénesis y por ello se denominan horizontes genéticos.

2. DENOMINACIÓN DE LOS HORIZONTES GENÉTICOS

2.1. Reglas de nomenclatura

Horizontes principales: letras mayúsculas: O, A, E, B, C, R.

Proceso edafogénico principal: letras minúsculas: k, t, w, s, na, m, etc.

Secuencia de horizontes: índices numéricos tras las letras minúsculas: 1, 2, 3, ...

Horizontes de transición con predominio de uno de ellos: se escribe en primer lugar la letra correspondiente al horizonte dominante: AB, BA,...

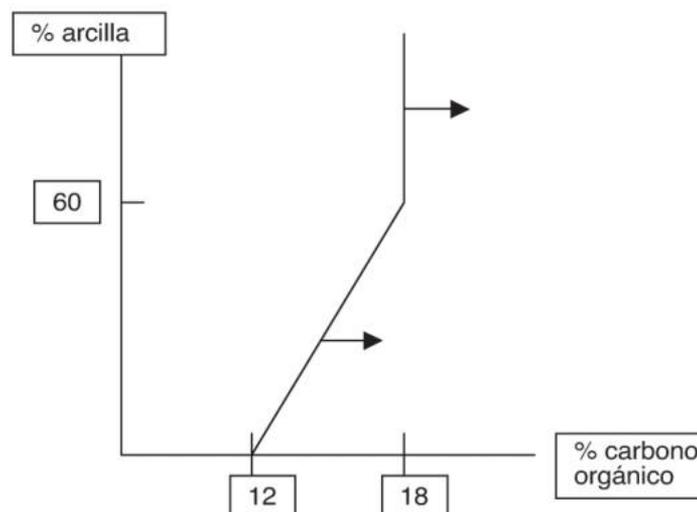
Horizontes de transición con inclusiones: se escribe en primer lugar la letra correspondiente al horizonte mayoritario, después una barra y la letra del horizonte incluido: A/B, B/C.

Discontinuidades litológicas: números consecutivos antes de las letras mayúsculas.

2.2. HORIZONTES GENÉTICOS PRINCIPALES

Denominación	Definición
H	Horizonte orgánico de un suelo orgánico. Turbera
O	Horizonte orgánico de un suelo mineral. Contiene un 20% o más de carbono orgánico
A	Horizonte organo-mineral de un suelo mineral. Se ha formado en la parte superior del suelo y está oscurecido por la presencia de materia orgánica
E (eluvial)	Horizonte mineral empobrecido por pérdida máxima de materia orgánica, hierro, aluminio y arcilla. Enriquecimiento relativo en arena y limo, por lo que su color es blanuzco. Se halla debajo de un O o un A y encima de un B
B	Horizonte mineral formado dentro del suelo. Con estructura edáfica, color distinto al del material originario, Bw; o bien con acumulación de sustancias translocadas, Bt, Bk; o con rasgos hidromorfismo (exceso de agua), Bg.
C	Horizonte mineral, comparativamente poco afectado por procesos edafogénicos, C, Cg, Ct.
R	Roca consolidada subyacente, demasiado dura para romperla con la mano. Si presenta grietas, están separadas más de 10 cm. Contacto lítico.

2.3. INTERPRETAR





Perfil: Horizontes A (oscurecido por la materia orgánica) y C. Mollisol. Morella.

J. Sánchez

2.4. DENOMINACIÓN DE HORIZONTES: PROCESO PREDOMINANTE

El proceso edafogénico dominante se indica por medio de **letras minúsculas** añadidas a la letra mayúscula correspondiente al horizonte principal. Al no existir un acuerdo internacional para su uso sólo de indican aquéllas en las que dicho acuerdo existe generalmente, las restantes pueden consultarse por Internet en el sistema con el que se esté trabajando:

Nomenclatura	Definición	Ejemplos
a	Descomposición de materia orgánica: alta Contenido de fibras < 17% en volumen	Oa, Ha
b (<i>buried</i>)	Horizonte enterrado por aportes	Ab
c	Concreciones de hierro, manganeso, aluminio o titanio	Cc
d	Restricción física para el paso de las raíz. Compactación. No cementado.	Suela de labor
e	Descomposición de la materia orgánica: media Contenido de fibras entre un 17 y un 40% volumen	Oe, He
f (<i>frozen</i>)	Contiene permanentemente hielo	
ff	Permafrost seco	
g (<i>gley</i>)	Fuerte gleificación. Exceso de agua	Ag, Bg, Cg
h (<i>humus</i>)	Acumulación de materia orgánica en horizontes minerales. En un B es iluvial.	Ah Bh
i	Descomposición de la materia orgánica: baja Contenido de fibras > 40% volumen	Oi
j (<i>jarosita</i>)	Acumulación de jarosita: $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	
k (<i>Kalk</i>)	Acumulación de carbonatos, generalmente $CaCO_3$	Bk, Ck

Nomenclatura	Definición	Ejemplos
m	Cementación continua o casi (> 90%). Restringe el paso de las raíces. No se deshace al sumergirlo en agua.	Bkm (CaCO ₃) Bym (yeso) Bqm (sílice) Bkqm (CaCO ₃ y sílice) Bsm (hierro)
n	Presencia de nódulos de carbonato cálcico	Bkn
na	Acumulación de sodio intercambiable. ESP > 15%	Btna
ox	Acumulación residual de sesquióxidos	
p (<i>plow</i>)	Horizonte labrado y alteración antrópica. Si el horizonte afectado era un A, B o C se designa como	Ap
q	Acumulación de sílice por procesos edáficos	Cq
r	Metereorizado o material subyacente blando. Con una cierta cementación. Impiden el paso de las raíces. Dificultad de excavación de baja a alta	Cr
s	Acumulación iluvial de sesquióxidos y materia orgánica	Bs Bhs con materia orgánica
ss (<i>slickenside</i>)	Con caras de deslizamiento. Indica la presencia de arcillas expansibles. Carácter vértico	Bss
t (<i>ton</i>)	Acumulación de arcilla iluvial. Presencia de revestimientos de arcilla.	Bt
u (<i>urbano</i>)	Materiales urbanos o de origen antrópico	
v	Plintita. Material rico en hierro y aluminio y pobre en materia orgánica. Rojizo.	
w (<i>weathering</i>)	Desarrollo de estructura edáfica y color distinto del material originario	Bw
x	Carácter fragipan. Con densidad aparente alta. En seco parece cementado (firme) y en húmedo es muy frágil (se rompe sin deformación previa)	Cx
y (<i>yeso</i>)	Acumulación de yeso (CaSO ₄).2H ₂ O	By, Cy
z	Acumulación de sales más solubles que el yeso	Az

3. RELACIONES ESENCIALES

a) Establecer relaciones entre ambas columnas:

- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Concentración relativa de arena y limo por eluviación muy significativa | a. Horizonte A _p |
| 2. Color oscuro del suelo debajo de un horizonte E en un suelo de bosque húmedo | b. Horizonte B _t |
| 3. Horizonte orgánico de un suelo orgánico | c. Capaceo |
| 4. Translocación de arcilla (iluviación) | d. Horizonte B _g |
| 5. Laboreo | e. Horizonte H |
| 6. Inicio de una explotación a cielo abierto | f. Horizonte E |
| 7. Capa freática alta | g. Pérdida de CaCO ₃ |
| 8. Horizonte orgánico de un suelo mineral | h. Bss |
| | i. Horizonte O |
| | j. Horizonte B _h |

b) Indicar con una x la influencia significativa de los aspectos siguientes:

	Bg	2C	Bw	Bt	Bh	Ap	Bq	Ab	Bss	Ct
Exceso de agua										
Materia orgánica										
Laboreo										
Translocaciones										
Alteración										
Arcilla expansible										
Coluvios										

4. HORIZONTES DE DIAGNÓSTICO

En 1955 el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) (hoy NRCS-USDA) planteó la conveniencia de precisar las definiciones de los horizontes del suelo. Para ello introdujo el concepto de **horizontes de diagnóstico**, definiéndolos con criterios cuantitativos, a ser posible, observables y medibles en campo. Las definiciones propuestas resultan más complejas que las de los horizontes genéticos clásicos, ya que son muy detalladas, pero tienen la ventaja de que su aplicación resulta mucho más objetiva y la clasificación de los suelos, *Soil Taxonomy* (ST) (1960, 2006), más precisa que los sistemas de clasificación precedentes. Años más tarde, la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (hoy IUSS) y FAO adoptaron la idea de los horizontes de diagnóstico, utilizándola en el sistema de clasificación denominado *World Reference Base* (WRB) (UISS-FAO, 1998, 2006) (Unidad 11).

Para evitar confusiones con los horizontes genéticos, el NRCS-USDA al introducir los horizontes de diagnóstico propuso denominaciones y definiciones propias. Los nombres se formaron a base de neologismos, generalmente de raíz latina o griega. Para evitar confusiones y errores, habrá que **recordar y tener en cuenta** que, si bien la WRB utiliza el concepto, y a veces el mismo nombre para los horizontes de diagnóstico, desafortunadamente, no ha mantenido los mismos criterios en las definiciones. Un estudio comparado puede consultarse en Porta y López-Acevedo (2005, pp. 209 a 241).

HORIZONTE DE DIAGNÓSTICO

Es un horizonte del suelo definido morfométricamente o por lo menos con la mayor precisión posible, con datos de campo y de laboratorio para su utilización taxonómica. En un mismo suelo los horizontes de diagnóstico presentes corresponden a una determinada organización y derivan de los procesos edafogénicos que hayan predominado a lo largo de la formación del suelo.

EPIPEDIÓN

Es un horizonte de diagnóstico formado en la parte superior del suelo y que por ello está oscurecido por la materia orgánica (aproximadamente se corresponde a un horizonte A, puede ser parte de un B si ésta está oscurecida).

ENDOPEDIÓN

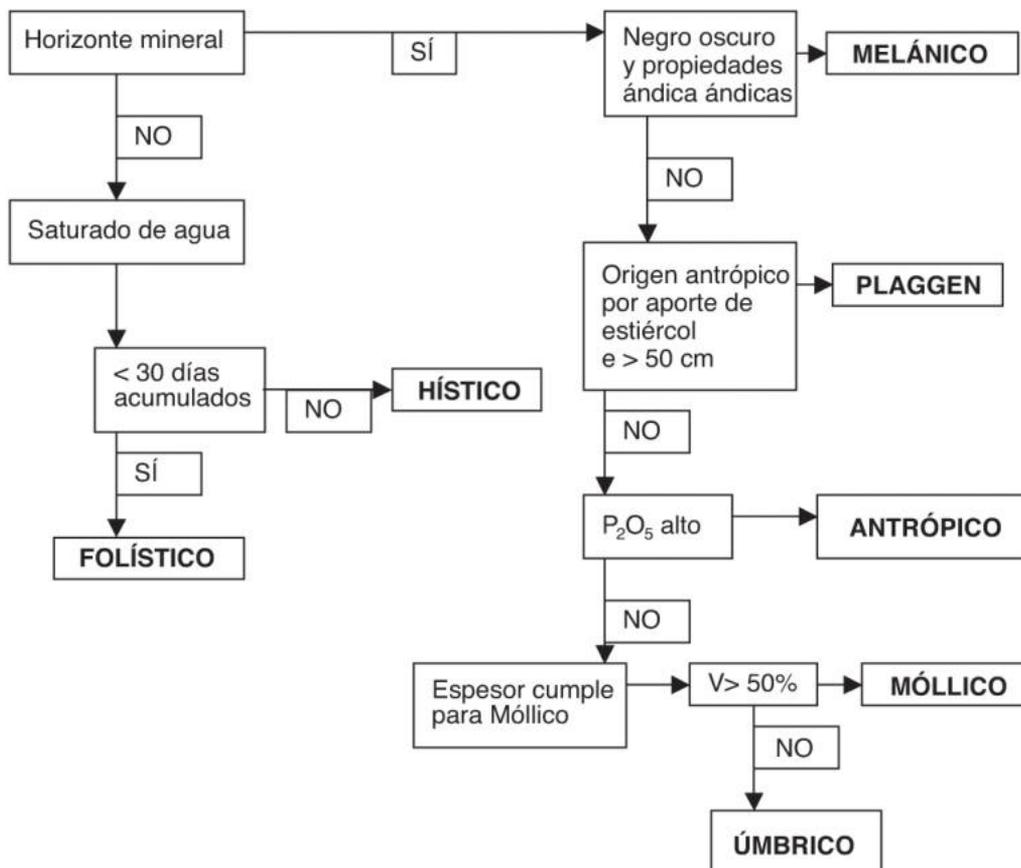
Es un horizonte de diagnóstico formado en el interior del suelo. Se caracteriza por presentar estructura edáfica y un color distinto al del material originario; o bien por presentar acumulación de sustancias translocadas dentro del perfil o ganadas por aportes subsuperficiales; o por presentar rasgos ligados a una saturación por agua. Por ello equivale a un horizonte genético de tipo B.

Se puede afirmar que, por lo general, existe una correspondencia entre horizontes de diagnóstico y horizontes genéticos, pero **no a la inversa**, por la mayor exigencia en los criterios de definición de aquéllos. Haciendo uso de estas equivalencias se introduce la terminología de algunos horizontes de diagnóstico. Para una definición completa debe recurrirse a las claves de clasificación.

Las equivalencias resultan más útiles en el caso de los endopediones:

Horizonte de diagnóstico Soil Taxonomy	Horizontes de diagnóstico WRB	Horizonte genético equivalente
Epipediones		
Móllico	Móllico →	A
Úmbrico	Úmbrico	A
Ócrico	Ócrico (no diagnóstico)	A
Antrópico		A
Melánico	Melánico	A
Hístico	Hístico	H
Endopediones		
Álbico	Álbico →	E
Argílico	Árgico	B _t B _t
Cálcico	Cálcico e hipercálcico	B _k
Cámbico	Cámbico	B _w
Duripán	Dúrico	B _{qm}
Espódico	Espódico	B _h & B _s
Gypsico	Gypsico e hipergypsico	B _y
Nátrico	Nátrico	B _{tna}
Óxico	Óxico	B _{ox}
Petrocálcico	Petrocálcico	B _{km}
Sálico	Sálico	B _z
	Vértico	B _{ss}

5. DIAGNÓSTICO SIMPLIFICADO DE EPIPEDIONES



6. OBSERVAR E INTERPRETAR

A1. La diferenciación de horizontes a partir de un material originario o de una roca madre (horizonación) se hace patente a medida que progresa la edafogénesis.

Indicar los estadios de desarrollo por lo que puede haber pasado un suelo formado a partir de una roca caliza dura hasta llegar a un perfil: A B₁ C R.

7. MANEJO DE DATOS

A1. En la descripción de un suelo se puede leer «en el horizonte cuyo límite superior se halla a 55 cm aparecen nódulos abundantes, dan efervescencia al ácido clorhídrico del 11%». Los análisis de carbonato cálcico equivalente en laboratorio, que siempre se realizan en la tierra fina, es decir, en lo que resulta de secar la muestra y tamizarla a 2 mm, han dado los siguientes resultados: 0-28 cm (no hay), 28-55 cm (no hay), 55-80 cm (35,2%), 80-120 cm (20,8%). Se trata de suelo de viñedo en clima mediterráneo (régimen de humedad xérico).

- Dibujar el perfil de «contenido en carbonato cálcico equivalente» de este suelo.
- Proponer una denominación para los horizontes genéticos de 0 a 28 cm y de 55 a 80 cm.
- ¿Por qué se expresan los resultados en «carbonato cálcico equivalente» y no «carbonato cálcico»? (Ver Unidad 14).

8. COMPLETAR INFORMACIÓN

A1. El noroeste de la Península Ibérica, situado en latitudes medias, presenta condiciones ecológicas que resultan favorables para el desarrollo de turbas (Histosoles), que han sido estudiadas por Martínez Cortázar *et al.* (2000). Los horizontes cuyas propiedades sean: densidad aparente 0,2 Mgm⁻³ (masa de suelo seco referida a la unidad de volumen de suelo), con un contenido de carbono orgánico (c.o.) entre el 20 y 60% se denominan (1), si el suelo se halla (2) de agua. En el caso en que el contenido de carbono orgánico fuese inferior a un 18%, interesaría conocer además el (3) El suelo cimbreo al saltar sobre él, lo que es característico de suelos (4)

9. ANALIZAR Y JERARQUIZAR

E3. 1. Buscar en Internet la definición del horizonte hístico según *Soil Taxonomy* y según la *World Reference Base (Base de Referencia Mundial de Suelos, WRB)*:

- Identificar los criterios utilizados para definir este horizonte de diagnóstico en uno y otro sistema de clasificación de suelos.
- Explicar cuáles son las dos características que aparecen como más relevantes en estos suelos.
- Indicar a qué horizonte genético equivalen y si la correspondencia es biunívoca.

Nota. La densidad aparente es la masa de suelo referida al volumen total al que corresponde dicha masa inalterada.

2. Proceder de igual modo con un horizonte de diagnóstico que sea frecuente en los suelos de la zona en que nos encontramos.

10. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

- Completar:

Los horizontes de diagnóstico se definen con toda precisión en *Soil Taxonomy* desde las primeras versiones (1960 a 2004). Un epipedión (gr. *epi*, sobre) *es/no es* sinónimo de horizonte A, ya que (2) *puede /no puede* ser parte de un horizonte B. En realidad, lo que define el espesor de un epipedión es la profundidad hasta la que está (3) _____ el suelo, debido a la presencia de materia orgánica.

b) Identificar 12 términos referentes a nombres de horizontes de diagnóstico. Elaborar un esquema conceptual según se sugiere.

a	e	s	p	o	d	i	c	o	o
r	k	a	n	d	i	c	a	u	c
g	y	p	s	i	c	o	m	m	i
i	e	r	u	a	c	a	b	b	t
l	s	i	l	i	l	o	i	r	s
i	o	c	l	a	c	i	c	i	i
c	a	l	c	i	c	o	o	c	h
o	o	c	b	o	c	i	x	o	d
m	e	l	a	n	i	c	o	i	u
n	a	t	r	i	c	o	c	r	i

Suelos ácidos (clima húmedo)

Epipediones: -

Enpediones: - - -

Suelos de clima árido y semiárido

Endopediones: - -

Suelos condicionados por el sodio intercambiable

Endopediones: -

Suelos con iluviación de arcilla

Endopedión: -

Suelos volcánicos

Epipedión: -

Endopedión con estructura edáfica y sin acumulaciones significativas

-

Epipediones ricos en materia orgánica

En praderas: -

En zonas saturadas de agua: -

11. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A1. Indicar qué análisis deben pedirse al laboratorio para poder confirmar las hipótesis formuladas tras la descripción del suelo, en los siguientes casos:

a) Endopedión argílico

— Tipo de muestra a tomar en campo:

— Análisis a requerir:

— Proceso a confirmar:

b) Endopedión espódico

— Tipo de muestra a tomar en campo:

— Análisis a requerir:

— Proceso a confirmar:

c) Endopedión cálcico

— Tipo de muestra a tomar en campo:

— Análisis a requerir:

— Proceso a confirmar:

12. CONOCER Y COMPRENDER

A1. Completar los huecos con el término que más se ajuste entre los propuestos:

Al estudiar en el campo un suelo muy evolucionado, los horizontes se distinguirán más fácilmente por la diferencia de (1) _____ entre ellos. En otros casos puede resultar más difícil, como ocurre cuando el color es muy uniforme en todo el perfil. Los horizontes (2) _____ se forman en la parte superior del suelo, por lo que reciben (3) _____, debido a lo cual su color es (4) _____, lo que se utiliza como criterio para distinguirlos al describir el perfil de un suelo.

En un suelo labrado, cualquiera que sea el proceso genético que haya dado origen al horizonte de superficie, éste se denomina (5) _____, excepto en el caso de horizontes orgánicos. Los horizontes se denominan siguiendo unas normas de nomenclatura, sin que se haya llegado a una normalización de aceptación general, lo que dificulta la transmisión de la información. No obstante, en algunos casos sí ha habido coincidencia, más que acuerdo, así los horizontes formados dentro del suelo debido a un proceso de translocación de arcilla iluviada se designará como (6) _____, que no debe ser confundido con un material originario rico en arcilla. La diferencia morfológica que los distingue es la presencia de (7) _____ que se localizan en canales de raíces y poros y tienen un aspecto brillante al ser observados con ayuda de un cuenta hilos. Por otro lado, un horizonte con síntomas de hidromorfismo, colores gris-verdosos y a veces con moteados, se designa añadiendo la letra minúscula (8) _____ a la del horizonte afectado.

En regiones áridas y semiáridas los suelos pueden contener componentes que en condiciones más húmedas (régimen de humedad percolante), de haber existido en el material originario, se habrían ido perdiendo progresivamente por lavado hasta agotarse en el suelo al cabo de un cierto número de años. Entre estos componentes cabe citar el (9) _____, cuya presencia en el perfil del suelo se identifica por medio de un ensayo de (10) _____.

- | | | | | |
|------|-------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|
| (1) | a) textura | b) elementos gruesos | c) color | d) materia orgánica |
| (2) | a) A | b) B | c) C | d) R |
| (3) | a) polvo | b) agua de lluvia | c) purines | d) materia orgánica |
| (4) | a) claro | b) gris | c) oscuro | d) rojo |
| (5) | a) A _L | b) L | c) A | d) Ap |
| (6) | a) Ag | b) Bt | c) Ba | d) Bp |
| (7) | a) arcillas | b) revestimientos de arcilla | c) estructuras | d) colores |
| (8) | a) h | b) g | c) p | d) m |
| (9) | a) cuarzo | b) aluminio | c) hierro | d) yeso |
| (10) | a) cloruros | b) sulfatos | c) AgNO ₃ | d) HCl |

4

ESTUDIO DE SUELOS EN EL CAMPO MORFOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE SUELOS

OBJETIVOS

Entender la organización interna de un suelo.

Aprender la terminología, metodología y técnicas para examinar y describir el perfil de un suelo.

Saber formular hipótesis acerca de la edafogénesis, comportamiento y funciones potenciales de los suelos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Sitio y pedión.

Situación de los puntos de observación.

Intensidad de las observaciones: intensidad geográfica e intensidad tipológica.

La calicata como medio para el estudio del suelo.

Morfología de suelos.

Estudio de la organización interna de un suelo.

Interpretación del perfil de un suelo.

Propiedades, características y atributos del suelo.

Funciones de edafotransferencia.

Descripción de suelos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a ed. Cap. 3. Mundi Prensa. Madrid, 2003.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Cap. 5. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2005.

NRCS. *National Soils Handbook*. Soil Conservation Service-USDA. 2004. www.iec.cat/mapasols.

FAO: *Guidelines for Soil Description*. FAO, 97 pp. Roma, 2006. www.iec.cat/mapasols.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccione el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos.

El suelo está organizado de forma multiescalar desde la cuenca hidrográfica al microambiente, constituyendo un (1) _____ de observación, integrado por diferentes (2) _____ que corresponden a diferentes escalas de trabajo. Un planificador estatal suele estar más interesado por la información a escala (3) _____, es decir aquella que se reflejaría en un mapa a escala (4) _____, si bien la información de suelos se obtiene en campo en una unidad mínima denominada (5) _____, que refleja el intervalo de variación de un conjunto de propiedades que definen un suelo individual.

El horizonte genético que se forma en la parte superior de un suelo mineral por aporte de materia orgánica, principalmente por la raíces, y que se distingue en campo por su coloración (6) _____ se denomina (7) _____. Entre los horizontes subsuperficiales formados por (8) _____ cabe citar el Bt, caracterizado por un componente: (9) _____ que se halla formando (10) _____. Un suelo con un horizonte H se caracteriza por tener un/a mal/a (11) _____, lo mismo ocurre con los horizontes que se designan utilizando el subíndice (12) _____, que se suelen hallar en (13) _____ en zonas húmedas, en las que puede haber (14) _____ próxima a la superficie del suelo.

- | | | | | |
|------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------|
| (1) | a) abanico | b) campo | c) <i>continuum</i> | d) centro |
| (2) | a) organizaciones edáficas | b) suelos | c) mapas | d) planteamientos |
| (3) | a) pequeña | b) grande | c) general | d) estatal |
| (4) | a) 1: 2 500 | b) 1: 5 000 | c) 1: 25 000 | d) 1: 250 000 |
| (5) | a) polipedión | b) pedión | c) perfil | d) calicata |
| (6) | a) grisácea | b) blancuzca | c) oscura | d) siempre muy negra |
| (7) | a) H | b) O | c) E | d) A |
| (8) | a) aportes | b) pérdidas | c) translocaciones | d) transformaciones |
| (9) | a) limo | b) arcilla | c) materia orgánica | d) sales solubles |
| (10) | a) turrículas | b) revestimientos | c) canales | d) acumulaciones |
| (11) | a) permeabilidad | b) drenaje | c) conductividad hidráulica | d) infiltración |
| (12) | a) a | b) t | c) h | d) g |
| (13) | a) plataformas | b) laderas | c) glacis | d) fondos |
| (14) | a) agua | b) capa freática | c) capa impermeable | d) capa endurecida |

2. SITIO Y PEDIÓN

El suelo integra y registra los acontecimientos y los procesos edafogénicos. Una historia compleja y unos cambios cuya explicación es posible obtener del propio suelo, de ahí la importancia del estudio de la morfología, propiedades y características de cada suelo.

Al estudiar los suelos de un determinado paisaje se hace patente que, al aumentar la escala de observación, es decir, al estudiar con mayor detalle el territorio, se puede observar una mayor variabilidad en el conjunto de características, en unas más que en otras, lo que permite separar más unidades de suelos. Por ello, para describir los suelos de un determinado edafopaisaje, deben elegirse **sitios** que resulten representativos, lo que significa que el suelo estudiado esté rodeado de suelos similares, formando un conglomerado cuyas características varíen dentro de un intervalo estrecho.

SITIO

El sitio en el que se halla un suelo hace referencia a un área de poca extensión, que se considera representativa de la forma y superficie del terreno, la vegetación y otros rasgos asociados con el suelo objeto de estudio. Todos estos aspectos que definen el sitio determinan la edafogénesis actual.

PERFIL

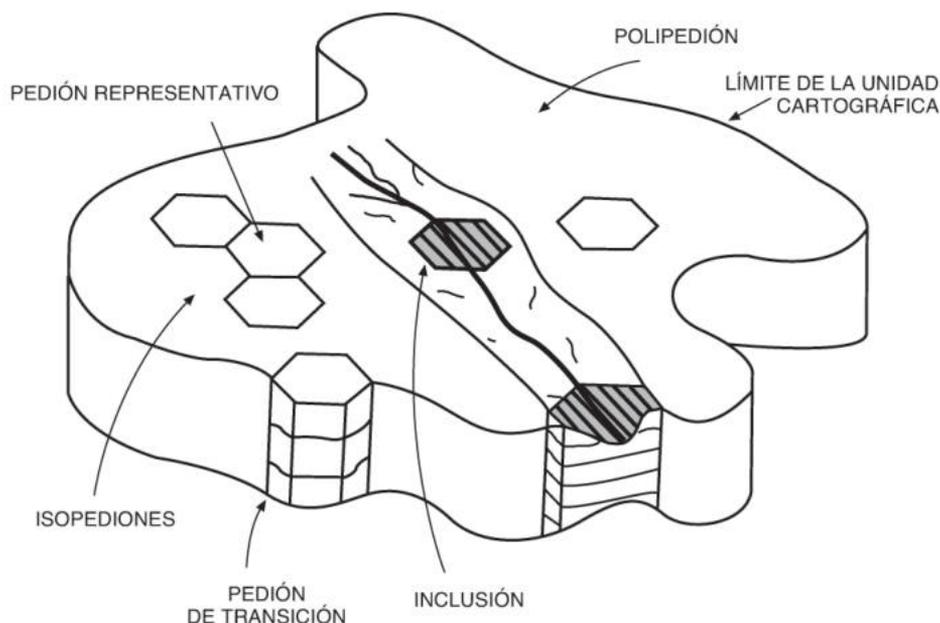
Corte vertical del terreno que permite estudiar el suelo en su conjunto, desde la superficie hasta el material originario.

PEDIÓN

El pedión es una unidad mínima (volumen) de descripción y muestreo de un suelo completo, con dimensiones laterales suficientes para poder caracterizar la naturaleza, disposición y variabilidad de los horizontes.

POLIPEDIÓN

Un polipedión está formado por pediones similares (isopediones) contiguos, cuyas propiedades varían en intervalos estrechos. Por la superficie que ocupa, un polipedión resulta representable en un mapa a escala muy detallada (escala grande).



3. SITUACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN

La cubierta edáfica que integra un edafopaisaje presenta una gran variabilidad espacial, derivada de los factores ecológicos de formación. Por ello resulta de suma importancia una adecuada selección de la localización de los puntos de observación, para que resulten representativos de las distintas unidades de suelos que se pretenden caracterizar con ellos.

La finalidad de una prospección de suelos determina igualmente la localización de los **sitios** a estudiar, así:

- Al investigar un problema concreto, la representatividad vendrá determinada por el sitio donde se haya presentado el problema.
- Para identificar qué suelos hay y cómo se distribuyen en un determinado territorio, se trabaja con la hipótesis de que existe una relación suelo-paisaje que se traduce en una **variación sistemática** de los suelos, en la que inciden los restantes factores ecológicos de formación. La fotointerpretación de fotografías aéreas permite dividir un edafopaisaje en **unidades de suelo** a modo de piezas de un mosaico, cuyas características se supone que varían dentro de un intervalo estrecho. La prospección de campo permitirá verificarlo en mayor o menor grado según la intensidad del trabajo de campo, que depende de la escala.

El uso de un sistema de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) resulta de interés para determinar la situación de los puntos de observación. También se puede recurrir a análisis de modelos digitales del terreno y al establecimiento de relaciones suelo-paisaje.

- Para aquellas propiedades relacionadas con el uso de los suelos (fertilización química, salinidad en zonas de regadío, vertidos, contaminaciones, entre otras), y que por ello presentan una **variación ligada al uso**, sin relación con los factores ecológicos de formación, debe recurrirse a muestreos sistemáticos siguiendo una malla. Los puntos de observación y muestreo pueden ser los de intersección en la malla, o se pueden formar muestras compuestas, mezcla de varias tomadas en una misma malla. Esta manera de proceder

permitirá obtener resultados representables en un mapa de isolíneas, que son aquellas que unen puntos en los que el valor del parámetro considerado es el mismo. Este tipo de muestreos permiten análisis de resultados por medio de técnicas geoestadísticas.

4. INTENSIDAD DE LAS OBSERVACIONES

Un conjunto de propiedades repetidas en los suelos de un espacio determinado permite definir una **clase de suelos**, unidad que tendrá o no representación en un mapa dependiendo de la escala de éste y de la extensión ocupada por la unidad establecida. En **mapas detallados** (escala grande) será posible representar unidades cuyos suelos presenten un conjunto de propiedades muy semejantes, que varían dentro de un intervalo estrecho, aunque la superficie ocupada sea pequeña. A partir de estas propiedades se puede establecer una definición para la unidad en cuestión. Los suelos pertenecientes a una unidad determinada se pueden representar en un mapa delimitándolos con una línea. La superficie así establecida se denomina **delineación** o polígono.

Al elaborar un mapa de suelos, a medida que se trabaje con escalas cada vez menores, habrá delineaciones que dejarán de tener representación a la nueva escala, las nuevas delineaciones pasarán a ser combinaciones de varias clases de suelos, lo que supone una generalización de la información, con nuevas clases de suelos y nuevas definiciones para ellas. Con ello algunas características de la realidad terreno pasan a ser *inclusiones* en el mapa.

Al plantear una prospección de suelos, cabe distinguir dos tipos de intensidades por lo que hace a las observaciones:

INTENSIDAD GEOGRÁFICA

Viene definida por el número de observaciones realizadas en el campo por unidad de superficie. Se conoce igualmente como **densidad de observaciones** y determina la precisión de un mapa. Un mapa de buena calidad atendiendo a la precisión de la información es aquel que está avalado por una densidad de 0,2 a 2 observaciones por cm² del mapa a elaborar, incluyendo calicatas y sondeos. La densidad adoptada depende finalmente de las características de la zona a cartografiar, que suele ser mayor en zonas agrícolas que en las forestales y del presupuesto disponible.

INTENSIDAD TIPOLÓGICA

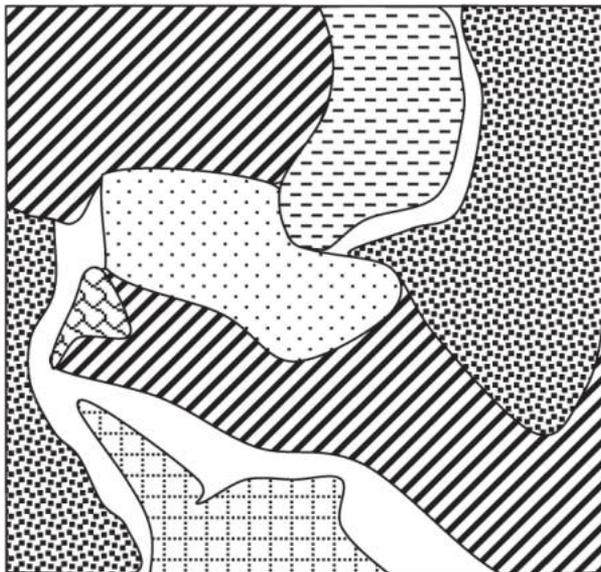
Viene definida por el número de observaciones de campo por unidad cartográfica (conjunto de delineaciones de un misma clase de suelos) establecida. Determina la precisión con la que se establecen los intervalos de variación de las distintas propiedades dentro de cada unidad cartográfica establecida.

La **calidad** de un estudio cartográfico, es decir, su **consistencia**, viene condicionada, entre otros aspectos, por la intensidad geográfica, que es la que da coherencia entre las partes de un edafopaisaje y determina el grado de concordancia (**precisión temática**) entre la realidad terreno y el modelo derivado del estudio de suelos en el campo, que es el que se plasma en el mapa elaborado. Por consiguiente, si bien es posible hacer un zoom de un mapa de suelos para aumentar la imagen y con ello mejorar la legibilidad, deberá tenerse en cuenta que la nueva imagen no contendrá más delineaciones, como correspondería a la nueva escala de la imagen. Ni vendrá avalada por la densidad de observaciones requerida.

5. INTERPRETAR Y DISCUTIR

G2. Comparar estas dos figuras en el supuesto de que la primera represente una superficie cuadrada de un mapa de suelos de 20 cm de lado y en la segunda, la misma zona, si bien en este caso la superficie que ocupa en el mapa es un cuadrado de 10 cm de lado (aun cuando en la imagen no sea así).

- Describir las diferencias.
- Calcular el número de observaciones que se han tenido que realizar para conseguir una intensidad geográfica de 0,5 en cada caso.
- ¿Cuál de los dos mapas representa mejor la realidad terreno y cuál de ellos permite realizar previsiones con mayor fiabilidad?
- Indicar cuántas unidades cartográficas y cuántas delineaciones se han representado en cada caso.
- ¿Cuántas observaciones deben realizarse para lograr una intensidad tipológica de 5 en cada caso?



6. LA CALICATA COMO MEDIO PARA EL ESTUDIO DEL SUELO

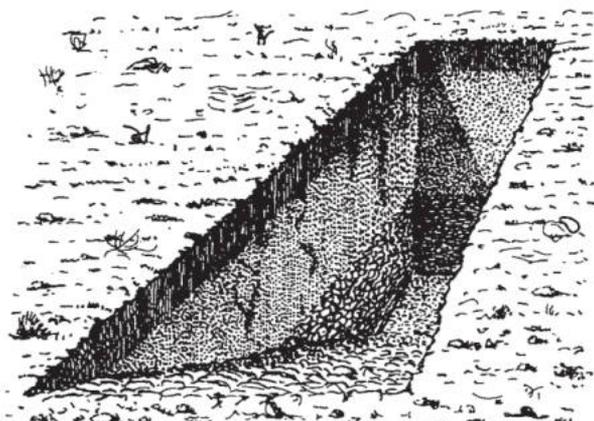
El estudio de un pedión permite:

- Observar e inferir propiedades del suelo.
- Poner en evidencia el resultado de la edafogénesis (horizontes) y, a partir ahí, poder inferir cuáles han sido los procesos edafogénicos que han predominado.
- Estudiar el funcionamiento general del suelo: régimen hídrico, condiciones de drenaje (facilidad con que se elimina el agua con relación a los aportes), aireación, entre otros aspectos.
- Identificar el modelo de distribución de las raíces, pudiendo inferir la penetrabilidad del suelo y el volumen explorable.
- Establecer conexiones lógicas entre las propiedades morfológicas y el comportamiento, características de uso y respuesta del suelo.

El estudio de un suelo debe realizarse en un **corte fresco** del terreno, para que no hayan sido alteradas sus características y propiedades por haber estado expuesto a la intemperie durante cierto tiempo e incluso haya crecido vegetación. En trabajos profesionales resulta imprescindible abrir calicatas para estudiar, describir y muestrear los suelos de la zona a prospectar.

CALICATA

Una calicata es una excavación que permite observar un suelo en su conjunto. Debe tener un tamaño suficiente para poder trabajar con comodidad, unos 70 cm de ancho y unos 2 metros de profundidad o hasta una roca dura si está más superficial.



Una calicata permite estudiar el perfil de un suelo, los distintos horizontes y su organización interna, así como la toma de muestras (se muestrea desde la parte inferior a la superficie).

Imagen tomada del libro *Què és la Ciència del Sòl?* (Oriol y Valle, 1937).

Para verificar el grado de uniformidad de las unidades de suelos y para fijar límites entre delineaciones se utilizan sondeos con barrena manual y cortes recientes.

7. MORFOLOGÍA DE SUELOS

La morfología de suelos hace referencia a las formas y estructuras observables en el perfil de un suelo a ojo desnudo y con ayuda de una lupa de mano, un cuchillo y algunos ensayos para diagnósticos de campo.

El estudio se realiza horizonte a horizonte y se basa principalmente en los colores, formas, texturas, estructuras, elementos gruesos, compacidad, modelo de distribución de las raíces, entre otras características, todas ellas fáciles de estudiar, medir o estimar en campo y seleccionadas por su significación para las funciones y el comportamiento de los suelos.

Por medio de los estudios macromorfológicos en campo se puede llegar a interpretar la organización interna de un suelo, el comportamiento esperable frente a distintos usos, así como los procesos edafogénicos que le han dado origen.

8. ESTUDIO DE LA ORGANIZACIÓN INTERNA DEL SUELO

El estudio de la organización de un suelo se inicia intentando identificar los **horizontes** existentes, lo que resulta fácil si hay diferencias de color entre ellos y más complejo en otros casos.

HORIZONTES

Se trata de volúmenes o capas de disposición horizontal o subhorizontal, que aparecen superpuestas en un suelo, si bien no se trata de material depositado o sedimentado, sino que son el resultado de la diferenciación del material originario debido a procesos de horizonación (procesos edafogénicos). Por ello se les denomina **horizontes genéticos**.

HORIZONACIÓN

Procesos de diferenciación de horizontes en un suelo debido a la edafogénesis.

Los horizontes genéticos se designan con letras mayúsculas del abecedario.

SUELOS MINERALES

Los **horizonte genéticos principales** son:

- O** horizonte orgánico de un suelo mineral. Se trata de una capa de restos orgánicos encima de la superficie de un suelo mineral.
- A** horizonte formado en la parte superior de un suelo. Se caracteriza por presentar un oscurecimiento debido a la incorporación de materia orgánica, principalmente procedente de la descomposición de las raíces finas o de material orgánico procedente de un horizonte O, en el caso de que exista.
- B** horizonte formado dentro del suelo, pudiendo deberse a diversos procesos:
 - B_w** formado por alteración. Presenta una estructura diferente a la del material originario, a veces también un color distinto.
 - B_t** formado por acumulación arcilla translocada (iluviada).
 - B_k** formado por acumulación de carbonato cálcico translocado.
 - B_y** formado por acumulación de yeso translocado.
 - B_h** formado por acumulación de materia orgánica iluviada.
 - B_s** formado por acumulación de sesquióxidos translocados.
- C** horizonte formado por material de características semejantes a las del material originario.
- R** roca consolidada subyacente, sin apenas grietas. Constituye un contacto lítico.

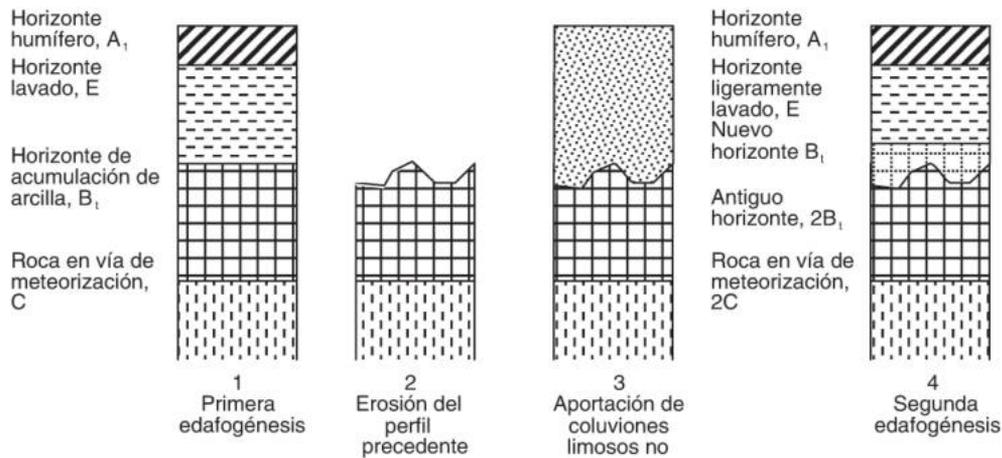
SUELOS ORGÁNICOS

H Horizonte o capa orgánica de un suelo orgánico, formado *in situ* en condiciones de saturación de agua durante períodos prolongados, por acumulación de material orgánico no descompuesto o parcialmente descompuesto.

9. INTERPRETACIÓN DEL PERFIL DE UN SUELO

Antes de empezar a describir un perfil de un suelo interesa verificar su representatividad, para ello se observarán los distintos lados, para verificar si se corresponden entre ellos o se observa alguna transición o anomalía.

Gaucher (1987) representa distintas situaciones, desde un perfil simple a otros con superposición de materiales que, a su vez, han sido objeto de procesos formadores distintos a los que dieron lugar al suelo que ahora permanece enterrado.



10. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. 1. a) Describa con sus propias palabras las imágenes.

b) Indique posibles horizontes en cada suelo.

c) Indique alguna relación entre la morfología observada y las funciones del suelo.



J. Porta



J. Porta

2. Describa con sus propias palabras lo que se observa en la imagen y formule alguna hipótesis para explicarlo.



J. Porta

3. Describa las condiciones ecológicas de formación de este suelo sabiendo que se trata de una turbera de alta montaña (Pirineos, Cataluña, España).



J. Porta

11. PROPIEDADES, CARACTERÍSTICAS Y ATRIBUTOS DEL SUELO

PROPIEDADES DEL SUELO

Las propiedades de un suelo se miden o infieren a partir de observaciones directas en campo y laboratorio. La inferencia de propiedades a partir de otras propiedades observadas se basa en la existencia de conexiones lógicas entre unas y otras.

Propiedades observadas. Se pueden apreciar de forma directa en campo: límite entre horizontes, espesor de un horizonte, profundidad del suelo, existencia de una suela de labor, color, manchas, elementos gruesos, textura, estructura, consistencia, cementaciones, acumulaciones, grietas, etc.

Propiedades inferidas. Son aquellas que se obtienen a partir de las propiedades observadas o medidas. Entre ellas cabe indicar: el grado de desarrollo del suelo, efectos del laboreo, componentes, régimen de humedad, aireación, densidad aparente, condicionantes para la nascencia, riesgos de contaminación de una capa freática, riesgos de corrosión, problemas para construcciones y canales, etc.

ATRIBUTOS DEL SUELO

Son características del suelo que se observan y se miden o estiman, o que se infieren a partir de propiedades que se miden o se observan en el suelo.

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Son aquellos atributos del suelo que puede medirse o estimarse: profundidad efectiva, textura, estructura, contenido de materia orgánica, pH, compactación, profundidad de aparición de horizontes cementados o endurecidos, salinidad, contaminantes, profundidad a la capa freática, profundidad adecuada para instalaciones subterráneas de servicio público.

CUALIDADES DEL SUELO

Son atributos de comportamiento y de rendimiento que no son directamente medibles. Se infieren a partir de observaciones de las condiciones dinámicas y de las propiedades del suelo. Entre ellas cabe citar: clase de drenaje, corrosividad, erosionabilidad por el viento, etc.

Las propiedades y cualidades de los suelos son los criterios utilizados para interpretar información de suelos, para predecir el comportamiento del suelo, su clasificación y cartografía.

CUALIDAD DE LAS TIERRAS

Es un atributo complejo de las tierras para una clase concreta de empleo (productividad de los cultivos, productividad de los animales domésticos, productividad forestal, entre otras). Como ejemplos pueden citarse la humedad disponible, la resistencia a la erosión, los peligros de inundación, el valor nutritivo de los pastos, la accesibilidad, rendimientos de los cultivos, incrementos anual medio de las especies arbóreas, entre otras.

12. FUNCIONES DE EDAFOTRANSFERENCIA

Al realizar una prospección de suelos, por el tiempo que requieren y por su elevado coste, no se determinan de forma sistemática todos los parámetros posibles. Así por ejemplo, la densidad aparente, la conductividad hidráulica, la velocidad de infiltración, la capacidad de intercambio catiónico o la mineralogía de arcillas son ensayos y análisis caros de realizar, que consumen tiempo y que sólo se requieren para aplicaciones específicas, por lo que no se realizan siempre. Es posible que, con posterioridad, se requiera tal información y que no se disponga de ella. Esto puede limitar la aplicación regional de modelos de simulación detallados basados en procesos.

Dado que obtener esta información con nuevo trabajo de campo consumiría tiempo y seguiría resultando muy caro, se han desarrollado expresiones que permiten su estimación a partir de parámetros más simples, cuyos valores numéricos estén disponibles en los mapas de suelos de las mismas unidades de suelo. Estas expresiones reciben el nombre de **funciones de edafotransferencia** (Bouma, 1989).

FUNCIONES DE EDAFOTRANSFERENCIA (FET)

Funciones predictivas de ciertas propiedades del suelo, a partir de otras propiedades medidas más fácilmente, rutinariamente o de forma más económica.

Se han establecido relaciones entre la morfología y las propiedades hidráulicas del suelo con ayuda de programas informáticos, para ser incorporadas en FET. Cabe destacar, que la utilización correcta de una FET requiere

re su **validación** con datos de campo. Por ello sería deseable que, cuando se hizo la prospección inicial, se hubiese tenido la previsión de realizar un cierto número de estos ensayos o análisis, para poder contrastarlos con los valores estimados a partir de una FET. En caso de no haber sido así, se deberá realizar trabajo de campo complementario, para disponer de valores reales con los que validar la función. Por otro lado, no debe olvidarse que una FET, por su **carácter empírico**, sólo será de aplicación para los suelos para los que haya sido establecida. Las FETs establecidas para los suelos de una clase de suelos resultarán más precisas, que si se trabaja con el conjunto de una base de datos, pero no serán más fiables (Woesten *et al.*, 2001; Pachespsky y Rawls, 1999).

13. DESCRIPCIÓN DE SUELOS

Al describir un suelo se debe prestar atención a aquellas propiedades que resulten relevantes para los diferentes tipos de usuarios de información de suelos. Para poder introducir en una base de datos la información generada en campo, resulta imprescindible utilizar **criterios normalizados**.

La voluntad de utilizar este tipo de criterios en la descripción de suelos empezó a generalizarse a nivel mundial a partir de la publicación en 1937 (revisado en 1962) del *Soil Survey Manual* por parte del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (<http://soils.usda.gov/technical/handbook/>). Con la misma finalidad se han publicado las *Guidelines for Soil Description* (FAO, 1971, 2006), y en diversos países se han elaborado versiones específicas. En el caso de España se ha publicado el *Manual SINEDARES* (CBASA, 1979), accesible por Internet (www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés) y la *Guía de Campo de Suelos* (Porta *et al.*, 2005).

Las descripciones de suelos se hacen horizonte a horizonte, por lo que la **identificación de horizontes** es la primera operación a realizar. Se le debe dedicar todo el tiempo que sea necesario, para hacerlo de una forma precisa, ya que todo el trabajo posterior depende de ello. La existencia de diferencias de color a distintas profundidades es uno de los criterios más útiles para distinguir los límites entre horizontes, ahora bien, cuando el perfil presente un color uniforme, se deberá recurrir a otros criterios, entre ellos, diferencias a distintas profundidades en: la consistencia al intentar clavar un cuchillo, la textura, la estructura, el porcentaje y tipo de elementos gruesos, el modelo de distribución de raíces, entre otros.

La descripción de un suelo incluye generalmente los siguientes aspectos:

Información general: número del perfil, fecha de descripción, autor, localización, hoja del mapa y coordenadas, tipo de descripción, fisiografía del paisaje, etc.

Descripción del sitio y usos del suelo:

Factores ecológicos de formación del suelo como condicionantes de la clase e intensidad de los procesos:

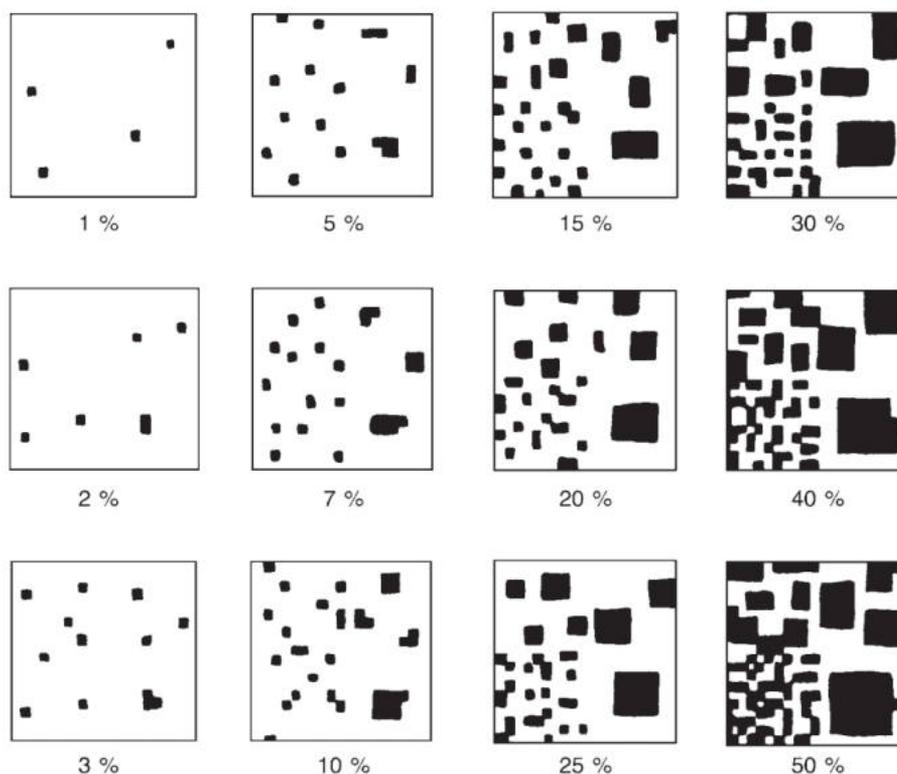
- Clima general, importante para suelos de edafogénesis reciente y para los usos del suelo.
- Condiciones meteorológicas inmediatas: agua y temperatura.
- Morfología del sitio: atributos del relieve (cota, forma y configuración).
- Posición del suelo en la toposecuencia.
- Uso del territorio y vegetación.
- Material originario y material subyacente. Discontinuidades litológicas en el perfil, que generalmente están asociadas a cambios ambientales.
- Afloramientos rocosos y pedregosidad superficial.

Descripción del perfil del suelo horizonte a horizonte: morfología y otras características:

- Profundidad del suelo y profundidad efectiva de enraizamiento.
- Límites entre horizontes: profundidad, amplitud y forma (plana, ondulada, lenguas, etc.)
- Estado de humedad en el momento de la descripción.
- Tamaño de los constituyentes minerales: textura y elementos gruesos ($\varnothing > 2$ mm).
- Color con el código Munsell: matiz (longitud de onda de la luz reflejada), que corresponde a cada página de la tabla; brillo (albedo) en ordenadas, croma (intensidad cromática) en abscisas. Ejemplo de color codificado: 7,5 YR 5/7, donde 7,5YR es el matiz, 5 el brillo y 7 el croma.

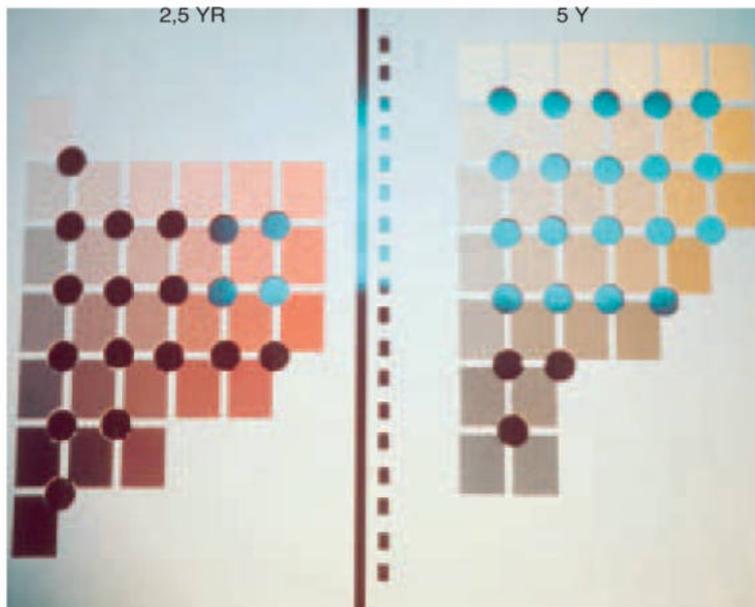
- Moteado: existencia de manchas en más de un 10% (proporción, tamaño, naturaleza, distribución, color).
- Ensayos de campo para identificar: carbonato cálcico (HCl 11%), yeso (BaCl_2 10%), sales más solubles que el yeso (cloruros con AgNO_3 ; sulfatos con BaCl_2 ; pH; manganeso con H_2O_2 , entre otros múltiples ensayos (Porta *et al.*, 2005).
- Materia orgánica: cantidad y grado de unión con la materia mineral.
- Organización de los constituyentes del suelo: estructura (grado de desarrollo, forma y tamaño de los agregados).
- Propiedades mecánicas: la consistencia depende del grado de humedad de la muestra y se expresa por medio de la compactidad, adhesividad, plasticidad, friabilidad y dureza.
- Porosidad: macroporosidad.
- Grietas desde superficie del suelo: anchura y profundidad.
- Concentraciones: enriquecimientos secundarios (revestimientos de arcilla, carbonato cálcico, yeso, materia orgánica, entre otros); cementaciones (pisolitos, nódulos, costras, entre otras); y reorientaciones de partículas debido a presión (caras de deslizamiento).
- Actividad biológica y sistema radicular.
- Actividades antrópicas: artefactos, materiales transportados y materiales técnicos resultantes de procesos industriales.

Los porcentajes de distintos componentes: elementos gruesos, manchas, entre otros, se pueden estimar por medio del siguiente cuadro elaborado por FAO.



14. OBSERVAR Y DESCRIBIR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras estas dos páginas de una Tabla de Colores Munsell.
- b) ¿En qué parte de la página se sitúa el color del fragmento de suelo tallado, cómo el brillo y el cromatismo?



15. METODOLOGÍA DE TRABAJO

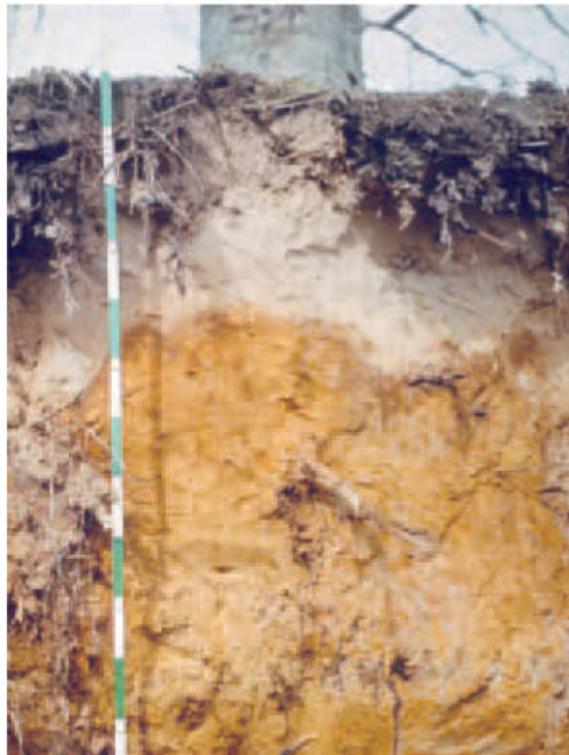
G2. Anotar de forma codificada en la ficha de descripción de campo las morfologías correspondientes a «estructura (grado de desarrollo)» descritas en los horizontes 1, 2, 3, 5, 6 y 7:

Horizonte	Grado
1	Fuerte
2	Fuerte
3	Moderada
5	Moderada
6	Débil
7	Material original en más del 50%

	1	2	3	4	5
Sin estructura					
S/estructura por elementos gruesos					
Muy débil					
Débil					
Moderada					
Fuerte					
Muy fuerte					
Material original					
Material original > 50% volumen					

16. OBSERVAR Y DESCRIBIR

G2. Identificar los horizontes genéticos y describir la forma y nitidez los límites entre el tercer y cuarto horizonte:



C. Roquero

17. INTERPRETAR Y COMUNICAR

E3. Discutir y redactar un informe a presentar en público acerca de los siguientes aspectos:

- Al estudiar las descripciones de los suelos de una zona se observa que existen unidades de suelos en las que se ha descrito la presencia de yeso. Buscar información acerca de si este componente de estos suelos puede crear algún problema. Por Internet resulta accesible el *National Soil Survey Handbook*, que en su parte 618 trata de las *Soil Properties and Qualities* y, dentro de ella, en 618.31 hace referencia al yeso (definición y significación). Es accesible en Internet: <http://soils.usda.gov/technical/> (Verificada en 2007). También se puede acceder a través de www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés: USDA-NRCS.
- En otra parte del trabajo se indica que al cortar con el cuchillo muestras de los suelos situados en un fondo, se observa que aparecen a modo de estelas negruzcas, paralelas entre ellas. ¿Cuáles de las siguientes propuestas pueden resultar correctas?

- b.1) Las estelas son concreciones deleznales de hierro y manganeso.
- b.2) Son debidas a la presencia de una capa freática oscilante a lo largo del año.
- b.3) Se trata de un suelo bien drenado.
- b.4) Al aportar a estos suelos aguas con elementos contaminantes solubles, el riesgo de que lleguen a pasar a la capa freática es bajo.
- b.5) Se trata de materia orgánica debido a su color oscuro.

18. RELACIONES ESENCIALES

A1. Establecer relaciones entre ambas columnas referentes a morfología de suelos: propiedades observadas en campo y propiedades susceptibles de ser inferidas a partir de las primeras.

Propiedades observadas	Propiedades inferidas
1. Existencia de grietas que se abren durante los períodos secos del año y presencia de caras de deslizamiento	a) Muy pedregoso, problemas para las segadoras y aperos de labranza
2. Color del horizonte en húmedo 7,5YR 2/2 en superficie del suelo	b) Dificultad para la penetración de las raíces y el agua
3. Pedregosidad superficial: la superficie ocupada por fragmentos de diámetro de 15 a 30 cm es de un 10%	c) Suelo que absorbe la radiación, cálido en primavera. Adelanta la germinación.
4. Existencia de una suela de labor	d) Problemas de asfixia radicular, capa freática
5. Horizonte cuyo color en seco es 7,5YR 8/2 y da efervescencia con HCl del 11%	e) Componente posible: CaCO ₃
6. Presencia de elementos xenobióticos en un horizonte subsuperficial	f) Arcillas expansibles
7. Moteado, profundidad de la capa freática estabilizada a menos de 45 cm	g) Horizonte oscurecido por la m.o.: B
8. Nódulos calizos abundantes.	h) Translocación de iones calcio y bicarbonato y preprecipitación dentro del suelo.

19. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. 1. Buscar en Internet y en la bibliografía existente en la biblioteca el significado de los siguientes términos: slickenside, clay skin, albedo, compacidad.

2. Definir los siguientes horizontes genéticos correspondientes a suelos minerales:

O
A
B
C
R

20. OBSERVAR E INTERPRETAR

Describe con sus propias palabras las dos imágenes y formule alguna hipótesis acerca del suelo y sus horizontes.



J. Porta



J. Porta

21. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Completar con el término que resulte adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los cuatro propuestos:

Le pasan para que revise el borrador del Pliego de condiciones técnicas para un concurso público para la realización de una hoja de un mapa a escala 1: 25.000. En el documento se indica que deberá realizarse un total de 1.200 observaciones (calicatas más sondeos), lo que permite calcular la intensidad (1) _____. Para cada sitio se deberán describir los atributos del relieve consistentes entre otros aspectos en (2) _____ y _____.

Lo que se describe en campo son (3) _____ que proporcionan información acerca de la variabilidad lateral de los horizontes, así como las irregularidades en su espesor y la posible existencia de horizontes intermitentes.

Se indica que al realizar ensayos en campo deberá utilizarse (4) _____ para verificar la presencia de cloruros; para (5) _____ se utilizará cloruro bórico del 10%. Para la descripción de los colores deberán utilizarse las Tablas Munsell, que describen los colores por medio de tres parámetros (6) _____, _____ y _____.

Se indica que se preste especial atención en la delimitación de las áreas cuyos suelos presenten grietas profundas y anchas desde la superficie del suelo. Ello se debe a que a partir de esta observación se puede inferir (7) _____ en el suelo. Los horizontes de máxima acumulación se denominan genéricamente horizontes (8) _____.

Las manchas deberán describirse en todos aquellos perfiles en los que supongan como mínimo un (9) _____. En la denominación de horizontes deberán seguirse las siguientes convenciones: para los horizontes subsuperficiales de alteración (10) _____, mientras que para los de acumulación de arcilla (11) _____, y para los de (12) _____, B_k . Al remitir las muestras al laboratorio las etiquetas no deberán ponerse nunca dentro de las bolsas, ya que con la humedad podrían destruirse, debiendo rotular y etiquetar por fuera. Las bolsas correspondientes a muestras de un mismo perfil se remitirán juntas al laboratorio dentro de otra bolsa.

- | | | | | |
|------|----------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
| (1) | a) geográfica | b) del mapa | c) tipológica | d) alta |
| (2) | a) forma | b) relieve | c) configuración | d) paisaje |
| (3) | a) horizontes | b) pediones | c) agregados | d) subórdenes |
| (4) | a) H_2O_2 | b) $BaCl_2$ | c) $AgNO_3$ | d) $NaNO_3$ |
| (5) | a) arcilla | b) cloruros | c) sulfatos | d) sulfuros |
| (6) | a) hue | b) croma | c) matiz | d) brillo |
| (7) | a) movimientos | b) secado | c) fragilidad | d) inconsistencia |
| (8) | a) A | b) B | c) C | d) de diagnóstico |
| (9) | a) 5% | b) 1% | c) 10% | d) 25% |
| (10) | a) B_a | b) B_{al} | c) C_w | d) B_w |
| (11) | a) B_a | b) B_t | c) B_{ac} | d) B_c |
| (12) | a) acumulación de $CaCO_3$ | b) acumulación de potasio | c) acumulación de yeso | d) acumulación de krotovinas |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

En esta parte introductoria de la Unidad se ofrece una visión de conjunto de las propiedades físicas del suelo, relacionándolas con su comportamiento y funciones.

Al finalizar el estudio de la Unidad se debe ser capaz de:

Describir las distintas propiedades físicas y saber cómo se miden y evalúan.

Entender el comportamiento físico del suelo y su importancia en relación al uso de los suelos.

Realizar cálculos referentes a propiedades físicas y saber interpretar los resultados.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

El suelo como sistema de tres fases.

Propiedades físicas del suelo.

Composición granulométrica. Textura.

Color.

Estructura del suelo: organización de las partículas individuales.

Densidad y porosidad.

Consistencia, sellado, encostramiento y tixotropía.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*, 3ª edición. Cap. 6, 11 y 14. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2003.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Cap. 4, 5, 9 y 10. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 2005.

Hillel, D.: *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier, 494 pp. New York, 2004.

Hillel, D.: *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press. New York, 1998.

Dirksen, Ch.: *Soil Physics Measurements*. GeoEcology. Catena Verlag, 154, pp. Reiskirchen, 1999.

Lal, R. y Shukla, M.J.: *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, Inc., 716 pp. New York. 2004.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos:

(1) _____ pueden estudiarse a diferentes escalas al constituir el suelo un *continuum*, para ello deben utilizarse enfoques metodológicos muy distintos. Un paisaje puede estudiarse con ayuda de fotos aéreas y un (2) _____, enfoque que se conoce como fotointerpretación. En campo, las partículas de arena de una duna, así como los agregados que pueden formar un horizonte se aprecian (3) _____. Si se desmenuza un agregado sólo será posible identificar partículas con ayuda de una lupa hasta un cierto tamaño, mientras que la observación de partículas submilimétricas requiere un microscopio petrográfico que permite estudiar (4) _____ de suelo, y para mayores aumentos se utiliza un microscopio electrónico que permite además detectar qué elementos químicos están presentes. La movilización selectiva de sustancias desde la parte superior del suelo a una inferior donde se acumulen, agregándose a los materiales edáficos preexistentes se denomina (5) _____. En el caso de verse afectadas las arcillas se requiere que estén dispersas para poder ser movilizadas y el resultado es la formación de un horizonte (6) _____. La ausencia de oxígeno en un horizonte tiene lugar cuando el espacio poroso está lleno de (7) _____ y ello induce a que tengan lugar procesos redox, que afectarán a elementos que puedan actuar con (8) _____ valencia. Estos procesos darán lugar a colores (9) _____. Sin embargo, los suelos desarrollados a partir de esquistos, roca (10) _____ de color muy oscuro, heredarán este color, que no debe interpretarse erróneamente como debido a una abundancia de (11) _____. Un horizonte genético con acumulación de materia orgánica iluviada se designa con las letras (12) _____. De acuerdo con el diagrama de Bowen, la posibilidad de encontrar olivino en la fracción arena de un horizonte será (13) _____, lo contrario que el cuarzo.

- | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|
| (1) a) las organizaciones edáficas | b) las plantas | c) los datos | d) las fronteras |
| (2) a) microscopio | b) estereoscopio de espejos | c) escáner | d) ploter |
| (3) a) con lupa | b) al microscopio | c) a simple vista | d) con SEM |
| (4) a) láminas delgadas | b) los elementos químicos | c) las redes | d) la fauna |
| (5) a) movimiento descendente | b) translocación | c) transformación | d) capilaridad |
| (6) a) Bt | b) Bw | c) Ba | d) Ct |
| (7) a) aire | b) arcilla | c) agua | d) anhídrido carbónico |
| (8) a) una única | b) más de una | c) ambi- | d) iso- |
| (9) a) rojos | b) pardos | c) grises, verdes y moteados | d) blancos |
| (10) a) ígnea | b) caliza | c) volcánica | d) metamórfica |
| (11) a) hierro | b) manganeso | c) materia orgánica | d) carbón |
| (12) a) Bmo | b) Bw | c) Bh | d) Bs |
| (13) a) alta | b) media | c) muy baja | d) nula |

2. EL SUELO COMO SISTEMA DE TRES FASES

El suelo es un sistema abierto (con entradas y salidas), dinámico (varía con diferentes escalas de tiempo según la propiedad considerada) y, al ser un medio poroso, está constituido por tres fases que interactúan entre ellas:

- Fase **sólida**: integrada por componentes inorgánicos (procedentes de la meteorización y de aportes. Representa generalmente más del 95% de la masa de suelo seco) y componentes orgánicos (restos de plantas en distinto grado de descomposición). La organización de estos componentes crea un espacio de huecos, lo que es de especial relevancia para las funciones del suelo. La fase sólida es relativamente estable a escala humana, para unas condiciones ecológicas dadas.
- Fase **líquida** (agua del suelo): agua con iones disueltos (a muy baja concentración, excepto en suelos salinos) y sustancias en solución o en suspensión. La cantidad de agua y su composición son muy variables, incluso a lo largo del día. La fase líquida permite que haya reacciones químicas, transformaciones y translocaciones en el suelo y suministra agua y nutrientes en una forma que las plantas pueden absorber.
- Fase **gaseosa** (aire o atmósfera del suelo): los gases que la componen (oxígeno, nitrógeno, anhídrido carbónico, vapor de agua) se mueven por difusión, al existir un gradiente de concentración entre dos puntos. La aireación del suelo es necesaria, ya que muchos procesos biológicos consumen oxígeno y producen

anhídrido carbónico. El contenido de aire y su composición vienen determinados por las relaciones suelo–agua–planta y, aunque son semejantes a los del aire, son mayores la proporción de vapor de agua y la de anhídrido carbónico. Su composición puede variar mucho a corto plazo. La fase gaseosa es la que proporciona oxígeno para la respiración de la raíces y su falta produce anoxia y muerte de la planta.

3. ANÁLISIS DE RELEVANCIA

G2. Discutir cuál será la influencia de las fases líquida y gaseosa según que el suelo esté saturado de agua total o parcialmente, o bien esté permanentemente seco, en los siguientes supuestos, para:

- a) Agricultura: plantación de melocotoneros (duraznos).
- b) Populicultura: plantación de chopos (*Populus sp*).
- c) Espacios de ocio: área de picnic.
- d) Medio natural: vegetación de *Typha latifolia*.

4. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Tradicionalmente, se ha venido prestando más atención a las propiedades químicas que a las físicas, en el estudio de la fertilidad de los suelos. Ello es así, por la mayor facilidad que supone la realización de análisis químicos de suelos, frente a los ensayos físicos. No obstante, hay que tener en cuenta que la importancia de las propiedades físicas es tan relevante o más que las químicas, en el comportamiento y funciones de los suelos.

Además, la persistencia de las propiedades físicas a lo largo del tiempo hace que condicionen más el comportamiento, funciones y usos de un suelo que las químicas, siendo además más difícil poder corregir sus defectos. Por ello, en caso de degradarse, no resultará fácil su rehabilitación. Una dificultad a añadir reside en el hecho de que la medida de las propiedades físicas suelen requerir metodologías de campo laboriosas de implementar, y que consumen mucho tiempo. Por consiguiente, se trata de una información cara de obtener y, por ello, su determinación no se suele incluir de forma sistemática en las prospecciones de suelos, excepción hecha de la textura.

Las propiedades físicas del suelo son las siguientes:

Distribución porcentual según el tamaño de partículas: granulometría o textura. Se establecen tres fracciones atendiendo al tamaño: arena, limo y arcilla.

Porosidad

Relación entre el volumen de huecos y el volumen total.

Densidad aparente

Relación entre la masa seca de partículas y el volumen total.

Densidad real

Relación entre la masa seca de partículas y el volumen de éstas.

Retención de agua

Almacenamiento de agua en un espesor de suelo. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD).

Permeabilidad

Velocidad de movimiento del agua en el suelo.

Infiltración

Entrada de agua en el suelo a partir de su superficie.

5. COMPLETAR INFORMACIÓN

A1. En el cuadro que sigue se indican las propiedades físicas del suelo, algunas unidades de medida, ecuaciones de dimensión y algunos órdenes de magnitud, que deberán retenerse. Completar la información que falta en alguno de los bloques.

Propiedades físicas	Unidades SI	Ecuación de dimensiones	Orden de magnitud de las medidas
Masa volumen densidad real (de las partículas) densidad aparente (del suelo) superficie específica: relación entre la superficie y unidad de masa de partículas	cm ² g ⁻¹	[L ² M ⁻¹]	1100 a 5000 (2650) 250 a 1800 (1350) 10 (arena) a 500 (limo) arcillas: muy elevada
espesor de un horizonte profundidad del suelo profundidad efectiva (explorable)	cm cm cm	[L] [L] [L]	cm a m cm a m 2 m
Granulometría (textura): Distribución de tamaños de partículas individuales por clases	% en masa	[MM ⁻¹]	100 para cada fracción: 0 a 100
Color moteado	Munsell		
Estructura agregados inestabilidad de los agregados sellado superficial encostramiento superficial espacio de huecos: porosidad			30 a 85
Consistencia esfuerzo cortante adhesividad plasticidad compacidad friabilidad dureza tixotropía			
Humedad infiltración humectación – desecación capacidad de retención de agua disponible para las plantas. CRAD drenaje potencial del agua movimiento del agua conductividad hidráulica			0 a 85 5 a 20 60 a 250
Cambios de volumen por humectación y desecación agrietamiento			
Difusividad térmica	m ² s ⁻¹	[L ² T ⁻¹]	
Capacidad portante: capacidad del terreno para soportar cargas			
Susceptibilidad frente a las heladas			

6. COMPRENDER Y APLICAR

E3. Contestar los siguientes aspectos:

- Representar por medio de un diagrama circular la distribución porcentual de las tres fases correspondientes a un horizonte en el que los componentes inorgánicos ocupen en volumen un 48% y la materia orgánica un 3%. ¿Qué ocurre con el volumen ocupado por las otras dos fases?
- Refiriéndose al 49% del volumen restante:
 - ¿Se pueden identificar algunas situaciones en las que sea posible precisar el porcentaje de ocupación de dicho volumen por la fase líquida y la fase gaseosa?

- b) ¿Puede haber situaciones en que el suelo presente sólo una fase o sólo dos fases? Indicar ejemplos.
- c) ¿Qué importancia puede tener según cual sea el volumen de cada fase? ¿Qué función del suelo puede verse principalmente afectada?
3. Sabiendo que la relación entre la masa y el volumen define la densidad. Inferir cuántas densidades diferentes se pueden definir en el suelo, atendiendo a que es un sistema de tres fases.

7. PROPIEDADES FÍSICAS, COMPORTAMIENTO Y FUNCIONES DEL SUELO

La aptitud de un suelo para desarrollar determinadas funciones viene condicionada, en gran medida, por las propiedades físicas, ya que éstas determinan, entre otros, los siguientes aspectos:

- El almacenamiento y circulación del agua.
- El régimen de humedad del suelo.
- La facilidad de extracción de agua por parte de las plantas.
- La aireación.
- La nascencia y emergencia de las plántulas.
- La facilidad de crecimiento de las raíces.
- La susceptibilidad a la erosión: erosionabilidad.
- Los hábitats para los microorganismos.
- La temperatura del suelo.
- La idoneidad para cimentaciones y conducciones enterradas.



J. Porta

La pérdida de la parte superior del suelo por erosión hará cambiar completamente las propiedades físicas y la calidad del suelo puesto a disposición de las plantas.

8. RELACIONES ESENCIALES

G2. Establecer relaciones esenciales entre los términos de la primera columna y los de la segunda columna:

1. Distribución de tamaño de partículas	a) Idoneidad para el crecimiento de las plantas.
2. Porosidad	b) Volumen explorable.
3. Profundidad efectiva	c) Partículas individuales.
4. Infiltración	d) Aireación del suelo.
5. Densidad aparente	e) Textura.
	f) Entrada de agua en el suelo.
	g) Relacionado con el almacenamiento de agua.
	h) Facilidad de circulación del agua.
	i) Relacionado con el volumen de la fase sólida y la fase líquida.
	j) Relacionado con la masa de la fase sólida.

9. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar aquel término que mejor se ajuste en el contexto, de entre los propuestos:

La fase sólida del suelo está integrada por (1) _____ y por (2) _____. La fase líquida se denomina igualmente agua del suelo y se trata de una (3) _____, que proporciona nutrientes a las plantas a medida que éstas los absorben. No debe confundirse adsorber con absorber, el primero hace referencia a fenómenos que afectan a la superficie de las partículas, mientras que el segundo implica la entrada dentro, por ejemplo, de una raíz. La fase gaseosa resulta imprescindible para la vida en el suelo, ya que proporciona (4) _____ y la mayoría de organismos que viven en el suelo lo requieren, al ser aerobios.

La superficie específica es importante ya que condiciona la actuación de las fuerzas de superficie y las reacciones químicas que tienen lugar en un suelo. Cuanto más alargadas o planas sean las partículas (5) _____ será la superficie específica. Por ello y otras causas, el componente más reactivo del suelo será (6) _____.

- | | | | | |
|-----|--------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|
| (1) | a) componentes inorgánicos | b) cuarzo | c) arcilla | d) hielo |
| (2) | a) feldespatos | b) biotita | c) caliza | d) componentes orgánicos |
| (3) | a) solución ligeramente salina | b) agua pura | c) agua de lluvia | d) agua de cristalización |
| (4) | a) nutrientes | b) CO ₂ | c) oxígeno | d) vapor de H ₂ O |
| (5) | a) menor | b) mayor | c) igual | d) mucho menor |
| (6) | a) el cuarzo | b) la arcilla | c) la caliza | d) el óxido de hierro |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. En esta Unidad se utilizan conceptos relacionados con los estudiados previamente. Seleccione aquel término que mejor encaje dentro del contexto de entre los propuestos:

Los componentes inorgánicos del suelo proceden (1) _____, que sufren procesos de (2) _____. Resulta fácilmente comprensible que los minerales se presentarán en el suelo en granos de tamaño tanto (3) _____ si ocupan una posición de baja temperatura en el diagrama de Bowen, como ejemplo cabe citar (4) _____. Por ello (5) _____ frecuente encontrar olivinos en suelos desarrollados en las llanuras aluviales.

- | | | | | |
|-----|-------------------------|----------------------------|-----------------|------------------|
| (1) | a) de aportes fluviales | b) del material originario | c) de coluvios | d) de rocas |
| (2) | a) alteración | b) meteorización | c) disolución | d) disgregación |
| (3) | a) mayor | b) menor | c) más regular | d) más irregular |
| (4) | a) el cuarzo | b) el olivino | c) la mica | d) la arcilla |
| (5) | a) es | b) suele ser | c) no suele ser | d) no puede ser |

2. CONCEPTO DE GRANULOMETRÍA Y TEXTURA DEL SUELO

TIERRA NATURAL

La expresión **tierra natural** hace referencia al estado del suelo en el campo. Comprende un *continuum* de tamaños de partículas minerales existentes.

ELEMENTOS GRUESOS

Los fragmentos de tamaño superior a 2 mm se denominan elementos gruesos.

Los elementos gruesos se dividen en: gravilla (0,2 a 0,6 cm), grava (0,6 a 6 cm), cantos (6 a 25 cm) y bloques (25 a 60 cm o mayores).

TIERRA FINA

La fracción que pasa por un tamiz de 2 mm de malla se denomina tierra fina.

Los análisis químicos de suelos se realizan en la tierra fina, a la que por lo general se refieren los resultados.

En aquellos casos en que los elementos gruesos sean muy abundantes habrá que referir los resultados a tierra natural.

En la tierra fina se han establecido tres intervalos de tamaños o fracciones granulométricas: **arcilla** (menor de 2 μm), **limo** (según ISSS de 2 a 20 μm o bien según USDA de 2 a 50 μm) y **arena** (del límite superior del limo a 2000 μm). La arena se subdivide a su vez, con los criterios USDA, en: arena muy gruesa (2000 a 1000 μm), arena gruesa (1000 a 500 μm), arena media (500 a 250), arena fina (250 a 100) y arena muy fina (100 a 50). Con los criterios ISSS se establece la división entre arena fina (20 a 200) y arena gruesa (200 a 2000 μm).

La fracción arcilla, al tener una superficie específica ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) muy alta y un comportamiento coloidal (las arcillas mineralógicas poseen carga eléctrica), resulta mucho más reactiva y, por ello, más determinante en el comportamiento del suelo y la respuesta de las plantas que las restantes fracciones.

Los términos composición granulométrica, granulometría y textura, frecuentemente se utilizan como sinónimos, si bien se pueden establecer las siguientes distinciones:

COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA

Proporción porcentual de arena, limo y arcilla en la fracción mineral de la tierra fina.

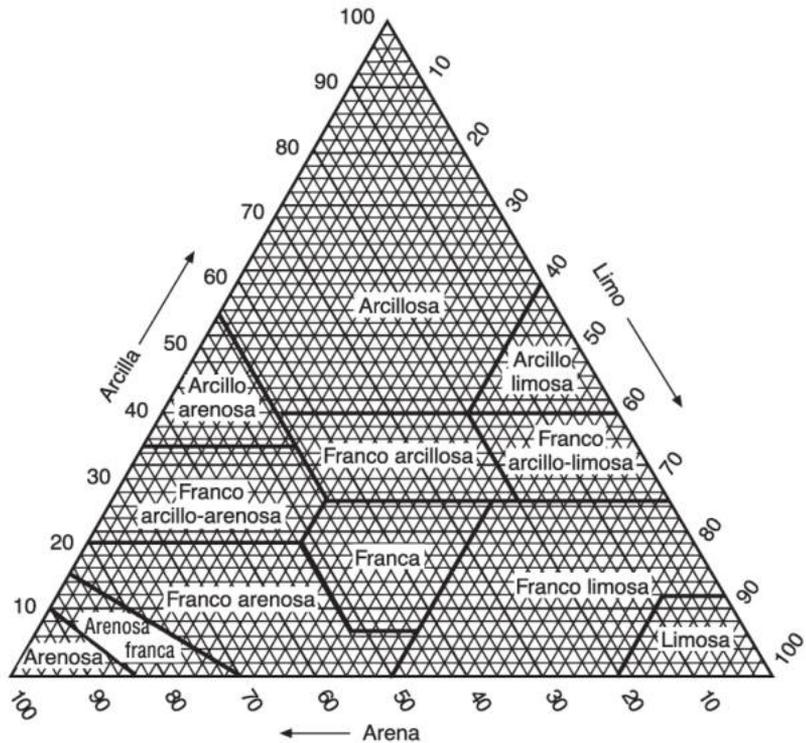
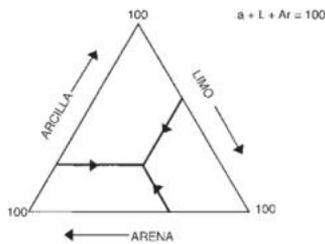
TEXTURA

Apreciación global de las propiedades mecánicas de una muestra de suelo. Se describe por medio de la sensación al hacer deslizar entre los dedos una muestra húmeda, de la que se han eliminado los elementos gruesos. A falta de datos analíticos, a partir de la textura determinada en campo, una persona entrenada puede realizar una estimación de la clase textural o clase granulométrica (no de los porcentajes) a la que pertenece la muestra.

CLASE TEXTURAL

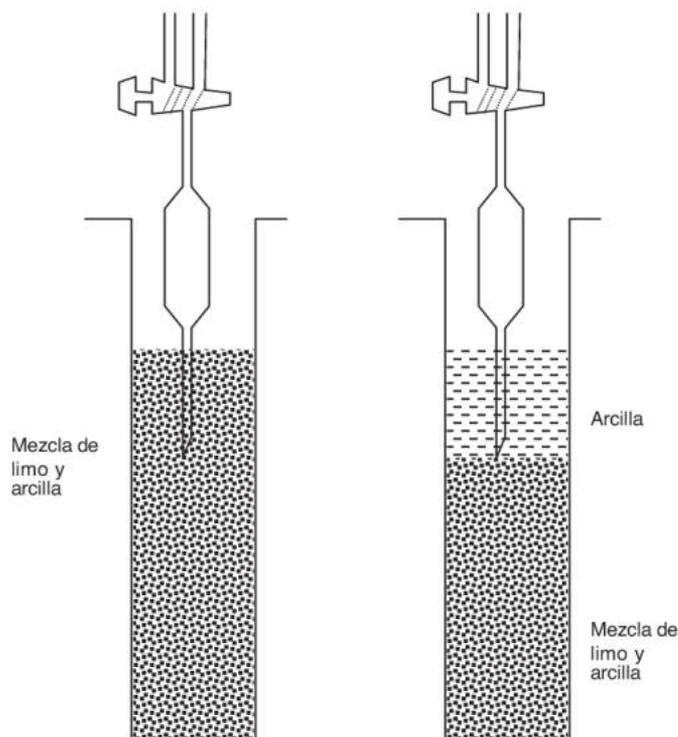
Las múltiples combinaciones de porcentajes de arena, limo y arcilla que pueden darse se han agrupado en unas pocas clases texturales, 12 según los criterios USDA. Proporcionan información acerca del comportamiento esperable del suelo y se denominan: arenosa, franco-arenosa, franco-limosa, franca, etc. Para determinar la clase textural se utilizan diagramas, por lo general, triangulares (triángulos equiláteros), existiendo uno para los datos ISSS y otro para los USDA.

La textura se estima en campo, mientras que la granulometría se analiza en laboratorio. A partir de estos datos y con ayuda de un triángulo de texturas, se puede determinar la clase texturas (USDA):



Para llevar a cabo un análisis granulométrico, en primer lugar se debe destruir la materia orgánica con peróxido de hidrógeno. Hecho esto, las partículas más gruesas (arenas) se separan por tamizado, siguiendo los criterios de tamaños (USDA, que es el más utilizado o bien ISSS). La determinación del porcentaje de arcilla y de limo se hace por sedimentación basada en la ley de Stokes. Para ello se individualizarán las partículas de arcilla con un dispersante a base de sodio. El hexametáfosfato sódico es uno de los agentes dispersantes más frecuentemente utilizados (Porta *et al.*, 1986 → www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés).

Al agitar la suspensión suelo-agua y dejarla en reposo, las partículas sedimentan con una velocidad (V) que depende de su tamaño ($r =$ radio de la partícula, supuesta esférica), siendo k una constante: $V = K r^2$. En un primer momento (1), la suspensión es homogénea, para dejar de serlo al sedimentar las partículas, de manera que la parte superior de la probeta de sedimentación (2) queda libre de partículas de tamaño mayor a uno determinado (r), al cabo de un cierto tiempo (t). Ello permite muestrear las partículas de tamaño menor o igual al que define la Ley de Stokes.



Los resultados de un análisis granulométrico se expresan en tanto por cien. La calidad de un análisis granulométrico se puede verificar comprobando si la suma de porcentajes [arena (A) + limo (l) + arcilla (a)] se halla en una horquilla que vaya de 95 al 101%. En caso de una desviación mayor, deberá repetirse el análisis. Los resultados de los análisis granulométricos se pueden representar igualmente en diagramas en los que el eje de ordenadas es decimal y el de abscisas logarítmico (diagrama semilogarítmico):

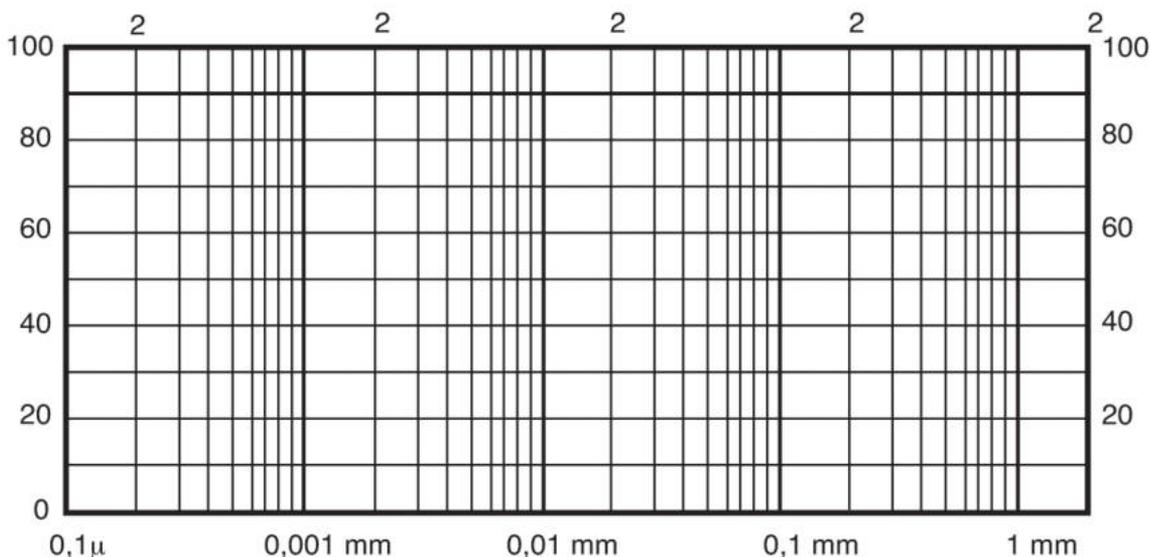
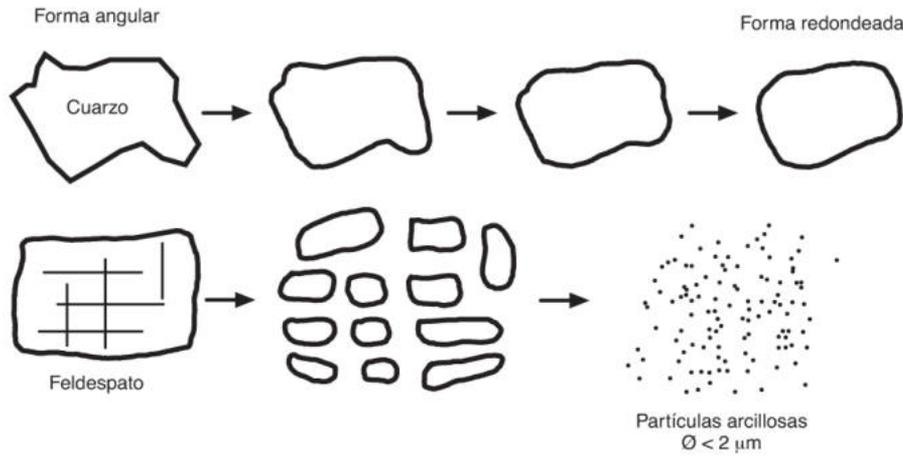


Diagrama semilogarítmico para representar análisis granulométricos.



La mineralogía de las distintas fracciones granulométricas es distinta debido a la diferente estabilidad de los minerales frente a la meteorización (Rothery, 1997).

3. INTERPRETAR Y DEDUCIR

A1. Al estudiar la sedimentación en régimen laminar de partículas sólidas esféricas en suspensión en agua, Stokes puso de manifiesto que la velocidad de sedimentación (V) en condiciones isotérmicas es la que corresponde al equilibrio de las fuerzas actuantes: fuerza de caída de las partículas (F_C), empuje que sufren de acuerdo con el principio de Arquímedes (F_E) y la fuerza de fricción (F_F). Stokes demostró experimentalmente que la fuerza de fricción entre las partículas y el líquido, en el supuesto que sean esféricas de radio r es proporcional a la longitud de la circunferencia máxima de la partícula y a tres veces la velocidad de sedimentación: $F_F = 2\pi\eta \times 3V$.

- Deducir la expresión que permite calcular la velocidad de sedimentación, siendo:
 - η = viscosidad del líquido
 - ρ_s = densidad de las partículas
 - ρ_w = densidad del líquido.
- Sabiendo que la velocidad es el espacio recorrido por la partícula referido a la unidad de tiempo, ¿cómo se podría utilizar el experimento de Stokes para extraer de la suspensión una muestra que sólo contenga partículas de arcilla?
- Se desea saber la velocidad máxima de sedimentación y el tiempo al que hay que pipetear a 10 cm de profundidad en la probeta la fracción limo USDA. Se tomará el valor de K igual a $35,6 \times 10^3 \text{ [L}^{-1} \text{ T}^{-1}\text{]}$ para la constante de la ley de Stokes: $V = K \times r^2$, con una temperatura de 20°C , a la que se supone que tiene lugar la sedimentación en condiciones isotermas. La velocidad V se expresa en cm s^{-1} y r es el radio aparente de las partículas expresado en cm.

4. CALCULAR E INTERPRETAR

A1. 1. Partiendo de un cubo de cuarzo:

- Calcular la superficie específica de un cubo de cuarzo de 1 cm de lado y si éste se talla en cubos cuyo lado sea igual al del límite superior de la arena USDA y en cubos cuyo lado fuese igual al límite superior de las arcillas. Indicar el número de partículas resultantes en cada caso a partir del cubo inicial. La densidad real del cuarzo es de 2.650 kg m^{-3} .
- ¿En cuál de los casos anteriores habrá mayor interacción entre la fase líquida y la fase sólida? Inferir algunas consecuencias.
- ¿Es esperable que al observar al microscopio electrónico de barrido (SEM) partículas del suelo sean cúbicas como en el ejemplo?
- ¿Es esperable encontrar partículas de igual mineralogía en las distintas fracciones granulométricas? ¿Por qué? ¿Qué forma tendrá las partículas de arcilla sabiendo que se trata de filosilicatos? (Utilizar el diagrama de Bowen para formular alguna hipótesis).

2. Se reciben de un laboratorio los análisis granulométricos de tres muestras correspondientes a un mismo suelo. Se han determinado tres fracciones, expresando los resultados como arena/limo/arcilla según los criterios USDA: (1) 62,2/19,2/18,4; (2) 29,4/30,5/40,1; y (3) 39,2/38,7/15,4.

- Verificar la calidad de los análisis, indicando si se aceptan o se pide que se repita alguno de ellos.
- ¿Qué información complementaria se requiere para poder determinar la clase textural con un triángulo de textura?
- Representar los resultados aceptados en un diagrama acumulativo: profundidades-porcentajes. ¿Qué fracción interesa representar primero, por qué? Indicar qué hipótesis podrían resultar aceptables en relación a posibles procesos edafogénicos y cuál podría ser la denominación de alguno de los horizontes genéticos. ¿Qué información complementaria debería aparecer en la ficha de descripción de campo para confirmar las hipótesis formuladas?

5. TEXTURA Y PROPIEDADES DEL SUELO

Como síntesis que relacione la granulometría del suelo y el comportamiento de éste:

Fracción predominante	Interpretación
Elementos gruesos	Disminuyen la cohesión en horizontes muy arcillosos, lo que favorece la penetración de las raíces en la interfase elemento grueso-matriz. Aumentan la permeabilidad si se hallan en proporción suficiente. Si son porosos retienen humedad. Frenan la erosión y las pérdidas de agua si recubren el suelo. Liberación potencial de nutrientes al meteorizarse. Suelos pedregosos. Dificultan el movimiento de la fauna en el suelo. Menor almacenamiento de agua. Menor cantidad de nutrientes asimilables. Efecto abrasivo para los aperos y sembradoras. Roturas en dientes de segadoras por pedregosidad superficial. Deformaciones en el crecimiento de raíces gruesas.
Arena gruesa	Macroporosidad alta. Permeabilidad alta. Compacidad baja. Poca inercia térmica. Facilidad de laboreo. Energía de retención de humedad baja. Almacenamiento de nutrientes bajo, CIC baja. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD) baja.
Arena fina	Propiedades intermedias entre arena gruesa y limo. Minerales poco meteorizables. Riesgo de erosión eólica alto.
Limo (franco-limoso)	Fertilidad física deficiente. Riesgo de sellado y de encostramiento superficial. Velocidad de infiltración baja. Inestabilidad estructural alta. Permeabilidad de media a baja. Compacidad media. Erosionabilidad alta. Almacenamiento de nutrientes medio. CRAD de media a baja.
Arcilla	Fertilidad química alta, según mineralogía. Superficie específica muy alta. Capacidad de intercambio catiónico alta, dependiendo de la mineralogía de arcillas. CRAD alta. Permeabilidad baja, dependiendo que se puedan formar pseudolimos o pseudoarenas. Microporosidad alta. Compacidad alta. Dificultad de laboreo, debido a su elevada plasticidad (estado húmedo) o compacidad (en seco). Energía de retención de humedad alta. Gran inercia térmica. Dificultad a la penetración de las raíces.

A falta de medidas directas, se pueden utilizar las siguientes relaciones entre la textura y el comportamiento del suelo (Johnson, 1979 y Craul, 1999):

Atributos	Suelos arenosos	Suelos de textura		Suelos arcillosos
		Franca	Franco-limosa	
Permeabilidad	Alta	Media	Media	Baja
Compacidad	Baja	Media	Media a alta	Alta
Calentamiento en primavera	Rápido			Lento
Capacidad de almacenamiento de nutrientes	Baja	Media	Media	Alta ^(*)
Dificultad para el laboreo	Media	Baja	Moderada	Alta
Plasticidad	Baja	Media		Alta
CRAD	Baja	Media	Medio-alta	Alta
Energía de retención de agua	Baja		Media	Alta
Potencial de escorrentía	Bajo	Bajo a medio	Alto	Medio a alto
Erosionabilidad por el viento	Alta	Media	Baja	Baja

(*) La mineralogía de la arcilla tendrá una gran influencia: caolinita (baja), montmorillonita (alta).

6. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. a) Describa con sus propias palabras la imagen correspondiente a una llanura aluvial en la que hay un cultivo de guisantes (*Pisum sativum*).

b) ¿Podría inferir algo y proponer alguna explicación del comportamiento del cultivo?



J. Porta

7. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. Completar con el término que corresponda.

La meteorización de una roca provoca su desintegración por medio de procesos físicos, químicos y biológicos, que constituyen la base de la formación de un suelo. La naturaleza de las rocas y las condiciones de medio, por un lado, y los procesos edafogénicos, por otro, hacen que las partículas resultantes presenten distintos tamaños en los horizontes de los suelos. Las partículas de diámetro aparente superior a 2 mm se denominan (1)

_____. Por tamizado y sedimentación se pueden segregar las partículas según tamaños. Por orden decreciente, se distinguen las siguientes: las mayores de 25 cm se denominan (2) _____, de 0,2 a 25 cm son (3) _____. Según los criterios USDA, de 2000 a 50 μm es el intervalo de (4) _____, de 50 a 2 μm es el del (5) _____ y las menores de 2 μm corresponden a (6) _____. Mientras que los criterios ISSS establecen como límite superior del limo los (7) _____ μm .

Las partículas menores de 2 mm constituyen (8) _____, que es la fracción que se utiliza en el laboratorio para realizar los análisis (9) _____. En relación con los elementos gruesos cabe destacar que no son totalmente inertes desde un punto de vista químico, ya que liberan muy lentamente nutrientes a medida que se (10) _____.

8. MANEJO DE DATOS

E3. 1. A partir de los resultados de un análisis granulométrico (USDA) recibidos de un laboratorio proceder a:

Profundidad cm	Horizonte	Arena Ar %	Limo L %	Arcilla a %
0-27	Ap	20,0	12,7	67,3
27- 85	Bss1	12,5	19,7	67,6
85-122	Bss2	11,9	15,9	72,0

- Verificar la calidad de los análisis. ¿Qué criterios pueden aplicarse?
- Determinar la clase textural de cada horizonte.
- Construir el perfil textural de este suelo.
- Con ayuda de un diagrama semilogarítmico, determinar el porcentaje aproximado de la fracción limo más arena muy fina (2-100 μm) del epipedión, que se utiliza en la ecuación universal de pérdida de suelo (RUSLE).

9. COMPRENDER PROCESOS

E3. Discutir y redactar un informe.

- ¿Qué incidencia puede tener en los resultados de un análisis granulométrico el hecho que se haya olvidado de tratar una muestra con agua oxigenada?
- ¿Qué incidencia tendrá haber olvidado añadir hexametáfosfato sódico?
- ¿En qué caso tendrán mayor importancia estos errores analíticos, en muestras bien estructuradas o en las de un horizonte Bta.
- ¿En muestras arcillosas o en las arenosas?
- Indicar qué funciones de un suelo pueden verse afectadas por las características texturales de sus horizontes.

10. RELACIONES ESENCIALES

A1. Establecer relaciones entre ambas columnas (algunas no tienen correspondencia):

1. Columna rellena de arena	a) Dispersa la arcilla, por lo que se usa en el laboratorio para individualizar estas partículas el análisis granulométrico
2. Columna rellena de arcilla	b) Medida para mallas de tamices
3. Suelo arenoso	c) Deja un mayor número de poros gruesos
4. Calcio	d) El efluente de fosas sépticas entrará lentamente en el suelo y éste desempeñará adecuadamente su función como filtro y depurador, evitando la contaminación de la capa freática
5. Sodio	e) El agua entra con facilidad en el suelo (velocidad de infiltración elevada)
6. Mesh	f) El anclaje de plantas no será muy bueno y el suministro de agua y nutrientes tampoco. La potencialidad de este suelo para desempeñar su función como productor de biomasa será baja en condiciones naturales
7. Suelo arcilloso	g) Determinación de la granulometría por sedimentación.
8. Método del densímetro	
9. Epipedión arenoso franco	

11. REFERENTES TEMPORALES

A1. Ordenar secuencialmente las operaciones siguientes, parte de un análisis granulométrico:

(1) dispersar con _____, (2) destruir la m.o. con _____, (3) tamizar a 2 mm, (4) tamizar a 50 μm (5), pipetear al cabo de 8 horas (20°C), (6) secar el pipeteado en estufa, (7) pesar un cristizador limpio, (8) verificar la calidad del análisis, (9) pesar entre 10 g (arcillosos) y 30 g (arenosos) de muestra.

12. METODOLOGÍA DE TRABAJO

- A1.** a) ¿Cómo se determina la textura de un horizonte en el campo? Aplicarlo al caso de una muestra franco-limosa.
- b) ¿En qué se basa la determinación del porcentaje de arcilla en laboratorio?
- c) ¿Por qué se debe esperar menos tiempo para pipetear el limo fino (2-20 μm) que la arcilla, de acuerdo con la ley de Stokes?

13. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Después de revisar los contenidos de la Unidad, seleccionar el término que mejor se ajuste en el contexto, de entre los propuestos.

El comportamiento físico y químico de los suelos está fuertemente condicionado por la distribución del tamaño de partículas. Los suelos con un cien por cien de arena son (1) _____, serán suelos muy (2) _____. Una clase textural es (3) _____ de tamaños de partículas (4) _____ materia orgánica, que caracteriza a suelos con un comportamiento y requerimientos de manejo semejantes. La textura puede determinarse en campo, si bien se requiere un entrenamiento previo en laboratorio con muestra cuya granulometría haya sido determinada analíticamente para poder así obtener resultados fiables.

Los criterios USDA establecen el límite entre la fracción arcilla y la fracción limo en (5) _____ μm , mientras que el límite entre esta fracción y la arena en (6) _____ μm . Cada vértice de un triángulo de textura representa el (7) _____ de una fracción determinada. La presencia de arcilla en una muestra tiene (8) _____ significación que la de arena, en el sentido que con (9) _____ contenidos de la primera el comportamiento del suelo se ve condicionado por esta fracción, mientras que sólo lo hace con (10) _____ contenidos de arena. Una parte del análisis granulométrico se basa en la individualización de las partículas de (11) _____ utilizando ión sodio como elemento (12) _____ y en recuperar una alícuota en un proceso de sedimentación que se basa en la ley (13) _____. La fracción (14) _____ se determina por tamizado a diferentes tamaños.

- | | | | | |
|------|-----------------|-------------------|------------------|---------------|
| (1) | a) frecuentes | b) ocasionales | c) abundantes | d) no existen |
| (2) | a) secos | b) húmedos | c) fértiles | d) oscuros |
| (3) | a) un intervalo | b) un conjunto | c) un porcentaje | d) una medida |
| (4) | a) con | b) con poca | c) con más | d) sin |
| (5) | a) 2 | b) 20 | c) 50 | d) 0,6 |
| (6) | a) 2 | b) 20 | c) 50 | d) 250 |
| (7) | a) 10% | b) 25% | c) 50% | d) 100% |
| (8) | a) mayor | b) menor | c) igual | d) alta |
| (9) | a) bajos | b) medios | c) altos | d) iguales |
| (10) | a) altos | b) medios | c) bajos | d) mayores |
| (11) | a) arena | b) limo fino | c) arcilla fina | d) arcilla |
| (12) | a) diluyente | b) dispersante | c) floculante | d) separador |
| (13) | a) de Boyle | b) de Hooke | c) del mínimo | d) de Stokes |
| (14) | a) arcilla | b) arcilla gruesa | c) limo fino | d) arena |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CC. Seleccionar el término más adecuado de entre los que se proponen:

Algunos componentes, como por ejemplo los óxidos de hierro confieren color al suelo. Análogamente las acumulaciones calizas formadas por (1) _____ se pueden identificar por su color (2) _____ y porqué dan reacción al (3) _____. Los esquistos son una roca (4) _____ que confieren color oscuro a los suelos formados a partir de ellos. Un horizonte Bh se identificará por su color (5) _____ .

- | | | | | |
|-----|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| (1) | a) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | b) CaCO_3 | c) MgCO_3 | d) CaCl_2 |
| (2) | a) rojo | b) blanquizco | c) rosa | d) oscuro |
| (3) | a) H_2SO_4 | b) HCl 11% | c) NaCl | d) AgNO_3 |
| (4) | a) metamórfica | b) sedimentaria | c) ígnea | d) volcánica |
| (5) | a) claro | b) rojo | c) oscuro | d) amarillo |

2. DESCRIPCIÓN DEL COLOR: CÓDIGO MUNSELL

Al observar la superficie de un suelo sin vegetación o el perfil de muchos suelos, llama la atención la variedad de colores que presentan. Tan es así, que las primeras clasificaciones utilizaban el color para establecer clases de suelos: suelos rojos, suelos amarillos, suelos pardos, etc. Nos podemos preguntar a qué se deben los distintos colores y si el color de cada horizonte tiene alguna significación, y si permite inferir otras propiedades de los suelos más difíciles de medir o de observar.

El color se debe a **elementos cromógenos** que contiene cada horizonte de un suelo, principalmente al hierro en sus distintos estados de oxidación o con diferente grado de hidratación; así como la materia orgánica y de componentes tales como el carbonato cálcico, yeso, arena, entre otros. El color puede haber sido heredado del material originario (**color litogénico**) en suelos litocromos o bien ser el resultado de procesos edafogénicos. Existe una influencia de la textura, de manera que a igual porcentaje y tipo de materia orgánica, un horizonte aparecerá más oscuro si es arenoso, que si es arcilloso.

Al ser una propiedad fácil de observar, el color constituye una gran ayuda para **distinguir los horizontes** en el perfil de un suelo y, al estar relacionado el color con la presencia de hierro y al ser éste un elemento que cambia de color según sea su estado de oxido-reducción: rojo, pardo-rojizo y pardo, cuando está oxidado, y gris, gris-verdoso, verde claro, cuando está reducido, el color permite inferir el estado de aireación y la clase de drenaje, es decir, la facilidad con la que un suelo deja salir el agua, en relación a los aportes. Estas propiedades están directamente relacionadas con el crecimiento radicular y, por ello, con la productividad.

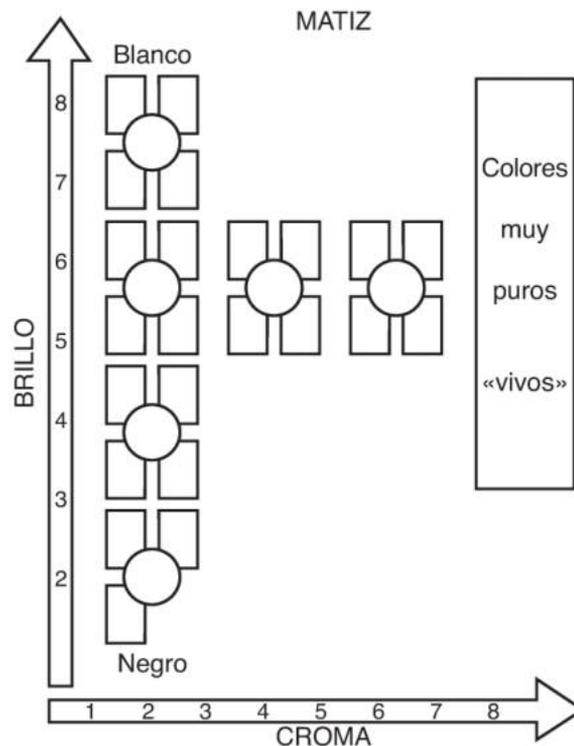
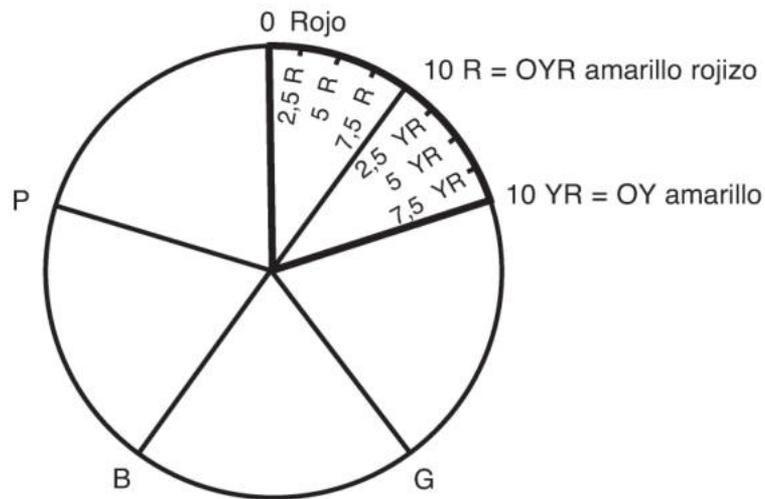
Para evitar imprecisiones al describir los colores del suelo, se utiliza un código de colores que permite una descripción objetiva y una denominación normalizada: el Código Munsell, que es el que utilizan las Tablas Munsell.

CÓDIGO MUNSELL

Las tablas Munsell están organizadas según un espacio de tres dimensiones (sólido de color, que se puede representar por medio de un cilindro). El color se codifica utilizando tres parámetros básicos:

— **Matiz** : Expresa la longitud de onda dominante en la radiación reflejada. Se designa por medio de una o dos letras mayúsculas: R (rojo), YR (amarillo-rojizo), Y (amarillo), GY (amarillo verdoso), G (verde), BG (verde azulado), B (azul), PB (azul púrpura), P (púrpura). Los matices más comunes en los suelos van del R (rojo) al amarillo (Y).

- **Brillo** (albedo) (Intervalo de 1 a 8). Corresponde a la ordenada en una página de las Tablas. Expresa la proporción de radiación reflejada respecto a la radiación incidente. Es función del contenido de humedad, por lo que al describir un color deberá indicarse si se hace en una muestra seca o bien tras añadirle agua. Un valor 0 corresponde al color negro y el 10 al blanco.
- **Croma** (1 a 8). Corresponde a la abscisa. Expresa la pureza relativa del color y corresponde a la intensidad del color espectral dominante o saturación cromática. A mayor pureza mayor croma.

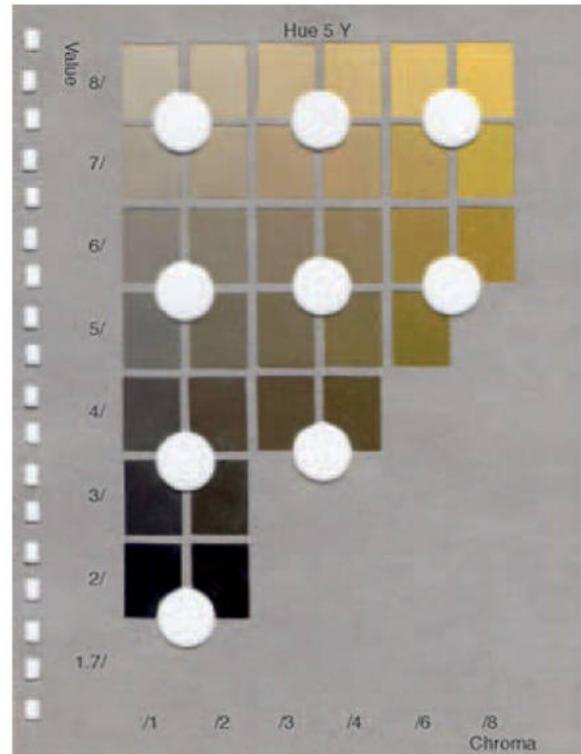
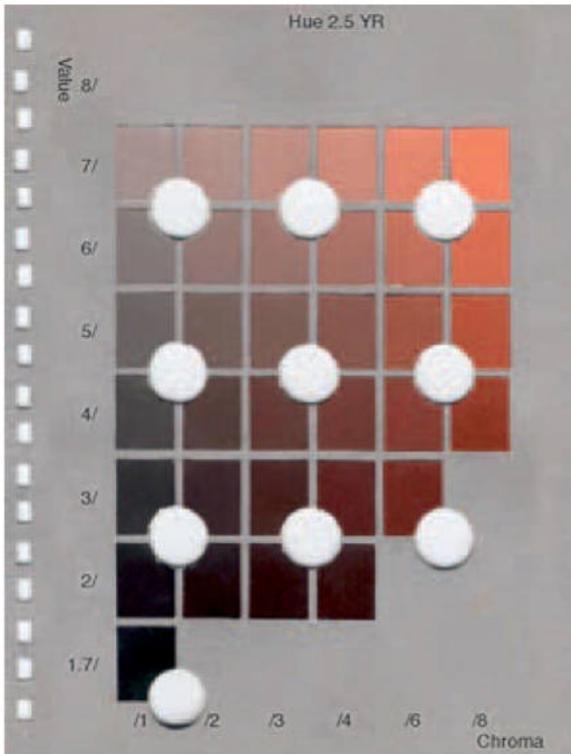


Código Munsell: Matiz, brillo y croma.

3. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Estudiar estas páginas de una Tabla Munsell y contestar:

- ¿A qué corresponden los términos ingleses «hue» y «value», cuál es su traducción al español?
- ¿Cuál de las dos páginas se utilizará para describir el color de un suelo con mal drenaje?
- Expresar un color de alta pureza y bajo albedo.
- ¿En qué zona de la página se hallan los suelos fríos en primavera debido al color de la superficie del epipedión?



4. MOTEADO

MOTEADO

El moteado hace referencia a la existencia de manchas de color contrastado respecto al color de la matriz de un horizonte. Se considera significativo y se describe cuando las manchas suponen un 10% o más de la superficie del horizonte. Su color puede ser pardo, ocre, negro o gris y se codifica con las Tablas Munsell.

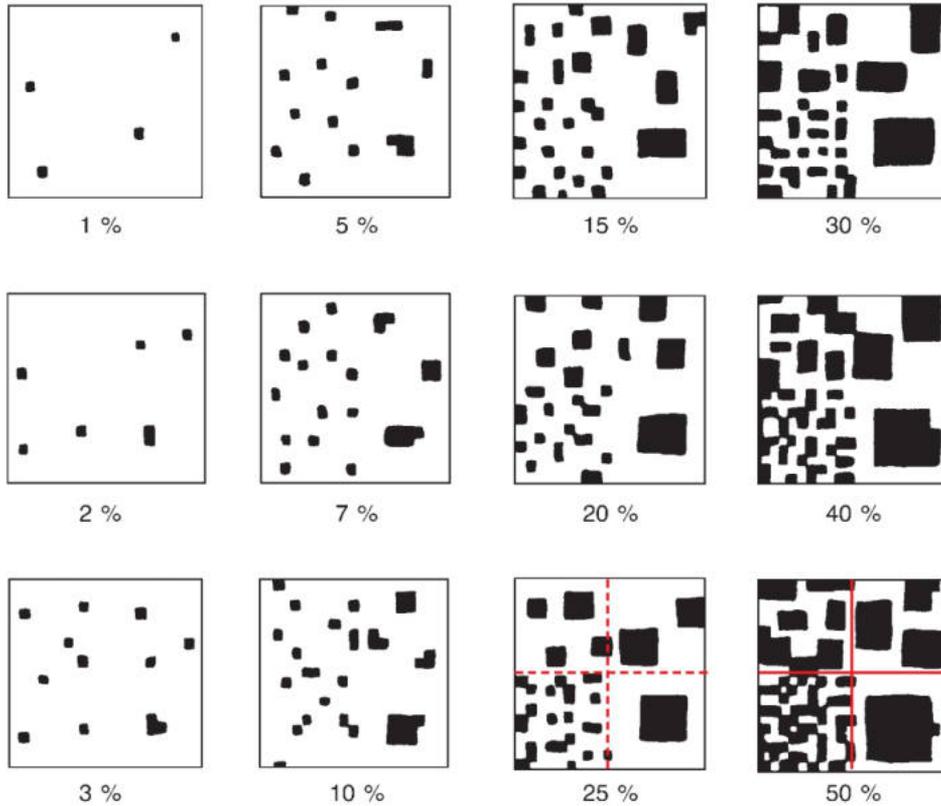
El origen del moteado puede ser diverso, pero en muchos casos se deben a la alternancia de condiciones de saturación por agua y desecación, debido a la presencia de una capa freática, cuyo nivel varíe a lo largo del año. Ello provoca la movilización de aquellos elementos que pueden actuar con más de una valencia, el hierro y el manganeso, principalmente, que reprecipitan posteriormente, al cambiar las condiciones a oxidantes.

Las manchas de color gris pueden indicar que el hierro se halla reducido, o bien que se trata de zonas decoloradas, en las que el hierro ha migrado, es decir, ha habido un empobrecimiento en hierro. Las manchas de colores ocre y pardo-rojizas se deben a la precipitación de hierro, a veces acompañado de manganeso.

Para la descripción de las manchas se tiene en cuenta: la cantidad (estimación del porcentaje), tamaño, color (código Munsell), contraste, nitidez, forma y distribución.

Pueden ser actuales o debidas a condiciones ecológicas del pasado (carácter relictivo) y por ello sin significación ecológica en la actualidad.

La presencia de manchas proporciona, por consiguiente, información acerca del régimen de humedad del suelo, estado de aireación y facilidad de salida del agua frente a los aportes (clase de drenaje). El porcentaje de manchas se puede estimar con los siguientes dibujos, en cada uno de los cuales hay cuatro tamaños de manchas para un mismo porcentaje:



5. PROPIEDADES Y COMPORTAMIENTOS INFERIDOS A PARTIR DEL COLOR

El color permite inferir propiedades y atributos del suelo que, de otra manera, resultarían costosos de obtener, y hacerlo consumiría mucho más tiempo.

— Información inferible acerca de los componentes:

- Colores oscuros: alto contenido en materia orgánica; componentes ferromagnesianos; material originario (esquistos, p.e.); materiales piroclásticos (volcánicos); manganeso (MnO_2); sulfuros de hierro.
- Colores rojizos a pardos: óxidos de hierro Fe(III) con distinto grado de hidratación, buena aireación.
- Colores blancuzcos: carbonato cálcico (efervescencia con HCl del 11%); yeso (ensayos de sulfatos); color residual debido a la arena (cuarzo) y limo (horizonte E); sales más solubles que el yeso (eflorescencias blancas en superficie).

— Información inferible acerca del régimen de humedad: clase de drenaje (modelos de colores debidos a procesos redox):

- Hidromorfismo permanente: colores grises, verdosos, más amarillos que 2,5Y.
- Hidromorfismo temporal (capa freática colgada): moteados en la zona de oscilación de la capa freática.

6. EL COLOR COMO INDICADOR DE PROCESOS EDAFOGÉNICOS

Algunos procesos edafogénicos dan lugar a coloraciones características en el suelo, por ello, a partir del color se pueden formular hipótesis que habrá que contrastar posteriormente con otros criterios y análisis acerca de la edafogénesis. Algunos ejemplos:

- Color **oscuro** en la parte superior del suelo: procesos de oscurecimiento debido a la acumulación de materia orgánica aportada por la vegetación (raíces, hojas, etc.). Formación de un horizonte A.
- Color **oscuro** a una cierta profundidad dentro del suelo: una hipótesis podría ser que se trata de un horizonte A **enterrado**: Ab. No obstante, según sean los factores ecológicos de formación, podría tratarse del resultado de un proceso de iluviación de materia orgánica. Formación de un horizonte Bh de un Podzol^{WRB} o EspodosolST.
- Color **rojo**: puede deberse a modificaciones en el estado de hidratación de óxidos de hierro ligados a las arcillas, que han dado lugar a la presencia de óxido férrico no hidratado (hematita). Proceso de **rubefacción**, típico de la zona mediterránea, si bien no exclusivo de ella. Puede llevar asociado un proceso de iluviación de la arcilla. Típico de AlfisolesST del Grupo de los Rhodoxeralf, Rhodustalf, entre otros.
- Color **blanco** en un horizonte subsuperficial: puede ser debido a la pérdida de determinados componentes cromógenos (materia orgánica, hierro, entre otros). Proceso de eluviación que da lugar a un horizonte E. Típico de Podzoles^{WRB} o EspodosolesST; de Planosoles^{WRB} o AlbaqualfST y de algunos Solonetz^{WRB}. También podría ser debido a determinados componentes de color claro: yeso, carbonatos cálcico, eflorescencias salinas.
- Colores **grises, verdosos y moteados**: condiciones ácuicas. Procesos de óxido-reducción y procesos de decoloración por empobrecimiento en componentes cromógenos (hierro, manganeso).

Existen otros procesos que pueden llevar asociados colores característicos: empardecimiento, melanización, lutefacción, entre otros.

7. OBSERVAR E INFERIR

G2. A partir de los colores que presenta este suelo identificado en Bretaña (Francia) se pueden inferir procesos y otras propiedades del suelo. Discutir y formular hipótesis en relación a:

- Procesos identificados.
- Horizontes genéticos y horizontes de diagnóstico.
- Régimen de humedad.
- Zona geográfica más próxima donde nos hallamos, en la que pueden existir suelos de esta clase.



J. Porta

8. ESTUDIAR E INTERPRETAR

E3. Estudiar la siguiente información y redactar un informe a presentar en público:

¿Qué propiedades se pueden inferir a partir de los colores determinados en húmedo con ayuda de una Tabla Munsell en los seis horizontes correspondientes a dos suelos? Consultar la Tabla Munsell.

Suelo 1:	Ap 2,5Y 4/2	X 5Y 6/2	X 2,5Y 6/3
Suelo 2:	Ap 7,5 R 4/3	X 10 R 7/4	X 7,5 R 6,5/6

9. INTERPRETAR Y COMUNICAR

E3. Redactar un informe a exponer en público.

Se dispone de un residuo que se piensa aportar al suelo, con la condición de que no haya una capa freática a la que pueda llegar. Previamente a efectuar el aporte se hace una prospección por medio de algunas calicatas y sondeos. No se alcanza ninguna capa freática, pero se observa que a partir de 30 cm el material del suelo presenta colores grises (2,5Y 8/2) y existe moteado. ¿Se puede inferir algo acerca de la presencia o no de una capa freática en algún momento del año?

10. CONOCER Y COMPRENDER

A1. 1. Seleccionar aquel término que mejor convenga de acuerdo con el contexto:

El color es una característica de cada (1) _____. Unos colores son heredados del material originario o material parental, por lo que se denominan (2) _____, mientras que otros derivan de los procesos edafogénicos. Para evitar una descripción subjetiva de los colores no se utilizan los nombres corrientes y se usa el Código Munsell, que se basa en un sólido de color definido por tres parámetros. La longitud de onda dominante en la radiación reflejada corresponde a (3) _____. En la coloración del suelo desempeña un papel preponderante (4) _____.

En los suelos saturados de agua permanentemente los colores de sus horizontes son (5) _____. En aquellos suelos en los que hay una capa freática oscilante temporal, la zona afectada por la oscilación o presencia de agua tiene (6) _____ debidos a la reducción de (7) _____ durante la saturación por agua, su movilización en estado (8) _____ y su posterior precipitación con la entrada de oxígeno por los poros, al descender la capa freática.

Por consiguiente, el color es importante, ya que a partir de él se pueden inferir otras propiedades del suelo difíciles de medir o cuya medida consumiría mucho tiempo. Así por ejemplo, la presencia de determinados componentes se infiere en primer lugar a partir del color, como es el caso de la materia orgánica por su color (9) _____, del carbonato cálcico (CaCO_3); de una cementación por sílice (duripán); o de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) por su color más bien blanco algo amarillento, debiendo recurrir al ensayo con (10) _____ para diferenciar los dos primeros y al de (11) _____ para el yeso. Vemos pues, que un mismo color puede ser debido a causas diferentes.

Las clasificaciones antiguas de suelos utilizaban los colores para establecer clases de suelos, pero este criterio ha sido abandonado, si bien se utiliza para diferenciar determinados horizontes de diagnóstico, entre ellos el epipedión (12) _____.

- | | | | | |
|------|--------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| (1) | a) suelo | b) pedión | c) horizonte | d) material orgánico |
| (2) | a) originarios | b) parentales | c) heredados | d) litogénicos |
| (3) | a) brillo | b) croma | c) matiz | d) hue |
| (4) | a) el cuarzo | b) el yeso | c) los óxidos de hierro | d) la materia orgánica |
| (5) | a) grises | b) rojos | c) pardos | d) blancos |
| (6) | a) raíces muertas | b) moteados y concreciones | c) agua | d) nódulos |
| (7) | a) azufre | b) sulfatos | c) nitratos | d) hierro |
| (8) | a) reducido | b) soluble | c) oxidado | d) disuelto |
| (9) | a) característico | b) oscuro | c) variable | d) pardo |
| (10) | a) AgNO_3 | b) BaCl_2 del 10% | c) HCl del 11% | d) H_2SO_4 |
| (11) | a) AgNO_3 | b) BaCl_2 | c) HCl | d) H_2SO_4 |
| (12) | a) hístico | b) mólico | c) óchrico | d) espódico |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos.

La textura de un horizonte hace referencia a la (1) _____ de partículas, por ello en un análisis granulométrico se debe lograr que las partículas se hallen individualizadas, para lo que se recurre a destruir la (2) _____ con peróxido de hidrógeno, conseguido lo cual se añade un agente dispersante a base de (3) _____, con lo que las partículas con carga eléctrica, es decir, (4) _____ se dispersan y se puede proceder al análisis granulométrico. Una roca sedimentaria puede tener estructura (5) _____ que es litológica, y no es debida a procesos edáficos.

- | | | | | |
|-----|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
| (1) | a) proporción por tamaños | b) dimensión | c) forma | d) homogeneidad |
| (2) | a) caliza | b) materia orgánica | c) óxidos de hierro | d) unión |
| (3) | a) calcio | b) aluminio | c) sodio | d) potasio |
| (4) | a) la materia orgánica | b) los cationes | c) los aniones | d) las arcillas mineralógicas |
| (5) | a) prismática | b) laminar | c) maciza | d) granular |

2. ESTRUCTURA DEL SUELO: MACROESTRUCTURA Y MICROESTRUCTURA

Las partículas individualizadas al estudiar la textura, raramente se encuentran de este modo en los suelos, excepto si el material es arenoso. La estructura es una propiedad típicamente edáfica que, de presentarse, permite diferenciar un suelo de un material geológico.

ESTRUCTURA

La estructura hace referencia al tamaño y manera de agregarse de forma natural y estable las partículas individuales, y el espacio de huecos de distintos tamaños que lleva asociada esta organización en agregados.

El estudio de la estructura se puede abordar a diferentes escalas espaciales, ya que constituye un *continuum* de organizaciones de partículas, desde la **macroestructura**, que caracteriza los agregados que se pueden identificar en campo a ojo desnudo, hasta las uniones observables con microscopio electrónico, pasando por las disposiciones de partículas observables en lámina delgada y microscopio petrográfico, en este caso se denomina **microestructura**.

Entender los tipos de uniones y los mecanismos de agregación que confieren estabilidad a la estructura presenta cierto grado de complejidad y puede abordarse con diferentes enfoques, desde las observaciones de campo al estudio físico-químico de los procesos. En esta Unidad se introducen los aspectos más asequibles, dejando para después de haber estudiado los fenómenos de superficie (Unidad 8) el profundizar en los procesos de agregación.

3. ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Un agregado (ing. *ped*) es una unidad tridimensional resultante de la aglomeración de partículas individuales, cuya cohesión interna se debe a diversos procesos y tipos de cementos (arcilla, óxidos de hierro, materia orgánica, carbonato cálcico, agua).

La **estabilidad de la estructura** expresa la resistencia de los agregados de un horizonte de un suelo, en unas condiciones particulares, para soportar una fuerza aplicada. La presión ejercida sobre el suelo puede ser debida a compactación por el paso de maquinaria; al impacto de gotas de lluvia; o a la humectación repentina, que atrapa aire en el interior de los agregados y puede hacerlos colapsar.

La estabilidad de la estructura del suelo viene condicionada por sus componentes y las características físico-químicas.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura es una característica de cada horizonte en un mismo suelo y se manifiesta mejor si se ha dejado secar el perfil una vez abierta la calicata. Los **agregados se describen** en campo atendiendo al grado de desarrollo de la estructura, la forma y tamaño de los agregados y su estabilidad:

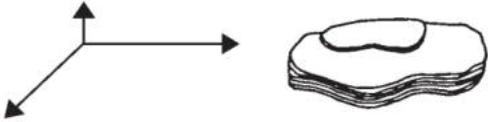
- **Grado de estructuración o de pedialidad:** se describe a partir de la facilidad con la que se pueden distinguir los agregados en un horizonte. Expresa el grado de desarrollo de la estructura y la peculiaridad de los agregados. Si hay agregados, la estructura se denomina **pedial** (débil, moderada o fuerte) y si no los hay **apedial**. En este caso puede tratarse de una **estructura maciza** o continua, si no se observan agregados y al intentar partir un volumen de suelo se rompe en cualquier dirección, sin seguir líneas preferentes; o bien si los granos individuales están sueltos, se denominan **granular simple**.
- **Forma de los agregados o tipo de estructura:** laminar (dominan dos dimensiones sobre la tercera), prismática (domina una dimensión sobre las otras dos, típica de horizontes subsuperficiales ricos en arcilla iluviada); en bloques angulares, subangulares y granular compuesta (no predomina ninguna de las tres dimensiones). La mejor estructura es la granular compuesta, corresponde a suelos con una actividad biológica alta y con materia orgánica. La estructura columnar típica de suelos con exceso de sodio, es muy inestable.



Estructura laminar: típica de una costra superficial formada por impacto de las gotas de lluvia (natural o procedente de un aspersor) sobre un suelo desnudo con estructura inestable, con lo que se verá dificultada la emergencia de las plántulas. J. Porta



Estructura prismática: debida a grietas de retracción que aparecen al secarse el suelo. Típica de endopediones argílicos. C. Roquero

Tipo de estructura (no se representa a escala)	Descripción
<p>Laminar</p> 	<p>Heredada en materiales depositados bajo el agua, por ejemplo en suelos de llanuras de inundación. También puede deberse al impacto de las gotas de lluvia que formen sellos y costras superficiales. Impide la penetración vertical de las raíces, el agua y el aire y dificulta la emergencia.</p>
<p>Prismática</p> 	<p>Típica de horizontes enriquecidos en arcilla: Bt, endopediones argílicos. Los planos de debilidad verticales corresponden a grietas de retracción. Los prismas pueden presentar una gran dureza y las raíces no ser capaces de penetrar en ellos.</p>
<p>Columnar</p> 	<p>Prismas rematados en la parte superior por una cúpula. Típica de suelos alcalinos (endopediones nátricos), Bt_{na}. Frecuentes en Solonetz^{WRB}.</p>
<p>Bloques angulares</p> 	<p>Aristas rectas y caras rectangulares. Frecuente en endopediones cámbicos. Intersecciones curvas.</p>
<p>Bloques subangulares</p> 	<p>Aristas agudas y caras curvas. Típica de suelos de zonas semiáridas y áridas pobres en materia orgánica. Frecuentemente en epipediones óchricos y endopediones cámbico y cálcico. Esferas imperfectas.</p>
<p>Granular compuesta</p> 	<p>Es la estructura más favorable, por su estabilidad y por los huecos que dejan circular el agua y el aire. Típica de medios biológicamente activos ricos en bases y con materia orgánica. Epipediones de praderas, frecuente en epipediones móllicos.</p>
<p>Migajosa</p>	<p>Granular compuesta muy porosa. Epipediones con materia orgánica bien evolucionada.</p>

- **Tamaño** de los agregados: se mide con una escala de referencia para cada tipo de estructura. Como ejemplo se incluye la que corresponde a estructuras angulares y subangulares. En las guías de descripción de suelos se podrán encontrar las restantes (www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés).
- **Estabilidad**: En laboratorio se puede determinar la **inestabilidad** estructural de los agregados sometidos a la acción de diversos procesos (humectación por capilaridad, impacto de gotas de lluvia, agitación en condiciones normalizadas, entre otros). El método elegido, de entre los muchos propuestos, deberá ser el adecuado a las características del suelo a investigar.

ESTRUCTURAS EN BLOQUES ANGULARES
Y SUBANGULARES (no está a escala)

Muy fina
(menos de 5 mm de lado)

Fina
(de 5-10 mm de lado)

Mediana
(de 10-20 mm de lado)

Gruesa
(de 20 a 50 mm de lado)



5. OBSERVAR Y DESCRIBIR

G2. Describa con sus propias palabras lo que observa en la imagen. Formule alguna interpretación.



6. ESTRUCTURA Y FUNCIONES DE LOS SUELOS

La existencia de agregados en un horizonte implica un espacio de huecos. Unos son de gran tamaño, son los **macroporos** ($\varnothing > 250 \mu\text{m}$), que suelen hallarse interconectados, por lo que permiten la transmisión de agua y aire, el crecimiento de las raíces y, además, pueden servir de hábitat para microorganismos. La abundancia de macroporos favorece, por tanto, las condiciones de aireación, la permeabilidad y la biodiversidad. Los **microporos** ($\varnothing < 250 \mu\text{m}$) almacenan agua, pero son menos efectivos para la transmisión de fluidos en el suelo y para el crecimiento de las raíces y de microorganismos.

La estructura es una propiedad dinámica cambiante según el estado de humedad del horizonte y a lo largo del tiempo. Incide en la calidad del suelo y en su fertilidad. Su importancia radica en el hecho de que modifica las características básicas debidas a la textura, en especial la proporción y tamaño de poros, y en que las unidades estructurales o agregados son relativamente estables.

La estructura incide en el comportamiento del suelo frente a diversas funciones, entre otros aspectos, en la infiltración, almacenamiento y movimiento del agua, la entrada de gases y aire en el suelo, la facilidad de laboreo, la nascencia, la penetración y crecimiento de las raíces, la erosionabilidad del suelo, y por una capacidad para actuar como hábitat para los organismos, por lo que es una fuente de biodiversidad.



Al labrar un suelo demasiado húmedo se pueden formar artificialmente agregados de gran tamaño (terrones, ing. clod). Si la estructura es estable, al irse secando el suelo se irán fragmentando, reproduciendo el tipo de estructura característica del horizonte (agregados). En caso contrario permanecen, y habrá que romperlos mecánicamente.

J. Porta

7. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

G2. Estudiar los siguientes aspectos:

- Establecer la diferencia entre textura y estructura de un horizonte. ¿Podría haber algún símil entre el material que se utiliza en una construcción y el edificio resultante?.
- Seleccionar un término de la primera fila y vincularlo con uno de la segunda y otro de tercera fila, con los que esté relacionado:
 - (a) estructura laminar (b) estructura prismática (c) estructura granular compuesta
 - (m) horizonte rico en arcilla iluviada (n) aporte de materiales en una llanura aluvial (p) epipedión de suelo de pradera
 - (x) Bt (y) A (z) C

8. FACTORES DE CONTROL EN LA FORMACIÓN DE AGREGADOS

La organización de la fase sólida del suelo es un proceso muy complejo, resultado tanto de la dinámica natural, como de intervenciones antrópicas, cuyos efectos pueden ser positivos o negativos para la estructuración.

La interacción entre las partículas minerales y la materia orgánica, que da lugar a la formación de agregados, viene controlada por factores abióticos, que pueden contribuir a la agregación de partículas individuales o tener una acción desestructurante; y por factores bióticos, que pueden dar lugar a la formación de agregados de mayor tamaño o, en el caso de prácticas agrícolas inadecuadas, pueden favorecer la desestructuración. Por otro lado, hay mecanismos de estructuración–desestructuración en los que sólo se ven afectadas partículas minerales, principalmente en horizontes subsuperficiales.

Los principales factores de control en la formación de agregados son:

a) Factores abióticos:

- **Dependientes de las características del suelo.** Entre ellos: la cantidad y mineralogía de las arcillas (por su carga eléctrica negativa en su superficie; y por la capacidad de algunas de ellas para expandirse y retraerse); los cationes presentes en el complejo de cambio (el calcio, magnesio, hierro y aluminio floculan las arcillas, mientras que el sodio las dispersa); presencia de óxidos de hierro y de aluminio (en suelos tropicales dan lugar a agregados muy estables); carbonato cálcico.
- **Dependientes del clima y del régimen de humedad del suelo.** Entre ellos: las características de las lluvias (energía cinética de las gotas de lluvia, que aumenta con el cuadrado de la velocidad de caída, y es proporcional al tamaño de gota); la alternancia de estados de humectación y desecación (con un exceso de agua prolongado los cementos arcillosos y húmicos tienden a la dispersión y la estructura tiende a ser maciza o continua, mientras que la desecación favorece la fragmentación); alternancia de hielo–deshielo, cuyos efectos dependen de la humedad del suelo y de la velocidad a la que tiene lugar la congelación y el deshielo.

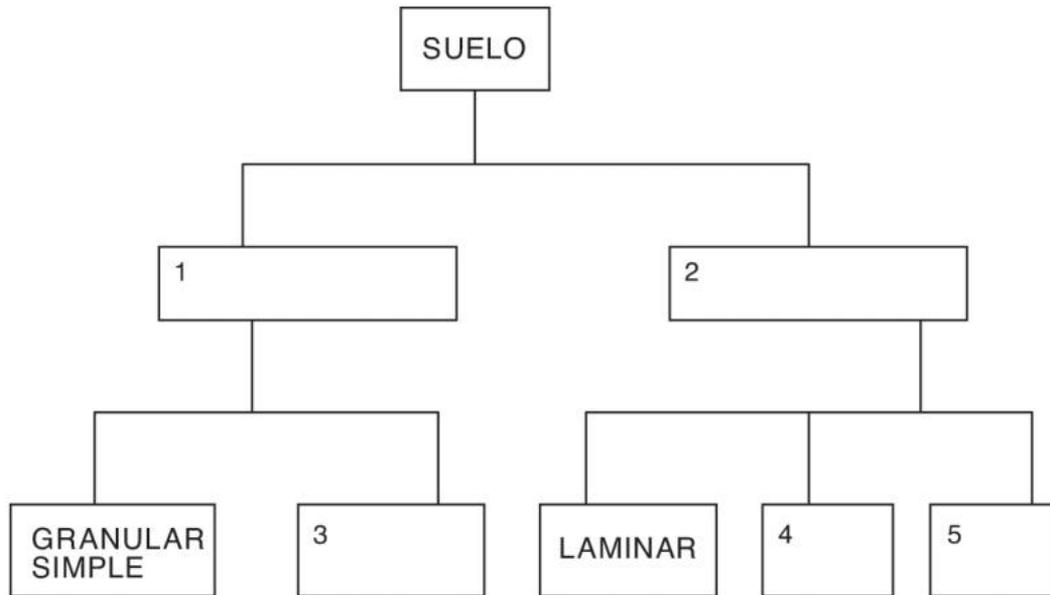
b) Factores bióticos:

- **Naturales:** Entre ellos: naturaleza y cantidad de materia orgánica, que se une a las arcillas para formar microagregados; actividad biológica, que da lugar a la formación de polisacáridos y sustancias «pegajosas» que unen paquetes de partículas de arcilla entre ellos y con granos de limo y arena, para formar asociaciones órgano–minerales, típicas del complejo arcillo–húmico. Las lombrices de tierra hacen una acción mecánica de mezcla, crean canales, ingieren cantidades ingentes de suelo, que excretan mejor estructurado y enriquecidos en microorganismos (bioturbación).
- **Antrópicos:** Pueden favorecer la estructuración. Entre ellos: el aporte de materia orgánica; el drenaje subterráneo, que elimine los excesos de agua; el subsolado de horizontes profundos, el aporte de acondicionantes químicos; la labranza mínima. Las prácticas agrícolas inadecuadas pueden inducir a una progresiva desestructuración, entre ellas: el riego con agua de mala calidad por su contenido en sodio; el laboreo con el suelo excesivamente húmedo; la circulación de maquinaria pesada o el paso de los animales; el labrar siempre a una misma profundidad puede dar lugar a una suela de labor.

Por consiguiente, se puede afirmar que la estructuración es un proceso específicamente edáfico, en el que intervienen un gran número de factores. Por ello será difícil actuar sobre él para intentar llevar cada factor a su óptimo, a determinar en cada circunstancia.

9. ESQUEMA CONCEPTUAL

A1. Completar el siguiente esquema conceptual referente al grado de agregación y al tipo de estructura:



10. RELACIONES ESENCIALES

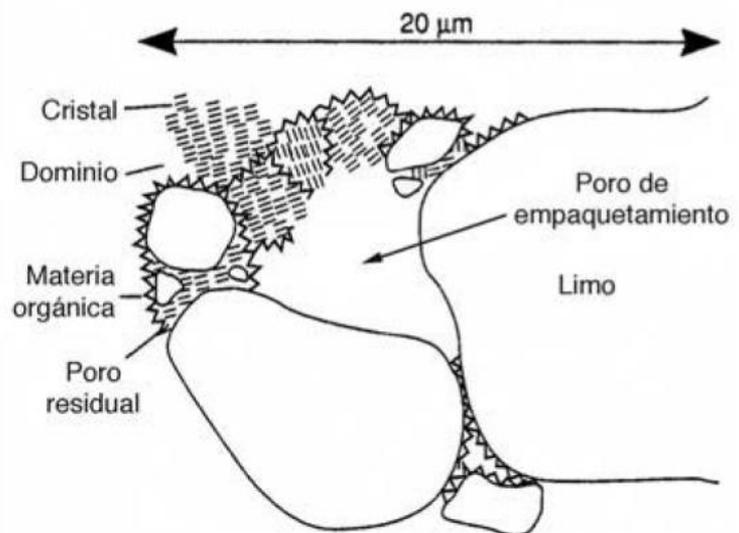
A1. Establecer las relaciones correspondientes entre las dos columnas (alguna puede no tener correspondencia):

- | | |
|-----------------------------------|---|
| 1. Textura | a) material depositado bajo las aguas o bien costra superficial |
| 2. Estructura columnar | b) estructura granular simple |
| 3. Suelo de duna | c) prado de gramíneas |
| 4. Estructura laminar | d) estructura maciza |
| 5. Estructura prismática | e) distribución por tamaño de partículas |
| 6. Estructura granular compuesta | f) horizonte rico en arcilla iluviada |
| 7. Poros comunicantes | g) macroporos |
| 8. Suelo hidromorfo | h) suelos sódicos |
| 9. Impacto de las gotas de lluvia | i) estructura columnar |
| 10. Inestabilidad estructural | j) estructura laminar |

11. DINÁMICA DE LA ESTRUCTURA

Al observar una muestra de suelo al microscopio electrónico se identifican uniones entre los distintos componentes (Rowell, 1997), que son el resultado de dos tipos de procesos: la formación de agregados y la estabilización de los agregados formados.

Los minerales de arcilla, al interactuar con cationes de valencia superior a uno, **floculan**. Como resultado, las partículas de arcilla se unen entre ellas para dar lugar a **dominios de arcilla**. Éstos, al interactuar con materia orgánica persistente (compuestos húmicos), originan uniones fuertes y forman **microagregados** estabilizados, al ser resistentes a la degradación microbiana. Los microagregados, a su vez, interactúan con materia orgánica temporal (productos microbianos, subproductos de las plantas,



Agregado observado al microscopio electrónico de barrido (SEM). Aumento $\times 3000$.

gomas de polisacáridos, azúcares, entre otros) y con raíces finas y micelios de hongos. El resultado es la formación de **macroagregados**, cuya estabilidad dependerá del tipo de materia orgánica implicada y de la actividad microbiana. Ello hace necesaria la incorporación continuada de materia orgánica, para mantener la estabilidad de la macroestructura.

Los agregados dejan entre sí un espacio de poros de distintos tamaños. Unos están interconectados, por lo que dejarán circular el agua y el aire, y servirá de hábitat para los organismos del suelo, aspectos fundamentales para las funciones potenciales de los suelos. También existen poros aislados, dentro de los agregados, que no desempeñan estas funciones.

12. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos:

La estructura del suelo se caracteriza por la presencia de unidades naturales de ensamblajes coherentes, formados por (1) _____ del suelo, dichas unidades se denominan (2) _____. La arcilla mineralógica, cuyas partículas tienen un tamaño de (3) _____ resultan esenciales en la estructuración del suelo por (4) _____.

La estructura se describe en campo atendiendo a su grado de desarrollo, de manera que cuando un suelo que no es arenoso no presenta estructura, se dice que ésta es (5) _____. Atendiendo a (6) _____ de los agregados, un endopedión rico en arcilla iluviada tiende a agregados (7) _____. Para el riego (8) _____ interesante que el epipedión tenga estructura laminar en su parte superior, al igual que para la emergencia de las plántulas. Ello se corresponde con un contenido de materia orgánica (9) _____, ya que este componente se une a (10) _____ para formar (11) _____. La estructura del suelo condiciona el/la (12) _____ del suelo.

- | | | | | |
|------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| (1) | a) arena | b) partículas elementales | c) arcilla | d) partículas minerales |
| (2) | a) dominios | b) tactoides | c) agregados | d) compuestas |
| (3) | a) < 2 μm | b) 2-20 μm | c) 2-50 μm | d) < 0,2 μm |
| (4) | a) su tamaño fino | b) su superficie específica | c) ser planas | d) su carga eléctrica |
| (5) | a) continua | b) la de la roca | c) espesa | d) granular simple |
| (6) | a) a la estabilidad | b) a la forma | c) a la pedialidad | d) al grado de desarrollo |
| (7) | a) laminares | b) arcillosos | c) prismáticos | d) columnares |
| (8) | a) no es | b) es | c) resulta | d) es muy |
| (9) | a) medio a alto | b) bajo | c) oxidable | d) sostenido |
| (10) | a) arena | b) limo | c) roca | d) arcilla |
| (11) | a) dominios | b) agregados | c) poros | d) microagregados |
| (12) | a) textura | b) profundidad efectiva | c) profundidad | d) drenaje |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE**CA. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto de entre los propuestos:**

La mayoría de las plantas enraízan en el suelo gracias a que éste es un medio poroso, debido a (1) _____, excepto en suelos arenosos. Ello permite establecer diferencias entre horizontes y entre suelos, y condiciona la aptitud de éstos para desarrollar diferentes funciones. Por el momento, la Tierra es el único planeta del sistema solar que posee suelo, debido a que éste es el resultado de la interacción entre la matriz física y (2) _____ y la vida está adaptada a la existencia del sistema edáfico, en el que, a pesar de la poca apariencia, viven bacterias, hongos, las cianobacterias y una abundante fauna, aprovechando el espacio de huecos existente en el suelo. La existencia de este espacio hace que el volumen del suelo y el de las partículas que lo componen sean (3) _____.

- | | | | | |
|-----|-------------------------|------------------|--------------------------|--------------|
| (1) | a) la textura | b) la estructura | c) los elementos gruesos | d) la fauna |
| (2) | a) los organismos vivos | b) el agua | c) la radiación solar | d) la fauna |
| (3) | a) iguales | b) diferentes | c) importantes | d) variables |

2. DENSIDADES DEL SUELO

La organización de las partículas individuales del suelo en unidades mayores hace que el suelo sea un medio poroso, lo que permite establecer dos tipos de densidades, la densidad de las partículas (minerales y orgánicas) y la del suelo en su conjunto.

DENSIDAD REAL

Masa de las partículas sólidas secas (M_s) referida a la unidad de volumen de las mismas (V_s):

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Varía con la naturaleza de las partículas. Se determina con un picnómetro.

Minerales de arcilla: 2000-2600 kg m⁻³

Cuarzo: 2500-2650 kg m⁻³

Valor medio para suelos minerales: 2650 kg m⁻³

Suelos orgánicos: 1100-1400 kg m⁻³

DENSIDAD APARENTE

Masa de sólidos respecto al volumen inalterado de suelo seco (volumen total, V_T):

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_T}$$

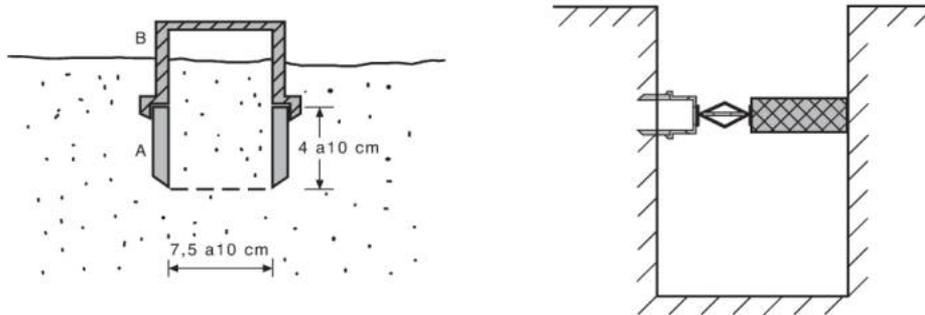
Valor medio de la densidad aparente para un suelo mineral: 1350 kg m⁻³

Para su determinación deberá tomarse un volumen conocido de suelo y, una vez dejado secar, se determina la masa, que se referirá a la unidad de volumen.

Puede utilizarse como un indicador de compactación, si bien no se han establecido valores umbral.

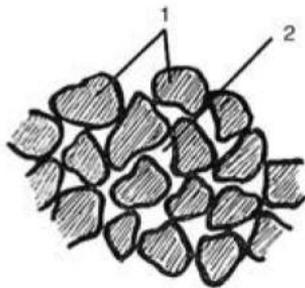
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO

G2. Observar las figuras y deducir de qué piezas se compone el equipo para determinar la densidad aparente de un horizonte de un suelo y explicar cómo se utiliza el cilindro metálico.

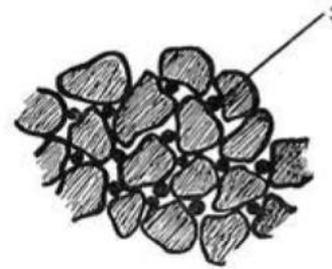


4. EL SUELO COMO SISTEMA POROSO: POROSIDAD

Una masa de partículas de arena (1), cuyos granos sean del mismo tamaño (homométricas), dejará un espacio de huecos entre las partículas (2). El tamaño de los huecos dependerá del de las partículas de arena, pudiendo denominarlos **huecos de empaquetamiento simple**. Si se mezcla con las mismas partículas de arena, partículas de menor tamaño y que no interaccionen con la arena, esta mezcla heterométrica tendrá un espacio poroso menor (3). Las partículas más finas rellenan en parte los huecos dejados por la arena.

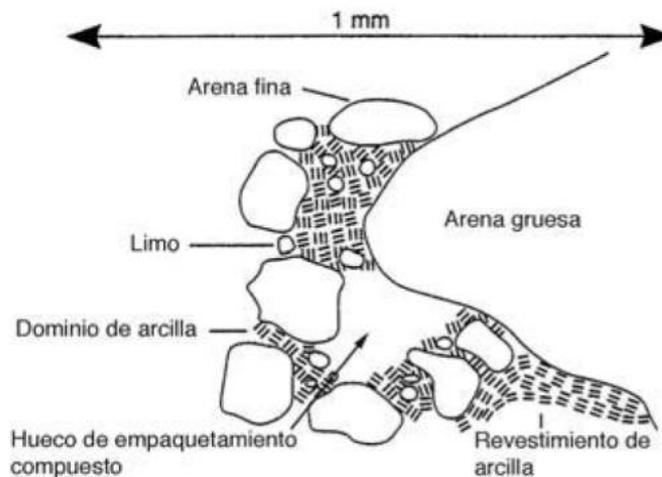


Asociación de partículas de arena homométricas: alta porosidad y permeabilidad.



Asociación de partículas de arena heterométricas: menor porosidad y permeabilidad.

Ahora bien, si los componentes de la fase sólida pueden interaccionar entre ellos: arena, limo, arcilla y componentes orgánicos, el resultado será la formación de microestructura y macroestructura dando origen a un espacio de huecos mucho mayor.



Organización de la fase sólida en agregados: se crean huecos de empaquetamiento compuesto que aumentan la porosidad y permeabilidad. (Lámina delgada de un agregado. Rowell, 1997)

POROSIDAD

Se define como la relación entre el volumen de huecos (V_V) y el volumen total (V_T). Se suele expresar en porcentaje:

$$P_T = \frac{V_V}{V_T} \times 100 = \frac{V_a + V_w}{V_a + V_w + V_s} \times 100 = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$$

V_a = volumen de aire

V_w = volumen de agua

V_s = volumen de sólidos

RELACIONES

$$\text{Ratio de poros} = e = \frac{V_V}{V_s} = \frac{V_a + V_w}{V_T - V_s} \quad 0,3 < e < 1,5 \text{ (generalmente)}$$

Volumen específico = $1 + e$

Porosidad = $1 - \text{Ratio de poros} = e/(1 + e)$

$$e = P_T / (1 - P_T)$$

Volumen específico = $1/(1 - P_T)$

La porosidad tiene importancia para la circulación del agua y el aire en el suelo. Atendiendo al tamaño de los poros y su funcionalidad se distingue: macroporosidad, mesoporosidad y microporosidad. Los macroporos dan lugar a un flujo preferencial que puede tener una significación ambiental importante, al permitir el transporte de contaminantes a posiciones subsuperficiales.

Además de la porosidad comunicante (**porosidad efectiva**) que controla el movimiento del agua en el suelo, pueden existir poros aislados dentro de los agregados (**porosidad residual**). Es por ello que el valor numérico de la porosidad no es un buen indicador del movimiento del agua en un horizonte, debiendo recurrir a la medida de la conductividad hidráulica para caracterizar la velocidad del agua en un suelo.

5. CALCULAR E INTERPRETAR

E3. Calcular e interpretar los siguientes aspectos.

- Calcular la masa del epipedión de una hectárea de suelo cuya textura es arenoso-franca y tiene un espesor de 25 cm y una densidad aparente de 1300 kg m^{-3} .
 - Indicar entre qué intervalos de valores se encuentran los contenidos de arcilla y limo en este horizonte utilizando un triángulo de texturas.
 - Deducir la expresión que permite calcular la porosidad en función de las densidades real y aparente.
 - ¿Cuál será la densidad real media del horizonte si la porosidad fuese del 50%?
 - ¿Cuál será la cantidad de agua que contendrá este horizonte cuando se halle saturado de agua inmediatamente después de un riego? La densidad de agua se supone igual a 1000 kg m^{-3}
 - ¿Cómo se denomina el proceso por el cual este horizonte pierde parte del agua recibida durante un riego o por aporte por la lluvia?
 - ¿Qué ocurrirá si la existencia de una suela de labor impide la pérdida del agua aportada por el riego? ¿Se puede considerar que aumentarán las disponibilidades de agua para las plantas de forma favorable?

2. Con un cilindro metálico cuyo diámetro interno es de 4,8 cm y su altura es de 2,5 cm se toma una muestra inalterada para determinar la densidad aparente. Los resultados de laboratorio son: masa de la muestra seca más el cilindro: 77,0 g; masa del cilindro vacío: 13,5 g. Calcular la densidad aparente.

3. Con un picnómetro de 100 ml, 20 g de muestra seca desplazan 7,5 ml de agua. Calcular la densidad real de la muestra y su porosidad con los datos del apartado 2.

CLASIFICACIÓN DE LOS POROS (Stoops, 2003)

Poros de empaquetamiento

Son los poros que existen entre los componentes del suelo (agregados o partículas) cuando están apilados de forma suelta, y que no se acomodan entre ellos. Son poros equidimensionales o elongados, altamente interconectados, extremadamente irregulares. Se subdividen en:

- Poros de empaquetamiento simple: entre partículas de un suelo con estructura granular simple (p.e. granos de arena).
- Poros de empaquetamiento compuesto: entre (micro)agregados del suelo, característicos de estructuras granulares compuestas o migajosas.
- Poros de empaquetamiento complejo: entre partículas del suelo y pequeños agregados.

Vesículas

Son poros relativamente grandes, con paredes lisas, normalmente equidimensionales o esféricos. No están interconectados, al ser poros aislados. Se forman al quedar atrapadas burbujas de aire en horizontes superficiales.

Canales

Poros tubulares (cilíndricos) lisos, con una sección transversal redondeada u oval. Corresponden a canales de raíces o galerías de fauna. Son moderadamente conductores.

Cámaras

Son poros bastante equidimensionales, con paredes lisas, interconectados con canales.

Cavidades

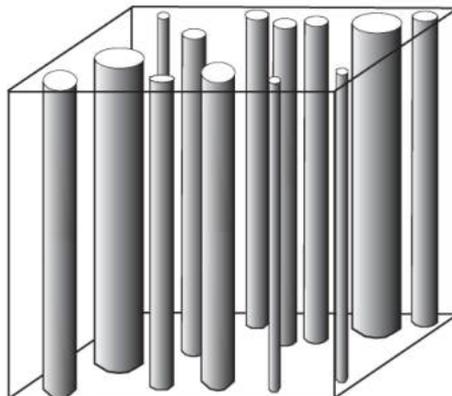
Poros irregulares, lisos o rugosos, con baja interconexión. Resultan del colapso de agregados, alteración de la estructura o disolución de componentes del suelo.

Planos

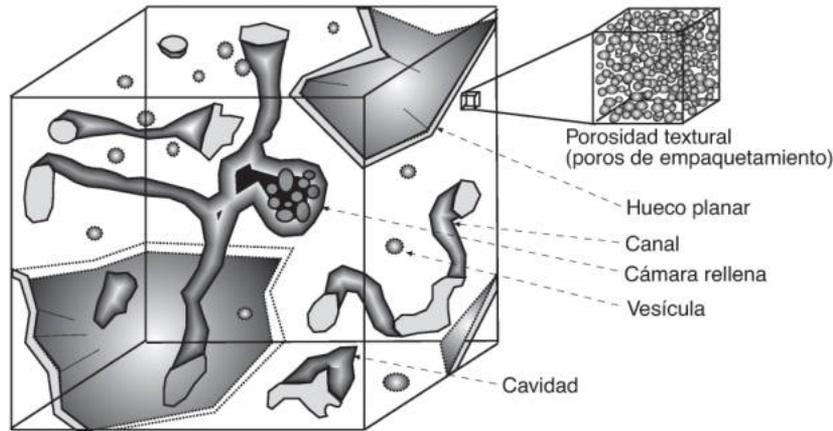
Son poros planares y fisuras, acomodados o no, lisos o rugosos, resultado de la contracción de agregados al secarse o del deslizamiento de caras entre ellos. Son en general buenos conductores de fluidos (aire y agua), excepto en los casos de estructuras laminares que producen poros planares horizontales, que dificultan el movimiento vertical del agua o del aire en el suelo.

En la figura siguiente se presentan dos modelos de distribución de poros, uno ideal, en el que los poros son cilíndricos, lisos y de diámetro constante, utilizado en Física de suelos, ya que resulta más fácil de manejar, y otro más realista, que muestra las distintas morfologías de poros, y que pone en evidencia la gran complejidad de modelización de la porosidad. La estereología de poros es la disciplina que se ocupa del estudio de la organización en 3D del espacio poral, su arquitectura, conectividad, y su relación con imágenes 2D resultado de la sección de volúmenes de suelo.

Un modelo ideal es:



En la realidad el sistema de poros es mucho más complejo:



8. ESTUDIAR E INTERPRETAR

E3. Buscar información y deducir el tipo de poros que están presentes en los tipos de estructuras que se indican y sus implicaciones para la entrada del agua en el suelo (estructura laminar), el almacenamiento y movimiento de agua: a) granular simple, b) migajosa, c) masiva, d) laminar (según que corresponda a la superficie del suelo o a un horizonte subsuperficial, e) en bloques subangulares y d) prismática.

9. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos:

La densidad (1) _____ y la porosidad reflejan el grado de estructuración de un horizonte y proporcionan información acerca de la (2) _____ para el crecimiento de las raíces y el movimiento del agua en el suelo. Dicha densidad se mide tomando (3) _____ conocido/a de suelo por medio de un anillo metálico. Para aumentar la calidad de la información deben realizarse varias repeticiones en cada horizonte. Las unidades SI con que se expresa son (4) _____. Un valor de referencia es el de (5) _____, si bien en horizontes orgánicos de suelos orgánicos, es decir en los (6) _____ es considerablemente más baja y en una suela de labor puede llegar a 2000. Un valor de 1600 debe considerarse restrictivo para el crecimiento de las raíces.

Los macroporos son los que se hallan (7) _____ los agregados, son huecos comunicantes que permiten la circulación de aire y el agua, por lo que los horizontes de estructura maciza se caracterizan por una macroporosidad (8) _____. El laboreo será más fácil en suelos con una densidad (9) _____ no muy alta, ya que ello se corresponde con una buena estructura. La presencia de (10) _____ en la sedes de intercambio provoca inestabilidad en la estructura y con ello un/a (11) _____ de la densidad (12) _____.

- | | | | | |
|------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| (1) | a) real | b) aparente | c) de las partículas | d) del agua |
| (2) | a) idoneidad | b) nutrición | c) disponibilidad de agua | d) aireación |
| (3) | a) una masa | b) un volumen | c) un agregado | d) un horizonte |
| (4) | a) Mg m^{-3} | b) g cm^{-3} | c) Mg m^{-2} | d) kg m^{-3} |
| (5) | a) 2650 | b) 900 | c) 2100 | d) 1350 |
| (6) | a) A | b) O | c) Ab | d) H |
| (7) | a) dentro de | b) entre | c) en la superficie de | d) con |
| (8) | a) baja | b) alta | c) media | d) mejor |
| (9) | a) real | b) aparente | c) de las partículas | d) del agua |
| (10) | a) calcio | b) magnesio | c) sodio | d) yeso |
| (11) | a) aumento | b) disminución | c) mejora | d) cambio |
| (12) | a) real | b) aparente | c) de las partículas | d) del agua |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos.

El volumen de suelo explorable por las raíces se denomina (1) _____, ya que condiciona la disponibilidades de agua y nutrientes para las plantas. El tipo de estructura hace referencia a que ésta pueda ser (2) _____. Un horizonte genético con acumulación de arcilla iluvial se denomina (3) _____, mientras que un endopedión de acumulación de yeso se denomina (4) _____.

Una ladera es una forma del relieve que une (5) _____ con un fondo. En ella cabe distinguir tres elementos: proximal, central y (6) _____ o basal. En una región volcánica puede haber recibido material (7) _____ transportado por el aire. Si el clima es húmedo la meteorización será (8) _____, ya que se trata de un material (9) _____ poroso.

- | | | | | |
|-----|--------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------|
| (1) | a) hábitat | b) profundidad de enraizamiento | c) profundidad efectiva | d) solum |
| (2) | a) pedial | b) prismática | c) gruesa | d) edáfica |
| (3) | a) Bw | b) Ba | c) Bt | d) argílico |
| (4) | a) yesífero | b) yesoso | c) gypsico | d) gíbsico |
| (5) | a) un fondo | b) una plataforma | c) un glacis | d) un coluvio |
| (6) | a) distal | b) superior | c) cóncavo | d) convexo |
| (7) | a) granítico | b) piroclástico | c) basáltico | d) metamórfico |
| (8) | a) rápida | b) lenta | c) ácida | d) básica |
| (9) | a) poco | b) muy | c) micro | d) medianamente |

2. COMPACTACIÓN DEL SUELO

La presencia de un horizonte o de una capa compactada en un suelo puede ser debida a las características del material originario y a los procesos edafogénicos; o derivar de actuaciones antrópicas inadecuadas, que han provocado una degradación de la estructura, lo que afecta a todos los aspectos de calidad del suelo.

Edafogénesis y compactación

Al estudiar el perfil de algunos suelos se puede observar que el sistema radicular presenta un comportamiento anómalo, con cambios de orientación de vertical a horizontal a partir de una cierta profundidad o bien que las raíces presentan aplastamientos y deformaciones.

En suelos poco desarrollados (Regosoles^{WRB} o EntisolesST) puede existir a poca profundidad un material muy compacto que impida el crecimiento de las raíces en profundidad.

En suelos con un endopedión con un elevado contenido de arcilla (argílicoST o argico^{WRB}), es posible observar que las raíces crecen a favor de grietas extraestructurales, formando un fieltro de raíces que tapizan los agregados prismáticos, sin llegar a entrar en ellos, debido a su elevada compacidad. Por ejemplo en el caso de maíz cultivado en un suelo con un horizonte Bt, se ha comprobado que las raíces no entraban en los prismas, si la densidad aparente de éstos era 1800 kg m^{-3} . A ello podía contribuir, además, el hecho de que en el interior de los prismas hubiese una menor aireación.

Análogamente puede ocurrir en suelos con un horizonte subsuperficial (endopedión) con una acumulación generalizada de yeso (gypsico de tipo hipergypsico^{WRB}, con más de un 60% de yeso). En estos casos, las pocas raíces que consiguen profundizar lo hacen a favor de planos de debilidad verticales, quedando el resto del ho-

rizonte sin explorar. Se podrían citar otros casos en los que la edafogénesis da lugar a horizontes muy compactos o con condiciones de aireación desfavorables.

Laboreo y compactación

El trabajo del suelo, así como la aplicación de cargas a su superficie al circular sobre ella con maquinaria pesada cuando el suelo está húmedo pueden afectar a la estructura, si se supera la capacidad del suelo para resistir los cambios adversos y para recuperar la situación inicial cuando cesa el estrés (resiliencia). La deformación mecánica provocada conduce a una compactación con pérdida de porosidad.

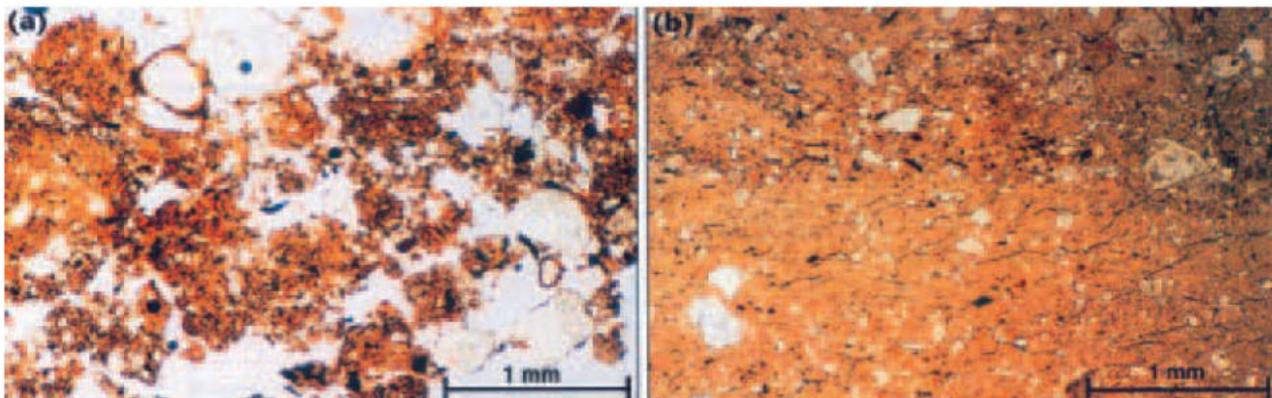


Compactación por paso de maquinaria.

J. Porta

En algunos casos, justo debajo de la profundidad habitual de un laboreo continuado a lo largo de años se localiza una capa compactada (suela de labor), por efecto del peso de los aperos de labranza. Por otro lado, un agricultor experimentado sabe que el suelo debe estar a tempero, es decir, tener un contenido adecuado de humedad para poder entrar a cultivarlo. Ello limita el número de días al año en los que un suelo determinado puede ser trabajado.

El estudio de la compactación se puede abordar por medio de la micromorfología. Las láminas delgadas de la figura muestran dos situaciones claramente diferenciadas, un horizonte bien estructurado, con un espacio poroso abundante (a la izquierda) y, por el contrario, en el segundo caso un horizonte muy compactado, en el que apenas es visible la porosidad.



Cortesía del CSIRO, Australia.

3. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN

La existencia de una capa compacta tiene diversos efectos desfavorables:

- **Sobre el agua:** si se halla en la superficie del suelo (costra), limita la velocidad de infiltración; si se halla a cierta profundidad, puede llegar a saturarse la parte suprayacente a la capa compactada, con ello aumenta el volumen de agua de escorrentía superficial y el riesgo de erosión. Por otro lado, el agua almacenada en el suelo será menor.
- **Sobre el crecimiento de las raíces:** El crecimiento de las raíces tiene lugar al aumentar su longitud al dividirse y elongarse las células de la región meristemática. De este modo la punta de la raíz va penetrando en el material circundante a favor de los huecos existentes, siempre y cuando el tamaño de la entrada sea mayor al diámetro de la punta de la raíz, de lo contrario la raíz desvía su crecimiento. Si el suelo no es rígido, las raíces pueden llegar a desplazar partículas por donde pasan. Por el contrario, en aquellos casos en que la compacidad del suelo sea elevada y el suelo sea muy compacto, la tasa de elongación de la raíz disminuirá. En aquellos suelos en los que tan sólo una parte de las raíces se vea enfrentada a condiciones desfavorables (física u otras), las restantes raíces pueden presentar un **crecimiento compensatorio** en otra parte del suelo que resulte más favorable. Ello permite explicar porque no existe siempre una relación directa entre el crecimiento del sistema radicular en su conjunto y el crecimiento de la planta o el rendimiento del cultivo.
- **Sobre la vegetación:** el crecimiento de las raíces se ve impedido cuando deben ejercer una fuerza para la penetración superior a 3-4 MPa, lo que es equivalente a la fuerza máxima que se puede ejercer con la palma de la mano al empujar un lápiz dentro de un horizonte. Al quedar limitado el volumen de suelo explorable, la cubierta vegetal dispondrá de menos nutrientes y será más susceptible a la sequía y los árboles, además, al tener un peor anclaje pueden sufrir los efectos del viento y llegar a caerse. Por otro lado, en aquellos casos en que la fructificación tiene lugar dentro del suelo, como en el trébol subterráneo, planta de gran importancia forrajera que se caracteriza por enterrar sus semillas, aquella puede verse dificultada.

4. CONCEPTO DE CONSISTENCIA

CONSISTENCIA

La consistencia es una propiedad mecánica que se debe a las fuerzas de cohesión entre las partículas y de adhesividad entre las partículas y el agua. Estas fuerzas hacen que las partículas se mantengan unidas y controlan la resistencia del suelo a la deformación, a la ruptura o a fluir bajo la acción de fuerzas mecánicas. Dichas fuerzas dependen del estado de humedad de la muestra, que se define como estado seco, húmedo y mojado. La consistencia depende, además, del contenido de arcilla y de su mineralogía.

5. CONSISTENCIA Y PROPIEDADES IMPLICADAS

La consistencia hace referencia a propiedades tales como la plasticidad, adhesividad, compacidad, friabilidad y dureza, que se pueden evaluar con ensayos de campo (Porta *et al.*, 2005, pag. 112 y ss).

PLASTICIDAD

Consistencia en estado muy húmedo. Aptitud de un volumen de suelo para deformarse sin romperse y mantenerse así al cesar la fuerza.

ADHESIVIDAD

Consistencia en estado muy húmedo. Aptitud del material del suelo para adherirse a las superficies con las que entra en contacto. Se evalúa probando como se adhiere entre el pulgar i el índice.

COMPACIDAD

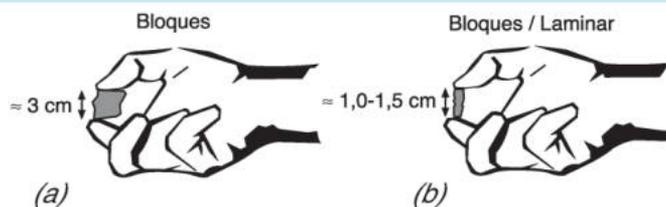
Consistencia a cualquier estado de humedad. Una organización muy densa de las partículas del suelo confiere una gran compacidad a un horizonte. Se evalúa por la resistencia que ofrece a la penetración de un cuchillo (fuerza necesaria y facilidad con que penetra el cuchillo) o bien con un penetrómetro.

FRIABILIDAD

Consistencia en estado húmedo a ligeramente húmedo. Resistencia que opone un volumen de suelo (agregado), al ejercer una cierta presión sobre él entre el pulgar y el índice.

DUREZA

Consistencia en estado seco. Resistencia que ofrece un volumen de suelo (agregado), al presionarlo entre el pulgar y el índice o con la mano.



Ensayos para determinar la consistencia, friabilidad y dureza de los agregados, según el estado de humedad de la muestra.

6. PENETRÓMETRO

PENETRÓMETRO

Aparato de bolsillo que se utiliza en campo para comparar la compacidad de los horizontes a partir de la resistencia que ofrecen a la entrada de un vástago metálico en el suelo. Permite realizar medidas cuantitativas.

7. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. a) Describa con sus propias palabras la imagen.

b) Formule alguna hipótesis acerca de lo que les puede haber ocurrido a estas raíces de alfalfa.



J. Porta

8. DOMINIOS DE CONSISTENCIA: LÍMITES DE ATTERBERG

La consistencia depende del contenido de humedad, entre otros factores, de manera que si a una muestra sólida seca se le va añadiendo agua, irá pasando de forma gradual a diferentes estados físicos (sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido), denominados **dominios de consistencia**, hasta llegar a un fluido viscoso (suspensión acuosa). El contenido másico de agua al que tienen lugar los sucesivos cambios, de un estado a otro, han permitido definir límites entre dominios de consistencia, conocidos como **límites de Atterberg**: límite plástico (de consistencia friable a consistencia plástica) y límite líquido (de consistencia plástica a fluido viscoso). Se trata de valores meramente indicativos, ya que los cambios tienen lugar de forma gradual. Existe una metodología normalizada para realizar los ensayos para determinar estos límites y obtener resultados reproducibles.

La diferencia entre la cantidad de agua correspondiente al límite líquido (L_L) y la del límite plástico (L_P) define el **Índice de plasticidad**. Valores inferiores a 10 indican baja plasticidad, especialmente los inferiores a 5; índices superiores a 10 y cercanos a 20 indican alta plasticidad.

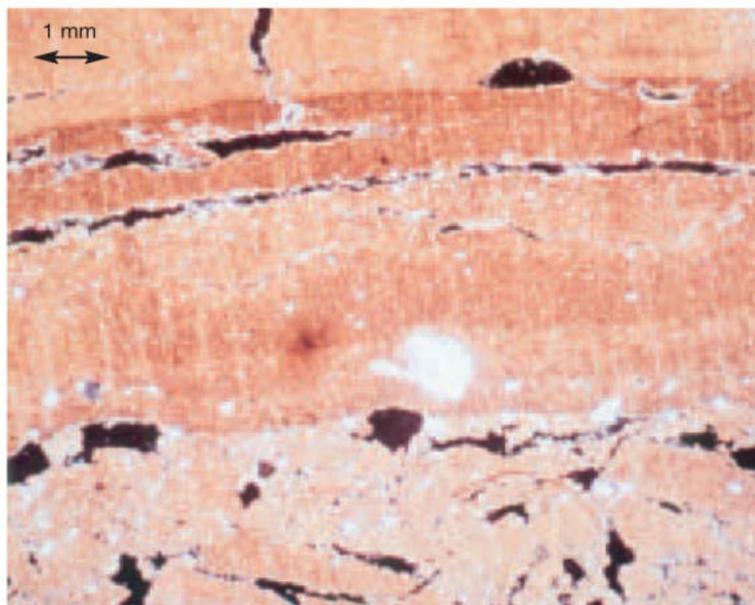
9. SELLADO Y ENCOSTRAMIENTO SUPERFICIAL

SELLADO

El sellado consiste en un proceso mediante el cual se forma una capa delgada de suelo húmedo (sello), de unos pocos milímetros de espesor, de elevada densidad aparente, baja porosidad, principalmente no comunicante; baja velocidad de infiltración y baja conductividad hidráulica. Se debe al impacto de las gotas de lluvia o de aspersor, sobre un suelo desnudo con agregados inestables.

ENCOSTRAMIENTO

Por secado, un sello da lugar a una costra superficial, capa muy compacta. Presenta estructura laminar, densidad aparente elevada, baja porosidad no comunicante, poco permeable al agua y al aire. Dificulta la emergencia de las plántulas de algunos cultivos (por ejemplo, maíz, cebolla, remolacha).



R. M. Poch

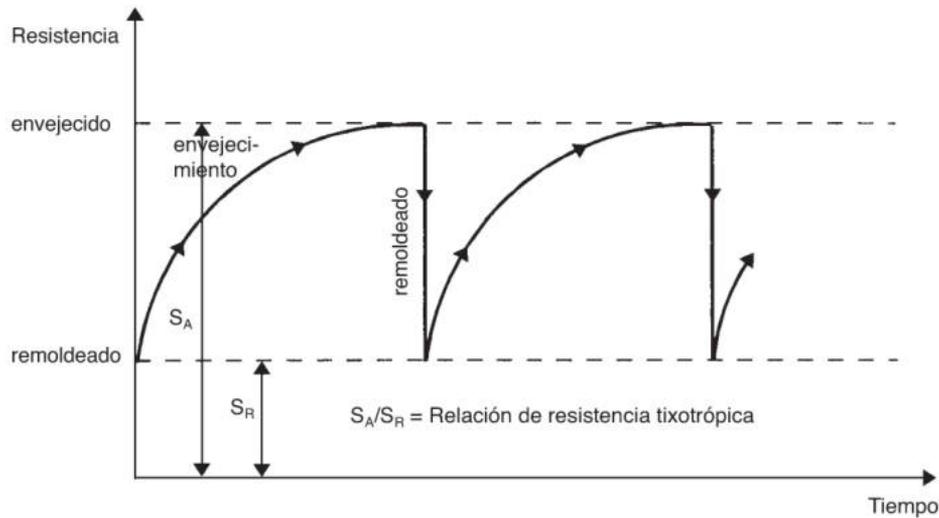
Lámina delgada de una costra superficial. Escala de observación: milimétrica. De la superficie del suelo hacia abajo se observan huecos planares y debajo huecos vesiculares (no comunicantes). Se puede inducir que la estructura del epipedión era muy inestable, al ser impactada por las gotas de lluvia. Se ha formado sello y al secarse da lugar a una costra superficial. El movimiento vertical del agua se verá muy dificultado con este modelo de huecos y la emergencia de las plántulas será muy deficiente.

10. TIXOTROPÍA

TIXOTROPÍA

La tixotropía es una propiedad reversible de un material muy húmedo, cuya consistencia pasa bruscamente de un estado más bien rígido y resistente, a una consistencia más fluida bajo la acción de una presión elevada (de los dedos, de un cuerpo o debido a un movimiento sísmico). Al desaparecer la presión, el material vuelve progresivamente a un estado más rígido o menos fluido.

Está relacionada con cambios en la ordenación de las partículas y con cambios en el agua adsorbida, que se ven afectados al aplicar la presión. Es una característica de suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos.



Influencia del tiempo de reposo en el aumento de resistencia de una arcilla con carácter tixotrópico remoldeada. Al cesar la presión, el sistema vuelve a una consistencia menos fluida o más rígida.



El color rosa mexicano del test de Fiedes-Perrot permite identificar la presencia de materiales amorfos (carácter tixotrópico).

J. Porta

11. TEMAS PARA EL DEBATE

E3. Estudiar los siguientes casos, buscar información en Internet y redactar un informe para cada uno de ellos:

1. a) Implicaciones de las propiedades físicas de los suelos en sus funciones potenciales.
b) Efecto del agua en la consistencia del suelo.
c) Incidencia de las prácticas de manejo del suelo sobre la consistencia.

2. En la parte basal de una ladera se quieren construir unas instalaciones ganaderas, así como unas viviendas rurales y escuelas. El mapa de suelos de la zona indica que la ladera está constituida por suelos con carácter tixotrópico. Se sabe que el grado de sismicidad de la zona es de medio a alto. Se pide su asesoramiento acerca de los siguientes aspectos:

- a) ¿Pueden correr algún riesgo las instalaciones en el emplazamiento indicado?
- b) ¿La tala de árboles de la ladera puede mejorar o empeorar los posibles riesgos?

3. Discutir si puede resultar correcto el siguiente texto:

En un informe se lee: «En los suelos arcillosos de la zona, la estructura es extremadamente importante para el crecimiento de las raíces, mientras que allí donde hay suelos arenosos resulta mucho más importante la resistencia del suelo a la elongación de las raíces».

4. Beneficios y desventajas del laboreo del suelo.

12. RELACIONES ESENCIALES

A1. Establecer relaciones entre ambas columnas referentes a estructura, densidades, porosidad y consistencia:

- | | |
|--|---|
| 1. Porosidad | a) Masa de partículas individuales, sin cohesión entre ellas |
| 2. Microagregados | b) Al humedecerse un agregado de forma repentina por una lluvia |
| 3. Suelo arcilloso bien estructurado | c) Masa de partículas continua, sin planos de debilidad |
| 4. Suelo con exceso de agua | d) Relación entre el volumen de huecos y el volumen total |
| 5. Estructura granular simple | e) Estructura prismática |
| 6. Formación de sello y estructura laminar | f) Propiedad de cambiar a una consistencia más fluida bajo acción de una fuerza de forma reversible |
| 7. Horizonte muy compacto | g) $\emptyset < 250 \mu\text{m}$ |
| 8. Friabilidad | h) Agrupación de láminas de arcilla unidas por medio de cationes con más de una carga. |
| 9. Tixotropía | i) Estabilidad de los agregados alta, elevada actividad biológica |
| 10. Pradera de gramíneas | j) El cuchillo sólo penetra unos pocos mm en el horizonte |
| 11. Dominio de arcilla | |
| 12. Dispersión | |

13. INTERPRETAR INFORMACIÓN

E3. Discutir los siguientes aspectos y redactar un informe:

Al estudiar en campo un endopedión hipergypsico^{WRB}, B_y, cuyo color en húmedo es 10YR 8/2, se observa una ausencia total de raíces. Ampliando el ámbito de observación, se identifica la existencia de planos verticales continuos bien definidos, a veces de hasta dos metros de profundidad, cuyas caras están tapizadas de raíces. Al realizar un ensayo de compacidad con el suelo seco, la punta del cuchillo sólo penetra unos pocos milímetros.

- a) ¿Se puede acotar inferiormente el contenido de yeso de este horizonte, atendiendo a su color? Formular alguna hipótesis sobre la compacidad de este horizonte ¿Variaría en el caso de estar húmedo el suelo?
- b) ¿Qué grado de dureza se podría inferir que tendrá el horizonte?
- c) ¿En las condiciones en que se describe este suelo, será posible evaluar la friabilidad?
- d) ¿Cuáles pueden ser las tres principales causas por las cuales las raíces no llegan a penetrar este horizonte gypsico?

14. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. En cualquier dirección identificar un mínimo de 15 términos referentes a propiedades físicas del suelo. Con ellos establecer un esquema conceptual que los incluya, complementando con otros términos, si fuese necesario para darle una estructura coherente.

a	d	i	l	o	s	e	s	a	f
n	e	z	i	m	a	t	h	r	l
i	n	p	o	r	o	m	i	l	o
f	s	r	o	k	a	a	c	l	c
a	i	a	e	t	b	i	r	e	u
r	d	s	i	l	i	m	o	s	l
r	a	z	e	c	i	c	m	n	a
e	d	o	l	l	e	s	a	u	m
i	a	p	e	d	i	a	l	m	m
t	p	i	o	i	n	i	m	o	d

15. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado dentro del contexto:

La consistencia es una propiedad (1) _____ que se mide en campo y (2) _____ del estado de humedad. Las propiedades a que hace referencia la consistencia son la compacidad, la plasticidad, la adhesividad, la friabilidad y la dureza. Ésta última se determina (3) _____, mientras que la compacidad de un horizonte se determina en campo (4) _____. Al compactarse un suelo la propiedad que suele cambiar es la (5) _____, por lo que su valor se puede utilizar como indicador, con lo que la macroporosidad (6) _____, y disminuye el volumen explorable por las raíces.

El impacto de las gotas de un riego por aspersión sobre la superficie de un suelo desnudo, cuya estructura sea (7) _____ provoca la formación de una capa delgada, de unos pocos milímetros de espesor, de elevada densidad aparente, estructura laminar que se denomina (8) _____ y puede provocar el fracaso de la emergencia de las plántulas de algunos cultivos.

Se toma un yogurt que haya estado en reposo durante un cierto tiempo (envejecimiento). Se abre y se pone boca abajo con cuidado. El yogurt no se derramará. Si, previamente a ponerlo boca abajo, se revuelve con una cucharilla (remoldeado), será mejor no ponerlo boca abajo según donde. Con este ensayo se ha puesto de manifiesto un comportamiento de tipo (9) _____.

- | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| (1) a) morfológica | b) variable | c) mecánica | d) estructural |
| (2) a) no depende | b) depende | c) puede depender | d) suele depender |
| (3) a) en estado seco | b) en húmedo | c) modelando el material | d) clavando el cuchillo |
| (4) a) apretando entre los dedos | b) intentando clavar un cuchillo | c) con la lupa | d) con HCl del 11% |
| (5) a) textura | b) densidad aparente | c) densidad real | d) circulación del agua |
| (6) a) aumenta | b) se mantiene | c) disminuye | d) no varía |
| (7) a) granular compuesta | b) laminar | c) inestable | d) fina |
| (8) a) sello | b) laminar | c) costra caliza | d) costra |
| (9) a) fluidal | b) esperable | c) tixotrópico | d) liquefacción |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Conocer los constituyentes minerales del suelo, su naturaleza y propiedades.

Entender la influencia de los componentes inorgánicos en las propiedades de los suelos.

Inferir las propiedades de los suelos a partir de su composición mineralógica.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Origen de los minerales del suelo.

Los minerales de las partículas del suelo.

Minerales de la fracción arena y limo.

Minerales de la fracción arcilla.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a ed. Mundi Prensa, 2003: Cap. 7.

Dixon, J.B. y Schulze, D. G.: *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Science Society of America, 866 págs.. Madison, W. 2002.

Meunier, A.: *Clays*. Springer, 441 págs. Berlin, 2005.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Completar el siguiente cuadro a partir de la lista de términos (puede haber varios que cumplen):

alófana	goetita	mirabilita
basalto	granito	olivino
calcilita	granular	ortosa
cuarzo	halita	pirita
erosión	hematita	porfírica
esquistosa	ilita	sienita
evaporación	microclina	yeso

Tres tectosilicatos	
Tres rocas ígneas	
Un mineral meteorizable	
Un tipo de estructura metamórfica	
Dos procesos de formación de rocas sedimentarias	
Una roca carbonatada	
Tres minerales de origen evaporítico	
Dos texturas de rocas plutónicas	
Tres minerales que contienen hierro	
Un mineral de arcilla	
Un mineral amorfo	

2. ORIGEN DE LOS MINERALES DEL SUELO

Los componentes minerales son mayoritarios en todos los suelos a excepción de los Histosoles (suelos orgánicos). La fragmentación del material parental produce fracciones de distintos tamaños que pueden ser objeto de meteorización química. Por ello la fracción mineral del suelo estará compuesta por fragmentos directamente derivados del material parental (resistatos) y minerales heredados, transformados y neoformados durante la meteorización y la edafogénesis. La proporción relativa de las diversas fracciones es un indicador del grado de desarrollo del suelo. Así, suelos poco desarrollados sólo habrán sufrido la fragmentación física del material parental, mientras que en suelos con un mayor grado de desarrollo la meteorización química habrá actuado por más tiempo y habrá podido cambiar la composición y estructura de los minerales, por lo que tendrá más proporción de minerales transformados y neoformados.

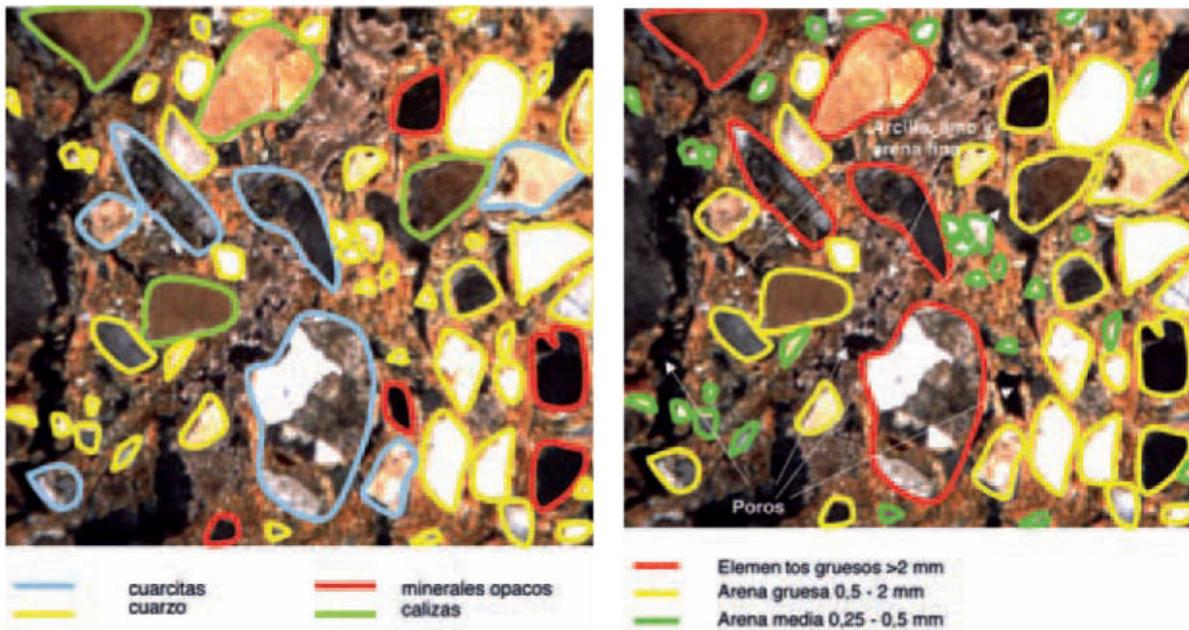
Estos procesos originan partículas de distintos tamaños, que pueden agruparse en distintas fracciones granulométricas. A igualdad de las demás condiciones, el grado de estabilidad mineral depende de su posición en la serie de Bowen, por otro lado, cuanto menor es el tamaño del grano, mayor será su susceptibilidad de meteorización, debido a la mayor superficie específica (área de interfase).

Al estudiar la textura del suelo se agruparon las partículas en elementos gruesos, arena, limo y arcilla. Desde el punto de vista de composición y métodos de estudio, las fracciones granulométricas se caracterizan por:

Fracción (USDA)	Diámetro	Composición	Métodos de estudio (Unidad 14)
Elementos gruesos	> 2 mm	Fragmentos de roca	Observación directa
Arena gruesa	0,5-2 mm	Fragmentos de roca con cierta alteración superficial	Microscopio petrográfico
Arena media	0,25-0,5 mm	Fragmentos de roca y minerales	
Arena fina	0,1-0,25 mm	Fragmentos mayoritariamente monominerales	
Arena muy fina	0,05-0,1 mm	Granos monominerales con cierta alteración	
Limo	2-50 μm	Minerales heredados y transformados sin carácter coloidal	Microscopio petrográfico y difracción de rayos X
Arcilla	< 2 μm	Minerales, principalmente filosilicatos, heredados, transformados y neoformados con carácter coloidal	Difracción de rayos X, análisis térmico diferencial, análisis termogravimétrico, espectroscopía de infrarrojos, microscopía electrónica, microanálisis.

3. OBSERVAR E INTERPRETAR

A1. Las siguientes microfotografías, tomadas con un microscopio petrográfico en modo de polarizadores cruzados, muestran las partículas del suelo a esta escala de observación, su naturaleza y tamaños.



R. M. Poch

- a) Compare las dos fotografías, haga un conteo de cada fracción granulométrica y determine su naturaleza, rellenando el siguiente cuadro:

	Cuarcitas	Cuarzo	Minerales opacos	Calcita
Elementos gruesos				
Arena gruesa				
Arena media				

¿Qué se puede deducir sobre el material parental?

- b) Qué tipo de minerales pueden aparecer opacos en polarizadores cruzados? Se puede encontrar información en: <http://www.hmag.gla.ac.uk/john/teaching/intro.htm> (verificado en 2007).

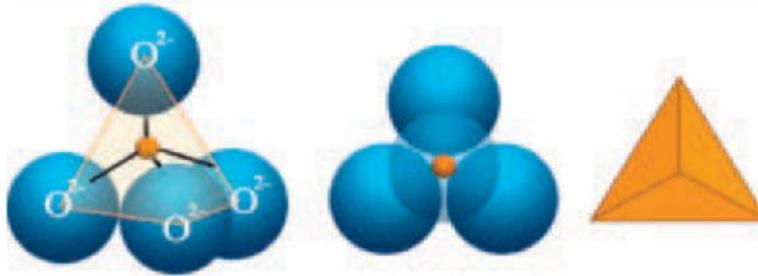
4. LOS MINERALES DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO

Minerales de la fracción arena y limo

A. SILICATOS

Un 95% de la corteza terrestre, está formada por silicatos. Esta clase mineralógica es la más frecuente en los suelos, y es especialmente importante en ellos, ya que es la más rica en especies minerales y porque forman parte de ella los minerales de arcilla.

La unidad de la estructura cristalina de los silicatos es un tetraedro regular con un núcleo de silicio unido a cuatro átomos de oxígeno por enlaces covalentes, que se encuentran en los vértices, con la fórmula general SiO_4^{4-} .



Anne E. Egger, M.A/M.S. «Minerales III: Los Silicatos», Visionlearning Vol. EAS-2 (9s), 2006.
http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=140&l=s

Los distintos tipos de silicatos se distinguen por el número y el modo de agrupación de esta unidad estructural. Para ver los distintos tipos de estructuras se puede consultar Porta et al. (2003) y [http:// web.visionlearning.com/silica_molecules.shtml](http://web.visionlearning.com/silica_molecules.shtml)

Nesosilicatos

Esta subclase está formada por tetraedros aislados que compensan las cargas negativas de los vértices con distintos cationes divalentes, que les sirven de enlace. Los más frecuentes son:

Olivino. Los cationes de enlace son Fe^{2+} y Mg^{2+} . La composición es variable según la riqueza relativa de ambos cationes, con lo que el grupo del olivino forma una serie continua desde fayalita (100% Fe) a la forsterita (100% Mg). Son minerales típicos de rocas máficas. Los enlaces Mg-O y Fe-O son muy débiles, por lo que se meteorizarán con mucha facilidad hacia otros minerales.

Circón. El catión de enlace es el circonio. Es un mineral muy resistente a la meteorización, por lo que se acumula de forma residual en las arenas de suelos muy desarrollados. La desaparición del resto de minerales más meteorizables hace que tenga lugar un enriquecimiento relativo en circón.

Granate. Es un grupo de nesosilicatos típicos de rocas metamórficas. Los cationes de enlace son Fe^{2+} y Al^{3+} . Puede aparecer en arenas de suelos formados a partir de este tipo de rocas. Son minerales muy meteorizables, por lo que no suelen presentarse en los suelos con cierto desarrollo.

Sorosilicatos y ciclosilicatos

En estas dos subclases los tetraedros de sílice se agrupan dos a dos (sorosilicatos) o en forma de anillos (ciclosilicatos). Las distintas especies minerales se distinguen por los cationes que compensan las cargas negativas de los vértices de los tetraedros. Son relativamente estables. Los más frecuentes en los suelos son el berilo (Be), la turmalina (Al, F, B) y la epidota (Ca, Al, Fe), que se encuentran normalmente en la fracción arena.

Inosilicatos

Esta subclase está formada por cadenas de tetraedros simples o dobles. Las primeras son el grupo de los **piroxenos**, en que cada tetraedro comparte dos vértices con los adyacentes para formar una cadena lineal simple. Las cadenas dobles forman el grupo de los **anfíboles**, en que se juntan longitudinalmente dos cadenas simples originando huecos ocupados por oxihidrilos. Los enlaces Ca-O, Mg-O y Fe-O son muy débiles por lo que tanto los

anfíboles como los piroxenos son minerales muy meteorizables y sólo se encuentran en las fracciones gruesas, normalmente alterados a arcillas y su presencia indica un bajo grado de desarrollo del suelo. Los dos minerales más frecuentes son:

Augita (piroxeno). Mineral típico de rocas básicas, en que las cargas negativas de los tetraedros están compensadas por Ca, Mg y Fe.

Hornblenda (anfíbol). Se encuentra en rocas menos básicas que los piroxenos (es un componente común en los granitos) y los principales cationes que contiene son Ca, Mg, Fe y Al.

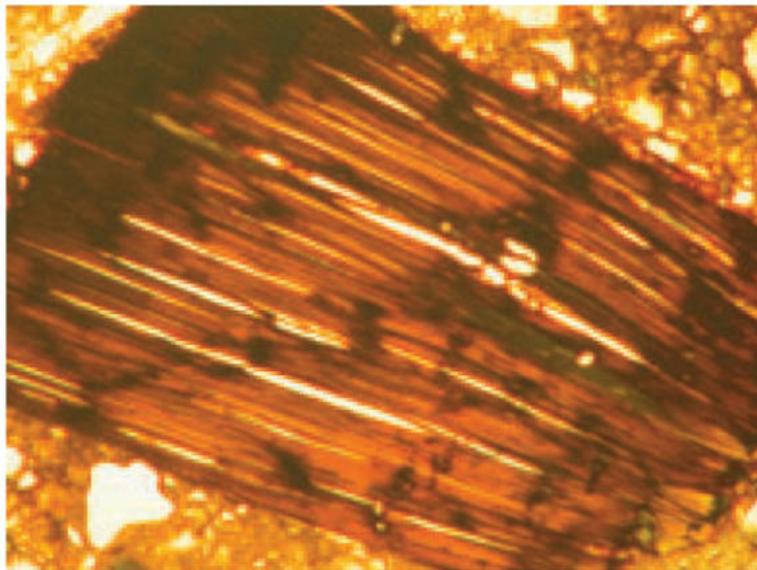
Filosilicatos

Esta subclase presenta estructuras en láminas, que se encuentran apiladas en forma de paquetes, como en un hojaldre. Las láminas son de dos tipos: tetraédricas, en que los tetraedros de silicio (láminas T) comparten tres vértices entre ellos; y octaédricas, en que la unidad de construcción es un octaedro con un núcleo de Al o de Mg y seis vértices ocupados por oxígenos y oxihidrilos (láminas O). Las distintas combinaciones de ambas láminas y la naturaleza de la unión entre ellas son lo que distingue los diferentes tipos de filosilicatos: las secuencias de capas T-O forman los filosilicatos 1:1, las formadas por capas T-O-T son los filosilicatos 2:1, y por otro lado, las formadas por capas T-O-T-O son los filosilicatos 2:1:1.

Son minerales muy importantes en los suelos y en la industria ya que constituyen los minerales de arcilla. Determinan muchas de las propiedades físicas y químicas de los suelos, como la capacidad de intercambio iónico, retención de agua, procesos de expansión–retracción, susceptibilidad de adsorber y liberar nutrientes o capacidad de interacción con la materia orgánica para formar el complejo arcillo–húmico. Pueden encontrarse filosilicatos como la *biotita* (mica negra) y la *moscovita* (mica blanca) en fracciones gruesas de los suelos, considerándose entonces como minerales heredados. Estos filosilicatos están a menudo meteorizados: la meteorización consiste en la separación de las láminas que se van hidratando y liberando cationes; y en la reorganización/síntesis de nuevos minerales de arcilla.

Precisando terminología: Arcilla vs. Arcilla

El término «arcilla» se puede definir de dos maneras, como fracción granulométrica y como mineral. En el primer caso, son las partículas menores de 2 μm , sea cual sea su composición mineralógica. Los minerales de arcilla, por el contrario, comprenden los filosilicatos y también otros silicatos sin estructura laminar, como la alófana. Ni todos los minerales de arcilla tienen diámetros menores de 2 μm , ni toda la fracción arcilla de los suelos está compuesta de minerales de arcilla, ya que otros compuestos tales como óxidos, hidróxidos, carbonatos o compuestos coloidales pueden formar parte de aquella fracción.



Fragmento de biotita (filosilicato 2:1) alterada: se observa la separación de las láminas y un oscurecimiento por liberación de hierro. (Microfotografía en microscopio petrográfico en polarizadores paralelos, longitud de la microfotografía 3.3 mm).

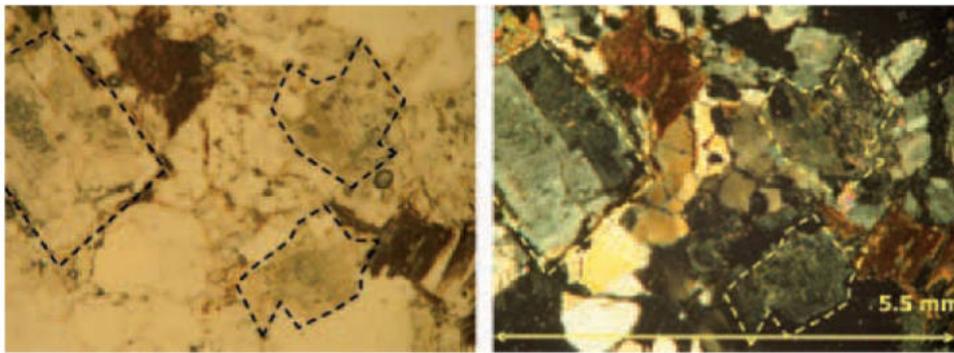
R. M. Poch

Tectosilicatos

Esta subclase presenta una estructura en tres dimensiones, en que los tetraedros comparten la totalidad de sus vértices con otros tetraedros. El cuarzo está compuesto exclusivamente de Si y O unidos por enlaces covalentes y con la fórmula general SiO_2 , ya que no tiene cargas que compensar con otros cationes. Debido a su estructura compacta y sin huecos es un mineral muy resistente a la meteorización, de gran dureza, eléctricamente neutro, por lo que se encuentra en la mayoría de los suelos en la fracción arena. Sólo en medios tropicales muy agresivos o a pH muy extremos puede meteorizarse formando grietas en su superficie (runicuarzo), pero en el resto de medios edáficos aparece inalterado.

Los otros minerales de la subclase presentan sustituciones isomórficas de silicio (4+) por aluminio (3+) en el interior de los tetraedros, lo que genera un déficit de carga positiva, que es compensado por cationes en cantidades variables. Como resultado se forman los *feldespatos alcalinos*, como la ortosa (feldespato potásico) o la sanidina (feldespato sódico-potásico); y el grupo de las *plagioclasas*, (tectosilicatos sódicos y cálcicos), formando, en este caso una serie continua, desde la anortita (100% Ca) hasta la albita (100% Na).

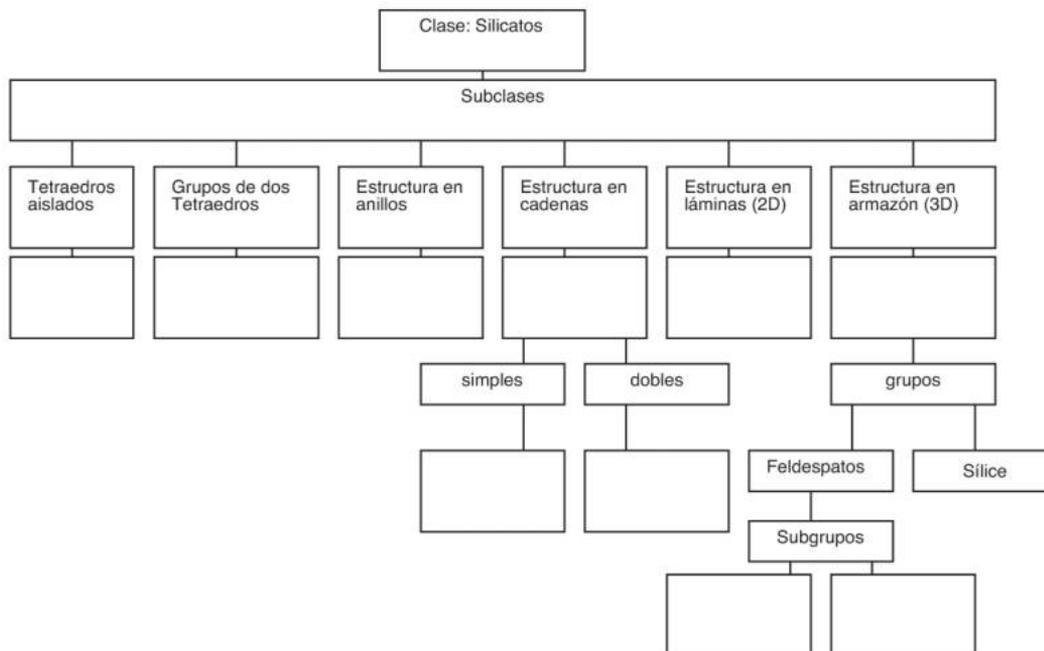
Los tectosilicatos son el grupo de minerales más resistentes a la meteorización, y predominan en rocas ácidas y neutras. Dentro de ellos, la albita es el más alterable (Diagrama de Mason).



Saprolita de granito observada en microscopio petrográfico, en polarizadores paralelos (PPL, izquierda) y cruzados (XPL, derecha). Se observan plagioclasas meteorizadas (fragmentos delineados) de apariencia borrosa, micas alteradas (fragmentos de color marrón en PPL) y granos de cuarzo frescos (el resto).
R. M. Poch.

B. OBSERVAR Y COMPLETAR

A1. Complete el siguiente esquema conceptual.



C. ANALIZAR E INTERPRETAR

G2. Al consultar el mapa geológico de una zona cuyos suelos está cartografiando, observa que hay dos tipos de materiales parentales: basalto y sienita alcalina.

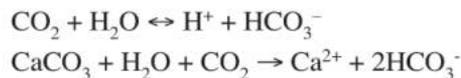
- Busque la composición mineralógica estándar de ambos tipos de rocas en Internet, o en Información Complementaria A.
- Indique qué tipos de minerales son los más meteorizables en cada caso, de acuerdo a la serie de Bowen (ver Información Complementaria A).
- Proponga una composición probable de la fracción arena de los suelos formados a partir de estas rocas.
- ¿Existe la posibilidad de que la vegetación muestre déficit de hierro en estos suelos?

D. CARBONATOS

Las rocas carbonatadas, tales como las calizas y dolomías, son el material parental de muchos suelos. Bajo climas áridos y semiáridos, caracterizados por un régimen hídrico no percolante, el carbonato cálcico (CaCO_3) y en menor medida la **dolomita** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) serán componentes importantes de los suelos y determinarán muchas de sus propiedades. Constituyen los suelos carbonatados o Calcisoles^{WRB} y otras clases de suelos.

El carbonato cálcico más común es la **calcita**. Según el tamaño de los cristales, la terminología utilizada es: *micrita* ($\phi < 10 \mu\text{m}$), *microesparita* ($10 < \phi < 80 \mu\text{m}$) y *esparita* ($\phi > 80 \mu\text{m}$).

La meteorización de la calcita tiene lugar por disolución en agua que contenga CO_2 , y su solubilidad en agua pura es de 5 a 6 mgL^{-1} . Su producto de solubilidad es K_{ps} (calcita) = $4,5 \times 10^{-9}$. Está regida por el equilibrio carbonato-bicarbonato, según el cual la disolución es mayor en agua que contenga anhídrido carbónico.



Ello es especialmente importante en los suelos, ya que la respiración de las raíces y de la biota edáfica producen CO_2 , que favorecerá la disolución de los carbonatos. El mismo equilibrio amortigua las variaciones de pH, de manera que en suelos con carbonato cálcico, el pH estará tamponado a valores de 7.5 a 8.5, que es el pK de la reacción de disolución.

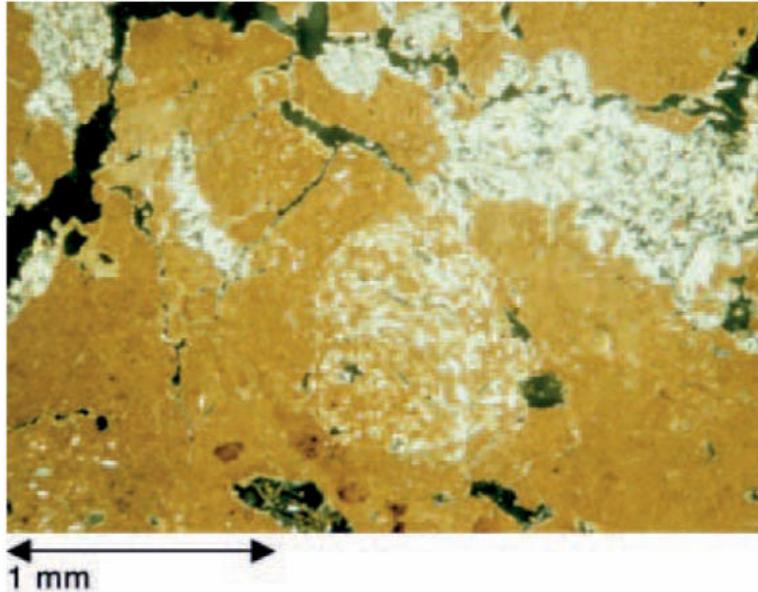
E. YESO

El yeso es sulfato cálcico dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Forma parte de las rocas evaporíticas. Es mucho más soluble en agua pura que el carbonato cálcico; en un orden de magnitud (2.6 gL^{-1} a 25 °C), por lo que sólo aparece como componente del suelo en climas áridos y semiáridos. Debido a su solubilidad sufre ciclos estacionales de disolución-reprecipitación en el suelo. El yeso edáfico tiene forma de cristales lenticulares, y normalmente resulta de la precipitación en el interior de poros, a partir de una solución del suelo saturada en yeso. Su acumulación da lugar a la formación de horizontes gypsicos. Posteriormente, la actividad de la fauna mezcla estos cristales con la matriz del suelo. En ciertas condiciones, estos cristales pueden recrecer y ensamblarse entre ellos, originando horizontes cementados, denominados horizontes petrogypsicos. Los suelos que contienen yeso en cantidades que afectan su comportamiento se denominan suelos yesíferos, Gypsisoles^{WRB} o GypsidsST (Aridisoles), entre otros.

Desde el punto de vista de fertilidad del suelo, la presencia no mayoritaria de yeso resulta positiva, ya que la solución del suelo estará saturada en calcio que, como catión bivalente, favorece la estructuración del suelo y evita procesos de sodificación. Como efectos negativos cabe destacar algunos antagonismos del calcio y los sulfatos con otros iones. Cuando el suelo contiene más de un 60% de yeso, los horizontes gypsicos son masivos y resultan impenetrables por las raíces, con lo que la profundidad efectiva del suelo se limita al epipedión.

Materiales parentales muy ricos en yeso sufren procesos de karstificación debido a su solubilidad, con la aparición de socavones y subsidencias. Otros problemas geotécnicos derivan del contenido en ión sulfato en la solución del suelo, que la hace corrosiva frente al hormigón corriente o al acero.

Las particularidades de los suelos yesosos hacen que los ecosistemas que en ellos se desarrollan sean a menudo endémicos y de gran valor ambiental.



Microfotografía en polarizadores cruzados en la que se observan cristales lenticulares de yeso, de color blanco, relleno de poros (de color negro), y mezclados parcialmente con la masa basal carbonática (color pardo). Ver p. 82. R. M. Poch

Desde el punto de vista analítico hay que tener precauciones con estos suelos, ya que los procedimientos estándar de los laboratorios pueden distorsionar los resultados. En concreto, el calentamiento a más de 40–50 °C hace desaparecer agua de hidratación del yeso. Por otro lado, la dispersión de las partículas de arcilla es difícil, debido a la saturación por calcio, por lo que los análisis granulométricos deben realizarse con técnicas específicas.



Horizonte de acumulación masiva de yeso microcristalino (90% yeso). R. M. Poch

F. SALES MÁS SOLUBLES QUE EL YESO

Las sales más solubles que el yeso pueden presentarse en suelos de climas semiáridos, áridos e hiperáridos. Se consideran como tales los cloruros (Na, Mg) y los sulfatos (Na, Mg), con solubilidades mayores de 40gL⁻¹, y

normalmente en el intervalo entre 250 a 400 g L⁻¹. Los suelos con sales solubles en cantidades importantes se denominan suelos salinos o Solonchaks^{WRB} o los SalidsST. Presentan una alta variabilidad estacional: en periodos húmedos las sales se disuelven y pueden ser translocadas, y en periodos secos ascienden por capilaridad y precipitan en forma de eflorescencias blancas en la superficie del suelo, a partir de la solución del suelo. A menudo al precipitar al secarse el suelo dan lugar a sales hidratadas, en mayor o menor grado, dependiendo de las condiciones hidroquímicas del suelo y del entorno geomorfológico. Pueden dar lugar a un ahuecamiento de la superficie del suelo (Solonchak bufado).



Superficie de un Solonchak bufado, Fuerteventura, España.

J. Porta

La presencia de sales solubles dificulta enormemente la utilización del suelo, ya que debido a la elevada presión osmótica las raíces y la biota del suelo no pueden absorber agua y sufrirán sequía fisiológica. Ahora bien en estos suelos pueden establecerse comunidades halófilas que presentan estrategias que les permiten superar el exceso de sales. Esta vegetación a menudo tiene un valor ambiental elevado, e incluso económico, ya que, por ejemplo, en el caso de la Salicornia, pueden cosecharse sus tallos para condimentarlos en vinagre, para ser consumidos. Sólo se sirven en restaurantes elegantes, por lo que su precio puede ser elevado.

G. COMPLETAR INFORMACIÓN

A1. Buscar información para completar el cuadro siguiente.

Sal	Denominación	Solubilidad (gL ⁻¹)

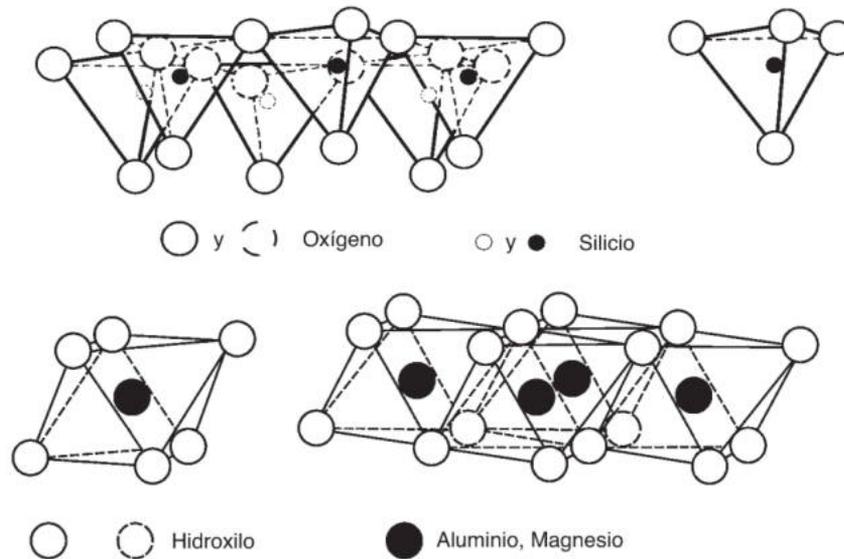
Minerales de la fracción arcilla

La importancia de los minerales de la fracción arcilla radica en que tienen cierta movilidad en el suelo por su comportamiento coloidal, y en que tienen carga superficial y capacidad de adsorción de iones. Son los componentes inorgánicos más reactivos junto con la fracción orgánica, y son los responsables de muchos procesos formadores, por ejemplo, la translocación de arcilla. Muchos de estos minerales son específicos de medios edáficos: no se encuentran en ambientes puramente geológicos, ya que requieren la interacción de la biosfera, hidrosfera y atmósfera para poderse formar. Desde el punto de vista de las funciones del suelo, algunos de ellos tienen aplicaciones industriales, por su gran capacidad de adsorción iónica y por su elevada superficie específica.

A. FILOSILICATOS

a) Principios estructurales

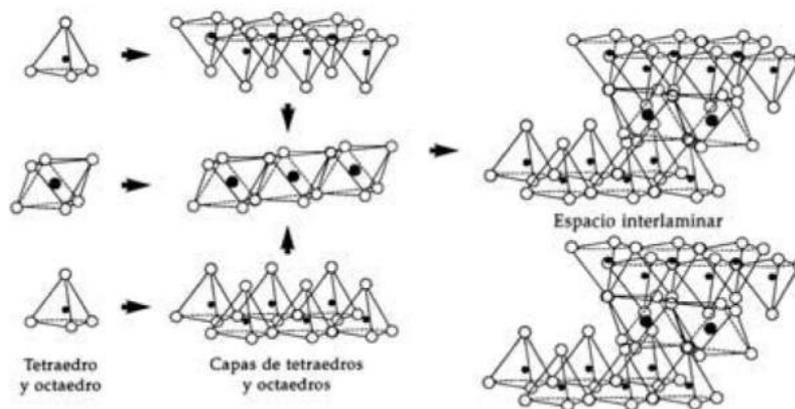
Los filosilicatos son combinaciones de dos tipos de capas que se unen de forma regular: una tetraédrica (planos formados por tetraedros de silicio, con enlaces colovalentes Si – O, y que comparten sus tres oxígenos basales), y otra octaédrica (planos formados por octaedros de aluminio o magnesio con oxígeno – hidroxilo en sus vértices). Esta capa se denomina dioctaédrica o capa gíbsitica (formada por aluminio), y trioctaédrica o capa brucítica (formada por magnesio).



Capas Tetraédricas	Capas Octaédricas	
Silicio	Brucíticas o trioctaédricas	Gibbsíticas o dioctaédricas
$\text{Si}_2\text{O}_5^{2-}$	$\text{Mg}_3(\text{OH})_6$	$\text{Al}_2(\text{OH})_6$
Posibles sustituciones isomórficas de Si^{4+} por Al^{3+}		Posible sustitución isomórfica de Al^{3+} por Fe^{2+} o Mg^{2+}

Las arcillas se clasifican, desde el punto de vista estructural en:

- Arcillas 1:1 cuando están formadas por paquetes o láminas, cada uno de los cuales está formado por una capa tetraédrica y una octaédrica.
- Arcillas 2:1 cuando están formadas por paquetes o láminas, cada uno de los cuales está formado por dos capas tetraédricas y una octaédrica central, según se muestra en la figura:

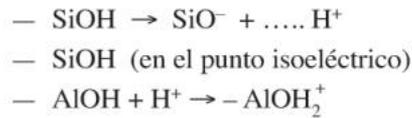


- Arcillas 2:1:1 cuando están formadas por paquetes o láminas, cada uno de los cuales está formado por dos capas tetraédricas, cuyo espacio interlaminaar está ocupado por una capa octaédrica.

La distancia entre un cierto plano de un paquete y su homólogo en el paquete inmediato se denomina **distancia basal**, que es una característica de cada tipo de arcilla y que se utiliza para su identificación. Esta distancia puede ser constante o variable, en función del tipo de arcilla y de las propiedades de la solución del suelo, dependiendo de la facilidad de la arcilla para abrir los espacios interlaminares e incorporar moléculas de agua o cationes hidratados.

- **Carga superficial:** en el momento de formarse un mineral de arcilla, si el medio es rico en aluminio, al tener éste un tamaño semejante ($0,55 \text{ \AA}$) al del silicio ($0,39 \text{ \AA}$) puede ocupar su lugar en la red cristalina, lo que se denomina **sustitución isomórfica**. La diferencia de tamaños hace que un tetraedro de aluminio sea menos estable que uno de silicio. Por otro lado, al tener menor carga el aluminio que el silicio, se genera un déficit de carga positiva, de carácter permanente: **carga permanente** negativa en la superficie de la arcilla. Análogamente, puede haber sustituciones isomórficas en la capa octaédrica, en la que el aluminio sea sustituido por el magnesio y el hierro, Fe(II), lo que origina a su vez un déficit de carga positiva de carácter permanente.

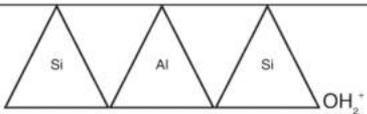
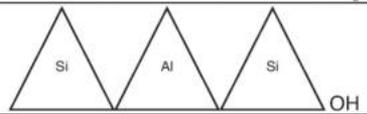
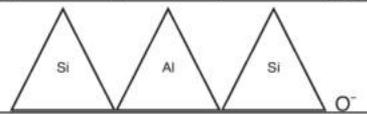
Por otro lado, en los extremos de las láminas también pueden aparecer cargas eléctricas, si bien en este caso pueden ser negativas o positivas, dependiendo del pH del medio, por lo que se trata de **cargas variables**. Son debidas a la disociación del grupo OH o a su protonación:



- La carga superficial es responsable de la capacidad de hidratación de las arcillas, y de la capacidad de intercambio iónico, ya que en su superficie, se pueden adsorber iones (Unidad 8).

B. COMPLETAR INFORMACIÓN

A1. Complete el siguiente cuadro indicando, para la estructura de la capa tetraédrica que se muestra, cuál es la carga permanente, la variable y el balance de carga total.

pH del medio	Estructura	Carga permanente	Carga variable	Carga total
Ácido				
Neutro				
Básico				

c) Arcillas 1:1

Son arcillas típicas de medios tropicales húmedos, si bien pueden presentarse en otros muchos suelos. Se agrupan bajo la denominación de caolinitas. Tienen un cociente Si/Al bajo, y son características de medios muy meteorizados y lavados, en los que al haberse lavado la sílice sólo pueden neoformarse arcillas 1:1. Al meteorizarse liberan muy pocos cationes básicos.

Caolinita

Es una arcilla dioctaédrica, con una distancia basal constante de $0,72 \text{ nm}$. La cohesión entre láminas 1:1 se debe a puentes de hidrógeno, ya que carecen de sustituciones isomórficas que les proporcionen carga superficial permanente. La carga que presentan es dependiente del pH, y se localiza en extremos rotos de las láminas. Estas arcillas tienen una superficie específica baja ($< 40 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$) y una CIC también baja ($1-10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Su morfología en microscopía electrónica de transmisión es en plaquetas hexagonales, con tamaños de hasta limo fino.



Caolinita.

Cortesía de E. A. FitzPatrick

Haloisita

Su composición es idéntica a la de la caolinita, pero tiene una distancia basal variable (0,73-1,01 nm) debido a la hidratación entre las capas 1:1. Se deshidrata de forma irreversible cuando se calienta a 100 °C, convirtiéndose a metahaloisita. La morfología en microscopía electrónica de transmisión es tubular o esferoidal. Tiene una capacidad de intercambio catiónico (CIC) ligeramente más elevada que la caolinita.

d) Arcillas 2:1 con distancia basal constante

Son arcillas presentes en casi todos los suelos, y se consideran heredadas del material parental, excepto la illita en algunos casos. Representan el punto de partida para la formación de otros minerales de arcilla.

Moscovita

Arcilla dioctaédrica con numerosas sustituciones isomórficas en la capa tetraédrica, compensadas por K^+ no hidratado entre las capas, con una posición relativamente fija, debido a un enlace iónico K-O (complejo de superficie de esfera interna). La distancia basal es de 1,0 a 1,02 nm y tiene una CIC relativamente baja.

Illita

Arcilla dioctaédrica con composición similar a la moscovita, pero con menos sustituciones isomórficas y menor contenido en K^+ entre las capas. Es más hidratada y tiene un contenido mayor en cationes. Tiene sustituciones isomórficas en la capa dioctaédrica con más hierro y magnesio en lugar del aluminio que en la moscovita. Su CIC es del orden de 10-40 $cmol_c Kg^{-1}$ arcilla, y su distancia basal 1,01 nm. Se la considera un producto de meteorización de otros filosilicatos 2:1 (moscovita, biotita), o bien neoformada. Tiene una superficie específica entre 100-120 m^2g^{-1} .

Biotita

Es una arcilla trioctaédrica, en la que las posiciones de los cationes en la capa octaédrica están ocupadas por cationes divalentes. Según la riqueza relativa, forma una serie continua desde 100% Fe^{2+} (**biotita**) a 100% Mg^{2+} (**flogopita**). Tiene numerosas sustituciones isomórficas en la capa tetraédrica, compensadas por K^+ no hidratado entre capas, con una posición fija debida a enlaces iónicos K-O. Su distancia basal es de 1,03 nm y tiene una CIC relativamente baja.

e) Arcillas 2:1 con distancia basal variable

Estas arcillas están formadas por láminas separadas por cationes con grados de hidratación variables, con lo cual la distancia basal varía en función de la humedad del medio, entre 1,0 y 1,5 (1,7-1,9) nm. Son productos de transformación de micas y cloritas, en función de la disponibilidad de cationes en el medio de formación. Tam-

bién pueden ser de neoformación en medios ricos en sílice, magnesio y hierro en condiciones de drenaje deficiente. Condicionan de forma importante las propiedades físicas (expansión–retracción del suelo) y químicas (capacidad de intercambio catiónico) de los suelos en que se encuentran.

Vermiculitas

Pueden ser dioctaédricas o trioctaédricas. Tienen una carga superficial elevada, con lo que los cationes hidratados entre las láminas están fuertemente retenidos. Tienen una capacidad de expansión–retracción moderada. Su CIC es del orden de 120–150 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ arcilla, y su superficie específica entre 600–800 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$. Es necesario llegar a una temperatura superior a los 300 °C para su deshidratación completa.

Esmectitas

Tienen una carga superficial menor que las vermiculitas, con lo que su capacidad de intercambio catiónico es menor, del orden de 80–150 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ arcilla, y se deshidratan fácilmente. Su capacidad de expansión–retracción es muy elevada. Su superficie específica es de 600–800 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$.

Dentro del grupo de las esmectitas pueden distinguirse:

- **Montmorillonita**: dioctaédrica, con sustituciones isomórficas en la capa octaédrica.
- **Beidellita** y **nontronita**: dioctaédricas, con sustituciones isomórficas en la capa tetraédrica. Las nontronitas presentan un predominio de Fe (III) en la capa octaédrica. Son características de Vertisoles formados a partir de basaltos.
- **Saponita**: trioctaédrica.

f) Arcillas 2:1:1

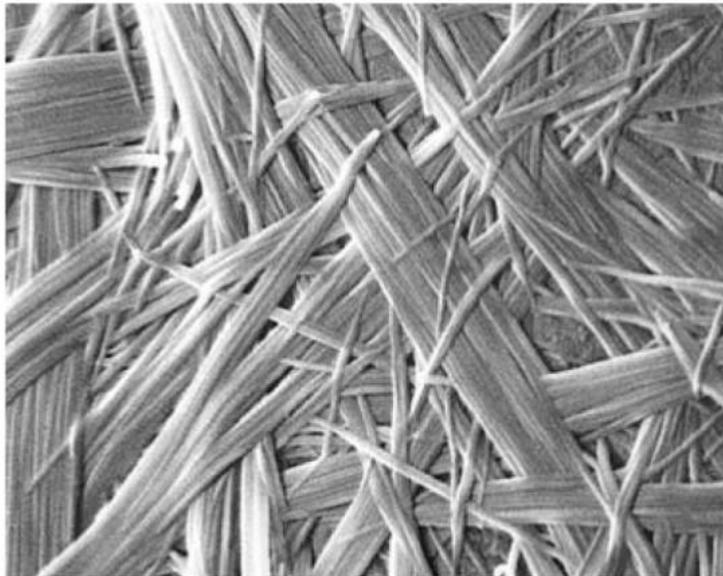
Se caracterizan por estar formados por láminas 2:1 separadas por una capa octaédrica que puede ser bien dioctaédrica (gibbsítica) o trioctaédrica (brucítica). Pueden ser heredadas y neoformadas, y se consideran poco estables en los suelos. El grupo más importante son las **cloritas**. Tienen una distancia basal constante, entre 1,4–1,45 nm. Su CIC está entre 10–40 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ arcilla, y su superficie específica entre 70 y 150 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$.

g) Arcillas interestratificadas

La meteorización y transformación de arcillas puede producir estructuras mixtas con distancias basales no definidas, entre la arcilla de partida y la arcilla neoformada, que se denominan arcillas interestratificadas. Como ejemplos cabe destacar los interestratificados clorita–vermiculita, o mica–clorita.

h) Minerales fibrosos

Bajo esta denominación se incluyen arcillas formadas por láminas no continuas, con huecos regulares, canales estrechos que les confiere una alta porosidad y en los que se localizan cationes intercambiables y moléculas de agua (agua zeolítica). Como ejemplo cabe destacar la **paligorskita** o la **sepiolita**, arcillas neoformadas en medios áridos y semiáridos.



Paligorskita.

Cortesía de E. A. Fitz Patrik

B. SILICATOS AMORFOS

En este grupo se encuentran silicatos con bajo grado de ordenación, y por lo tanto no tienen distancia basal característica. Son una mezcla de tetraedros (Si, Al) y octaedros (Al, Fe, Mg) altamente desordenados o amorfos, con una estructura esponjosa que contiene numerosos espacios huecos. Eventualmente incluyen cationes como Ca, K y Na. Debido a su estructura esponjosa y abierta tienen una elevada superficie específica ($>500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$), y son poco estables. Se caracterizan por su elevada capacidad de hidratación debida a puentes de hidrógeno en los espacios vacíos, por una capacidad de intercambio iónico dependiente del pH (extremos de cadenas de sílice y alúmina), y por una baja carga permanente debida a sustituciones isomórficas en tetraedros. La existencia de carga variable se puede identificar en campo con la prueba del NaF (test de Fieldes-Perrot) (Porta *et al.*, 2005).

Son típicos de suelos volcánicos poco desarrollados, procedentes de la meteorización de vidrio volcánico. También se encuentran en EspodosolesST muy meteorizados, entre otros suelos.

Están representados por la **alófana** (hidratación elevada, morfología globular en microscopía electrónica de transmisión), y la **imogolita** (morfología fibrosa en microscopía electrónica de transmisión, cristalinidad mayor que la alófana).

Las **zeolitas** se consideran tectosilicatos, si bien están íntimamente relacionadas con las arcillas. Tienen estructuras muy abiertas, formadas por tetraedros que dan lugar a cavidades y a un sistema de canales interconectados. Presentan una alta capacidad de intercambio catiónico ($100 \text{ a } 300 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) compensada por calcio, sodio y potasio. Pueden adsorber agua de forma reversible. Su origen está relacionado con rocas piroclásticas y vidrios volcánicos.

C. ÓXIDOS OXIHIDRÓXIDOS

La fracción arcilla de los suelos normalmente está teñida por óxidos e hidróxidos, los cuales son indicadores de las condiciones de formación de los suelos. Dentro de los elementos cromógenos, los más importantes son los compuestos del hierro. Las diferentes formas de los óxidos dependen del pH y el potencial redox. En condiciones de pH alto y medio oxidante, la forma estable es la férrica (Fe^{3+}), como óxido hidratado en distintos grados, que confiere al suelo colores amarillentos o pardos (**goetita**) o más rojizos (**hematita**). En climas más secos, la forma más estable es la deshidratada (hematita), mientras que en condiciones de sequía menos drásticas predomina la goetita. Otros óxidos de Fe indicadores de ambientes edáficos son la **ferrihidrita**, la **lepidocrocita**, la **magnetita** o la **siderita**.

Mineral	Fórmula	Color Munsell	Color
Goetita	FeOOH	10YR 8/6	amarillo
Goetita	FeOOH	7.5YR 5/6	marrón fuerte
Hematita	Fe_2O_3	5R 3/6	rojo
Hematita	Fe_2O_3	10R 4/8	rojo
Lepidocrocita	FeOOH	5YR 6/8	amarillo rojizo
Lepidocrocita	FeOOH	2.5YR 4/6	rojo
Ferrihidrita	$\text{Fe}_5\text{HO}_8\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.5YR 3/6	rojo oscuro
Maghemita	Fe_2O_3	2.5YR-5YR	rojo
Schwertmanita	$\text{Fe}^{3+}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH},\text{SO}_4)_{12-13}\cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$		amarillo pardo
Magnetita	Fe_3O_4		negro
Sulfuro de hierro	FeS	10YR 2/1	negro
Pirita	FeS_2	10YR 2/1	negro metálico
Jarosita	$\text{K Fe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$	5Y 6/4	amarillo pálido
Pirolusita	MnO_2		
Sibbsita	$\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$		
Bohemita	$\gamma\text{-AlOOH}$		
Siderita	FeCO_3		

(Ampliado y modificado del NRCS-USDA, 2002).



Colores de algunos óxidos de hierro (Cortesía de Bigham et al., 2002).

En suelos básicos, como los calizos, se favorece la oxidación e insolubilización del hierro, lo cual puede causar déficits de Fe en las plantas. Por el contrario, en suelos fuertemente ácidos puede ocurrir toxicidad debida al Fe, por su abundancia en la solución del suelo.

5. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Seleccionar el término más adecuado de entre los propuestos.

Por orden de importancia en porcentaje en masa, los tres elementos químicos más abundantes en los minerales de la superficie terrestre que se pueden encontrar en los suelos son (1) _____, (2) _____ y el (3) _____. Los minerales petrogenéticos que forman las rocas de la corteza son un en 95% (4) _____. La estructura cristalina de los minerales más abundantes en la mayoría de los suelos consta de un (5) _____ con un átomo de (6) _____ y un (7) _____ con un átomo de (8) _____. La sustitución de uno de estos átomos por otro de tamaño semejante, si bien de menor carga se conoce como sustitución isomórfica y da origen a (9) _____, lo que confiere propiedades importantes al mineral y al suelo que lo contenga. La carga se denomina (10) _____.

Partiendo de la meteorización de una misma roca, en las distintas fracciones granulométricas del suelo resultante se encontrarán (11) _____ especies minerales. El término arcilla se utiliza con dos significados distintos, uno de ellos hace referencia a (12) _____ y la otra a (13) _____. Las caolinitas son arcillas (14) _____, mientras que las montmorillonitas son (15) _____, siendo estas últimas (16) _____. El orden de magnitud de la superficie específica de los minerales de arcilla es de (17) _____, por lo que serán los componentes (18) _____ activos desde un punto de vista de su reactividad química.

- | | | | |
|---------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| (1) a) silicio | b) oxígeno | c) calcio | d) carbono |
| (2) a) oxígeno | b) hierro | c) aluminio | d) silicio |
| (3) a) silicio | b) oxígeno | c) calcio | d) aluminio |
| (4) a) carbonatos | b) granitos | c) silicatos | d) basaltos |
| (5) a) tetraedro | b) dodecaedro | c) lámina | d) filosilicato |
| (6) a) silicio | b) aluminio | c) hierro | d) magnesio |
| (7) a) hexaedro | b) octaedro | c) lámina | d) filosilicato |
| (8) a) silicio | b) aluminio | c) hierro | d) magnesio |
| (9) a) distorsión en el cristal | b) carga eléctrica – | c) una alteración | d) una anomalía |
| (10) a) eléctrica | b) variable | c) permanente | d) invariable |
| (11) a) las mismas | b) diferentes | c) semejantes | d) equivalentes |
| (12) a) mineralogía | b) tamaño de grano | c) origen | d) procedencia |
| (13) a) mineralogía | b) tamaño de grano | c) origen | d) nesosilicato |
| (14) a) 1:1 | b) 2:1 | c) T-O-T | d) 2:1:1 |
| (15) a) 1:1 | b) 2:1 | c) T-O | d) 2:1:1 |
| (16) a) blancas | b) expansibles | c) rojas | d) no expansibles |
| (17) a) 10 | b) 450 | c) 10 ⁶ | d) 25 |
| (18) a) más | b) menos | c) poco | d) bio- |

6. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

1. El siguiente suelo se encuentra en los Pirineos catalanes, con una precipitación de 1500 mm anuales y una ETP anual de 800 mm.



Código perfil: CER941A

Altitud: 1.820 m

Régimen de temperatura del suelo: críco (frío: $0 < t_{\text{mas}} < 8 \text{ } ^\circ\text{C}$)

Régimen de humedad del suelo: údico

Material originario: rocas metamórficas carbonatadas y depósitos de ladera

Vegetación: Pastos heliófilos mesófilos (*Mesobromion*)

Descripción del perfil:

0-2 cm : O

Húmedo, COLOR: De la matriz: 10 YR 3/4 (húmedo);. EST. DE ÓXIDO-REDUCCIÓN: Oxidación. ELEMENTOS GRUESOS: pocos. CONSISTENCIA: Poco compacto. MATERIA ORGÁNICA: horizonte orgánico. RAÍCES: frecuentes. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11 %), nula. LÍMITE INFERIOR: Neto, plano.

2-24 cm : A₁

Húmedo, COLOR: De la matriz: 10 YR 3/3 (húmedo);. EST. DE ÓXIDO-REDUCCIÓN: Oxidación. ELEMENTOS GRUESOS: pocos. TEXTURA: Franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Muy fuerte, migajosa, fina. CONSISTENCIA: Compacto, friable. MATERIA ORGÁNICA: Poca. RAÍCES: frecuentes. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11 %), nula. LÍMITE INFERIOR: Neto, plano.

9-24 cm : A₂

Húmedo, COLOR: De la matriz: 10 YR 3/4 (húmedo);. EST. DE ÓXIDO-REDUCCIÓN: Oxidación. ELEMENTOS GRUESOS: pocos. TEXTURA: Franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Muy fuerte, migajosa, mediana. CONSISTENCIA: Compacto, friable. MATERIA ORGÁNICA: Poca. RAÍCES: frecuentes. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11 %), nula. LÍMITE INFERIOR: Gradual, plano.

24-69 cm : B_w

Húmedo, COLOR: De la matriz: 10 YR 4/4 (húmedo);. MANCHAS: Frecuentes, por mezcla de materiales. EST. DE ÓXIDO-REDUCCIÓN: Oxidación ELEMENTOS GRUESOS: frecuentes, fragmentos de rocas metamórficas carbonatadas, TEXTURA: Franco-limosa. ESTRUCTURA: Fuerte, en bloques subangulares mediana. CONSISTENCIA: Compacto, friable. RAÍCES: frecuentes. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11 %), nula. ESTUDIO DE SUPERFICIES: frecuentes revestimientos de carbonatos, asociados a los elementos gruesos y moderadamente gruesos.

> 69 cm : 2C

ELEMENTOS GRUESOS: Frecuentes, fragmentos de rocas metamórficas carbonatadas. ENSAYOS DE CAMPO: Alrededor de los elementos gruesos, respuesta al HCl (11 %), muy alta.

Horizonte genético	pH H ₂ O 1:2,5	Materia orgánica (%)	Carbonato cálcico equivalente (%)
O ₁	6,5	16,0	imperceptible
A ₁	6,1	7,3	ip.
A ₂	6,1	2,3	ip.
B _w	8,4	2,0	ip.

a) El equipo de cartografía de suelos de la zona ha realizado un informe provisional en el que, debido a la inexperiencia del redactor, hay 5 errores. Encuentre los gazapos y corríjalos.

El perfil CER941A se ha desarrollado sobre coluvios de ladera formados por esquistos silíceos. El edafoclima se caracteriza por un régimen no percolante. El estudio del suelo en el campo y los datos analíticos, concretamente la materia orgánica, muestran que el epipedión ha perdido los carbonatos que estaban presentes en la fracción mineral gruesa del suelo, por disolución, ya que los valores son ligeramente básicos. Esta disolución está favorecida por la alta actividad biológica en los epipediones, a pesar de que una parte del año está inactiva por las bajas temperaturas. Los carbonatos se acumulan parcialmente en el horizonte B_w recubriendo los elementos gruesos, pero la matriz del suelo continúa estando descarbonatada, tal como lo indica su consistencia. El material parental no alterado se encuentra a unos 70 cm.

b) Explique el por qué del pH del horizonte B_w si en el campo la matriz del horizonte no reacciona con el HCl 11%.

2. Los Llanos de Moxos, en Bolivia, es una de las mayores zonas húmedas del planeta (más de 100 000 km²) debido a que sufre inundaciones estacionales. El material parental consiste de sedimentos aluviales cuaternarios del río Amazonas. Algunas áreas están ocupadas por bosques, aunque la vegetación predominante son sabanas pastoreadas y pantanos. Actualmente se utilizan para ganadería extensiva y en menor grado para agricultura de roza, tumba y quema. Los siguientes datos analíticos corresponden a la fracción arcilla de tres pediones representativos. Observe los datos, consulte fuentes externas y responda las siguientes preguntas:

- ¿Son esperables fenómenos de agrietamiento en estos suelos? ¿Por qué?
- ¿Hay algún mineral indicador de condiciones reductoras estacionales? ¿Cuál? Relaciónelo con la denominación de horizontes genéticos dada en el campo.
- Dé una estimación de la CIC de los horizontes E, Btg2 y 2Bw del pedión 4, considerando que el contenido de materia orgánica es inapreciable.
- Discuta la naturaleza de cada mineral de arcilla desde el punto de vista de su formación en este medio (heredado-neoformado).
- ¿Es esperable la presencia de carbonato cálcico en estos suelos? ¿Por qué?
- Haga una lista de los mayores condicionantes para el uso agrícola o forestal de estos suelos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Composición (% relativo)						pH	Arcilla (%)
		Ilita	Caolinita	Esmectita	Lepidrocrita	Goetita	Cuarzo		
Pedión 4									
A ₂	4-16	49	10	20	–	–	21	4,5	–
E	16-28	53	12	16	–	–	19	4,5	67,0
B _{tg1}	28-59	49	10	23	2	–	16	4,8	81,9
B _{tg2}	59-99	38	9	41	tr	–	12	5,1	60,6
B _{tg3}	99-144	55	10	20	tr	tr	15	5,5	23,7
2B _{w1} (rojo)	144-185	56	8	19	–	4	13	5,8	18,1
2B _{w2} (amarillo)	144-185	61	9	17	–	–	13	5,8	9,9
Pedión 17									
B _{tg1}	10-50	51	15	13	3	–	18	5,3	80,6
B _{tg3}	70-123	33	15	32	–	7	13	5,9	71,6
Pedión 23									
A ₂	15-25	43	17	21	–	tr	19	5,3	26,9
B _{wg1}	25-55	54	10	17	5	–	14	5,3	27,2
B _{wg4}	85-120	46	11	25	–	3	15	5,9	48,8

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Conocer los componentes orgánicos del suelo.

Entender su comportamiento y las transformaciones que sufren en el suelo.

Aprender cuál es el papel de los componentes orgánicos en las funciones del suelo.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Aspectos generales: materia orgánica del suelo, materia orgánica fresca y humus.

Funciones de la materia orgánica del suelo.

Factores de control de la materia orgánica del suelo.

Componentes químicos.

Aspectos cualitativos de la materia orgánica.

Reacciones en las que intervienen los microorganismos del suelo.

Características y actividad de las sustancias húmicas.

Evolución de la materia orgánica del suelo.

Técnicas para el estudio de la materia orgánica.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ediciones Mundi Prensa, 3.ª edición, pp. 165-207, Madrid, 2003.

Magdoff, F. y Weil, R.R. (ed.): *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture. Advances in Agroecology*. 398 pp. CRC Press. New York, 2004.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos:

El proceso por medio del cual las rocas y minerales se transforman total o parcialmente, al entrar en contacto con la atmósfera, hidrosfera y (1) _____ debido a que (2) _____, se denomina (3) _____. En la materia orgánica que se incorpora al sustrato mineral para dar un suelo tienen importancia los fenoles que están formados por un hidroxilo (-OH) unidos a un (4) _____. Un suelo se considera que está enterrado si tiene encima una capa de material cuyo espesor es superior a (5) _____. Un suelo orgánico es aquél que se forma en condiciones de saturación por agua casi permanentes, sus horizontes se designan con la letra (6) _____ y corresponden a una turbera, es decir a un (7) _____. El carácter cumúlco se utiliza para designar aquellos suelos cuyo (8) _____ tiene un gran espesor debido a que han recibido materiales ricos en materia orgánica, por lo que muy posiblemente ocupan una posición (9) _____. El drenaje de un suelo hace referencia a la (10) _____ del agua.

- | | | | | |
|------|-----------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
| (1) | a) biosfera | b) agua | c) organismos vivos | d) el suelo |
| (2) | a) afloran o casi | b) se humectan | c) se parten | d) se hidratan |
| (3) | a) edafogénesis | b) litogénesis | c) meteorización | d) hidrólisis |
| (4) | a) ácido orgánico | b) anillo aromático | c) alcohol | d) ciclo hexano |
| (5) | a) varios metros | b) 50 cm | c) 1 m | d) 2 m |
| (6) | a) A | b) O | c) H | d) g |
| (7) | a) Histosol | b) Organosol | c) Histisol | d) Humosol |
| (8) | a) endopedión | b) epipedión | c) horizonte Bh | d) pedion |
| (9) | a) proximal | b) de plataforma | c) de fondo | d) de divisoria |
| (10) | a) velocidad de circulación | b) tubería enterrada | c) salida | d) facilidad de salida |

2. COLONIZADORES PRIMARIOS DE ROCAS

Los productos resultantes de los procesos de meteorización (saproлита o alterita) no empiezan a convertirse en suelo hasta que no haya una incorporación de materia orgánica.

Existen organismos (bacterias, hongos y vegetales superiores) que están adaptados a poder vivir en medios con nutrientes muy limitados, por lo que son capaces de colonizar la superficie inalterada de una roca (roca fresca), iniciar procesos de meteorización e ir incorporando gradualmente materia orgánica al sistema. Como ejemplo cabe citar los **líquenes**, asociaciones simbióticas entre un alga, que puede captar CO₂ y N₂ del aire y un hongo, cuyas hifas serán capaces de extraer nutrientes de la roca (p. 21 y 72). En otros medios no tan desfavorables, las plantas pueden establecerse aportando materia orgánica progresivamente, iniciándose así la diferenciación entre un material geológico y un suelo.



Colonización de líquenes sobre un granito inalterado.

J. Porta

3. APORTES DE MATERIA ORGÁNICA: DURACIÓN ECOLÓGICA DEL PROCESO

Se podría pensar que si hay un aporte continuado de restos orgánicos al suelo por parte de las plantas, año tras año, el contenido de materia orgánica en el suelo aumentaría de forma indefinida, pero se ha observado que no es así. En los suelos minerales, la materia orgánica siempre es un componente minoritario (por lo general de un 1% a un 8%), lo que indica que se llega a alcanzar un estadio de equilibrio dinámico, para unas condiciones ecológicas del medio determinadas, entre la tasa de aporte y la tasa de descomposición (mineralización). Cuando se equilibran, el contenido de materia orgánica no aumentará más, en tanto perduren las mismas condiciones ecológicas. El tiempo para que ello tenga lugar varía de unos medios a otros y define la duración ecológica del proceso de acumulación de materia orgánica.

Por otro lado, un aspecto igualmente importante reside en el hecho que los restos orgánicos que llegan al suelo no perduran tal cual, sino que están sometidos a la acción microbiana y de la fauna del suelo, cuya actividad conduce a la descomposición y transformación de la materia orgánica en el suelo. Por ello, es de esperar que en el suelo haya restos orgánicos recientes de diferentes procedencias, junto con materiales orgánicos en distinto grado de descomposición, así como raíces, microorganismos vivos, restos muertos, entre otros. Por consiguiente, resulta fácil inferir, que lo que se denomina materia orgánica del suelo (MOS) constituye un material heterogéneo bastante complejo.

Por la forma como se incorpora la materia orgánica al suelo, ésta se acumulará en los horizontes A, O y H y, en aquellos casos en que ha sido translocada dentro del suelo, dará lugar a horizontes Bh.

4. LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO Y EL HUMUS

La masa total de células vivas de un lugar determinado se denomina **biomasa**, mientras que la masa de células muertas, incluso aunque estén todavía unidas a un organismo vivo, se denomina **necromasa**. A un árbol se le suele considerar como biomasa, a pesar de que la mayor parte de sus células estén ya muertas (Gobat *et al.*, 2003). Los aportes de materia orgánica al suelo pueden tener lugar a partir de la parte aérea de las plantas, necromasa depositada encima de la superficie del suelo; y dentro del propio suelo, a medida que las raíces van muriendo.

Materia orgánica del suelo (MOS)

Expresión que agrupa a todos los constituyentes orgánicos del suelo. Está formada principalmente por C, H, O y N y, en menor proporción, por S, P, B, Fe, Mo, entre otros.

Materia orgánica fresca

Se denomina así a la parte de la MOS poco alterada, antes de que se convierta en humus. Está constituida por restos de plantas y animales: biomasa vegetal muerta procedente de la parte aérea de la vegetación (hojas y ramas de la vegetación natural, así como residuos de cosechas), y raíces finas, biomasa microbiana, microfauna, excrementos, y secreciones y excreciones solubles de plantas y animales.

No se encuentra unida a la fracción mineral, de la que puede separarse por métodos físicos: tamizado o por medio de líquidos de diferentes densidades.

Para estudiar la MOS, al tratarse de un material muy heterogéneo, se han ido buscando procedimientos para dividirla en sus distintos componentes. Con este fin se han utilizado diferentes enfoques metodológicos, lo que conduce a definir distintas fracciones con criterios operacionales, en términos de separación por tamaños o densidades, así como de solubilidad e insolubilidad en soluciones acuosas a diferentes valores de pH. Las técnicas analíticas actualmente disponibles (cromatografía, espectrometría visible, infrarroja y de resonancia magnética nuclear, entre otras) han permitido enfoques de base bioquímica.

Con un enfoque operacional se puede separar, por un lado, los **materiales orgánicos gruesos** (materia orgánica particulada) y, por otro, la **fracción coloidal**.

a) Materiales orgánicos gruesos

Por tamizado se pueden separar los fragmentos orgánicos de tamaño arena y mayores, que corresponden a **materia orgánica macroscópica**.

b) Fracción coloidal o humus

Está formada por un conjunto de sustancias orgánicas fuertemente descompuestas y de composición química variable de unos suelos a otros. Unos constituyentes son el resultado de la alteración microbiana (m.o. heredada con características químicas reconocibles) y otros de la reorganización en moléculas complejas (**humus** en sentido estricto) que han perdido las características químicas de sus precursores.

La fracción coloidal presenta *carga eléctrica negativa*, si bien dependiente del pH, debido a la existencia de grupos funcionales carboxílicos (COOH), y fenólicos (OH). Al ser muy elevada su superficie específica, es la fracción más reactiva de la materia orgánica. Constituye entre un 60 y un 80% de la materia orgánica total del suelo. Su color es oscuro, actuando como elemento cromógeno del horizonte en el que se halle. Presenta una elevada resistencia a la degradación, lo que se debe tanto a la naturaleza recalcitrante de sus componentes, como al hecho de que al unirse con las arcillas y dar lugar a agregados, pueden pasar a ocupar posiciones que resultan difícilmente accesibles a la acción de los microorganismos.

5. OBSERVAR E INTERPRETAR

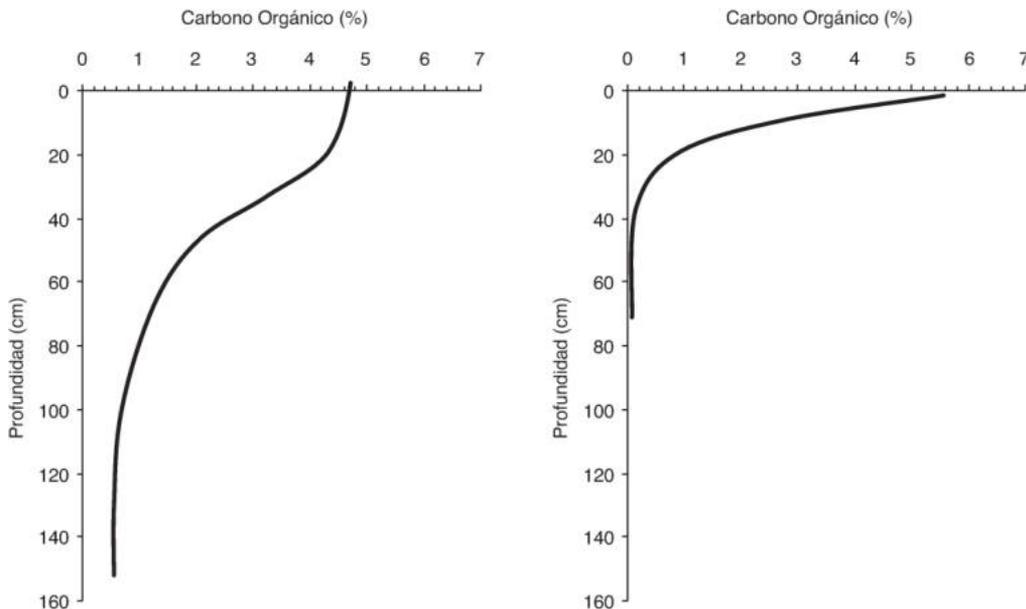
E3. Un primer efecto de la materia orgánica es que actúa de elemento cromógeno, produciendo un oscurecimiento del horizonte en el que se halla, lo que permite diferenciar los horizontes A, los epipedones y otros horizontes y situaciones.

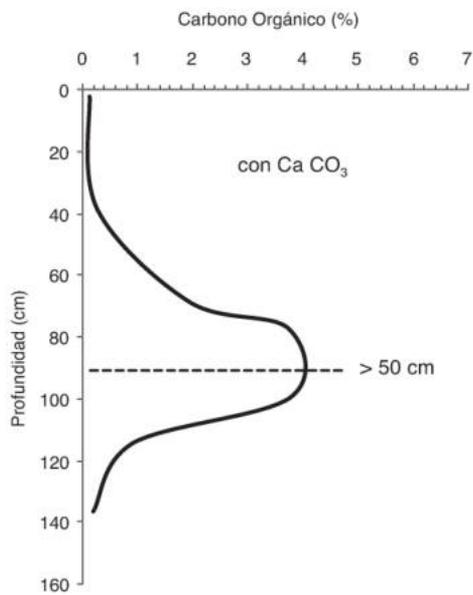
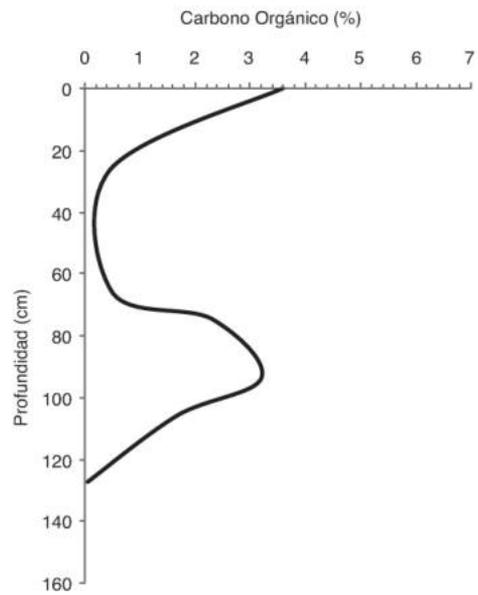
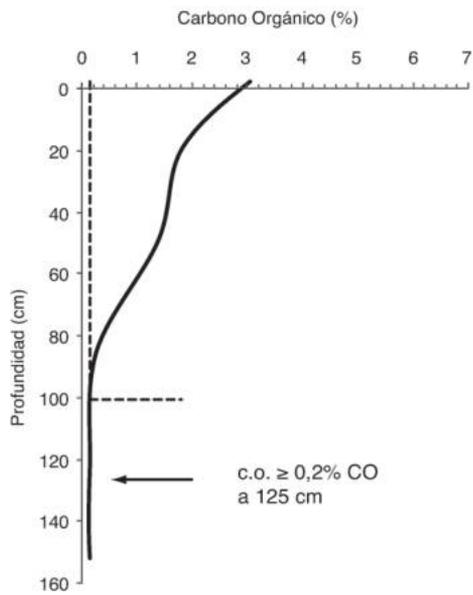
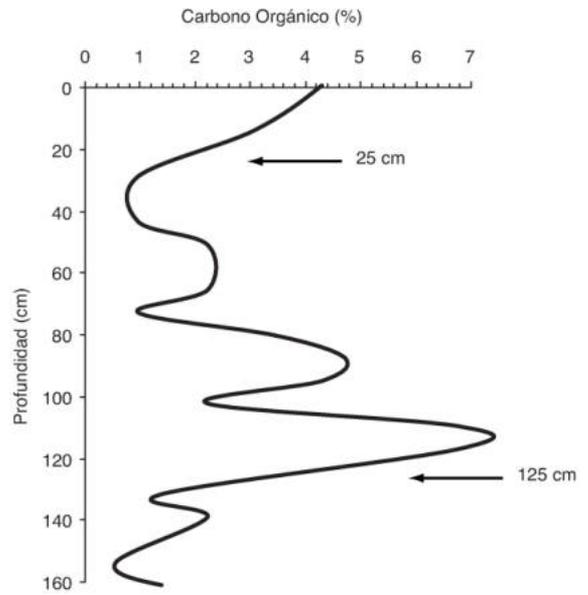
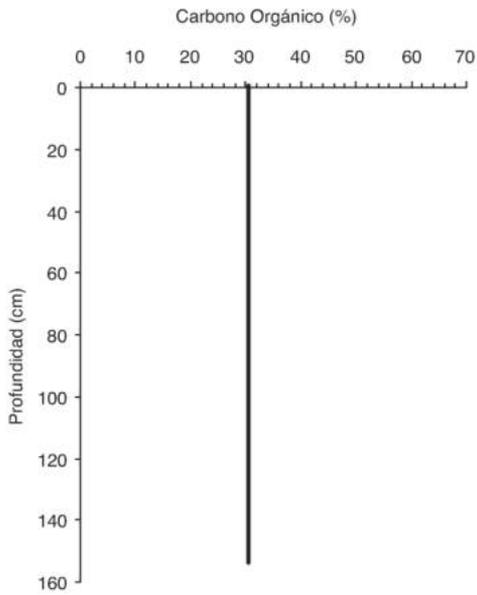
Estudie los siguientes casos de distribución de materia orgánica en el suelo y redactar un informe acerca de los siguientes aspectos:

- Describa según sus propias palabras qué rasgo resulta relevante en cada uno de ellos.
- Formule alguna hipótesis acerca del origen de la materia orgánica del horizonte que la contiene en cada caso.
- Proponga una denominación para los horizontes genéticos y los horizontes de diagnóstico, cuando ello sea posible.
- Infiera algunas condiciones ecológicas de formación.
- Indique si es esperable encontrar alguno de estos suelos en su zona.

Puede resultar de interés utilizar los siguientes conceptos, entre otros:

Suelo mineral / suelo orgánico / medio ácido / suelo de pradera / suelo de bosque / suelo de montaña / suelo de llanura aluvial / suelo enterrado / turbera / carácter cumúlico / medio con saturación permanente de agua / inundaciones periódicas a lo largo de los años / suelo de delta / suelo de alta montaña / suelo potencialmente apto para la horticultura / suelo con actividad biológica alta / translocación de materia orgánica / mantillo / Histosol / suelo con gramíneas.





6. FUNCIONES DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL SUELO

La mayoría de las funciones de los suelos vienen condicionadas por el tipo y cantidad de MOS que contengan. La materia orgánica condiciona las propiedades físicas (tamaño de poros, estabilidad de la estructura, densidad aparente, movimiento del agua, entre otras), incide además sobre la disponibilidad de nutrientes y en la actividad biológica del suelo. La disminución del contenido de materia orgánica va asociada a una degradación del territorio, por todo ello, la materia orgánica constituye uno de los indicadores de la calidad de los suelos.

Propiedades físicas

La materia orgánica interviene en la **formación de agregados** por lo que incide en la estructuración y en la estabilidad de la estructura, en la porosidad, la aireación, el almacenamiento de agua (la MOS puede almacenar unas cinco veces más agua en peso que los minerales de arcilla) y en los suelos bien estructurados la velocidad de movimiento del agua es más alta. Además, la estabilidad de los agregados de la superficie del suelo hace que disminuya el riesgo de sellado y encostramiento superficial y, al mejorar la infiltración, disminuirá el riesgo de erosión. Por otro lado, el **albedo** de la superficie del suelo disminuye al aumentar el contenido de materia orgánica, y con colores oscuros el suelo absorberá más radiación solar, aumentando antes la temperatura del suelo en primavera, con los consiguientes efectos sobre la germinación.

Propiedades químicas

La fracción coloidal de la MOS tiene carácter anfótero. Si bien por lo general aporta carga eléctrica negativa, lo que le permite interactuar con cationes presentes en el agua del suelo, a los que atrae (**procesos de intercambio catiónico**). Esta propiedad permite el almacenamiento temporal de nutrientes en una forma fácilmente disponible para las plantas y también amortigua los cambios de pH en el suelo. Con respecto a los vertidos de elementos contaminantes con carga positiva hace que el suelo pueda ejercer un papel depurador, ya sea al prevenir o retardar su translocación a otro compartimento ambiental (capa freática) o limitando su biodisponibilidad y, con ello, su introducción en la cadena trófica, al no ser absorbidos por las raíces. La materia orgánica interviene, además, en la **formación de complejos organo-minerales**.

Propiedades biológicas

La MOS constituye una fuente de energía metabólica para los microorganismos y la fauna del suelo. Al mineralizarse, se liberan **macronutrientes** para las plantas: nitrógeno, fósforo y azufre, así como **micronutrientes**, mientras que, al biodegradarse, puede liberar vitaminas y aminoácidos. También se ha descrito que contiene reguladores del crecimiento y que puede tener efectos antibióticos. Por otro lado, los suelos tienen capacidad para **secuestro C**, al poderlo almacenar en forma de materia orgánica, que puede permanecer estable durante largo tiempo, lo que supone un efecto favorable, al contribuir a disminuir el efecto invernadero o de calentamiento global.

7. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CONTENIDO DE MOS

La cantidad y tipo de materia orgánica incorporada al suelo y su evolución dependerán de diversos factores:

CLIMA. En términos generales, la precipitación hace que la MOS aumente, mientras que la temperatura favorece su descomposición.

VEGETACIÓN. Determina la cantidad de materia orgánica aportada anualmente por la cubierta vegetal que, a su vez, depende del clima. Las gramíneas y aquellas plantas con sistemas radiculares densos, con abundantes raíces finas, proporcionan más materia orgánica al suelo y en un mayor espesor de suelo, que un bosque. La composición del material orgánico aportado hace que haya especies mejorantes (C/N bajo) y especies acidificantes (C/N alto), existiendo una gama de situaciones intermedias.

ESTRUCTURA DEL SUELO. Contribuye a la aireación y favorece la penetración de las raíces. Crea micrositios en los que la materia orgánica permanece inaccesible a la acción de los microorganismos, confiriendo gran estabilidad a los microagregados del suelo.

ORGANISMOS DEL SUELO. Los microorganismos y la fauna intervienen en la descomposición de la materia orgánica.

La fauna provoca bioturbación, con lo que favorece la mezcla y la estructuración.

La flora (macroflora: rizosfera, y microflora: bacterias, actinomicetos, hongos libres y micorrizas, algas), según sus requerimientos de oxígeno puede ser aerobia o anaerobia; y, según sus requerimientos nutritivos, autótrofa o heterótrofa.

POSICIÓN DEL SUELO EN EL PAISAJE. Determinadas posiciones del paisaje son zonas de pérdida de MOS por erosión, mientras que otras son zonas de aporte (llanuras aluviales, pies de laderas, entre otras). Por otro lado existe un efecto solana-umbría (Unidad 2).

CONDICIONES DE DRENAJE. El mal drenaje frena la descomposición de la MOS, ya que predominan los microorganismos anaerobios.

TEXTURA. Los suelos arenosos tienen un menor contenido de materia orgánica que los arcillosos, a igualdad de las demás condiciones.

MINERALOGÍA DE LAS ARCILLAS. La afinidad por la MOS y efecto protector frente a la acción microbiana varía según la composición mineralógica de las arcillas. El contenido en materia orgánica es más alto en suelos arcillosos con arcilla 2:1, que en suelos arenosos.

USO DEL SUELO. El cultivo cambia las condiciones ecológicas del suelo. Habrá menores aportes de restos orgánicos al suelo y la mayor aireación, lo que puede hacer aumentar la descomposición microbiana, por lo que la MOS tenderá a alcanzar un nuevo equilibrio dinámico hacia un menor contenido en estas condiciones. Sin embargo, determinadas prácticas agrícolas pueden ejercer un efecto reparador, si con ellas se aportan enmiendas orgánicas, se riega o se hace una agricultura de conservación.

8. ANALIZAR Y EXPLICAR

G2. Analizar y explicar los siguientes aspectos.

- Explicar a qué puede ser debido el hecho de que los suelos de selva tropical, húmeda y cálida, que se caracteriza por un importante volumen de biomasa y, por consiguiente, con aportes grandes de materia orgánica, los suelos no presenten grandes cantidades de MOS.
- Explicar por qué en zonas semiáridas es frecuente encontrar suelos con bajos contenidos de MOS (alrededor del 1%) y qué hipótesis se podría formular para explicar en algunas de estas zonas la presencia de suelos ricos en materia orgánica (4-5%). Considerar la duración ecológica.
- Ordenar los siguientes suelos atendiendo al contenido de MOS esperable:
suelos de zonas áridas / turbera de alta montaña / suelos cultivados en secano / suelos de prado / suelos de regadío.
- Formular algunas hipótesis acerca de la presencia de carbón (forma inerte de m.o.) en el suelo.

9. ASPECTOS CUALITATIVOS DE LA MATERIA ORGÁNICA

La relación entre el contenido de carbono orgánico total (C) y de nitrógeno total (N), conocida como relación C/N, expresa la tasa a la cual el nitrógeno estará a disposición de las plantas. Por ello se puede utilizar como indicador de calidad de una materia orgánica o de la materia orgánica del suelo de medios aerobios. Valores altos (> 25-30) indican que la materia orgánica tendrá una baja capacidad de descomposición. En suelos de cultivo, la materia orgánica se estabiliza con valores C/N de 10 a 14, mientras que en las bacterias la relación tiene un valor de 4 a 5, en un estiércol maduro de 20, en la paja de trigo de 80 y en la madera puede ser superior a 1000.

Una vegetación **mejorante** es aquella que aporta materia orgánica que tiene una relación C/N baja. Es rica en nitrógeno, sustancias hidrosolubles hidrolizables y celulosa y relativamente pobre en lignina. Activa los procesos bacterianos, a los que proporciona energía fácilmente disponible, al ser una materia orgánica muy lábil. Proporciona nitrógeno a las plantas. Son de este tipo las materias orgánicas aportadas al suelo procedentes de frondosas (fresno, sauce, olmo, tilo, etc.) y por la mayoría de la plantas herbáceas.

Una vegetación **acidificante** es aquella que aporta materia orgánica que tiene una relación C/N alta. Es pobre en nitrógeno y rica en lignina. Por su contenido en taninos, fenoles tóxicos y ácidos orgánicos inhibe la actividad bacteriana en el suelo. Su nivel energético es bajo. Caracteriza las materias orgánicas procedentes de resinosas (pinos), brezos, mirtilo, entre otras.

El efecto acidificante va ligado a los fenoles y resinas que matan a los microbios, bloquean enzimas y favorecen el lavado de bases.

10. OBSERVAR E INTERPRETAR

E3. Estudiar y redactar un informe de acuerdo con la documentación que se adjunta, cumplimentando el cuadro.

Se han abierto tres calicatas. Una en un prado y las otras dos en zonas de bosque próximas, una con una vegetación de pinos y otra de hayas. En el suelo de prado con gramíneas se observa un primer horizonte, de unos 40 cm, de color oscuro, con abundantes raíces finas. En el suelo bajo pinos se observa un horizonte O de unos 10 cm, formado por materia orgánica en la que resultan fácilmente identificables las acículas, muchas de ellas poco descompuestas, entre ellas se observan unos filamentos blancos correspondientes a micelios de hongos. Debajo de este horizonte predomina material mineral, oscurecido en un espesor de unos 10 cm. Por último, en el suelo del hayedo se observa que la superficie está prácticamente libre de restos de las hojas caídas en el otoño anterior y la parte superior del suelo está oscurecida en unos 15 cm de espesor. El análisis de laboratorio permite establecer valores para la relación C/N de 18 para las raíces de gramíneas, 65 para las hojas de pino y de 40 para las del hayedo.

	Prado	Pinar	Hayedo
1. ¿A qué puede deberse el color oscuro de los horizontes del suelo?			
2. ¿Cómo se puede explicar el modelo de distribución de la m.o. en cada suelo?			
3. ¿Qué horizontes se han descrito?			
4. ¿Se puede utilizar de indicador de algo la relación entre el carbono y el nitrógeno (C/N)? ¿de qué?			
5. ¿Qué se puede inferir del medio a partir de la existencia de micelios de hongos?			

11. GRUPOS DE COMPONENTES DE LA MOS

Desde un punto de vista bioquímico, la materia orgánica del suelo está integrada por: hidratos de carbono (azúcares, celulosa y hemicelulosa); derivados nitrogenados (proteínas, péptidos y aminoácidos libres); grasas, aceites, ceras y resinas; alcoholes, aldehídos y cetonas; ácidos orgánicos (ácido acético, entre otros); lignina (macromoléculas no uniformes derivadas del unidades tipo *p*-propifenol sustituido); compuestos cíclicos (fenoles y taninos que inhiben la descomposición de la MOS por su acción sobre los microorganismos del suelo); alcaloides y derivados (purinas); hormonas, enzimas, antibióticos, como los más importantes.

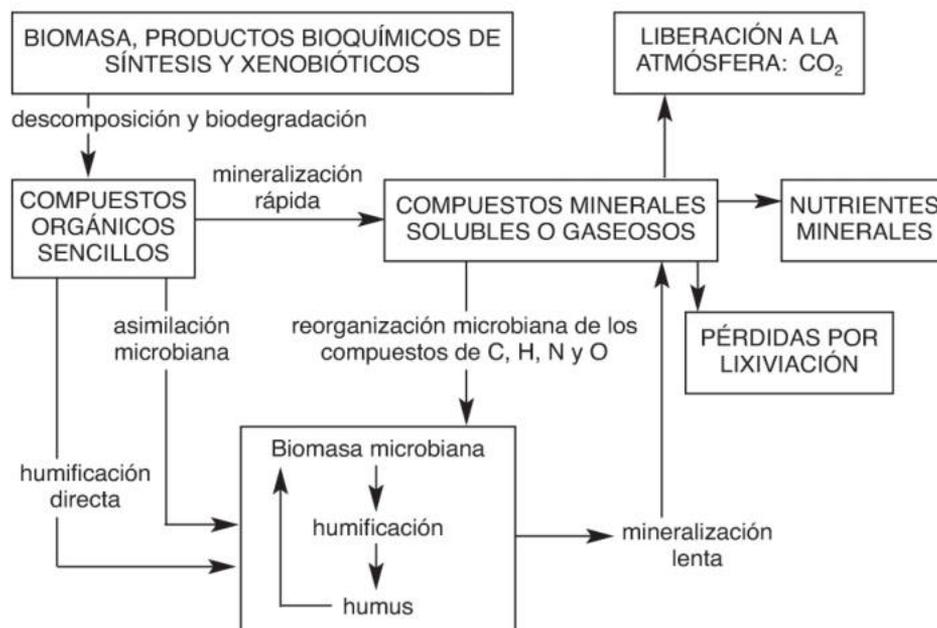
12. EVOLUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN EL SUELO: CATEGORÍAS DE COMPONENTES

La materia orgánica incorporada al suelo experimenta una serie de transformaciones que dependen de la naturaleza del material orgánico y de las condiciones ecológicas. Cabe distinguir tres procesos fundamentales:

- Descomposición:** Fragmentación progresiva debida a la mesofauna y procesos catabólicos de descomposición microbiana, que degradan componentes complejos y liberan energía.
- Mineralización:** Conjunto de procesos de transformación principalmente biológica (puede ser debida igualmente al fuego o a una hidrólisis ácida) de la MOS en compuestos minerales solubles o gaseosos: CO_2 , H_2O , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , entre otros.

- c) **Humificación:** conjunto de procesos complejos, de naturaleza bioquímica o de carácter abiótico, que tienen lugar tras la descomposición de la materia orgánica fresca. Liberan componentes preexistentes (materias orgánicas **heredadas**) y, por medio de procesos de condensación dan lugar a moléculas nuevas (**humus** en sentido estricto) por acción de los microorganismos. Tiene lugar más rápidamente bajo condiciones aerobias.

Se puede establecer el siguiente modelo conceptual para describir los procesos que experimentan los materiales orgánicos desde su incorporación al suelo:



De acuerdo con el modelo conceptual expuesto, cabe distinguir las siguientes categorías de componentes orgánicos en el suelo:

- Componentes orgánicos heredados** directamente de los restos orgánicos: celulosa, hemicelulosas, lignina, proteínas y lípidos. Se trata de estructuras identificables.
- Componentes orgánicos de síntesis** derivados de los procesos de humificación: moléculas aromáticas policondensadas y macromoléculas que constituyen la **humina** (a veces heredada, otras veces de neoformación). Siguiendo una metodología operacional, fracción coloidal de la MOS puede fraccionarse en **ácidos húmicos** (solubles en soluciones alcalinas, pero insolubles al acidificar los extractos alcalinos), **ácidos fúlvicos** (solubles en soluciones alcalinas y que permanecen en solución al acidificar la solución) y en **humina** (fracción insoluble):

Fracciones	Álcali	Ácido	Alcohol
Ácidos fúlvicos	Soluble	Soluble	–
Ácidos húmicos	Soluble	Insoluble	Insoluble
Humina	Insoluble	Insoluble	Insoluble

Los ácidos fúlvicos tienen importancia en suelos de regiones frías y húmedas, donde se forman en cantidades importantes debido a que la descomposición microbiana de la materia orgánica se ve dificultada, ya sea por una baja disponibilidad de nutrientes, temperaturas desfavorables o por saturación de agua.

13. CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO DE LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

Las sustancias húmicas presentan un carácter coloidal y las siguientes características:

Superficie específica muy alta: 800 a 900 m² g⁻¹.

Carga molecular debida a los grupos carboxílicos (-COOH) y fenólicos



Densidad de carga muy elevada.

Polifuncionalidad: la reactividad de los grupos funcionales que pueden asociarse o transportar tanto compuestos solubles en agua como lípidos.

Carga espacial variable, dependiente del pH derivada de los grupos carboxílicos y fenólicos.

Capacidad de intercambio catiónico alta, de 150 a 300 cmol_c kg⁻¹ de materia seca.

Se unen con la fracción mineral para formar agregados a los que confieren estabilidad.

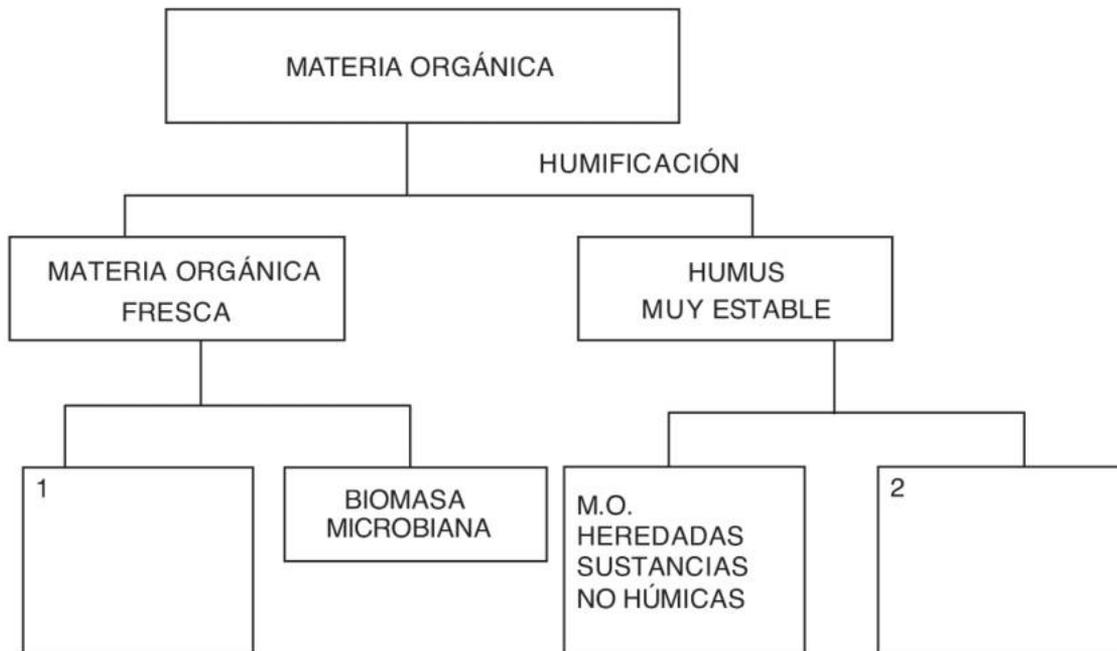
Poder tampón frente a las variaciones de pH.

Gran estabilidad: se descomponen muy lentamente, debido a que están relativamente oxidadas, su peso molecular es alto, su estructura es tridimensional y al ser caótica no es reconocida por las enzimas.

Color: de amarillo a negro. Confieren el color oscuro al suelo.

14. ESQUEMA CONCEPTUAL

Completar el siguiente esquema conceptual:



15. RELACIONES ESENCIALES

A1. Establecer relaciones entre ambas columnas:

1. Grupos carboxílicos y grupos fenólicos	a) Acción de las <i>Pseudomonas</i>
2. El ión amonio procedente de la mineralización de la materia orgánica se acumula en el suelo, exceso que puede provocar daños en algunas plantas, por ejemplo, sandía o tabaco.	b) Relación C/N alta
3. Carga eléctrica dependiente del pH.	c) Carácter anfótero de la caolinita y óxidos de hierro
4. Fijación simbiótica de N ₂ atmosférico.	d) Condiciones de inundación y mala aireación
5. Producen un mayor contenido de m.o. en un mayor espesor de suelo, horizonte A.	e) Origen de la carga eléctrica de la MOS
6. Metabolizan un amplio espectro de compuestos entre ellos los pesticidas.	f) Vegetación de gramíneas
7. Confiere rigidez a las plantas y resiste la mineralización debido a su carácter macromolecular, tridimensional y estructura bastante desordenada.	g) Lignina
	h) Celulosa
	i) <i>Rhizobium</i>

16. FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA EN AGRICULTURA

Las principales fuentes de materia orgánica en sistemas agrícolas son:

- Los residuos de cosechas.
- Los abonados en verde, seleccionando cultivos que produzcan mayor cantidad de materia orgánica total en un corto período de tiempo.
- Estiércoles.
- Compost.

17. INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN

E3. Discutir los siguientes puntos y redactar un informe a exponer públicamente, por lo que habrá que prepararlo en versión electrónica.

1. Se recibe la siguiente consulta. En un suelo arenoso de una llanura costera, se quiere intercalar entre los dos cultivos principales un cultivo para ser incorporado al suelo como abonado en verde. Con ello se pretende disminuir la erosión eólica, al estar el suelo cubierto de vegetación y mejorar las condiciones del suelo. Se desea saber qué cultivo debe utilizarse, uno que proporcione material orgánico con una C/N de 8 u otro con una C/N de 25. Justificar el criterio utilizado y formular propuestas de manejo, para que no se vea afectado el cultivo siguiente.

2. La materia orgánica sin descomponer tiene como principales grupos de componentes orgánicos: hidratos de carbono, ligninas, proteínas, grasas, ceras y resinas. Explicar:

- ¿Por qué unos son más susceptibles de suministrar energía de forma más inmediata? Ordenarlos: lignina, azúcares, celulosa, hemicelulosa, proteínas, ceras y grasa.
- ¿Qué macronutrientes liberará la MOS al mineralizarse?
- ¿A qué se debe que uno de ellos sea más recalcitrante frente a la mineralización, y que por ello pase a formar parte del humus?
- ¿Qué efectos tiene la presencia de taninos en la mineralización de la materia orgánica?

3. Los análisis de laboratorio indican que los suelos arenosos de una determinada finca presentan menores contenidos de materia orgánica que suelos arcillosos de la misma finca, habiendo tenido el mismo manejo y los mismos cultivos. ¿A qué puede atribuirse la diferencia?

4. ¿En qué posición en el paisaje es esperable encontrar mayor contenido de materia orgánica en los suelos de una misma zona: en llanura aluvial o en la parte media de una ladera? ¿Por qué? Relacionarlo con el drenaje y los procesos que han dado lugar a estos suelos.

- ¿Por qué puede utilizarse la corteza de pino como cubierta del suelo en jardinería, para zonas sin vegetación?

18. MANEJO DE DATOS

E3. Discutir los siguientes aspectos:

En el modelo factorial de Jenny para el estudio de la edafogénesis, el tiempo es uno de los factores ecológicos de formación del suelo. En este sentido, se expresa que un suelo determinado cambia en una escala de tiempo muy grande (miles de años). No obstante, en el estudio de las funciones de los suelos y de la incidencia que en ellas pueden tener las acciones antrópicas, interesa considerar aquellas propiedades que cambien en escalas de tiempo mucho más cortas, correspondientes a una vida humana: son propiedades dinámicas de los suelos.

La materia orgánica y la salinidad son, entre otras, propiedades dinámicas que dependen en gran medida del uso del suelo y de las prácticas de cultivo.

Se dispone de la siguiente información. En una determinada zona existían suelos con praderas vírgenes, una parte de las cuales se puso en cultivo, desconociéndose cuando. Al estudiar este sistema en un momento determinado (momento cero) se observaron unas considerables diferencias entre los contenidos de MOS en las praderas vírgenes (57 Mg MOS ha⁻¹ y 20 cm) y los suelos cultivados, tal como se indica en la tabla. Se decidió implantar praderas cultivadas y monocultivo de trigo, usos que se han mantenido a lo largo 60 años, pasados los cuales la situación es la indicada en la tabla.

Uso del suelo	Momento cero		A los 60 años de uso	
	Mg MOS ha ⁻¹ y 20 cm	ρ_b , kg m ⁻³	Mg MOS ha ⁻¹ y 20 cm	
Pradera virgen	57	1.340	57	
Pradera de gramíneas	35	1.350	45	
Trigo en monocultivo	36	1.390	35	

Con estos datos se pide analizar los siguientes aspectos:

- ¿Cuál es el porcentaje de m.o. en un espesor de 20 cm para cada uno de estos suelos?
- ¿Cuál es el porcentaje de carbono orgánico?
- ¿Qué situación se supone implícitamente que existe en los suelos de pradera virgen?
- ¿Cuáles han sido los efectos del cambio de usos de estos suelos?

19. RELACIONES ESENCIALES

G2. Establecer las relaciones existentes entre las dos columnas (puede haber más de una):

1. La carga variable existente en el suelo es debida a	<ol style="list-style-type: none"> minerales del grupo de la esmectita sustancias húmicas feldespatos óxidos e hidróxidos de hierro
2. La pérdida de materia orgánica del suelo tiene efectos sobre	<ol style="list-style-type: none"> el aumento de la fijación de fósforo en suelos de carga variable aumento de la densidad aparente un mayor secuestro de carbono
3. Las sustancias más ligeras de la materia orgánica del suelo son	<ol style="list-style-type: none"> los ácidos fúlvicos las huminas los lípidos las arcillas
4. Durante la mineralización de la materia orgánica el nitrógeno orgánico se transforma en	<ol style="list-style-type: none"> nitrosaminas aminoácidos NO₃⁻ y NH₄⁺ sustancias húmicas

5. Los ácidos fúlvicos son solubles en	a) soluciones alcalinas b) solventes orgánicos c) agua d) no son solubles
6. La estabilidad del carbono orgánico en el suelo es mayor en	a) las sustancias húmicas b) los ácidos fúlvicos c) los ácidos húmicos d) el mantillo (horizonte O)
7. La relación C/N es un indicador de	a) la falta de oxígeno b) el equilibrio entre mineralización y humificación c) la actividad biológica del suelo d) el secuestro de carbono e) falta de nutrientes en el suelo f) falta de nitrógeno en el suelo
8. El origen de las sedes de intercambio en los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos se debe a	a) las sustituciones isomórficas b) la disociación de grupos funcionales carboxílicos y fenólicos c) depende del pH d) las bases intercambiables

20. CONOCIMIENTOS Y COMPRENSIÓN

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado de entre los propuestos:

La MOS debe su importancia a su (1) _____ en el suelo, lo que explica que, a pesar de encontrarse en porcentajes muy bajos en el suelo, ejerza una influencia tan grande. Está formada por necromasa descompuesta, biomasa de microorganismos y (2) _____, integrado éste por sustancias resultantes de la alteración de los productos sintetizados por las plantas y los microorganismos. Es un componente muy estable y de color muy oscuro. La MOS tiene carga eléctrica (3) _____, de manera que a pH superior a 3 es negativa. Dicha carga se debe a (4) _____, lo que genera una capacidad de intercambio catiónico del orden de (5) _____ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de MOS y le confiere una capacidad amortiguadora frente a los cambios de pH.

La materia orgánica incorporada al suelo es objeto de la acción de los microorganismos, que son los responsables de tres grandes grupos de procesos que conducen a la descomposición (lixiviación, fragmentación y catabolismo), la mineralización (paso a formas inorgánicas), que tiene gran importancia en el ciclo de nutrientes y la (6) _____.

Los microorganismos descomponen igualmente materiales orgánicos de origen industrial en el caso de haber sido incorporados al suelo, se conocen como productos (7) _____. El suelo actúa, por consiguiente, como depurador natural, siempre y cuando no se supere su capacidad de autodepuración. Como indicador de la tasa de descomposición de una materia orgánica se puede utilizar la (8) _____.

El contenido y tipo de MOS viene condicionado por el clima, vegetación, organismos del suelo, posición del suelo en el paisaje, mineralogía de arcillas y uso del suelo. De manera que un bosque de resinosas (por ejemplo, un pinar), cuya materia orgánica tiene una relación C/N (9) _____ que la de un bosque de frondosas (por ejemplo un hayedo, fresno), dará lugar a una materia orgánica mucho más resistente a la descomposición, lo que explica la formación de horizontes (10) ____ en el primer caso. Entre los componentes químicos de la MOS cabe citar (11) _____ que es un derivado del *p*-propilfenol, que forma macromoléculas no uniformes y que debido a sus núcleos aromáticos presenta una resistencia relativamente alta a la degradación y es el material de partida para la formación de la/s (12) _____.

- | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|
| (1) a) elevado % | b) reactividad química | c) peso molecular | d) color oscuro |
| (2) a) mantillo | b) m.o. fresca | c) ácidos húmicos | d) humus |
| (3) a) permanente | b) baja | c) variable | d) alta |
| (4) a) sustituciones isomorfas | b) grupos carboxílicos y fenólicos | c) H^+ | d) OH^- |
| (5) a) 10 – 20 | b) 50-60 | c) 150-300 | d) 80-90 |
| (6) a) oxidación | b) meteorización | c) humificación | d) biodegradación |
| (7) a) xenobióticos | b) plásticos | c) contaminantes | d) desechos |
| (8) a) relación C/N | b) presencia de oxígeno | c) flora | d) CE |
| (9) a) menor | b) mucho mayor | c) igual | d) mitad |
| (10) a) A | b) H | c) Bh | d) O |
| (11) a) la celulosa | b) la hemicelulosa | c) el tanino | d) la lignina |
| (12) a) madera | b) sustancias húmicas | c) MOS | d) hemicelulosas |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

21. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

Los histosoles o turberas son suelos formados por acumulación de materia orgánica, en áreas con drenaje deficiente. Estos suelos tienen una gran importancia ambiental, ya que secuestran el CO_2 de la atmósfera incorporándolo al suelo.

En el cuadro siguiente se encuentran las tasas de acumulación de materia orgánica medidos en dos turberas de regiones frías, y la superficie que ocupan.

Localización de la turbera	Tasa de crecimiento cm de turba $\cdot (100 \text{ años})^{-1}$	Superficie km^2	Incorporación anual de CO_2	
			$\text{kg CO}_2 \text{ m}^{-2}$	kg CO_2
Rusia	3,4	5		
Noruega	1,8	20		

- Complete el cuadro, calculando las cantidades de CO_2 que se incorporan anualmente a las turberas de Rusia y Noruega por m^2 de superficie, y también la contribución total en kg de CO_2 de las turberas al secuestro de carbono. Considere que la densidad aparente de la turba es de 200 kg m^{-3} , y que 1 kg de turba equivale a $1,83 \text{ kg}$ de CO_2 . De acuerdo a los resultados obtenidos, ¿cuál es la turbera que secuestra anualmente más carbono?
- El crecimiento de los Histosoles en las regiones frías se debe principalmente a la falta de oxígeno por saturación de agua, y a las bajas temperaturas, lo que dificulta la mineralización de la materia orgánica. Explique en que sentido el aumento de temperatura debido a un cambio global del clima podría variar el ritmo de acumulación de materias orgánicas y las implicaciones que ello podría tener a medio plazo para el clima del planeta.
- La retirada de los glaciares en Tierra de Fuego (Ushuaia, Argentina) hace unos 10.000 años ha hecho posible la formación de turberas (Histosoles), que constituyen unos ecosistemas singulares. Buscar información acerca del clima de la zona. Discutir las condiciones hidrológicas que pueden haber hecho posible la formación de estos suelos, así como qué posición geomorfológica es esperable que ocupen y qué comunidades vegetales pueden haberles dado origen. ¿Qué efectos puede tener el drenaje artificial de uno de estos turbales con la finalidad de su utilización agrícola o forestal?

Environmental Soil Chemistry illustrates fundamental principles of soil chemistry with respect to environmental reactions between soils and other natural materials and heavy metals, pesticides, industrial contaminants,...

D. L. Sparks, 2003.

OBJETIVOS

Aplicar los conocimientos de química al estudio del suelo.
Ofrecer una panorámica de las propiedades químicas.
Entender los aspectos químicos del comportamiento y funciones del suelo.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Química de suelos.
Principales ámbitos de la química de suelos.
Propiedades químicas de los suelos.
Formas en que se encuentran los elementos químicos en el suelo: biodisponibilidad.
Elementos en la fase sólida.
Elementos en la fase líquida del suelo.
Elementos intercambiables.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Cap. 18. Mundi-Prensa, Madrid, 2003.
Sparks, D.L.: *Environmental Soil Chemistry*. 2nd edition. Academic Press, 352 pp. New York, 2003.
Bohn, H.L. McNeal, B.L. y O'Connor, G.A.: *Soil Chemistry*. 3th edition. John Wiley & Sons, Inc. 305 pp. New York, 2002.
Sposito, G.: *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, 277 pp. New York, 1989.
Tan, K.H.: *Principles of Soil Chemistry*. 3th edition. Marcel Dekker, Inc. New York, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término que mejor se adapte al contexto, de entre los propuestos:

La estructura de los horizontes del suelo hace que éste sea un sistema de (1) _____. En algunas situaciones puede que una de ellas no exista, con lo que serán de prever (2) _____, con lo que algunos elementos precipitados pasarán a (3) _____, como por ejemplo el (4) _____. El diagrama de Mason resulta útil para interpretar el comportamiento de los distintos elementos en el suelo, en función de su (5) _____ y radio iónico.

Una ortosa, que es un (6) _____, al meteorizarse libera (7) _____, que es un macronutriente para las plantas. Entre una ceniza volcánica (roca ígnea extrusiva) y una cuarcita (roca metamórfica), la primera se meteorizará (8) _____ que la segunda, ya que aquella es más porosa y el (9) _____ que forma la segunda es (10) _____ al ser un mineral de (11) _____ presión y temperatura en la serie de (12) _____. La solubilidad de la calcita es (13) _____ que la del yeso y, a partir de ella, se puede determinar el producto de solubilidad (14) _____.

- | | | | | |
|------|-------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| (1) | a) dos fases | b) una fase | c) tres fases | d) tres dimensiones |
| (2) | a) procesos redox | b) problemas de anclaje | c) procesos reductores | d) procesos de acidificación |
| (3) | a) ser solubles | b) la planta | c) la fase gaseosa | d) la atmósfera |
| (4) | a) calcio | b) magnesio | c) sodio | d) hierro |
| (5) | a) volumen | b) carga | c) origen | d) peso atómico |
| (6) | a) sulfato | b) mineral de arcilla | c) nesosilicato | d) tectosilicato |
| (7) | a) calcio | b) potasio | c) magnesio | d) silicio |
| (8) | a) menos | b) más rápidamente | c) más abruptamente | d) más lentamente |
| (9) | a) calcio | b) olivino | c) cuarzo | d) zircón |
| (10) | a) muy estable | b) muy meteorizable | c) abundante | d) muy duro |
| (11) | a) alta | b) media | c) baja | d) igual |
| (12) | a) Mason | b) Bowen | c) van 't Hoff | d) Bowen |
| (13) | a) mucho menor | b) igual | c) el doble | d) mucho mayor |
| (14) | a) Kp | b) Ka | c) Kps | d) Kc |

2. QUÍMICA DE SUELOS

Uno de los objetivos iniciales de la Química de Suelos, como rama de la Ciencia del Suelo, fue contribuir a establecer las bases científicas para la producción de alimentos y, con ello, poder aumentar los rendimientos de los cultivos. Los trabajos de J. Thomas Way en Inglaterra a mediados del siglo XIX, sobre intercambio catiónico en el suelo, constituyen el inicio de la Química de Suelos. La publicación por la misma época en Alemania del libro de Justus von Liebig titulado *Química aplicada a la Agricultura*, en el que se expone la teoría de la alimentación mineral de las plantas, constituye la base de la Fertilidad de suelos y de la fabricación de abonos químicos.

Ambos científicos contribuyeron a la gran revolución agrícola, ya que la agricultura precientífica nunca se había aproximado a los rendimientos actuales, ni al potencial genético del material empleado. Cabe recordar que en esta época se estaba bajo influencia de las ideas del economista inglés Thomas R. Malthus, expuestas en su obra *Ensayo sobre el principio de la población* (1798). En ella formuló el principio según el cual la población humana crece en progresión geométrica, mientras que las producciones agrícolas lo hacen en progresión aritmética, lanzando así una corriente de opinión según la cual la población no encontraría recursos suficientes para su subsistencia. De ahí la importancia de los aportes de la Química y Fertilidad de Suelos para rebatir las ideas del malthusianismo. Por otro lado, la mejora genética ha contribuido enormemente a este aumento en las producciones agrícolas, al igual que la mecanización agraria y los agroquímicos, cuyo uso debe realizarse sobre bases científicas y con criterios que aseguren la salvaguardia de la salud de las personas y la calidad ambiental.

La Química de suelos trata de la composición química, las propiedades y reacciones químicas del suelo como sistema de tres fases.

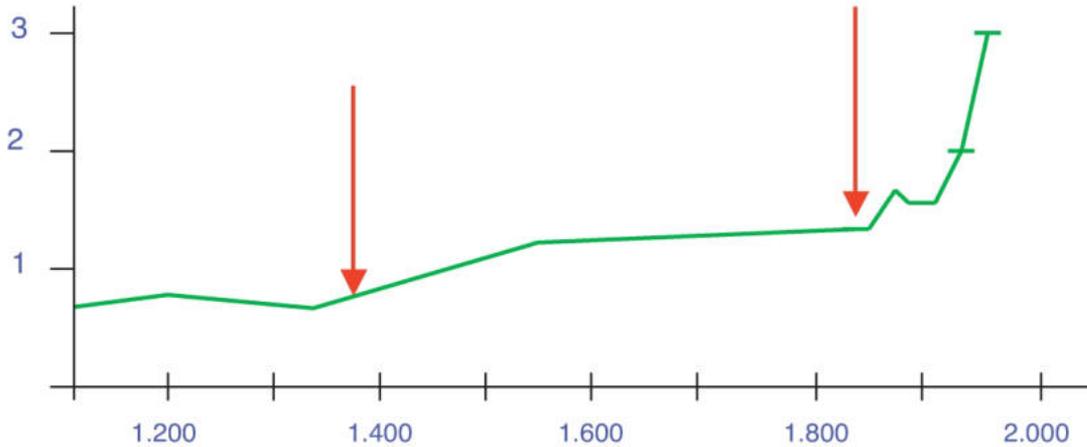
3. OBSERVAR E INTERPRETAR

E3. Las investigaciones realizadas en Inglaterra han permitido conocer la evolución del rendimiento del trigo en dicho país desde la Edad Media. Los resultados se muestran en la gráfica en la que en ordenadas se llevan los rendimientos relativos y en abscisas los años. Preparar un informe en el que:

- Describe con sus propias palabras la forma de la gráfica.
- Sugiera alguna hipótesis acerca de las causas de esta evolución.

Como información complementaria se sabe que en el siglo XVII se valoraba mucho un factor determinante de la fertilidad de los suelos. Lo apreciaban tanto, que lo guardaban incluso en los jardines de los palacios. Así, busque en Internet qué es lo que en 1618 evitó que se matasen los dos defenestrados de Praga, al ser lanzados desde una altura de unos 15 metros, desde una de las ventanas del Palacio.

- Indicar en qué fecha aproximada se produjo la gran revolución agrícola y cuáles pueden ser las causas. Buscar en Internet información acerca de Liebig.



4. PRINCIPALES ÁMBITOS DE LA QUÍMICA DE SUELOS

La Química de suelos ha realizado aportaciones importantes en los siguientes ámbitos, algunos estudiados en Unidades anteriores y en otros que se presentan en la presente Unidad:

- Nutrición de las plantas y química de los nutrientes.
- Ciclo de los elementos químicos.
- Dinámica de los elementos químicos en el suelo: biodisponibilidad.
- Meteorización química.
- Procesos edafogénicos: iluviación de arcillas, queluviación, lixiviación, ferrólisis, entre otros.
- Componentes inorgánicos y orgánicos.
- Procesos de floculación–dispersión: reacciones de superficie.
- Adsorción e intercambio iónico.
- Complejo arcillo–húmico.
- Reacción del suelo: acidez y basicidad.
- Salinidad.
- Sodicidad y alcalinidad.
- Procesos de oxidación–reducción.
- Calidad de las aguas.
- Contaminación y descontaminación de suelos.

5. FORMAS EN QUE SE ENCUENTRAN LOS ELEMENTOS QUÍMICOS EN EL SUELO: BIODISPONIBILIDAD

Los elementos químicos pueden hallarse en la **fase sólida** (en las redes cristalinas de los minerales y en la materia orgánica), en la **fase líquida** (en solución y en la interfase entre las partículas sólidas y el agua del suelo)

y en la **fase gaseosa**. La forma en la que se encuentra un elemento condiciona su reactividad, movilidad y biodisponibilidad.

BIODISPONIBILIDAD

La **biodisponibilidad** de un elemento o compuesto expresa su disponibilidad para un organismo específico, es decir, la posibilidad de que cause un efecto (positivo o negativo) sobre el organismo en cuestión.

La biodisponibilidad incide grandemente en la calidad de un suelo, ya que establece relaciones entre el comportamiento de los elementos y compuestos y su efecto sobre los organismos. Depende de factores complejos, entre ellos:

- De la **forma** en que se encuentre el elemento (en una red cristalina, en solución u otra).
- Del **estado de oxido-reducción**, que condiciona su movilidad.
- Del **pH del medio**.
- Del **organismo** al que se refiera.

Por ello, un mismo elemento, bajo diferentes especies químicas o mineralógicas, puede presentar una biodisponibilidad completamente distinta en unas que en otras. Análogamente, una misma especie química puede presentar distinta biodisponibilidad, según el organismo al que se enfrente. Así, por ejemplo, el nitrógeno, que es un macronutriente esencial para las plantas y que se halla en grandes cantidades en la atmósfera en forma de N_2 , como tal, sólo resulta biodisponible para las algas azules (cianofíceas) y las leguminosas. Para la mayoría de las restantes plantas, su biodisponibilidad es nula. Por el contrario, el nitrógeno en forma de ión nitrato $N-NO_3^-$ es biodisponible para las plantas y como ión amonio $N-NH_4^+$ lo es para algunas de ellas. Por su parte, el nitrógeno de la materia orgánica del suelo, para ser biodisponible, requiere ser liberado por medio de la mineralización de aquélla.

En el caso de los elementos nutrientes, para que sean efectivos, interesa que se hallen en el suelo en una forma biodisponible, lo contrario de lo que interesa que ocurra con aquellos elementos y compuestos contaminantes o fitotóxicos.

La biodisponibilidad de un elemento de naturaleza inorgánica se expresa en términos de concentración, mientras con elementos orgánicos se hace a partir de una especie química específica.

Los **elementos esenciales** para las plantas son aquellos sin los cuales la planta no es capaz de completar cualquier estadio de desarrollo (Cresser *et al.*, 1993):

Elemento	Forma catiónica	Forma aniónica	Otras formas
Nitrógeno	NH_4^+	NO_3^- , NO_2^-	N – orgánico
Fósforo		HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, Polifosfatos	P – orgánico
Potasio	K^+		
Azufre		SO_4^{2-} , S^{2-}	S – orgánico
Calcio	Ca^{2+}		
Magnesio	Mg^{2+}		
Hierro	Fe^{2+} , Fe^{3+} , $Fe(OH)^{2+}$ $Fe(OH)_2^+$		Complejo orgánico
Manganeso	Mn^{2+}		Complejo orgánico
Cobre	Cu^{2+}		Complejo orgánico
Zinc	Zn^{2+}		Complejo orgánico
Molibdeno		MoO_4^-	
Boro		$B(OH)_4^-$	H_3BO_3
Cloro		Cl^-	
Cobalto	Co^{2+}		
Selenio		SeO_4^{2-} , SeO_3^{2-} , Se^{2-}	

6. ELEMENTOS EN LA FASE SÓLIDA DEL SUELO

Elementos en los minerales del suelo

Los elementos químicos que forman parte de la estructura cristalina de un mineral (por ejemplo, el potasio en una ortosa o feldespato potásico) permanecen fijados en tal posición, unidos por diferentes tipos de enlaces químicos (iónico, covalente, etc.). Por ello no participan en reacciones químicas, ni son biodisponibles, mientras la red cristalina no se altere, al meteorizarse el mineral.

Los productos de la meteorización presentarán distinto comportamiento en función de la carga iónica y el radio iónico de cada uno de ellos (diagrama de Mason). Unos pueden entrar a formar parte de la red cristalina de minerales que se neformen en el suelo, con lo que quedarán inmovilizados de nuevo, y por ello sin efectos inmediatos sobre los organismos del suelo y las plantas. Por el contrario, otros son solubles, por lo que pueden ser absorbidos por las plantas o pueden perderse por lavado, si el régimen de humedad lo hace posible. Por la cantidad que de cada elemento requieren las plantas, se dividen en **macronutrientes** (N, P, K, S, Ca y Mg) y en **micronutrientes** (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn, para algunas plantas alguno más, como es el caso del silicio para las gramíneas).

Elementos en la materia orgánica del suelo

Los elementos químicos integrados en moléculas orgánicas (N, P, S y micronutrientes) sólo podrán participar en reacciones químicas y ser biodisponibles tras la mineralización de la materia orgánica, por lo que la tasa de mineralización condicionará la fertilidad potencial del suelo.

7. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. Analizar las siguientes situaciones y redactar un informe a exponer en público, que deberá exponerse en sistema electrónico.

1. En Chiapas (México) se practica agricultura itinerante, que consiste en utilizar la roza, tumba y quema de una superficie de selva, para cultivar en ella durante unos pocos años y, posteriormente, abandonarla para ir a cultivar otra zona con el mismo sistema.
 - a) Describa con sus propias palabras la imagen.
 - b) Formule alguna hipótesis que justifique este tipo de agricultura y evalúe la intensidad de la misma. Busque información en Internet y en la Biblioteca.



2. En otra región geográfica, al realizar un análisis mineralógico de los suelos, el resultado indica que son ricos en ortosa. Se pide:
 - a) ¿Qué se puede inferir acerca de la fertilidad actual y potencial en potasio de estos suelos, frente a las extracciones de potasio de la viña, cultivo con altos requerimientos en potasio?
 - b) ¿Qué utilidad tienen los análisis mineralógicos para asesorar a los agricultores, acerca de un plan de restitución de la fertilidad de los suelos?

8. INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN

E3. Estudiar la siguiente información y redactar un informe acerca de la biodisponibilidad de los elementos y su relación con la fertilidad del suelo.

- a) Fertilidad potencial esperable en dos suelos desarrollados en una zona de clima húmedo, cuyos materiales originarios son, en un caso, cenizas volcánicas y en otro una cuarcita.
- b) Especificar de qué tipo de rocas se trata.
- c) Indicar qué factores pueden determinar la fertilidad química a largo plazo.
- d) Teniendo en cuenta los criterios de movilidad de elementos establecido por Mason, indicar qué macronutrientes y micronutrientes liberados por meteorización permanecerán insolubles y cuáles estarán a disposición de las plantas y cuáles pueden ser perdidos por lavado en suelos de régimen de humedad percolante.
- e) ¿Qué se requiere para que los nutrientes contenidos en la materia orgánica puedan ser absorbidos por las plantas?

9. ESTUDIAR Y DEBATIR

E3. La idea de un mayor respeto por el medio ambiente y por la salud de las personas ha dado pie a plantear modalidades de agricultura basadas en un moderado o nulo uso de agroquímicos (fertilizantes, fitosanitarios, etc.).

Distribuir los distintos tipos de agriculturas entre el alumnado del curso, para que preparen un debate analizando puntos fuertes y puntos débiles de cada una de ellas y las posibilidades de una agricultura basada únicamente en aportes de materia orgánica para compensar las extracciones de nutrientes y mantener producciones que garanticen la seguridad alimentaria.

10. ELEMENTOS EN LA FASE LÍQUIDA DEL SUELO

La **fase líquida** (agua del suelo) es, por lo general, una solución muy diluida de unas pocas especies iónicas. Está en contacto con las partículas sólidas, por lo que en el caso de las arcillas, al tener éstas carga eléctrica negativa, se producen fenómenos de superficie. Éstos son debidos a la atracción electrostática de los cationes de la solución, que pasarán de ésta a ser adsorbidos alrededor de las partículas de arcilla. Análogamente ocurre con la materia orgánica, al tener igualmente carga eléctrica negativa. Si el suelo tiene partículas con carga positiva (óxidos de hierro y caolinita en medio ácido), la interacción será con los aniones de la solución.

Los **elementos solubles** proceden:

- De la meteorización y colapso de las redes cristalinas (meteorización biogeoquímica con una escala temporal, por lo general, muy prolongada).
- De la mineralización de la materia orgánica del suelo y la aportada como enmienda.
- Del aporte de elementos nutrientes inorgánicos (fertilizantes).
- Del agua de lluvia (aporte de sales en zonas próximas al mar, contaminantes procedentes de zonas industriales (lluvias ácidas), entre otros).
- Del agua de riego (cationes y aniones en solución y nutrientes aportados por fertirrigación).

Las principales características de los elementos solubles son:

Forma: se encuentran como cationes solubles (principalmente: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), aniones solubles simples (principalmente Cl^-) y aniones complejos solubles (principalmente SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-).

Solubilidad: el parámetro utilizado para predecir la solubilidad de un mineral es el producto de solubilidad: K_{ps} que tiene significación en sistemas en los que el mineral sólido esté en equilibrio con su solución. Cuando la actividad de solución de dos especies iónicas (anión y catión) alcanzan el punto de saturación (en un proceso de secado del suelo, por ejemplo), con respecto a un mineral dado, se produce una precipitación de superficie, que hará crecer cristales preexistentes en el suelo (calcita, yeso y sales más solubles).

Movilidad en el suelo: muy grande, al ser transportados por el agua. Precipitan al secarse el suelo y vuelven a disolverse en mayor o menor grado al humectarse éste.

Concentración: suele ser muy baja, excepto en los suelos salinos. Se mide por medio de la conductividad eléctrica (CE) en extractos suelo : agua; así como analizando la concentración de cada ión en un extracto de suelo (extracto de pasta saturada, en el caso de suelos salinos).

Unidades de medida: la unidad de medida de la conductividad eléctrica en el SI es el Siemens (S) por unidad de longitud, a una temperatura normalizada: dS m^{-1} a 25°C ; la concentración de una solución en el SI se mide en centimoles carga por unidad de volumen: $\text{cmol}_c \text{L}^{-1}$. Equivalencia: 1 dS m^{-1} a $25^\circ\text{C} = 1 \text{ mmho cm}^{-1}$ a 25°C .

Reacción: la solución del suelo puede ser ácida, neutra, básica o alcalina. Se mide por medio del pH.

Estos aspectos tienen las siguientes **implicaciones**:

- Los elementos solubles son los que pueden ser **absorbidos** por las raíces, por consiguiente constituyen la base de la nutrición de las plantas.
- Una concentración elevada de sales solubles tiene efectos adversos para la mayoría de los cultivos, masas forestales y plantas ornamentales.

11. ELEMENTOS EN FORMA INTERCAMBIABLE

Interacción con las partículas con carga eléctrica de superficie

Las superficies de las arcillas y la materia orgánica presentan **carga eléctrica**, por lo general negativa. Ello permite que iones hidratados, con carga eléctrica de signo contrario, interaccionen con estos componentes al ser atraídos por ellas por fuerzas electrostáticas, dando lugar a uniones de carácter reversible. Los iones que intervienen en este tipo de procesos se denominan **iones intercambiables** (cationes y aniones, según sea la carga del cambiador). De este modo se compensan las cargas de las arcillas y de la materia orgánica y se cumple el **principio de electroneutralidad**, tal como debe ocurrir en cualquier sistema natural. El proceso se denomina de **intercambio iónico** (catiónico o aniónico), ya que un ión puede ser reemplazado por otro. Un proceso de intercambio donde (i) indica las formas intercambiables y (e) las de la solución exterior se puede escribir:



Las **unidades de medida** para los cationes intercambiables en el SI es el centimol de carga por unidad de masa: $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ del cambiador de que se trate (suelo, arcilla, materia orgánica).

12. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. Discutir los siguientes aspectos:

Dado que el potasio es un macronutriente esencial para las plantas, y que tanto la ortosa, como la silvina y el sulfato potásico (de origen industrial) lo contienen, se desea saber:

- a) Cuál de estos compuestos presentará mayor eficiencia como abono para cubrir las necesidades de potasio de un cultivo con elevadas demandas en este elemento como la platanera. ¿Por qué presentan diferente eficiencia? Estudiar los valores del producto de solubilidad de cada uno de ellos.
- b) Indicar la fórmula química de los dos minerales citados.

13. CALCULAR E INTERPRETAR

A1. Comparar las constantes del producto de solubilidad de los siguientes minerales al estar en contacto con el agua del suelo: yeso, halita, carbonato cálcico. Buscar información.

14. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Seleccionar el término más adecuado de entre los propuestos:

La Química de suelos recibió un impulso muy importante con las investigaciones de J. Thomas Way que descubrió la (1) _____, propiedad que tiene importancia tanto en agricultura como en la industria. En el siglo XVII la importancia de la ganadería permitió disponer de (2) _____ para poder restituir los nutrientes al suelo, lográndose con ello aumentar los rendimientos de los cultivos, si bien no sería hasta el siglo XIX en que los trabajos de (3) _____ permitieran desarrollar la industria de los fertilizantes químicos, contribuyendo a la revolución agrícola y a rebatir las ideas pesimistas de (4) _____.

La biodisponibilidad expresa la disponibilidad de un elemento para un organismo específico, y (5) _____ la forma en que se encuentra el elemento. Los nutrientes se agrupan en macronutrientes y micronutrientes según (6) _____ de cada uno de ellos. Un elemento que se encuentre en la red cristalina de un mineral o en forma orgánica (7) _____ ser absorbido por las raíces y por ello (8) _____ un nutriente para las plantas. Los elementos, además, pueden encontrarse en forma soluble y en forma (9) _____, ambos en la fase líquida del suelo. La unidad de medida para los solubles es (10) _____, cuyo valor expresa la salinidad de un suelo. La unidad con la que se expresa la capacidad de intercambio catiónico del suelo es (11) _____.

- | | | | | |
|------|--|---------------------------|-------------------------|----------------|
| (1) | a) materia orgánica | b) arcilla | c) CIC | d) CIA |
| (2) | a) leche | b) alimentos | c) estiércol | d) abonos |
| (3) | a) J. von Liebig | b) V.V. Dokuchaev | c) T.R. Malthus | d) van 't Hoff |
| (4) | a) J. von Liebig | b) V.V. Dokuchaev | c) T.R. Malthus | d) van 't Hoff |
| (5) | a) no depende de | b) depende de | c) es independiente de | d) condiciona |
| (6) | a) el tamaño | b) la cantidad requerida | c) la composición | d) la forma |
| (7) | a) puede | b) no puede | c) suele | d) no suele |
| (8) | a) es | b) puede ser | c) excepcionalmente es | d) no es |
| (9) | a) intercambiable | b) precipitada | c) insoluble | d) gaseosa |
| (10) | a) dS m^{-1} a 25°C | b) cmolc kg^{-1} | c) mmol L^{-1} | d) kg |
| (11) | a) dS m^{-1} a 25°C | b) cmolc kg^{-1} | c) g L^{-1} | d) kg |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Introducir las bases científicas para el estudio de los fenómenos de superficie que tienen lugar en los suelos.

Entender los fenómenos de superficie y relacionarlos con la estructuración, estabilidad de los agregados y el transporte de material particulado.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Interacciones arcilla-agua: doble capa difusa.

Floculación y dispersión en sistemas coloidales.

Interacción entre dobles capas: bases para la formación de microagregados en el suelo.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Cap. 18. Mundi-Prensa, Madrid, 2003.

Tan, K.H. : *Principles of Soil Chemistry*. 3th edition. Marcel Dekker, Inc, New York, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Completar con el término que mejor se adapte en el contexto:

En los análisis granulométricos de suelos el porcentaje de arcilla se determina (1) _____, por aplicación de la ley de (2) _____, que lleva el nombre del científico que la dedujo experimentalmente. Para su cumplimiento se requiere que las partículas de arcilla estén (3) _____, de lo contrario se falsearían los resultados. En suelos que contengan un elevado contenido de yeso resultará (4) _____ conseguirlo, ya que este componente del suelo aporta suficiente ión (5) _____ a la suspensión para que ésta (6) _____. En el sistema internacional (SI) la unidad en que se mide la viscosidad es (7) _____, que en el sistema cgs equivale a (8) _____. En la fracción arcilla (arcilla granulométrica) predominan los (9) _____, que tienen carga eléctrica negativa debido a (10) _____, que pudieron originarse en (11) _____ en el momento en que se formaron. La causa no es ésta en las (12) _____, debiéndose en este caso a roturas en los bordes de las láminas, con posibilidad de que los grupos OH se disocien, con resultado de cargas negativas, o se protonen, generándose en este caso carga positiva, por lo que estas arcillas tienen un carácter (13) _____, no así las (14) _____.

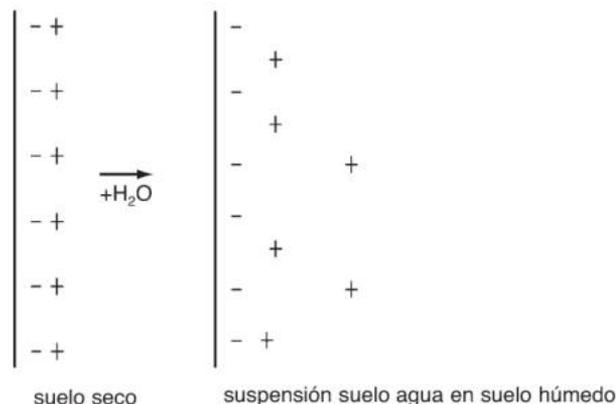
- | | | | | |
|------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| (1) | a) por tamizado | b) por sedimentación | c) por colorimetría | d) por rayos X |
| (2) | a) Stokes | b) Boyle | c) Mariotte | d) Darcy |
| (3) | a) juntas | b) floculadas | c) aisladas | d) dispersas |
| (4) | a) fácil | b) difícil | c) imposible | d) lento |
| (5) | a) magnesio | b) calcio | c) sodio | d) sulfato |
| (6) | a) se colorea | b) flocule | c) precipite | d) aumente de volumen |
| (7) | a) poiseuille | b) $N \cdot s \cdot m^{-2}$ | c) Pascal-segundo | d) N |
| (8) | a) 10 poises | b) 1 poise | c) $10 N \cdot s \cdot m^{-2}$ | d) $1 N \cdot s \cdot m^{-2}$ |
| (9) | a) nesosilicatos | b) ciclosilicatos | c) tectosilicatos | d) filosilicatos |
| (10) | a) pérdida de electrones | b) sustituciones isomórficas | c) ganancia de electrones | d) las arcillas |
| (11) | a) la capa T | b) la capa O | c) las capas T y O | d) los bordes |
| (12) | a) ilitas | b) cloritas | c) caolinitas | d) montmorillonitas |
| (13) | a) anfótero | b) bipolar | c) ambivalente | d) ácuico |
| (14) | a) alófanas | b) ilitas | c) materias orgánicas | d) canditas |

2. INTERACCIONES ARCILLA-AGUA: DOBLE CAPA DIFUSA

Origen de la doble capa

De poder observar a escala de microsítio un sistema arcilla-agua, se vería cómo interaccionan estos dos componentes. Cada lámina de arcilla constituye una **capa** con cargas eléctricas negativas (debidas a las sustituciones isomórficas), que deben ser compensadas por iones de signo contrario, para que se cumpla el principio de electro-neutralidad. Cada carga actúa como sede de intercambio catiónico.

En un suelo seco, la compensación de cargas tiene un carácter estático y los iones están encima de la superficie de la arcilla. Al añadir agua, las partículas de arcilla pasan a estar en suspensión y los iones de signo contrario abandonan las sedes de intercambio, al adquirir un movimiento cinético constante, de manera que un mismo catión cambia constantemente de posición (sede de intercambio). La carga negativa de la superficie de la arcilla y la nube de cationes que la rodea se denomina **doble capa eléctrica difusa** o simplemente doble capa.

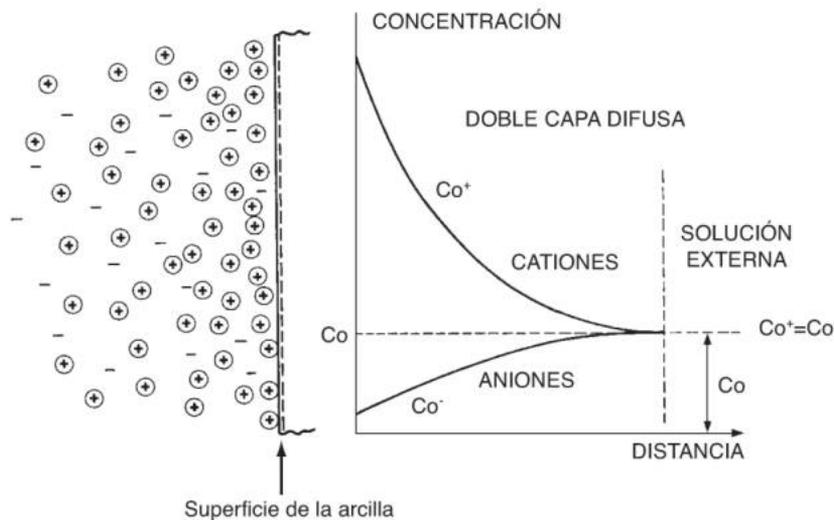


Los iones de signo contrario (cationes) a la carga de la superficie están sometidos a fuerzas de **atracción** electrostática, que hacen que haya una mayor concentración de cationes cerca de la superficie de la arcilla; y a la **difusión**, como iones libres que tienden a alejarse de la superficie y a homogeneizar toda la solución. Esto ocurre al equilibrarse la atracción y la difusión, lo que se consigue a una cierta distancia de la superficie de la partícula de arcilla, que define el espesor de la doble capa (1/K).

Geometría de la doble capa

La distribución de cationes en interacción con la partícula de arcilla no es uniforme, sino que su concentración (C_x) es máxima en la superficie y va disminuyendo de forma exponencial con la distancia (x). La distancia a la que se alcanza una situación de equilibrio define el espesor de la doble capa (1/K), más allá de la cual la concentración de la solución exterior (C_o) permanece constante. El espesor de la doble capa se halla en el intervalo que va de los 5×10^5 mm a los 30×10^{-5} mm, dependiendo de los iones de signo contrario y de la concentración. El espesor de la doble capa puede llegar a tener dimensiones comparables a las de los minerales de arcilla muy finos.

La geometría de la doble capa viene determinada por las fuerzas de atracción arcilla-catión, que dependen del tipo de arcilla, de la carga del catión, de su grado de hidratación y de la concentración de la solución exterior. En la figura puede observarse cómo aumenta el exceso de cationes y el déficit de aniones al acercarse a la superficie de la partícula cargada (arcilla):



Teoría de la doble capa difusa de Gouy-Chapman

La teoría de Gouy-Chapman o de la **doble capa difusa** expresa la concentración a una cierta distancia x de la superficie de la arcilla, en función de la concentración de la solución exterior (C_o), de la valencia del ión de signo contrario, la carga electrónica, el potencial eléctrico y la temperatura:

$$C_x = C_o \exp(-zey/kT)$$

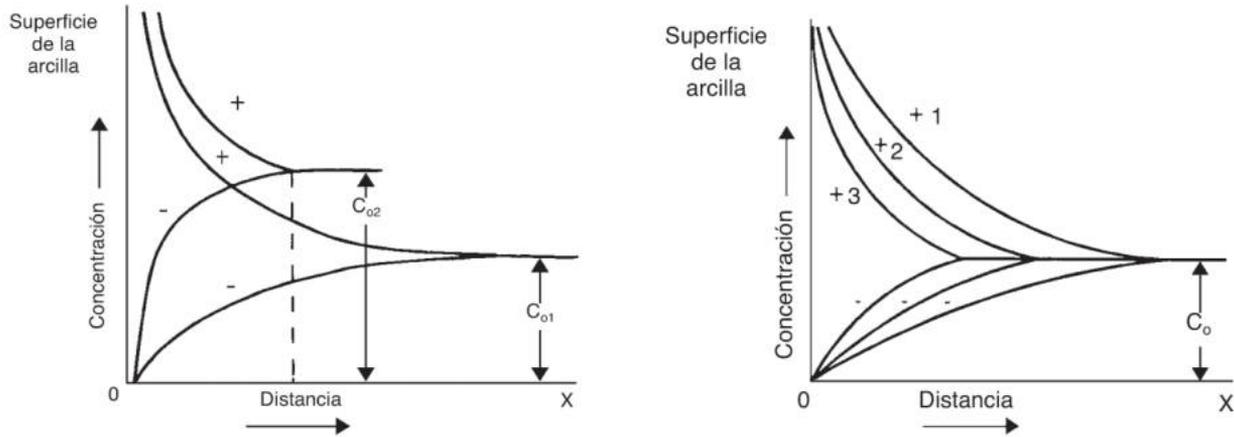
siendo C_o = concentración de cationes en la solución exterior
 z = valencia del catión
 e = carga electrónica
 y = potencial eléctrico
 k = constante de Boltzmann
 T = temperatura absoluta

El espesor de la doble capa difusa (1/K) se puede calcular a partir de la expresión:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{kz^+ \sqrt{C_o}}$$

Siendo k = constante asociada a la concentración, valencia de los iones, constante dieléctrica y la temperatura (a 25 °C tiene un valor igual a 3×10^7).

Esta expresión pone de manifiesto que al aumentar la concentración de la solución exterior (C_o), disminuye el espesor de la doble capa e igual ocurre al aumentar la carga del catión. Estos fenómenos tienen una gran trascendencia en la estructuración del suelo, en la inestabilidad de la estructura y, en general, en el comportamiento del suelo. La calidad de un agua de riego y la infiltración de agua de lluvia inciden sobre todos estos aspectos.



Esta teoría es igualmente válida para superficies con carga positiva. Para las interpretaciones a realizar resulta suficiente este modelo. No obstante, presenta limitaciones, por ejemplo, supone que los iones son puntuales por lo que se han propuesto otras teorías para expresar estos procesos.

3. FLOCULACIÓN-DISPERSIÓN EN SISTEMA COLOIDALES

Conceptos básicos

SUSPENSIÓN

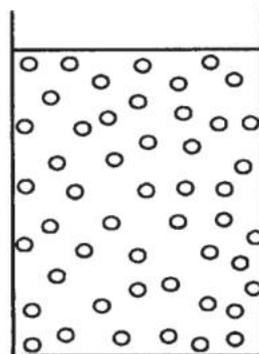
Interposición de partículas de una sustancia (arcilla) en las de otra (agua). Las partículas suspendidas no se disuelven, sedimentan y, además, son visibles con ayuda de un instrumento óptico.

FLOCULACIÓN

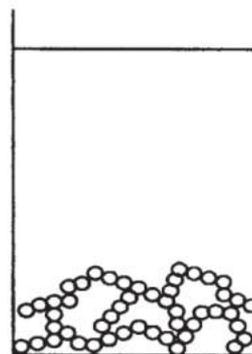
Proceso de formación de partículas de mayor tamaño (flóculos) de una fase sólida dispersa en una suspensión, por agregación de partículas más finas. La suspensión se hace inestable y se produce una sedimentación. Tiene gran importancia en la formación de agregados y en su estabilidad.

DISPERSIÓN

Proceso de repulsión mutua entre partículas finas (arcillas) que hace que se mantengan separadas en suspensión, sin que tenga lugar su sedimentación. La suspensión se dice estable. Tiene importancia en el transporte de partículas en el suelo, ya que éstas resultan altamente móviles, siendo susceptibles de ser erosionadas o translocadas dentro del suelo.



Suspensión dispersa

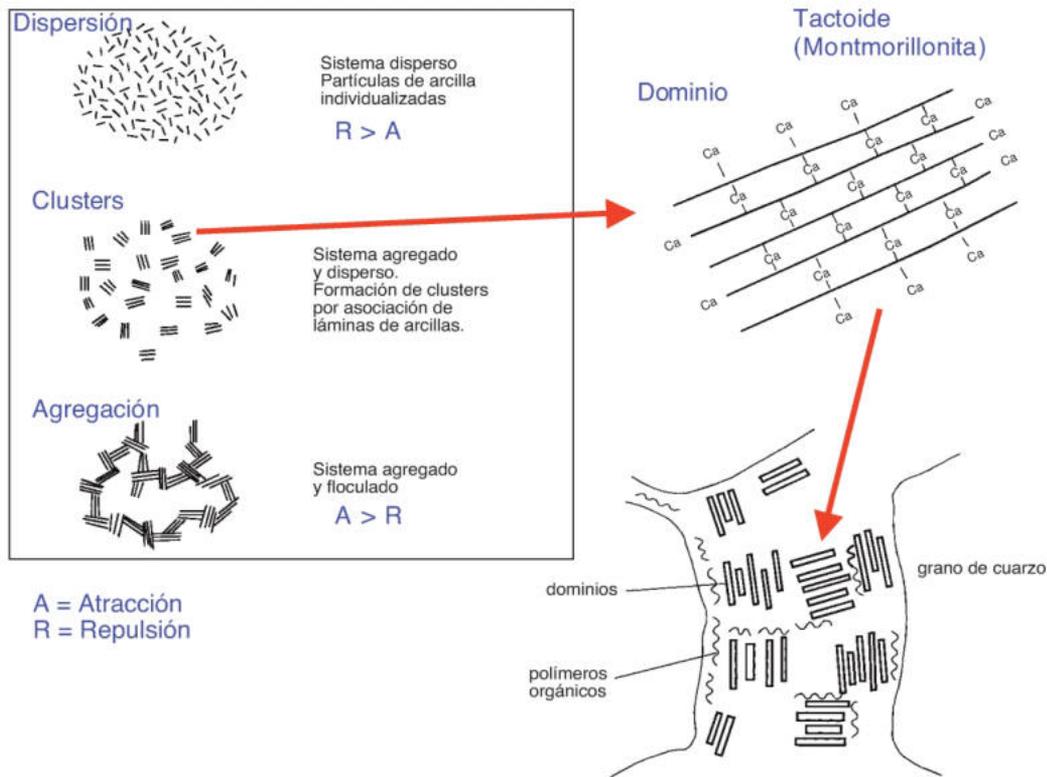


Suspensión floculada

Las suspensiones estables tienen importancia en la movilidad de adsorbentes orgánicos e inorgánicos de metales traza, contaminantes y nutrientes, tales como los aniones fosfato o pesticidas, entre otros.

La floculación de partículas de arcilla (cargadas negativamente) tiene lugar por intervención de iones de signo contrario (cationes) con más de una carga. La compensación de cargas eléctricas hace que las partículas se puedan unir y el sistema flocule. Un conjunto de láminas de arcilla agrupadas constituyen un **dominio de arcilla**. La floculación de la arcilla constituye una primera etapa necesaria para la formación de **microagregados** y la **estructuración** del suelo, en la que, además, interviene la materia orgánica.

Cuando las partículas de arcilla se hallan individualizadas, como ocurre cuando los iones de signo contrario en el sistema son monovalentes, en especial en presencia de sodio, el sistema estará disperso y el suelo tendrá una estructura muy inestable o incluso continua o maciza.



Concentración crítica de floculación

La concentración crítica de floculación es la menor concentración de electrolito a la que una suspensión coloidal se hace inestable y empieza a flocular rápidamente.

La concentración crítica de floculación depende de la naturaleza de las partículas, de la composición del medio acuoso y del tiempo de sedimentación. De manera que con el Ca^{2+} la concentración será mucho más baja que con el Na^+ , por la menor carga de éste. Dicho de otro modo, el efecto dispersivo del sodio sólo se manifiesta si la concentración de la solución externa es más baja que la que se requiere para que tenga lugar la floculación de las partículas de arcilla.

4. INTERACCIÓN ENTRE DOBLES CAPAS: BASES PARA LA FORMACIÓN DE MICROAGREGADOS EN EL SUELO

Las dobles capas difusas constituyen sistemas que tiende a repelerse entre ellas, ya que la parte exterior de cada una de ellas tiene el mismo tipo de carga (positiva), con lo que el sistema se mantiene disperso. Ahora bien,

cuanto menor sea el espesor de las dobles capas ($1/K$), mayor podrá ser la interacción entre las partículas de arcilla del sistema. Ello se debe a que, cuanto más corta es la distancia entre partículas, más efectiva es la atracción entre ellas debidas a las fuerzas atracción intermoleculares de London-Van der Waals. Estas fuerzas son inversamente proporcionales a la séptima potencia de la distancia, y, en el caso de partículas muy próximas, su efectividad se explica por su carácter aditivo entre pares de átomos de una y otra partícula y al contener las partículas un gran número de átomos. En este caso el sistema estará floculado.

Al rehumectar un suelo seco, las láminas o tactoides (o dominios) de los minerales de arcilla tenderán a repelirse de acuerdo con el espesor potencial de la doble capa (dependiendo del tipo y saturación del contraión (ión de signo contrario) y la concentración externa de electrolito), en las condiciones de pH y concentración salina finales. Esto provoca un aumento de volumen. Este hinchamiento de un volumen de suelo, lógicamente, tiene su máxima expresión en suelos arcillosos con arcillas expansibles (esmeditas y algunas vermiculitas).

La floculación de las partículas de arcilla en un suelo constituye la base para la formación de microagregados en él.

5. INTERPRETAR INFORMACIÓN

E3. Discutir y redactar un informe acerca del siguiente texto:

La aplicación más cercana de un proceso de dispersión–floculación reside en el análisis granulométrico de una muestra en el laboratorio, para lo que se requiere que las partículas de arcilla se hallen individualizadas. Stokes estudió la sedimentación de partículas en régimen laminar y determinó la velocidad de sedimentación.

- Consultar en la bibliografía cómo consiguen distintos métodos de análisis granulométrico que las partículas estén dispersas. En la biblioteca y en Internet, entre otros: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés: *Técnicas y Experimentos en Edafología*.
- ¿Cómo se puede transferir esta información para entender el efecto de la calidad de un agua de riego y el comportamiento de un suelo sódico?

6. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. Identificar un mínimo de 20 términos (incluyendo símbolos y unidades) referentes a Química de suelos (utilizar mayúsculas, minúsculas, subíndices y supraíndices, y colocar los acentos según corresponda). Construir un esquema conceptual con todos estos términos, introduciendo otros complementarios, si se requiere:

i	n	t	e	r	c	a	m	b	i	o
c	n	o	i	c	l	a	n	w	z	l
m	d	o	b	l	e	c	a	p	a	u
o	i	l	p	c	-	y	u	o	g	c
l	f	k	p	s	g	c	e	s	m	o
c	u	a	r	i	i	m	o	d	e	l
l	s	u	b	c	i	d	o	s	s	f
-	a	e	o	x	i	l	o	x	h	h
1	i	e	d	o	m	i	n	i	o	a
l	d	s	m	-	1	/	k	a	b	d
o	r	e	t	o	f	n	a	g	u	a

7. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. 1. A partir de las expresiones que derivan de la teoría de la doble capa de Gouy – Chapman, discutir los siguientes aspectos:

- En qué situación puede haber mayor interacción entre partículas de arcilla, en el caso en que en la suspensión arcilla – agua el ión de signo contrario sea el calcio o el sodio. ¿Por qué?

- b) Interpretar las distribuciones de iones de signo contrario en relación a la superficie de una arcilla en función de la concentración de la solución exterior. ¿Cómo se puede utilizar esta información para entender el comportamiento de un suelo en el campo, según sea su contenido de sales solubles, debido a la existencia de una capa freática salina?
- c) ¿Qué implicaciones tiene en los procesos edafogénicos el que sea el calcio o bien el sodio el ión de signo contrario en la doble capa?
- d) ¿Qué papel puede desempeñar el aluminio en suelos ácidos en relación a la floculación y dispersión de las arcillas?

8. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Seleccionar el término más adecuado según el contexto.

Los componentes inorgánicos y orgánicos interactúan (1) _____ en el suelo, lo que tiene una importancia grande en múltiples propiedades que condicionan el comportamiento de los suelos, la disponibilidad de (2) _____, los contaminantes y la calidad de las aguas de drenaje. Tales interacciones tienen efectos sobre el medio en el que se desarrollan las raíces de las plantas y el medio ambiente en general.

El hecho que las partículas de arcilla tengan (3) _____ resulta determinante, ya que hace posible que tengan lugar procesos de (4) _____, al tratarse de partículas de muy pequeño tamaño (5) (<_____). El espesor de la doble capa difusa viene determinado por la naturaleza del ión de signo contrario, su (6) _____ y su estado de hidratación y la concentración de la solución (7) _____. De manera que cuanto mayor sea ésta, (8) _____ será el espesor de la doble capa, lo que favorecerá la interacción entre dobles capas y la (9) _____, base para la formación de microagregados.

- | | | | | |
|-----|--------------------|---------------------------|------------------|-----------------------|
| (1) | a) entre ellos | b) con el agua | c) con el aire | d) con los organismos |
| (2) | a) oxígeno | b) aire | c) nutrientes | d) fósforo |
| (3) | a) carga eléctrica | b) capa octaédrica | c) capa T | d) estructura T-O-T |
| (4) | a) suspensión | b) dispersión/floculación | c) meteorización | d) repulsión |
| (5) | a) 20 mm | b) 50 mm | c) 0,2 mm | d) 2 μ m |
| (6) | a) radio | b) valencia | c) solubilidad | d) electronegatividad |
| (7) | a) exterior | b) interna | c) acuosa | d) alcalina |
| (8) | a) mayor | b) menor | c) igual | d) mucho mayor |
| (9) | a) dispersión | b) sedimentación | c) floculación | d) cementación |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Introducir el concepto de adsorción de iones y sus tipos, para entender los fenómenos de intercambio iónico y el comportamiento de los nutrientes y la adsorción y transporte de contaminantes en el suelo.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Procesos de adsorción de iones.

Isotermas de adsorción.

Adsorción de compuestos orgánicos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Cap. 18. Mundi-Prensa, Madrid 2003.

Evangelou, V.P.: *Environmental Soil and Water Chemistry*. John Wiley, 564 pp. New York, 1998.

Tan, K. H. *Principles of Soil Chemistry*. 3th edition. Marcel Dekker, Inc. New York, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto.

En el momento de formarse un mineral, en concreto un (1) _____, si la solución a partir de la cual se forma es muy rica en aluminio, este elemento puede entrar a formar parte de algunos de los tetraedros, en lugar de un (2) _____. Se debe a que el tamaño atómico de ambos es semejante, si bien difieren en (3) _____, por lo que aparecerán cargas eléctricas en (4) _____ de las partículas de arcilla. El proceso que da origen a estas cargas se conoce como (5) _____.

- | | | | | |
|-----|-------------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| (1) | a) nesosilicato | b) filosilicato | c) ciclosilicato | d) tectosilicato |
| (2) | a) hierro | b) calcio | c) magnesio | d) silicio |
| (3) | a) la hidratación | b) la carga | c) el radio | d) la estructura |
| (4) | a) el interior | b) los bordes | c) la superficie | d) la periferia |
| (5) | a) sustitución isomorfa | b) meteorización | c) intercambio iónico | d) fusión |

2. PROCESOS DE ADSORCIÓN

Conceptos básicos

El suministro de nutrientes por parte del suelo a las plantas (NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , entre otros); los procesos de mejora de la calidad del agua que atraviese un suelo por eliminación de iones; las reacciones entre la MOS y los pesticidas y los productos de su degradación; el comportamiento de los contaminantes en el suelo, entre otros muchos aspectos vienen controlados por procesos de adsorción por parte de los componentes con carga eléctrica del suelo.

INTERFASE

Es una región de transición o discontinuidad entre dos fases. No tiene las propiedades de ninguna de las dos fases, es una región frontera.

ADSORCIÓN

Proceso por el cual especies moleculares o iónicas se concentran en una interfase entre dos fases inmiscibles. Una de las fases atrae a la otra o ambas se atraen y una de ellas pasa a formar una capa (adsorbida) en la superficie de la otra. El **adsorbente** es el sólido en cuya superficie se adsorbe, y el **adsorbato** es lo adsorbido.

ABSORCIÓN

Hace referencia a la penetración de las especies adsorbidas dentro de la fase adsorbente (adsorbente).

Los responsables de los procesos de **adsorción** son los **grupos funcionales** existentes en la superficie del adsorbente. En el caso las partículas de arcilla, la existencia de carga eléctrica puede ser debida a: **sustituciones isomorfas**, en cuyo caso los grupos funcionales implicados son los $-\text{Al}-\text{OH}$ (aluminol) y $-\text{Si}-\text{OH}$ (silanol); y a **cargas no compensadas en los bordes** de las arcillas, debidas a la ionización de grupos $-\text{OH}$. Estas últimas cargas dependen del pH del medio. La MOS y los óxidos de hierro y aluminio también pueden actuar de adsorbentes y su carga depende también del pH del medio.

Fuerzas de adsorción en las interfases

En los límites de las fases no hay unas fuerzas de enlace especiales. Se trata de fuerzas que actúan en otras situaciones y, en cada caso, dependerán de las características de las superficies de las partículas (adsorbente) y de las del adsorbato. Se puede establecer una primera división entre: adsorción física, físico-química y química o quimisorción. Esta última incluye mecanismos tanto de atracción electrostática (intercambio catiónico e intercambio aniónico no específico), como compartir electrones, con lo que las interacciones son más fuertes entre el

adsorbente (**ligando**) y el **adsorbato**. En la quimisorción tienen lugar **reacciones de coordinación** con enlaces covalentes coordinados. El compuesto de superficie formado se llama **complejo** y **quelato** en aquellos casos en que un ligando orgánico **bidentado** se une a un ión metálico.

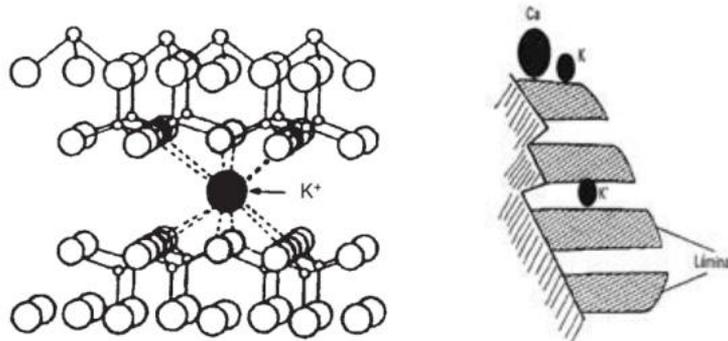
Entre las fuerzas de adsorción en las interfases cabe distinguir:

- Fuerzas de **London–van der Waals**: se trata de fuerzas físicas debidas a atracciones intermoleculares, que sólo son efectivas a distancias muy cortas, si bien su efectividad se debe a que se trata de fuerzas aditivas entre pares de átomos y, a que las partículas contienen un gran número de ellos. La atracción entre partículas será igual a la suma de todas las fuerzas atractivas entre pares de átomos de una partícula y de otra partícula. Este mecanismo es importante, ya que interviene en la floculación de las arcillas, cuando el espesor de la doble capa es pequeño.
- Puentes de hidrógeno**. Al ser el agua un dipolo, la adsorción de agua sobre las superficies de las arcillas está dominada por enlaces de este tipo.
- Fuerzas debidas a los **campos electrostáticos** que existen en la interfase de las partículas que forman el complejo coloidal del suelo: minerales de arcilla, materia orgánica, óxidos, etc. Estas fuerzas se ven implicadas en todo tipo de reacciones que tienen lugar en el suelo, ya sean físicas o químicas, entre ellas cabe destacar las de **intercambio iónico**. La teoría de la doble capa describe los fenómenos eléctricos que tienen lugar en las interfases arcilla–solución.

Complejos de esfera interna y complejos de esfera externa

Las sustituciones isomorfas puede tener lugar en las capas tetraédricas y en las octaédricas de las láminas de arcilla, con resultado de aparición de carga eléctrica negativa en la superficie de las arcillas. Ahora bien, este exceso de carga genera fuerzas electrostáticas de mayor intensidad en el primer caso que en el segundo, lo que permite explicar que se puedan formar complejos de superficie de distinta estabilidad:

- Complejos de **esfera interna** (Sposito, 1989) en los que la unión con un grupo funcional de superficie tiene lugar con cationes no solvatados y dipolos, dando lugar a enlaces muy estables. El enlace covalente depende de la configuración electrónica de la superficie y del ión complejado, por lo que este tipo de complejos se consideran una **adsorción específica**.

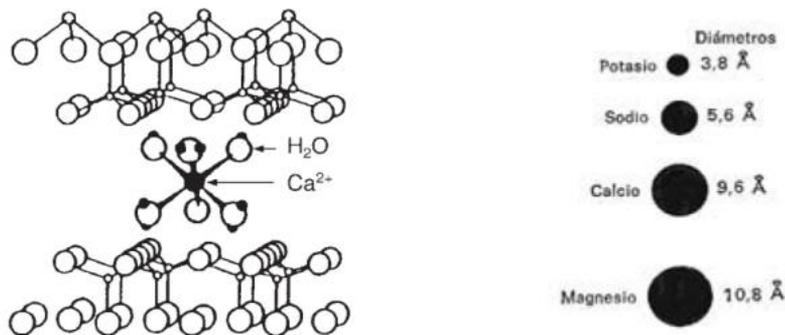


- Complejos de **esfera externa** (Sposito, 1989) si el ión está hidratado (calcio, magnesio, sodio, entre otros), el enlace es de tipo electrostático, por lo que los complejos son menos estables y el catión es mucho más móvil y permanece en una forma fácilmente intercambiable.

Como ejemplos de **complejos de esfera interna** cabe citar la unión del K^+ en posiciones interlaminares de las arcillas (micas y vermiculitas) con coordinación doce con átomos de oxígeno de dos cavidades silófanas contiguas. Esta fijación o retrogradación del potasio afectará a la efectividad de los abonados potásicos en suelos que contengan este tipo de arcillas.

El cobre se asocia fuertemente con la materia orgánica, enlazándose como complejo de esfera interna, lo que disminuye su biodisponibilidad y restringe su movimiento vertical (Han *et al.*, 2001).

El zinc puede enlazarse con la materia orgánica, pero en este caso se forma un **complejo de esfera externa**, permaneciendo en una forma más disponible, que puede reaccionar con otros cationes (Kanata-Pendias, 2001). A pH elevados el zinc puede adsorberse de forma selectiva en los óxidos de hierro y manganeso.



El estudio de la adsorción aniónica tiene importancia para poder interpretar el comportamiento en el suelo de los fertilizantes, productos fitosanitarios y herbicidas, así como elementos contaminantes.

3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Para describir y evaluar de forma cuantitativa la adsorción de materia (adsorbato) en una superficie (adsorbente), se han desarrollado diversos modelos que relacionan la cantidad de material adsorbido y la concentración en el equilibrio, trabajando en condiciones isotermas.

La adsorción que ha tenido lugar se suele estimar a partir del agotamiento de la sustancia adsorbida, comparando su concentración inicial en la solución puesta en presencia del adsorbente y la existente al alcanzarse el equilibrio con una cantidad conocida de adsorbente.

Los modelos más utilizados son el de Freundlich, que se cumple para un intervalo amplio de concentraciones, si bien no prevé un máximo de adsorción; el de Langmuir, que propone una adsorción en monocapa y define un límite finito de adsorción; el de Brunauer, Emmett y Tener (BET), que considera la adsorción multicapa; y el de Gibbs.

La expresión debida a Freundlich es:

$$\frac{x}{m} = kC^{1/n}$$

donde, x = cantidad adsorbida
 m = cantidad de adsorbente
 C = concentración de la solución en equilibrio
 k, n = constantes

Este tipo de curvas permiten conocer la cantidad de un elemento que hay que incorporar a un suelo determinado, para que se alcance en la solución una concentración de equilibrio predeterminada en función de los requerimientos nutricionales, para un óptimo de producción. Las isotermas de adsorción permiten definir el coeficiente de reparto, correspondiente a su tramo lineal, siendo muy utilizadas en la caracterización de la adsorción de plaguicidas.

4. CALCULAR E INTERPRETAR

E3. El modelo de Freundlich propone la expresión empírica (sin un fundamento teórico): $x/m = kC^{1/n}$, donde x es la cantidad de material adsorbido, m la cantidad de adsorbente, C la concentración de equilibrio y k y n unas constantes, para representar la adsorción en condiciones isotermas.

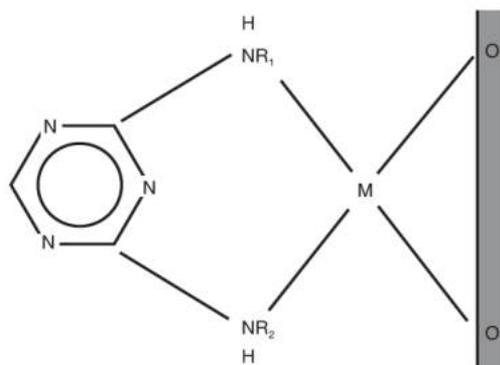
- a) Indicar qué forma tiene esta curva y qué significación tiene tal forma.
- b) Transformar esta expresión en logarítmica e indicar en este caso qué forma adquiere la curva.
- c) Representar la adsorción de anión sulfato en un suelo mineral de una zona tropical cálida y húmeda, sabiendo que al añadir anión sulfato equivalente a 60 ppm de S, la concentración en la situación de equilibrio era de 22 ppm de S; mientras que al añadir 20 ppm fueron 2 ppm.

- d) ¿Cómo se verán afectados el proceso de adsorción del anión sulfato, en el caso en que la muestra de suelo haya sido pretratada con peróxido de hidrógeno?

5. ADSORCIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS

La adsorción de pesticidas, herbicidas y sus productos de degradación en el suelo tiene una gran importancia, ya que hace variar su movilidad y, por consiguiente, sus efectos medioambientales. Al quedar inmovilizados disminuye su toxicidad de forma significativa, mientras que si el complejo resultante resulta soluble, podrán moverse libremente en el agua del suelo, pudiendo pasar a otro compartimento ambiental, al que pueden contaminar.

La MOS, por su carga eléctrica negativa, puede actuar como adsorbente de compuestos orgánicos que posean carga positiva, lo que tiene lugar tanto con compuestos en cadena (alifáticos), como con compuestos con anillos bencénicos (aromáticos). Esta última estructura es la que presentan los pesticidas. En las reacciones de coordinación que dan lugar a complejos, el ligando orgánico actúa como donante de pares de electrones a un metal o a un ión que ocupa una posición central y que a su vez puede unirse a la superficie de una partícula de arcilla (Tan, 1998):



6. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Seleccionar el término que mejor se adapte según el contexto.

El suelo tiene capacidad para (1) _____ ya sean iones, átomos o moléculas, debido a que las superficies de algunos componentes, tales como (2) _____ tienen carga eléctrica, que puede ser (3) _____ si deriva de sustituciones isomórficas. La adsorción consiste en que en la interfase de dos fases (4) _____ una de ellas se acumula en la superficie de la otra. Las fuerzas responsables de la adsorción son físicas, siendo las más importantes las (5) _____; los puentes de hidrógeno; los enlaces electrostáticos y las (6) _____, siendo ésta última una adsorción de tipo químico. Los complejos de esfera interna que tienen lugar entre iones no solvatados dan lugar a enlaces (7) _____ estables que los complejos de esfera externa, por lo que los iones (8) _____ intercambiables. Los procesos de adsorción pueden estudiarse por medio de (9) _____, como la ecuación de Freundlich que expresada en forma logarítmica corresponde a una (10) _____.

- | | | | | |
|------|--------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------|
| (1) | a) fijar | b) absorber | c) adsorber | d) filtrar |
| (2) | a) los elementos gruesos | b) la arena | c) el limo | d) la arcilla |
| (3) | a) variable | b) constante | c) permanente | d) positiva |
| (4) | a) inmiscibles | b) contiguas | c) sólidas | d) líquidas |
| (5) | a) de van der Waals | b) de Coulomb | c) gravitacionales | d) eléctricas |
| (6) | a) fuerzas físicas | b) reacciones de coordinación | c) cargas | d) adsorciones |
| (7) | a) mucho menos | b) igualmente | c) menos | d) mucho más |
| (8) | a) permanecen | b) no permanecen | c) son | d) pueden ser |
| (9) | a) leyes físicas | b) ecuaciones empíricas | c) fórmulas | d) análisis |
| (10) | a) recta | b) parábola | c) curva | d) hipérbola |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Basándose en el conocimiento de las formas en que se encuentran los elementos en el suelo, los conceptos de doble capa difusa y los fenómenos de adsorción física, llegar a entender la capacidad del suelo para adsorber cationes y sus implicaciones en el comportamiento y funciones del suelo.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Capacidad de intercambio catiónico.
Cambiadores de cationes y tipos de cargas eléctricas.
Cationes intercambiables en los suelos.
Determinación de los cationes intercambiables y de la capacidad de intercambio catiónico
Porcentaje de saturación.
Reacciones de intercambio catiónico.
Ecuación de Gapon y riesgo de sodificación.
Selectividad del cambiador: mecanismos de adsorción y series liotróficas.
Capacidad de intercambio catiónico y funciones de los suelos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Cap. 9. Mundi-Prensa, Madrid 2003.
Evangelou, V.P.: *Environmental Soil and Water Chemistry*. John Willey, 564 pp. New York, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado al contexto, de entre los propuestos.

Thompson (1850) era un agricultor inglés que, al hacer percolar purín de cerdo y una solución de sulfato amónico a través de una columna de suelo, puso de manifiesto que el líquido que salía de la columna no contenía amonio y, en cambio, contenía calcio. Comentó el hecho a su amigo J. Thomas Way, que resultó la persona adecuada para recibir la información acerca del fenómeno. Se interesó en él y se puso a investigarlo (Way, 1850, 1852). Los resultados pusieron de manifiesto que, al hacer pasar por la columna agua desmineralizada (1) ____, ocurría lo mismo. Al utilizar columnas rellenas con arena lavada, y hacer percolar una solución salina, su composición (2) _____ al atravesar la columna, mientras que si la columna se había llenado con material de un suelo, la solución (3) _____ en una cantidad equivalente a la del catión que disminuía.

Way supo entender y explicar que si entraba un catión y salía una cantidad equivalente de otro, en la columna llena de suelo debía producirse (4) _____ de iones. Estos trabajos le llevaron a descubrir una propiedad química, la (5) _____ de cationes, que ha resultado muy importante, tanto en Ciencia del Suelo como en otros campos científicos y para la industria. Los cationes que se comportaban de este modo debían formar parte de (6) _____. Esta propiedad de los suelos se explica ahora por la (7) _____, debido principalmente a la existencia de cargas electrostáticas en la superficie de las arcillas, por (8) _____ en las redes cristalinas, originadas en el momento de formación del mineral, es decir que se trata de cargas (9) _____.

El diagrama de Mason permite interpretar el comportamiento de los distintos elementos en el suelo en función del (10) _____. Las partículas de arcilla al unirse forman (11) _____.

- | | | | | |
|------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| (1) | a) también | b) no | c) siempre | d) a veces |
| (2) | a) se enriquecía | b) no se enriquecía | c) se empobrecía | d) no variaba |
| (3) | a) se enriquecía | b) no se enriquecía | c) se empobrecía | d) no variaba |
| (4) | a) un intercambio | b) una disolución | c) una liberación | d) una meteorización |
| (5) | a) disolución | b) liberación | c) capacidad de intercambio | d) transformación |
| (6) | a) la arena | b) las redes cristalinas | c) la materia orgánica | d) una posición nueva |
| (7) | a) meteorización | b) adsorción física | c) adsorción química | d) hidrólisis |
| (8) | a) fallos | b) sustituciones isomórficas | c) sustituciones polimórficas | d) silicio |
| (9) | a) variables | b) permanentes | c) isomórficas | d) positivas |
| (10) | a) potencial iónico | b) potencial | c) peso atómico | d) diámetro iónico |
| (11) | a) flóculos | b) agregados | c) microagregados | d) tactoides |

2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

La **capacidad de intercambio catiónico** es una propiedad del suelo que hace referencia a la carga negativa asociada a determinados componentes. Expresa la capacidad total de una masa de suelo (cambiador) para adsorber (fenómeno de superficie) de forma reversible iones de signo contrario, cationes hidratados, que compensan la carga negativa del cambiador y mantienen su electroneutralidad, en unas condiciones dadas de temperatura, presión, composición de la fase líquida y relación masa-solución.

La capacidad de intercambio catiónico se expresa en unidades SI en **cmol_c kg⁻¹ de suelo seco** (o del cambiador de que se trate). Esta unidad da un valor numérico que coincide con el que corresponde a expresarla en *meq/100 g* de suelo seco (unidad utilizada anteriormente).

La capacidad de intercambio catiónico viene dada por la expresión:

$$\text{CIC} = S \times \sigma \quad \text{cmol}_c \text{ kg}^{-1} \text{ de suelo seco}$$

Siendo: σ (cmol_c m⁻²) = **densidad de carga** de superficie
 S (m² kg⁻¹) = **superficie específica**

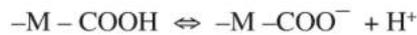
3. CAMBIADORES DE CATIONES Y TIPOS DE CARGAS ELÉCTRICAS

Los componentes del suelo que pueden actuar como cambiadores son:

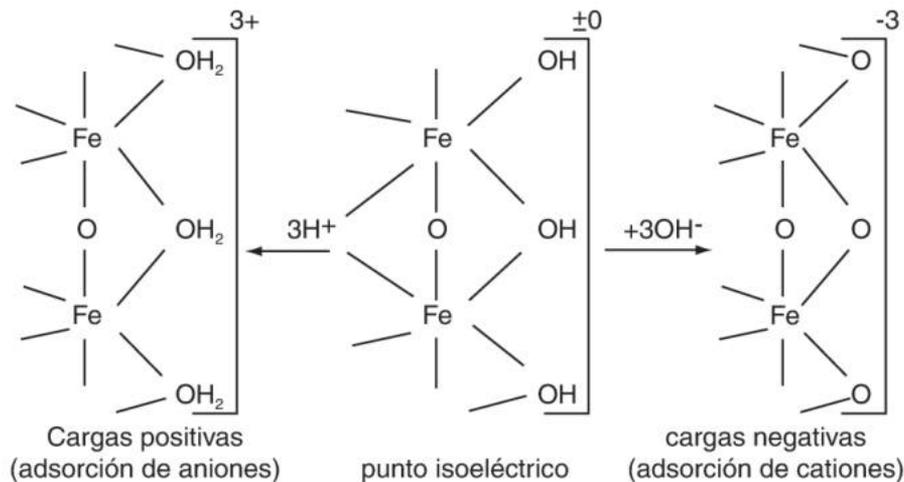
- Las arcillas mineralógicas. En ellas la carga eléctrica en superficie puede tener dos orígenes: las **sustituciones isomórficas** en las capas tetraédricas y octaédricas, que dan lugar a cargas permanentes; y las valencias incompletamente compensadas en los bordes de las láminas de arcilla, cargas variables con el pH. Para una caolinita:



- La **materia orgánica**. La ionización de los grupos hidroxilo (–OH) de los fenoles y los grupos carboxílicos (–COOH) de los ácidos orgánicos da origen a cargas dependientes del pH de la solución:



- Los **óxidos** de hierro, aluminio y manganeso. Estos componentes predominan en suelos fuertemente meteorizados, en los que llegan a condicionar el comportamiento químico del suelo. La carga eléctrica se origina en la interfase óxido-agua y depende del pH.



Por consiguiente, la CIC del suelo será igual a la suma de la CIC aportada por cada componente con carga eléctrica negativa, por lo general la arcilla y la materia orgánica:

$$\text{CIC}_{\text{SUELO}} \frac{\text{cmol}_c}{\text{kgsuelo}} = [\text{CIC}_{\text{ARCILLA}} + \text{CIC}_{\text{MO}} = \text{CIC}_a \times \% \text{ arcilla} + \text{CIC}_{\text{mo}}] \times \frac{1}{100}$$

Dado que las arcillas son el resultado de las condiciones ecológicas que han regido durante la formación del suelo, es frecuente que predomine un tipo de arcilla en un suelo. En aquellos casos en que ello sea así, la expresión anterior permite determinar la CIC_a y, por consiguiente, y, forma orientativa, el tipo de arcilla, conocido el contenido de arcilla, el de materia orgánica y asumiendo que la CIC de esta última es de 200 a 300 cmol_c kg⁻¹ de materia orgánica.

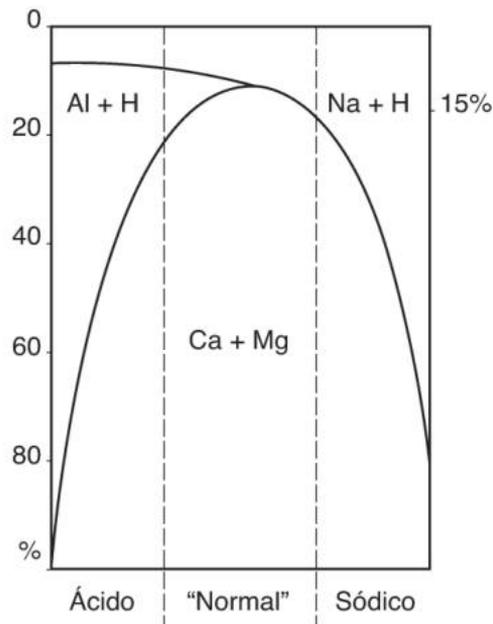
4. ESTUDIAR Y CALCULAR

G2. Al consultar un informe sobre los suelos de una zona en la que va a trabajar, observa que fue realizado en un momento en que se utilizaba como unidad para la CIC el meq/100 g suelo.

- Transforme esta unidad en cmol_c kg⁻¹ utilizando fracciones de equivalencia.
- ¿A cuántos cmol_c kg⁻¹ equivalen 20 meq Ca²⁺ int/100g suelo?

5. CATIONES INTERCAMBIABLES EN LOS SUELOS

Los cationes intercambiables pueden proceder de la meteorización del material originario, de la mineralización de la materia orgánica y de aportes superficiales y subsuperficiales. Las condiciones ecológicas, las extracciones por las plantas y el manejo del suelo determinan la composición del complejo de cambio. En esquema, los intervalos para las composiciones del complejo de intercambio catiónico de los suelos es (Bolt and Bruggenwert, 1976):



En suelos de **zonas áridas y semiáridas** (suelos generalmente calizos), predominan los cationes de intercambio básicos (a veces denominados *bases de cambio*, lo que desde un punto de vista químico no resulta del todo correcto), son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . El régimen de humedad de estos suelos es no percolante (arídico, xérico o ústico) y, por ello, estos cationes no se pierden por lavado.

En **zonas húmedas** (régimen de humedad percolante, údico) con suelos ácidos de $\text{pH}_w < 5,5$ puede haber, además de los cationes basificantes (Ca^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+); existen cationes acidificantes que se hidrolizan fácilmente y liberan protones Al^{3+} y sus distintas formas hidrolizadas, a veces hierro y manganeso y, en suelos muy ácidos ($\text{pH}_w < 4,0$), puede haber protones intercambiables en cantidad significativa.

En los **suelos sódicos** y en **suelos alcalinos**, el sodio intercambiable puede llegar a superar el 15% de la capacidad de intercambio catiónico (no a saturarla, como a veces incorrectamente se dice). Un valor del 10-15% resulta suficiente para hacer inestable la estructura al dispersar las arcillas, dependiendo de otras características del suelo.

6. DETERMINACIÓN DE LOS CATIONES INTERCAMBIABLES Y DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

El mecanismo físico-químico en el que se basa la determinación de los cationes intercambiables y la capacidad de intercambio catiónico consiste en desplazar los cationes adsorbidos en el cambiador, por medio de un **catión índice**, que no forme complejos de esfera interna con el cambiador, como ocurre con el K y la vermiculita, por ejemplo. Ahora bien, habrá que tener en cuenta, entre otros, los siguientes aspectos:

- Algunas sedes de intercambio están asociadas a grupos fenólicos y carboxílicos, cuya disociación depende fuertemente del pH. Igualmente ocurre con los componentes minerales o sedes superficiales que se ionizan. Por ello la capacidad de intercambio catiónico también dependerá del pH en estos suelos, entre ellos los AndisolesST o Andosoles^{WRB}, OxisolesST, UltisolesST, UltisolesST e Histosoles.
- El aluminio se encuentra precipitado en forma de gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$, a pH superiores a 5,5, mientras que por debajo de este valor se solubiliza, y actúan como catión intercambiable ácido. Debido a su elevada

carga puede fijarse en la superficie del cambiador, al formar complejos de superficie de esfera interna con grupos de la superficie de las arcillas, complejos que resultan muy estables. Con ello quedan bloqueadas algunas sedes de intercambio, y la capacidad de intercambio catiónico variará con el pH del medio.

Por ello, si se determina la capacidad de intercambio catiónico con una solución tamponada a pH = 7, en los suelos de carga variable se sobrevalorará la capacidad de intercambio catiónico. De ahí que se deban diferenciar dos conceptos:

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO MÁXIMA (CIC)

Desde un punto de vista operativo, corresponde al valor medido con una solución tamponada a pH = 7 o a 8,2 y elevada fuerza iónica (1N). Por lo general, se utiliza una solución de acetato amónico 1N a pH = 7.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO EFECTIVA (CICE)

Debido a la dificultad de ajustar en cada caso el pH y la fuerza iónica, la capacidad de intercambio catiónico efectiva, desde un punto de vista operativo, se determina sumando los cationes intercambiables básicos fácilmente intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) y los cationes intercambiables ácidos (Al y H) extraídos con una solución no tamponada de KCl y valorando la acidez y analizando el Al extraído.

Mide la carga eléctrica negativa presente en el suelo al pH y el nivel salino que éste tenga en el campo.

Por su importancia en el comportamiento del suelo y la respuesta de las plantas, la CICE se utiliza en la definición del endopedión óxicoST (típico de zonas tropicales con una meteorización muy intensa). Un horizonte debe tener una CICE $\leq 12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de arcilla para ser óxico.

Las raíces de las plantas también presentan capacidad de intercambio catiónico, que interviene en la absorción diferencial de nutrientes, que pasan de la fase líquida del suelo, al interior de la raíz, intercambiándose con protones liberados de la raíz.

7. PORCENTAJE DE SATURACIÓN

La suma de cationes hace referencia a la suma de los cationes intercambiables basificante. Se expresa, en unidades SI, en $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de suelo.

PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE CATIONES BASIFICANTES

Expresa la relación entre la suma de cationes intercambiables básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+) y la CIC en tanto por cien. El grado de saturación se representa como **V (%)**.

En **suelos calizos**, el complejo de cambio está saturado, por lo que $V = 100\%$. Si al realizar el análisis se opera incorrectamente y se hace la extracción con acetato amónico a pH = 7,0, se extraerán los cationes intercambiables y, además, se disolverá parte del carbonato cálcico, con lo que el contenido de calcio extraído será la suma de ambos y, por consiguiente, mayor que el que realmente ocupa las sedes de intercambio. El análisis conducirá a un valor erróneo, con una V superior al 100% de saturación de cationes basificantes.

Para evitar este problema, el intercambio se realiza con una solución de acetato sódico 1N a pH 8,2. Con ella se extrae el magnesio intercambiable, a la vez que se satura la columna con sodio. Este sodio, que equivale a la CIC de la muestra en $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, se intercambia con una solución de acetato amónico y se analiza el percolado. En una columna paralela se extraen con una solución de acetato amónico 1N a pH 7,0 el potasio y el sodio intercambiables. El calcio se determina por diferencia, expresando en $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$:

$$\text{Ca}^{2+}_i = \text{CIC} - (\text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)_i .$$

Por su significación para la respuesta de los cultivos y en el manejo de los suelos, el valor del porcentaje de saturación se utiliza en clasificación de suelos, para diferenciar un epipedión móllico ($V \geq 50\%$), de un úmbrico ($< 50\%$), tanto en *Soil Taxonomy* (2006), como en la *WRB* (2006). También es un criterio para separar los AlfisolesST de los UltisolesST, al requerirse que la V sea inferior al 35% en los Ultisoles.

8. CALCULAR

A1. Al analizar el complejo de intercambio de un epipedión de 25 cm, se ha hallado para el Ca^{2+} intercambiable un valor de $8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La densidad aparente del horizonte es de 1360 kg m^{-3} .

- Calcular la cantidad de calcio intercambiable referida a una hectárea. Aplicar factores de conversión.
- Discutir el resultado según que el suelo sea calizo o no, si la extracción se realizó con acetato amónico.

9. REACCIONES DE INTERCAMBIO CATIONICO

Las reacciones de intercambio catiónico, siendo X el cambiador (adsorbente) y A y B los cationes implicados, i la posición intercambiable y e la solución exterior, se formulan como: $\text{XA}_i + \text{B}_e \Leftrightarrow \text{XB}_i + \text{A}_e$

Si se trabaja con un sistema Ca-Na y X es un cambiador con carga eléctrica negativa unidad, la ecuación estequiométricamente equilibrada se formulará como:



Para un intercambio heterovalente:



Las reacciones de intercambio catiónico se caracterizan por ser:

- **Reversibles:** ello equivale a suponer que las isothermas de adsorción y desorción son idénticas, lo que suele ser cierto (Veburg *et al.*, 1995).
- **Rápidas:** prácticamente instantáneas.
- **Estequiométricas:** cumplen la ley de acción de masas.
- Presentan una **selectividad catiónica**.
- **Efecto de dilución de valencia:** la dilución de la fase líquida favorece la adsorción de los cationes de mayor carga.
- **Efecto del anión asociado.**
- **Efecto de coloides específicos.**
- **Reacciones a nivel de microsítio:** en la superficie del cambiador, ya sea el suelo o la raíz.

10. ECUACIÓN DE GAPON Y RIESGO DE SODIFICACIÓN

Aquellos suelos que reciban Na^+ procedente de aguas de riego de mala calidad, de aguas usadas en procesos industriales o de aguas depuradas con tratamiento con electrolitos a base de sodio, estarán sometidos a un riesgo de sodificación, por el aumento del porcentaje de sodio en las sedes de intercambio. Ello implicará inestabilidad de la estructura, debido a la dispersión de las arcillas, con lo que los dominios de arcilla colapsan y las propiedades físicas se degradan.

En el caso de un sistema de intercambio saturado por $\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+$, la ecuación de intercambio en el equilibrio se expresa como:



En este caso se cumplirá que: $\text{CIC} = (\text{Ca}^{2+})_i + (\text{Na}^+)_i$

El coeficiente de selectividad de Gapon o coeficiente de intercambio catiónico $K_{\text{Ca-Na}}$ viene dado por la expresión:

$$K_{\text{Ca-Na}} = \frac{[\text{Ca}^{2+}]_e^{1/2} [\text{Na}^+]_i}{[\text{Ca}_{1/2}]_i [\text{Na}^+]_e} = K_G \quad [K_G] = [\text{mmol L}^{-1}]^{-1/2}$$

$[\text{Ca}_i]_i$ en cmol kg^{-1}

$[\text{Ca}^{2+}]_e$ en mmol L^{-1}

K_G constante de Gapon

Reordenando la expresión:

$$\frac{[Na^+]_e}{[Ca^{2+}]_e^{1/2}} \times K_G = \frac{[Na^+]_i}{[Ca_{1/2}]_i}$$

Ecuación que puede utilizarse para determinar el sodio intercambiable: $[Na^+]_i$.

Siendo: $CIC = [Ca^{2+}]_i + [Na^+]_i$ (sistema $Ca^{2+} - Na^+$ saturado)

y denominando relación de adsorción de sodio (SAR) a la expresión: $SAR = [Na^+]_e / [Ca^{2+}]_e^{1/2}$

Se deduce:

$$[Na^+]_i = \frac{K_G \times (CIC) \times (SAR)}{[1 + (SAR) \times K_G]}$$

Empíricamente se asume que el Mg^{2+} está adsorbido del mismo modo que el calcio (USSL, 1954) y que ejerce una acción semejante al Ca^{2+} con un efecto aditivo al de éste, con lo que la expresión del **SAR práctico** se transforma en:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}}$$

Los cationes solubles (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})_e son los determinados en el extracto de pasta saturada expresados en **mmol_e L⁻¹** (cuyo valor numérico coincide a expresarlos en meq L⁻¹).

La relación de sodio intercambiable (ESR) es:

$$ESR = \frac{ESP}{100 - ESP} = K'_G \times SAR$$

ESP = Porcentaje de sodio intercambiable.

De manera que el SAR puede utilizarse como **indicador del riesgo de sodificación** de suelos y aguas, con un valor umbral de 10–12.

11. DEDUCIR E INTERPRETAR

- A1.** a) Para un sistema Ca – Na deducir la expresión que relaciona la *relación de adsorción de sodio* con la *relación de sodio intercambiable*.
- b) Indicar qué curva representa dicha expresión.
- c) Representar dicha curva tomando como valor de referencia K'_G igual a 0,015 (mmol L⁻¹)^{-1/2}

12. SELECTIVIDAD DEL CAMBIADOR: MECANISMOS DE ADSORCIÓN Y SERIES LIOTRÓFICAS

La ecuación de intercambio: $XNa_i + 0,5 Ca_e^{2+} \Leftrightarrow X(Ca_{1/2})_i + Na_e^+$ podría interpretarse en el sentido de que, en el equilibrio, el suelo XNa se ha convertido en suelo XCa. Para ello la reacción tendría que desplazarse a la derecha, debiendo eliminar los iones Na_e^+ del sistema. En el laboratorio se puede conseguir cuando en una columna de suelo (sistema abierto) se procede a lavados sucesivos repetidas veces (unas tres se considera suficiente a efectos operativos), con una solución con iones calcio. En campo sería el caso combinado enmiendas cálcicas, riego o lluvia y un sistema de drenaje, procedimiento que se utiliza en la mejora de suelos degradados por sodificación.

En otros casos en campo, la situación de equilibrio se caracteriza por la existencia de un suelo X(Ca,Na) con un porcentaje determinado de cada uno de ellos, dependiendo de la selectividad del cambiador para los cationes implicados (no se entra ahora en el efecto de la concentración).

En una primera aproximación al tema, se puede aceptar que los mecanismos implicados en la adsorción pueden comportar la formación de: complejos de esfera externa con iones no hidratados (complejos de alta estabilidad); complejos de esfera externa con los iones hidratados (complejos de baja estabilidad); y de iones hidratados que neutralizan cargas de superficie de forma deslocalizada, constituyendo un enjambre de iones difusos en la doble capa.

De acuerdo con la fuerza de adsorción relativa se puede escribir:

complejos de esfera interna > complejos de esfera externa > enjambre de iones difusos

Este comportamiento se interpreta en el sentido de que la dimensión del radio del ión no hidratado (r) está correlacionada con la tendencia a formar complejos de esfera interna, ya que el potencial iónico (Z/r) disminuye al aumentar el radio iónico (Diagrama de Mason), lo que permite establecer series de afinidad de adsorción relativa.

Las series de afinidad de adsorción relativa o **series liotróficas**, muestran la secuencia en que los cationes se desplazan unos a otros en la superficie del adsorbente (cambiador). Estas series siguen algunas reglas, de manera que los cationes más adsorbidos son:

- Los iones menos hidratados.
- Los de menor radio iónico hidratado, frente a los cationes de mayor tamaño (energía de hidratación).
- Los de mayor carga, frente a los de menor carga.
- Para los de igual carga según el radio iónico y el grado de hidratación
- Los que se hallen a mayor concentración en la solución exterior, frente a los minoritarios.

Catión	Cs ⁺	>	Rb ⁺	>	NH ₄ ⁺	>	K ⁺	>	Na ⁺	>	Li ⁺
Radio iónico, Å	1,69		1,48		1,43		1,33		0,95		0,60
Moléculas de agua de hidratación			2		–		2,5		4		6

Secuencias liotróficas

Para los divalentes la secuencia es: Ba²⁺ > Sr²⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺
Hg²⁺ > Cd²⁺ > Zn²⁺

En el caso de los metales de transición, la configuración electrónica desempeña un importante papel:

Cu²⁺ > Ni²⁺ > Co²⁺ > Mn²⁺

Para los cationes más frecuentes en el suelo, la preferencia es:

Al³⁺ >> Ca²⁺ >> NH₄⁺ ≈ K⁺ > H⁺ > Na⁺

En el caso de los protones (H⁺), al tener una sola carga, un gran radio hidratado y una baja concentración en la solución exterior, casi siempre constituirán una fracción muy pequeña del total de cationes intercambiables, y sólo en suelos extremadamente ácidos su cantidad será significativa.

Por otro lado hay que tener en cuenta la concentración, que afecta la adsorción al desplazar la ecuación de intercambio hacia uno u otro lado (ley de acción de masas), lo que puede llegar a invalidar las series liotróficas.

13. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO Y FUNCIONES DE LOS SUELOS

El **comportamiento de los suelos** viene controlado en gran manera por la naturaleza de sus componentes y la carga de las superficies de las partículas que los integran (fenómenos de superficie). Entre ellos cabe indicar: los elementos químicos en el suelo, el almacenamiento y liberación de nutrientes y de elementos tóxicos; la capacidad de amortiguación de los cambios de pH y de concentración; los fenómenos de floculación-dispersión; los mecanismos de estructuración del suelo; los procesos de expansión – retracción, entre otros.

Si se repasan las funciones del suelo (Unidad 1) resulta bastante evidente que muchas de ellas se ven afectadas por los fenómenos de superficie.

14. RELACIONES ESENCIALES

G2. Establecer relaciones entre las dos columnas:

- | | |
|--|---|
| 1. Cuanto menor es el radio iónico hidratado y mayor la carga del catión | a) $V = 115\%$ (por existencia de CaCO_3) |
| 2. Suelo rico en arcillas de carga variable en un medio fuertemente ácido | b) Suelo con $\text{pH}_w < 5,5$ |
| 3. $\text{Al}^{3+} \gg \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ | c) Capacidad para adsorber ión fosfato con formación de complejos de esfera interna muy estables |
| 4. Presencia de aluminio intercambiable | d) Más intensa es la fuerza de adsorción |
| 5. Horizonte de textura arenosa | e) Serie liotrófica |
| 6. CICE | f) Minerales de arcilla, al meteorizarse y tener capacidad para adsorber nutrientes catiónicos en su superficie |
| 7. Extracción errónea de cationes basificantes con NH_4OAc | g) Sin capacidad para intercambiar cationes ni aniones |
| 8. Arcilla con baja capacidad de intercambio catiónico al no tener sustituciones isomórficas | h) Vermiculita |
| 9. El NH_4^+ pasa a ocupar posiciones interlaminares desplazando al K^+ | i) Capacidad de intercambio catiónico correspondiente al pH del suelo |
| 10. La fracción mineral es un suministrador de nutrientes y a la vez un sumidero | j) Caolinita |

15. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. Estudiar el siguiente supuesto y redactar un informe al respecto.

En la definición del endopediación óxicaST o en la del endopediación ferrálica^{WRB} se requiere una $\text{CIC} \leq 16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de arcilla y una $\text{CICE} \leq 12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de arcilla.

- ¿Cómo debe pedir a un laboratorio que realicen los análisis para obtener esta información, si no está especializado en analizar suelos de estas características?
- ¿Cuál de los valores será mayor, el de la CIC o el de la CICE? ¿Por qué?
- ¿La suma de bases extraídas con NH_4OAc 1N a pH igual a 7,0 más el aluminio extraído con KCl 1N, con qué valor se corresponde, con la CIC o con la CICE?
- ¿Cuál puede ser la razón por la cual se exigen estas condiciones en la definición del endopediación óxica?
- ¿Qué implicaciones tiene para la nutrición fosfatada de las plantas y para la producción de los cultivos unas características de este tipo en el suelo?

16. MANEJO DE INFORMACIÓN

E3. Resolver la siguiente consulta y redactar un informe a presentar en público en una reunión con los socios que han requerido el asesoramiento:

Se nos consulta cuál puede ser la causa más probable por la que en unos pastos sembrados con una mezcla de una gramínea y una leguminosa, ésta última haya desaparecido.

Se dispone de las siguientes informaciones previas:

- La zona es templada húmeda, por lo que los suelos no presentaran problemas de salinidad.
- En la región hay praderas semejantes que no presentan este problema.
- Las raíces de las gramíneas tienen una CIC de 10–30 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de raíz seca, mientras que en las leguminosas es de 40–100 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.
- Los criterios de interpretación de análisis de nutrientes (potasio y fósforo asimilables), pueden encontrarse en la bibliografía y en Internet (www.iecat.net/mapasols → Documentos de interés: *Técnicas y Experimentos en Edafología*, p. 260).

Para poder realizar un diagnóstico se hacen abrir tres calicatas en sitios representativos del problema. La descripción de los perfiles no permite identificar problemas de fertilidad física (no hay suela de arado, no hay un exceso de elementos gruesos, ni mal drenaje, ni capa cementada). La prospección de campo se completa con una

toma de muestras de cada perfil y de cada parcela, en este último caso formando muestras compuestas de 0–27 cm, tomadas en zig-zag y adecuadamente mezcladas.

Los datos de laboratorio referentes al epipedión (0–27 cm) son:

- pH = 6,8
- Textura USDA: arcilla = 30%, limoUSDA = 18%
- Materia orgánica: 2,4%
- CIC = 7,8 cmol_c kg⁻¹ de suelo
- Potasio asimilable: 55 mg kg⁻¹ de suelo

Para preparar el informe se piensa que pueden resultar de interés los siguientes aspectos:

- a) Clase textural del epipedión.
- b) Tipo de arcilla probable, en el supuesto que predomine un tipo concreto.
- c) Evaluación del nivel de potasio del epipedión.
- d) Cantidad de KCl del 60% expresado en K₂O que sería necesaria para aumentar el contenido actual en un 10% de valor de la CIC en el epipedión, si la densidad aparente es 1350 kg m⁻³.
- e) Formular alguna hipótesis con base científica acerca de las posibles causas de la desaparición de las leguminosas en los suelos de esta finca.

17. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1.

La capacidad de intercambio catiónico tiene (1) _____ importancia en el suelo, siendo una de las propiedades afectadas (2) _____. Al aportar un catión como nutriente para las plantas, por su mayor concentración en la solución del suelo pasará (3) _____, quedando a disposición de las plantas, por el equilibrio existente entre la doble capa y (4) _____. En un proceso de intercambio catiónico, la adsorción de unos iones de la solución exterior implica la desorción simultánea de la misma cantidad de otros iones expresada en (5) _____.

En la determinación de la capacidad de intercambio catiónico se utiliza un catión índice que desplaza los cationes (6) _____ intercambiables, que son aquellos que forman complejos de superficie de esfera (7) _____ y un enjambre difuso en la doble capa. Tras lavar el exceso del catión índice, se determina la cantidad de éste que ha sido adsorbida. Como cationes índice se utilizan el Na⁺, Ba²⁺ y NH₄⁺, iones que no deben formar complejos de esfera (8) _____ con el adsorbente. En algunos casos esto puede ocurrir, como con el NH₄⁺, a pesar de ser uno de los cationes índice más empleados. La utilización de K⁺ en lugar de Na⁺ no sería adecuado, especialmente en suelo que contengan (9) _____, ya que se formarían complejos de esfera interna de (10) _____ estabilidad, perdiendo con ello el potasio su capacidad para ser intercambiado de nuevo.

La información proporcionada por las series (11) _____ puede resultar de interés para bloquear o activar la acción de un catión, añadiendo otro que sea competitivo con él, según interese mantenerlo en las sedes de intercambio o que pase a la solución y sea lavado. El efecto de la concentración puede (12) _____ la secuencia de adsorción.

- | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------|------------------|
| (1) a) mucha | b) poca | c) variable | d) relativa |
| (2) a) la textura | b) la pedregosidad | c) el color | d) la estructura |
| (3) a) a las sedes de intercambio | b) a la solución | c) a las raíces | d) a los poros |
| (4) a) el agua | b) los cationes | c) la solución exterior | d) los iones |
| (5) a) gramos | b) kg | c) cmol _c | d) litros |
| (6) a) fácilmente | b) más | c) adsorbidos | d) y aniones |
| (7) a) externa | b) interna | c) externa e interna | d) con carga |
| (8) a) externa | b) interna | c) externa e interna | d) con carga |
| (9) a) caolinita | b) montmorillonita | c) gibbsita | d) vermiculita |
| (10) a) poca | b) mediana | c) gran | d) escasa |
| (11) a) de Bowen | b) liotróficas | c) minerales | d) periódicas |
| (12) a) invalidar | b) reforzar | c) sumarse | d) intercambiar |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Entender los procesos de adsorción.
Conocer algunas de sus implicaciones.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Adsorción de aniones: capacidad de intercambio aniónico.
Origen de la carga eléctrica positiva: cambiadores de aniones.
Mecanismos de adsorción de aniones.
Aniones intercambiables: secuencias de adsorción.
Estudio de la adsorción de aniones.
Factores de control de la adsorción de aniones.
Comportamiento de los aniones en el suelo.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Ed. Mundi-Prensa, Cap. 9. Madrid, 2003.

Bohn, H.L. McNeal, B.L. y O'Connor, G.A.: *Soil Chemistry*. 3th edition. John Wiley & Sons, Inc. 305 pp. New York, 2002.

Sposito, G.: *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, 277 pp. New York, 1989.

Tan, K.H.: *Principles of Soil Chemistry*. 3th edition. Marcel Dekker, Inc. New York, 1998.

Evangelou, V.P.: *Environmental Soil and Water Chemistry*. John Willey, 564 pp. New York, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos.

Entre dos fases inmiscibles, la propiedad termodinámica básica de las interfases, para atraer y concentrar componentes de una de ellas o de ambas, se conoce como (1) _____, siendo el (2) _____ lo adsorbido en forma de iones, átomos o moléculas. La adsorción física es un proceso (3) _____, ya que intervienen enlaces (4) _____. La adsorción química o quimisorción incluye mecanismos tanto de atracción electrostática (intercambio catiónico y aniónico no específico), como (5) _____ electrones, lo que da lugar a reacciones de coordinación con enlaces covalentes coordinados. En este último caso más (6) _____ e irreversibles.

Los complejos de superficie en los que la unión con un grupo funcional de superficie tiene lugar con iones no solvatados (no hidratados) se denomina de esfera (7) _____ y dan lugar a enlaces muy estables.

Los minerales de arcilla son (8) _____ y, dentro de ellos, la caolinita tiene una estructura (9) _____. Para describir y evaluar la adsorción en una caolinita en medio ácido se utilizan las (10) _____ de adsorción. El pH al que una sustancia anfótera tiene carga (11) _____ se denomina punto isoeléctrico. La alófana está formada por materiales aluminosilicáticos altamente desordenados o amorfos con una elevada CIC que (12) _____ pH.

- | | | | | |
|------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| (1) | a) solución | b) absorción | c) adsorción | d) complexación |
| (2) | a) adsorbente | b) adsorbato | c) intercambiador | d) solvente |
| (3) | a) irreversible | b) reversible | c) isotérmico | d) adiabática |
| (4) | a) débiles | b) fuertes | c) covalentes | d) metálicos |
| (5) | a) intercambiar | b) ceder | c) captar | d) compartir |
| (6) | a) estables | b) inestables | c) intensos | d) débiles |
| (7) | a) interna | b) externa | c) circular | d) compartida |
| (8) | a) nesosilicatos | b) filosilicatos | c) tectosilicatos | d) carbonatos |
| (9) | a) T-O-T | b) 2:1 | c) 1:1 | d) 2:1:1 |
| (10) | a) reacciones | b) equivalencias | c) isotermas | d) cantidades |
| (11) | a) dos | b) positiva | c) cero | d) negativa |
| (12) | a) depende del | b) no depende del | c) influye sobre | d) aumenta el |

2. ADSORCIÓN DE ANIONES: CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

El estudio de la capacidad de intercambio aniónico (CIA) ha ido adquiriendo mayor interés a partir de 1975, al ser mejor conocidos los suelos de carga variable. La adsorción de aniones tiene importancia para entender el comportamiento de los aniones en relación a su movilidad y biodisponibilidad, en suelos de carga variable, tales como los AndisolesST, EspodosolesST, UltisolesST y OxisolesST, que tienen componentes en cuya superficie existe carga positiva.

La nutrición fosfatada, los efectos de los metales pesados, el comportamiento de los productos fitosanitarios y sus productos de degradación de carácter aniónico pueden verse afectados por procesos de adsorción aniónica. En sistemas acuáticos la adsorción-desorción de fosfatos por parte de los sedimentos tiene gran importancia en el control de los niveles de eutrofización de las masas de agua.

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

Expresa la cantidad máxima de anión susceptible de ser adsorbido por unidad de masa de adsorbente. Se refiere tanto a aniones que pueden ser fácilmente desplazables, tratándose en este caso de intercambio no específico asociado a atracción por cargas positivas superficiales (complejos de esfera externa); como a aniones unidos por enlaces covalentes (complejos de esfera interna), muy estables, y por ello, difícilmente reversibles.

3. ORIGEN DE LA CARGA POSITIVA: CAMBIADORES DE ANIONES

La adsorción de aniones incluye una serie de procesos complejos, que tienen lugar en la superficie de partículas coloidales con carga positiva. Los cambiadores de aniones son componentes del suelo que, generalmente por debajo del punto isoeléctrico, pueden captar protones en los grupos hidroxilos ($-OH$) y aminas ($-NH_2$), o en la

superficie de un metal, dando origen a cargas positivas. Se trata, pues, de cargas variables, ya que dependen del pH del medio.

Los componentes origen de carga positiva son:

— Materia orgánica: $R-NH_2 + H^+ \rightleftharpoons R-NH_3^+$

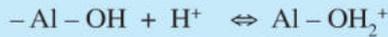
El grupo carboxílico $R-COOH$, al ser ácido, no llega a protonarse.

— Óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio (punto isoeléctrico superior a 7):

· $(Al, Fe)OH + H^+ \rightleftharpoons (Al, Fe)OH_2^+$

· $(Al, Fe)OH + OH^- \rightleftharpoons (Al, Fe)O^-$

— Arcillas con carácter anfótero: en los bordes de las partículas de caolinita (filosilicato 1:1)



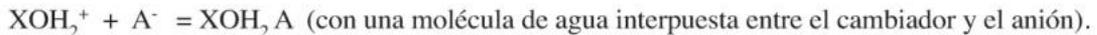
— Aluminosilicáticos de baja ordenación:

- Alófana (relación molar SiO_2/Al_2O_3 entre 1 y 2).
- Imogolita.

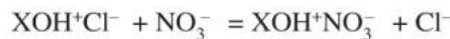
4. MECANISMOS DE ADSORCIÓN DE ANIONES

La adsorción de aniones, tal como ocurre con los cationes, es un **fenómeno de superficie** que puede tener lugar por distintos tipos de **mecanismos**: por formación de complejos (de esfera interna y de esfera externa) y por asociación de un enjambre difuso alrededor del cambiador.

Los complejos de **esfera externa** se forman por la unión del anión (A^-) a un grupo hidroxilo protonado ($-OH_2^+$), a un grupo amino protonado ($-NH_3^+$) o a la superficie del un metal ($-M^{n+}$) de un adsorbente (X):



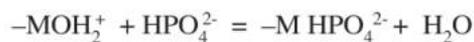
Una reacción de intercambio de este tipo podría ser, por ejemplo:



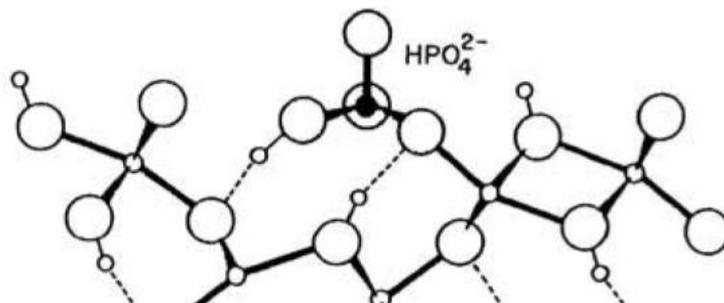
Los complejos de **esfera interna** superficiales se forman por intercambio de ligando (OH o H_2O). El intercambio puede verse favorecido por la protonación, que da lugar a sedes ácidas. La adsorción por este mecanismo es máxima al pK del ácido que se adsorbe.

Cabe citar como ejemplos, los hidroxilos de una goetita (M), pueden ser protonados para formar sedes ácidas: $-MOH + H^+ \rightleftharpoons -MOH_2^+$ (protonación, favorecida por pH bajos); los oxianiones inorgánicos como fosfato; y orgánicos como oxalato, además del flúor.

El intercambio del protón puede permitir la formación de un complejo de superficie de esfera interna, lo que supone la adsorción de un anión:



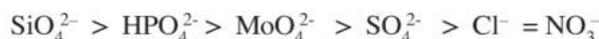
De acuerdo con Sposito (1989) el resultado final de la adsorción de un anión HPO_4^{2-} en la superficie de una goetita con formación de un complejo de esfera interna (muy estable) es:



5. ANIONES INTERCAMBIABLES: SECUENCIAS DE ADSORCIÓN

El tipo de mecanismo de adsorción preponderante dependerá del anión de que se trate. Los boratos, $B(OH)_4^-$ y fosfatos PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$ se adsorben principalmente formando complejos de esfera interna, por lo que presentarán una gran dificultad en ser desorbidos al lavar con otros aniones, tales como el Cl^- . Por el contrario, el anión cloruro da lugar a complejos de superficie de esfera externa, característicos de una adsorción no específica.

El estudio de los procesos de adsorción ha permitido determinar una preferencia en la adsorción de los diferentes aniones. El Cl^- y el NO_3^- son los únicos que no presentan adsorción específica por intercambio de ligando. La secuencia establecida es:



No obstante, hay que tener en cuenta el efecto concentración, al igual que ocurre con la adsorción de cationes. También se ha puesto de manifiesto la influencia de cationes complementarios en la adsorción de aniones, de manera que, en el caso del anión sulfato, se ha establecido:



La **movilidad** y, por consiguiente, la biodisponibilidad de los distintos elementos en el suelo viene controlada por los procesos de **adsorción**, a los que habrá que añadir los de **precipitación**, que resultan difíciles de separar de los primeros desde un punto de vista analítico. Por ello, a veces se utiliza la expresión genérica de **retención** para referirse al conjunto de estos procesos, que pueden incluir, además, la retención en el suelo de moléculas sin carga. En el caso de suelos con carbonato cálcico, se producirá una retención de fosfato debida también a la precipitación, ya sea en forma de fosfatos de calcio estables en el intervalo temporal de los cultivos o de fosfato tri-cálcico más estable (retrogradación apatítica).

6. ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN DE ANIONES

Isotermas de adsorción

Los modelos más utilizados para describir y cuantificar los procesos de adsorción de aniones son el de Freundlich, que se cumple para un intervalo amplio de concentraciones, si bien no prevé un máximo de adsorción; el de Langmuir, que propone una adsorción en monocapa y define un límite finito de adsorción; el de Brunauer, Emmett y Tener (BET), que considera la adsorción multicapa; y el de Gibbs.

Determinación de la capacidad de intercambio aniónico

La determinación de la CIA se basa medir la cantidad adsorbida de un anión índice fácilmente sustituible (Cl^-), saturando la muestra primero con NH_4Cl y desplazando luego éste anión con anión nitrato.

7. ESTUDIAR Y DISCUTIR

- G2.** a) En un ensayo con muestras procedentes de un suelo rico en óxidos de hierro y con arcillas de tipo cao-línítico se ha medido la disminución de la adsorción de ión fosfato a medida que se iba aumentando el pH de las muestras. Explicar el posible proceso e inferir alguna aplicación de estos resultados en relación con las disponibilidades de fósforo de los cultivos en estos suelos. ¿Qué efecto será esperable después de un encalado y de un sobreencalado?
- b) Al estudiar el comportamiento de la adsorción de aniones en un suelo ácido, tras destruir la materia orgánica con peróxido de hidrógeno, se ha observado que los resultados muestran una disminución en la adsorción de aniones. Sugerir alguna explicación.
- c) Indicar si podría ser útil añadir yeso a un suelo para aumentar la disponibilidad de molibdeno para las plantas en un suelo ácido.

8. FACTORES DE CONTROL DE LA ADSORCIÓN DE ANIONES

La adsorción de aniones viene controlada por el tipo de cambiador (adsorbente), el pH del medio, el anión enfrentado y su concentración en la solución, la presencia de cationes complementarios, el contenido de iones OH^- , el contenido y tipo de materia orgánica, la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de los aluminosilicatos, entre otros factores.

Los suelos en los que son más importantes los procesos de adsorción son aquéllos en los que predominan las cargas variables, es decir, las dependientes del pH. Entre ellos cabe citar los desarrollados a partir de materiales volcánicos (Andisoles), por la presencia de alófana, imogolita, óxidos de aluminio y de hierro y complejos órgano-minerales; así como los suelos tropicales fuertemente meteorizados (OxisolesST), por su contenido en caolinita y óxidos de hierro y aluminio. Igualmente en EspodosolesST, UltisolesST e Histosoles.

9. REFUERZO DE LABORATORIO

E3. Buscar información acerca de la reacción en que se basa en test de Fieldes-Perrot que permite detectar la presencia de materiales amorfos en el suelo, basándose en un proceso de adsorción.



J. Porta

10. COMPORTAMIENTO DE LOS ANIONES EN EL SUELO

Comportamiento del fósforo

Al estudiar la movilidad del fósforo en el suelo, se observa que disminuye en suelos ácidos, al ser fuertemente adsorbido al formar complejos de superficie de esfera interna con los óxidos hidratados de hierro y aluminio. Por consiguiente, en estas condiciones la biodisponibilidad del fósforo será muy baja. En un medio fuertemente ácido:



De acuerdo con la secuencia de adsorción, se observa una preferencia de los adsorbentes por el fósforo, frente a los demás aniones, excepto el SiO_4^{2-} .

Además, en suelos ácidos, el anión fosfato precipita al reaccionar con el hierro y el aluminio solubles, para lo que se requieren pH inferiores a 5,5. Al aumentar el pH hacia la neutralidad, la biodisponibilidad del fósforo aumenta, mientras que, si sigue aumentando el pH (caso de suelos calizos cuyo pH se encuentra entre 8 y 8,5), el anión fosfato interacciona con el calcio de la solución del suelo, precipitando en forma de fosfato cálcico estable y de fosfato tricálcico (apatito) mucho más estable. Estos mecanismos pueden ayudar a entender la falta de respuesta a un abonado fosfatado en determinados suelos calizos.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el fósforo se puede encontrar en el suelo en forma orgánica, siendo liberado al mineralizarse la materia orgánica. Si el contenido en fósforo liberado es alto, quedará a disposición de las plantas y, en caso contrario, los microorganismos lo utilizarán en su totalidad en sus propias síntesis. Para que haya liberación efectiva de fósforo, la materia orgánica aportada debe tener una relación C/P inferior a 200. Cuanto mayor sea la actividad biológica del suelo, tanto mayor será la cantidad de fósforo liberado por la mineralización de la materia orgánica.

Adsorción del anión molibdato

La superficie de los óxidos de hierro y aluminio hidratados son muy efectivos en la adsorción de aniones molibdato, proceso cuya intensidad decrece al aumentar el pH en el intervalo de 4,45 a 7,75 (Gupta y Lipsett, 1981).

Adsorción del anión borato

El boro es fácilmente asimilable en suelos ácidos, pero no así en suelos básicos, debido al elevado pK del ácido bórico (8,5–9), por lo que el boro queda retenido en este tipo de suelos, a diferencia de otros aniones. Los boratos pueden ser adsorbidos en la superficie de los óxidos hidratados de hierro y aluminio.

Los boratos son solubles, pero el anión puede ser retenido con la materia orgánica al formar complejos estables.

11. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. Analizar esta información y realizar un informe, sabiendo que para estudiar el comportamiento de un abonado fosfórico en función del pH en un suelo rico en arcillas de tipo caolínítico se determinó la adsorción de anión fosfato, obteniendo los siguientes resultados:

pH	cmol _c PO ₄ ³⁻ /kg de suelo
7,2	31,2
6,7	41,2
6,1	46,5
5,8	50,8
5,0	66,1
4,0	88,2

Fuente: H.W. Fassbender.

- ¿Qué grupos funcionales intervienen en esta adsorción aniónica?
- ¿De qué tipo es la adsorción que tiene lugar en este suelo?
- Formular alguna hipótesis acerca de la influencia de este proceso de adsorción en la eficiencia de los abonados fosfatados en esta zona
- En el caso en que se cultive maíz, ¿cuál será la sintomatología que presentará la planta y qué irá en aumento al visitar campos con suelos cada vez más ácidos?
- Inferir en qué parte del mundo se están llevando a cabo estos ensayos de fertilidad del suelos.
- ¿Se podría esperar un comportamiento semejante de un abonado fosfatado en un suelo calizo?

12. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Buscar información en la biblioteca o en Internet acerca de los problemas de fertilidad química en suelos tropicales de regiones cálidas y húmedas. Preparar un informe a presentar en público.

13. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto:

Las reacciones de intercambio aniónico son procesos que tienen lugar (1) _____ de las arcillas y m.o. La adsorción implica (2) _____ de movilidad del elemento o compuesto afectado. En el caso del anión fosfato estos procesos son de gran importancia para la nutrición de las plantas, ya que al incorporar un abono fosfatado a suelos con elevados contenidos en (3) _____ se puede producir su adsorción e inmovilización, si bien a ello también puede contribuir la (4) _____, así como la (5) _____ y (6) _____. En los suelos de zonas áridas y semiáridas la capacidad de adsorción de aniones es (7) _____, ya que su pH es básico, si bien no ocurre así como el borato, debido al elevado pK del ácido bórico. En los suelos calizos, la presencia de carbonato cálcico puede provocar una retrogradación apatítica del (8) _____ con (9) _____. Por consiguiente, los suelos de carga (10) _____, que son ácidos, son los que tienen capacidad para adsorber (11) _____. Teniendo en cuenta que el punto isoeléctrico es el pH al cual un componente tiene carga neta igual a cero, la adsorción de ión cloruro sólo puede tener lugar (12) _____ punto isoeléctrico, que es el intervalo de pH en el que los grupos reactivos tienen carga positiva.

- | | | | | |
|------|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| (1) | a) dentro | b) en la superficie | c) fuera | d) en las intercapas |
| (2) | a) una pérdida | b) una ganancia | c) una aceleración | d) un incremento |
| (3) | a) cuarzo | b) alófana | c) olivino | d) tectosilicatos |
| (4) | a) mineralización | b) materia orgánica | c) precipitación | d) inmovilización |
| (5) | a) ilita | b) motmorillonita | c) caolinita | d) clorita |
| (6) | a) los óxidos Fe y Al | b) los carbonatos | c) la calcita | d) el FeS_2 |
| (7) | a) muy elevada | b) media | c) cero | d) muy baja |
| (8) | a) azufre | b) sulfato | c) aluminio | d) fósforo |
| (9) | a) precipitación | b) adsorción | c) disolución | d) desorción |
| (10) | a) constante | b) variable | c) permanente | d) elevada |
| (11) | a) metales | b) calcio | c) cationes | d) aniones |
| (12) | a) por encima del | b) por debajo del | c) en el | d) junto al |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Entender el concepto de reacción del suelo y las causas ecológicas que la determinan.
Comprender la capacidad del suelo para amortiguar cambios.
Estudiar el papel del aluminio en la acidez del suelo.
Conocer cómo se ven afectadas las funciones de los suelos en diversos intervalos de pH.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Reacción del suelo: pH.
Tipos de acidez: medida y unidades.
Fuentes de acidez en el suelo.
Intervalo de existencia del pH.
Condiciones ecológicas determinadas por las propiedades químicas.
Funciones de los suelos que pueden verse afectadas por la reacción del suelo.
Factores de la acidez: teoría del aluminio.
Capacidad tampón de los suelos.
Acidez y problemas ambientales.
Gestión de suelos ácidos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Ed. Mundi-Prensa, Cap. 10. Madrid, 2003.
Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Ed. Mundi-Prensa, Cap. 11. Madrid, 2005.
Bohn, H.L. McNeal, B.L. y O'Connor, G.A.: *Soil Chemistry*. 3th edition. John Wiley & Sons, Inc. 305 pp. New York, 2002.
Sposito, G.: *The Chemistry of Soils*. Oxford University Press, 277 pp. New York, 1989.
Tan, K.H.: *Principles of Soil Chemistry*. 3th edition. Marcel Dekker, Inc. New York, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado según el contexto de entre los propuestos.

Las rocas ácidas son aquellas que tienen un (1) _____, y (2) _____ lugar a la formación de suelos ácidos. Estos suelos son característicos de unas condiciones ecológicas de formación (3) _____. Entre las rocas ácidas cabe citar (4) _____, que son rocas (5) _____. La pirita es un (6) _____ de (7) _____.

Un átomo de hidrógeno que ha (8) _____ un electrón se denomina (9) _____. Un grupo fenólico está formado por un OH unido a un (10) _____.

- | | | | | |
|------|------------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| (1) | a) elevado % de sílice | b) pH < 7,0 | c) pH > 7,0 | d) pH < 6,0 |
| (2) | a) dan | b) no dan | c) puede dar | d) siempre dan |
| (3) | a) de clima seco | b) durables | c) de clima húmedo | d) generales |
| (4) | a) los basaltos | b) los yesos | c) las cuarcitas | d) las serpentinas |
| (5) | a) metamórficas | b) ígneas | c) sedimentarias | d) evaporíticas |
| (6) | a) sulfato | b) sulfuro | c) mineral | d) carbonato |
| (7) | a) hierro | b) calcio | c) plomo | d) carbono |
| (8) | a) intercambiado | b) ganado | c) perdido | d) transferido |
| (9) | a) hidroxilo | b) protón | c) anión | d) hidróxido |
| (10) | a) carboxilo | b) alcohol | c) aminoácido | d) anillo aromático |

2. REACCIÓN DEL SUELO: pH

REACCIÓN DEL SUELO

La reacción del suelo es una propiedad físico-química que informa del grado de acidez o basicidad del suelo.

Se expresa por el pH, definido como el logaritmo de la inversa de la actividad de los protones (H^+) en el agua del suelo (fase líquida):

$$pH = \log \frac{1}{(H^+)} = -\log(H^+) = pH_w$$

Se utiliza la expresión *reacción del suelo* para indicar que se trata de un sistema que es suma de diferentes sistemas químicos que interaccionan. Cabe indicar que el pH no depende del volumen de la solución, sino de la relación suelo-agua utilizada al realizar la medida, por lo que se trata de una variable intensiva, es decir, un **factor de intensidad**.

La forma como se define el pH podría llevar a asociar, erróneamente, los problemas que se presentan en los suelos ácidos con la concentración de protones en su fase líquida. Debería evitarse esta confusión, ya desde ahora. Como se verá a continuación, la concentración de protones en la fase líquida es extremadamente baja. Entonces cabría preguntarse por qué se mide el pH, que sólo indica la concentración de protones. La respuesta se halla en las propiedades químicas del aluminio, que son objeto de estudio en esta Unidad, y en que el pH es una medida relativamente fácil de realizar. Por otro lado, es un buen indicador del comportamiento del suelo en relación a sus funciones potenciales.

La **importancia del pH** reside en que influye tanto en la nutrición de las plantas, como en el funcionamiento de los microorganismos del suelo, como en el comportamiento de los contaminantes, en el suelo, y en muchas propiedades del suelo.

3. CALCULAR E INTERPRETAR

- G2. a) Calcular la concentración molar de protones que determina que el pH de un horizonte tenga un valor de 5,0. Discutir si su valor es alto o bajo, para que permita explicar por sí solo los efectos desfavorables de este valor del pH de este suelo.

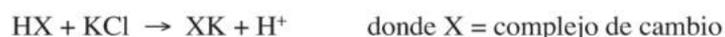
- b) Determinar cuántas veces es más ácido un suelo de pH = 4,0 que un suelo de pH = 6,0.
- c) De acuerdo con lo visto al estudiar el complejo de cambio, ¿qué comportamiento tendrán los protones en el suelo?
- d) Dado que el granito es una roca intrusiva ácida, ¿los suelos desarrollados a partir de un granito serán suelos ácidos, cualesquiera que sean las condiciones climáticas? Justificar la respuesta.

4. TIPOS DE ACIDEZ: MEDIDA Y UNIDADES

La intensidad de la acidez que mide la actividad de los protones en la solución del suelo, se denomina **acidez activa** o real (la expresión *acidez actual*, con que a veces se la denomina, constituye una traducción incorrecta del término inglés *actual*). Se determina por medio de un pH-metro, en una suspensión suelo-agua desmineralizada, en una relación 1:2,5. Las medidas deben realizarse con cuidado, ya que pueden verse afectadas por muchos factores de error (estado de los electrodos, de las soluciones tampón, forma de realizar la medida, entre otros). Los resultados se expresan en unidades de pH. A pesar de que algunos pH-metros permiten leer tres cifras decimales, en suelos no tendrá significación más que el primer decimal.

La **acidez intercambiable** o potencial expresa la concentración de protones en la solución del suelo, más los que se liberan de las sedes de intercambio y los que se originan por la hidrólisis de formas de aluminio fácilmente intercambiables. Esta liberación tiene lugar al realizar las medidas con una solución salina de KCl o de CaCl₂ no tamponada. El pH_K medido con KCl suele dar valores de entre 0,5 a 1 unidad de pH más bajos que el pH_w.

Las reacciones que tienen lugar son:

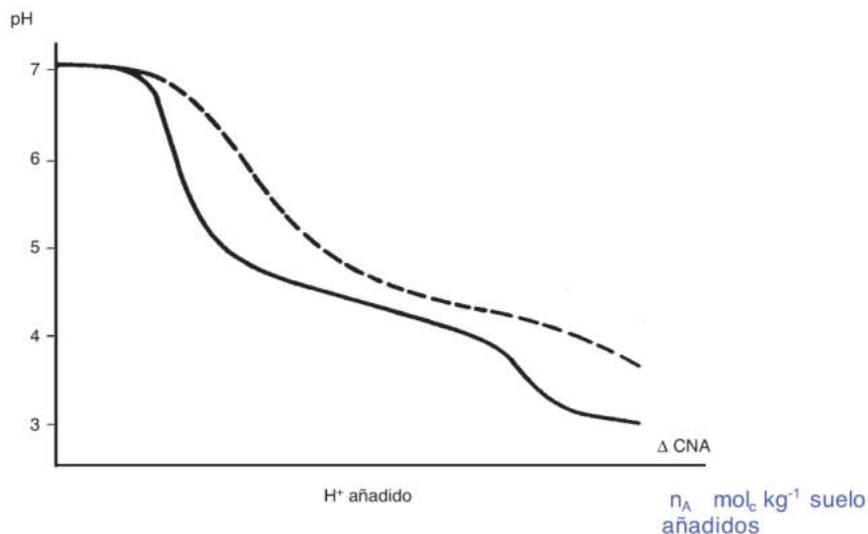


En el caso del aluminio:



$$K_c = \frac{[\text{Al}(\text{OH})^{2+}][\text{H}^+]}{[\text{Al}^{3+}]}$$

La **acidez total** o valorable es la que se mide valorando con una base. La valoración potenciométrica permite dibujar la **curva de neutralización** característica de cada horizonte de un suelo, cuyas pequeñas plataformas muestran que en el suelo hay componentes que tienen capacidad para tamponar los cambios bruscos de pH. El poder de amortiguación (β_H) expresa la cantidad de ácido o de base (n_A) necesaria para hacer variar una unidad el pH.



Los componentes que actúan como agentes tampón en el suelo varían en función del intervalo de pH del medio:

pH del suelo	Agente tampón
2,0–4,0	Oxidación de la pirita y otros sulfuros
4,0–5,5	Compuestos de aluminio
5,5–6,8	Complejo de intercambio catiónico
6,8–7,2	Materia orgánica y minerales
7,2–8,5	Carbonato cálcico y magnésico
8,5–10,5	Carbonato sódico, Na ⁺ intercambiable

5. FUENTES DE ACIDEZ EN EL SUELO

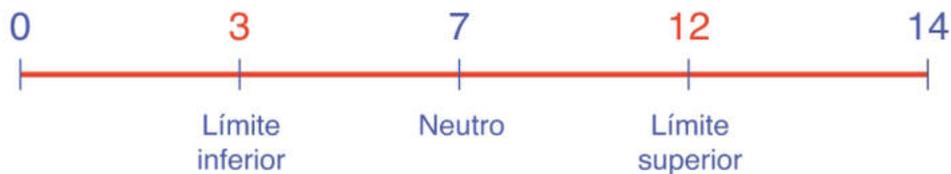
La hidrólisis de las distintas formas de aluminio constituye una **fuentes de acidez en el suelo**, junto a la que generan los grupos ácidos de la materia orgánica (carboxílicos y fenólicos); los ácidos solubles (producidos por la oxidación de la pirita, en condiciones muy especiales); la adición de ácidos y productos acidificantes a partir de la atmósfera; extracción de cationes por parte de las plantas y por las cosechas; los procesos de oxidación, tales como la nitrificación; la producción de ácidos orgánicos por los microorganismos, entre otras.

6. ESTUDIAR E INTERPRETAR

G2. ¿Se podría medir la acidez potencial con CaCl₂? ¿Cuál sería la reacción química que tendría lugar en este caso?

7. INTERVALO DE EXISTENCIA DEL pH

El intervalo de existencia del pH en los suelos va de pH 2–3 (suelos muy fuertemente ácidos) a pH 12 (suelos alcalinos). Los valores extremos del intervalo no son frecuentes en los suelos y, además, resultan muy desfavorables, tanto para los cultivos, como para las infraestructuras enterradas dado el riesgo de provocar corrosiones en el hormigón y en conducciones metálicas enterradas.



La productividad de las plantas de cultivo es máxima en determinados intervalos de pH, en los que el crecimiento es óptimo. Varía de unas especies a otras y, dentro de una misma especie, según variedades (Porta *et al.*, 2005, pág. 327). Fuera de ellos, el exceso de acidez o de alcalinidad hacen que las condiciones sean subóptimas para la actividad biológica en el suelo. Por debajo de pH 5,5, la solubilidad del aluminio aumenta, de tal manera que llega a ser tóxico para las plantas.

8. CONDICIONES ECOLÓGICAS

La acidificación de un suelo es un proceso natural en el que inciden, principalmente: el clima, el material originario, la vegetación, la materia orgánica, el tiempo, el manejo del suelo (uso de abonos acidificantes), el aporte de contaminantes por actividades industriales (lluvia ácida) y otras fuentes de acidez.

Los **suelos ácidos** son característicos de zonas de clima húmedo. En suelos con régimen de humedad percolante (údic), el agua aportada por las precipitaciones supera con mucho la evapotranspiración durante varios meses al año. Ello hace posible un lavado progresivo de cationes basificantes (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺). A lo largo de los años se van perdiendo cationes basificantes y, por otro lado, son extraídos por las plantas como nutrientes,

todo ello induce una acidificación progresiva del suelo. El lavado puede ir asociado a un aporte de sustancias acidificantes capaces de liberar protones: ácidos orgánicos procedentes de descomposición de la materia orgánica incorporada; por el CO_2 desprendido por la respiración y fermentaciones; por aporte de fertilizantes acidificantes, como los amoniacales; por la fijación de nitrógeno atmosférico o por aportes de lluvia ácida. Los materiales originarios ricos en sílice favorecen la acidificación, a igualdad de las demás condiciones, mientras que los calizos la frenan.

En suelos ácidos, las plantas sensibles se ven afectadas por la toxicidad del aluminio, por la del manganeso y por la deficiencia en calcio, que ocurren simultáneamente. Al aumentar la acidez, el aluminio y el manganeso se hacen más solubles y pueden encontrarse en formas soluble e intercambiable, siendo la causa de la toxicidad en suelos con pH por debajo de 5,5. El aluminio inhibe la división celular y la elongación de las raíces, que se concentrarán en la parte superior del suelo y presentarán un color marrón. En zonas intertropicales húmedas existen grandes áreas con limitaciones para el cultivo debido a la acidez excesiva y problemas de toxicidad.

Por el contrario, plantas que requieren grandes cantidades de hierro, como las azaleas y el rododendro prefieren suelos ácidos, ya que en ellos el hierro está más biodisponible. El bloqueo de la absorción del hierro en suelos calizos puede provocar un amarilleamiento en las plantas sensibles, síntoma de una deficiencia en hierro (clorosis férrica).

En el caso de las hortensias (*Hydrangea macrophylla*), el color de las flores puede variar según el pH del suelo, de manera que las que se cultivan en suelos de pH próximos a la neutralidad tienen flores rosas y rojizas, mientras que las que disponen de aluminio presentan tonalidades azuladas.



J. Porta

En los **suelos con pH próximos a la neutralidad** (pH = 7), las sedes de intercambio tienden a estar ocupadas por cationes basificantes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ .

Los **suelos básicos** se caracterizan por un régimen de humedad no percolante (árido, xérico o ústico), típicos de regiones áridas y semiáridas. El complejo de cambio está dominado por cationes basificantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+).

El carbonato cálcico, que suele ser un componente mayoritario en estos suelos, amortigua o tampona las variaciones de pH, que por ello tiene un valor alrededor de 8,5. Este valor corresponde al pK de la reacción de equilibrio carbonato-bicarbonato, si bien pueden intervenir otros factores.

Los **suelos fuertemente ácidos** (pH < 4), presentan H^+ , en la solución del suelo. Son suelos de polders ácidos y suelos en los que ha habido una oxidación de sulfuros por drenaje, en ausencia de carbonato cálcico (suelos de sulfatos ácidos); y los suelos de turberas ácidas (turba de *Sphagnum*, musgo).

Los **suelos alcalinos** (pH 9–12) se presentan en medios áridos y semiáridos. El porcentaje de sodio intercambiable es de un 15% o mayor, suele haber carbonato sódico, lo que hace que el pH sea tan elevado. El sodio produce un deterioro de la estructura del suelo, con lo que las propiedades físicas son extremadamente desfavorables, además, puede haber toxicidad por sodio y deficiencias en micronutrientes.

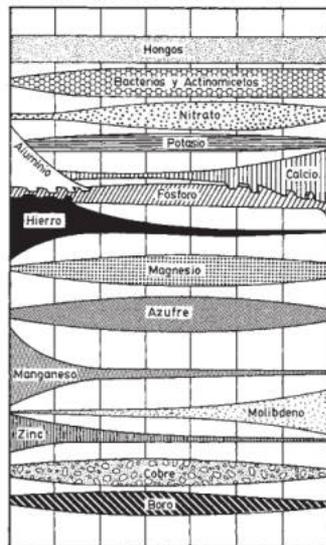
9. FUNCIONES DE LOS SUELOS QUE SE PUEDEN VER AFECTADAS POR LA REACCIÓN DEL SUELO

La acidez o la basicidad de los horizontes de un suelo tiene efectos sobre las propiedades y características **físicas** del suelo y por ejemplo, sobre la estructura; sobre el riesgo de erosión; **químicas**, por ejemplo, la movilidad de los elementos y **biológicas**, por ejemplo, sobre el predominio de bacterias en pH básicos y de hongos en los ácidos; la nodulación en las leguminosas es deficiente en suelos ácidos por deficiencia en molibdeno; los cultivos posibles quedan restringidos y los rendimientos esperables disminuyen. Por ello, la reacción del suelo incide sobre sus funciones potenciales:

- Producción de biomasa (biodisponibilidad de nutrientes y problemas por elementos tóxicos, etc.).
- Funciones medioambientales con efecto depurador: filtrado, transformaciones, transferencia de elementos a otros compartimentos ambientales, etc.
- Función hidrológica, por ejemplo, la facilidad del movimiento del agua.
- Hábitat biológico.
- Soporte de infraestructuras, por ejemplo, riesgo potenciales para conducciones de hierro o de hormigón enterradas.
- Protección de restos arqueológicos, susceptibles de ser afectados si aumenta la acidez del suelo, entre otras.

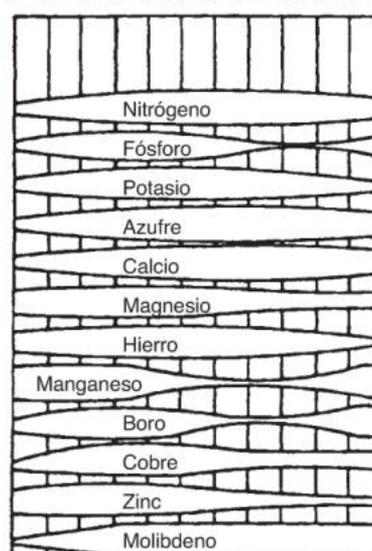
Truog estudió la movilidad de los diferentes elementos y la representó del siguiente modo:

4,5 5,0 5,5 6,0 6,5 7,0 7,5 8,0



Suelos minerales

4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 6,5 7,0 7,5 8,0 8,5 9,0 9,5



Suelos orgánicos

Para determinar con mayor detalle los efectos del pH del suelo deberá estudiarse la siguiente tabla:

pH	Evaluación	Efectos esperables en el intervalo
< 4,5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables.
4,5-5,0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al^{3+} y Mn^{++} .
5,1-5,5	Fuertemente ácido	Exceso: Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Deficiencia: Ca, K, N, Mg, Mo, P, S. Suelos sin carbonato cálcico. El hormigón ordinario resulta atacado. Actividad bacteriana escasa.
5,6-6,0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos.
6,1-6,5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes.
6,6-7,3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos. Por debajo de pH = 7,0 el carbonato cálcico no es estable en el suelo.
7,4-7,8	Medianamente básico	Suelos generalmente con $CaCO_3$.
7,9-8,4	Básico	Disminuye la disponibilidad de P y B. Deficiencia creciente de: Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Suelos calizos. Clorosis férrica debida al HCO_3^- .
8,5-9,0	Ligeramente alcalino	En suelos con carbonatos, estos pH altos pueden deberse al $MgCO_3$, si no hay sodio intercambiable. Mayores problemas de clorosis férrica (Russell, 1978).
9,1-10,0	Alcalino	Presencia de carbonato sódico.
> 10,0	Fuertemente alcalino	Elevado porcentaje de sodio intercambiable (ESP > 15 %) Toxicidad: Na, B. Movilidad del P como Na_3PO_4 . Actividad microbiana escasa. Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo.

La población microbiana de la rizosfera se ve afectada por el pH del medio. Los principales grupos de microbios presentan diferentes intervalos de tolerancias de pH: los que están adaptados a pH más elevados (pH = 10) son los actinomicetos, mientras que las bacterias crecen mal en pH ácidos, en los que se ven favorecidos los hongos las bacterias quimioautotróficas que oxidan el azufre (*Acidithiobacillus*) son las que toleran pH más ácidos (pH = 2-3).

En lo referente a la fauna del suelo, las distintas especies pueden presentar un estrecho intervalo de pH, para su crecimiento óptimo, por lo que no serán sustituidas por otras o bien puede haber desarrollado mecanismos para neutralizar un cierto grado de acidez, como es el caso de las lombrices de tierra, que poseen glándulas calcíferas a los lados de la faringe (Killman, 2001).

10. INTERPRETAR INFORMACIÓN

G2. Seleccionar el término que corresponda según el contexto.

El pH del suelo condiciona la biodisponibilidad de los nutrientes, así por ejemplo, en suelos calizos las plantas de verán (1) *favorecidas / afectadas desfavorablemente* en nutrición de manganeso, ya que el sistema radicular lo puede absorber (2) *más fácilmente / muy poco*. En el caso del fósforo los pH muy ácidos y muy básicos (3) *favorecen / dificultan* su biodisponibilidad. Por el contrario, la toxicidad por aluminio o por manganeso sólo será preocupante en suelos (4) *calizos / muy ácidos*. En suelos en los que haya zinc, como en los estériles de minería, en antiguas áreas industriales o en los que se aporte con purines de cerdo, la biodisponibilidad y toxicidad se presentará con pH (5) *muy ácidos / básicos*. En situaciones de toxicidad por cobre, algunas plantas pueden exudar cobre complexando el metal en los tejidos fúngicos, que forman una asociación (6) *bacteriana / micorrizada* con el sistema radicular.

11. FACTORES DE LA ACIDEZ: TEORÍA DEL ALUMINIO

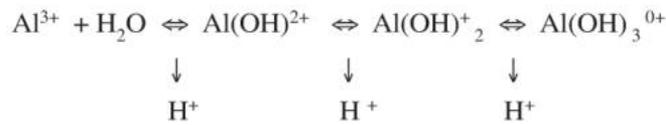
Como ya se ha indicado, la idea de que los suelos ácidos son aquellos cuyo complejo de cambio está saturado en un grado mayor o menor de protones, que fue propuesta por Bradfield (1923). Tanto esto, como el que las arcillas se comporten como ácidos débiles (arcilla – H), no resulta correcto. Las investigaciones llevadas a cabo pos-

teriormente han permitido esclarecer estos aspectos, y han llevado a un cambio importante en la concepción de la naturaleza de la acidez de los suelos a partir de 1950. Se pudo comprobar que las arcillas-H⁺ no son estables y colapsan, que los suelos se comportan como ácidos débiles (están parcialmente disociados) y que bajo condiciones de fuerte acidez (pH < 5,5) el aluminio contribuye a la acidez con liberación de protones.

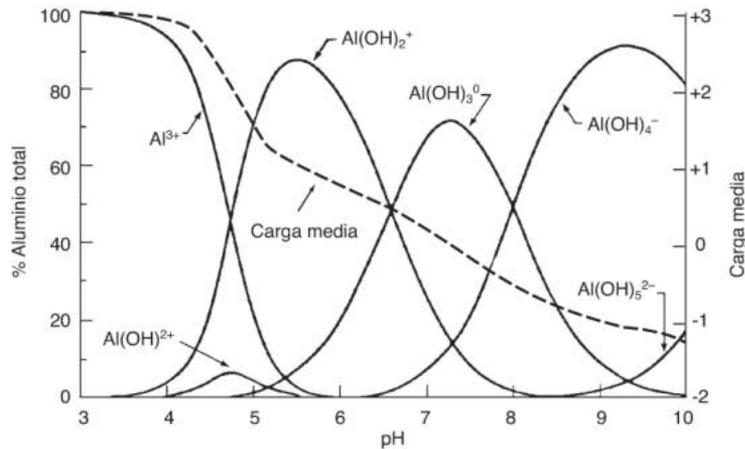
Ello llevó a formular la **teoría del aluminio**, que es la que se acepta en la actualidad y según la cual las arcillas - Al tienen un comportamiento de ácido débil. También se destacó la importancia del manganeso y del hierro en el comportamiento de los suelos ácidos y la respuesta de los cultivos (Bornemisza, 1965).

El aluminio que se halla en las redes cristalinas de las arcillas o en forma de óxido, Al₂O₃ o de gibbsita [Al(OH)₃] no se encuentra biodisponible, ni interviene en procesos de disolución, ni en los de intercambio. La meteorización por hidrólisis en medio ácido puede hacer colapsar la estructura de las arcillas, con lo que el aluminio será liberado y tenderá a precipitar en forma de gibbsita, Al(OH)₃, si el pH del medio es superior a 5,5. Por el contrario, a pH más ácidos el aluminio se halla en forma soluble y, por consiguiente, se halla en la solución y en las sedes de intercambio. En estas formas es biodisponible y, al ser absorbido por plantas sensibles, puede provocar efectos tóxicos. Cuando el aluminio intercambiable representa entre un 15 y un 30%, según la sensibilidad de los cultivos existirán problemas por toxicidad por aluminio.

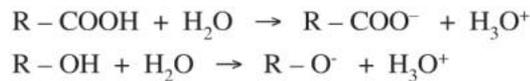
Las reacciones en las que interviene el aluminio en forma simplificada se pueden escribir como:



Por consiguiente, se puede afirmar que la hidrólisis del aluminio es una fuente de protones, con un comportamiento como ácido débil. Los campos de existencia de las distintas formas de aluminio son:



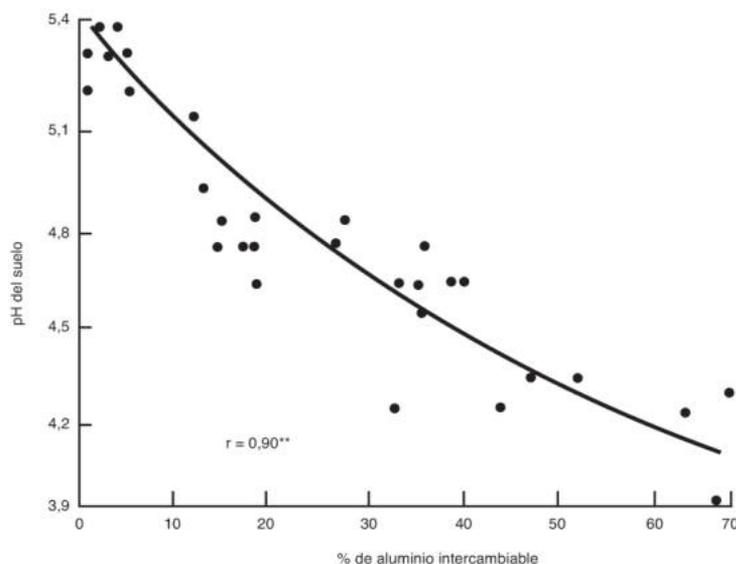
También serán fuente de protones al hidrolizarse, los grupos carboxilos y fenólicos de la materia orgánica:



La toxicidad del **manganeso** está asociada a la acidez y a condiciones de mal drenaje y a suelos ricos en materia orgánica, factores que favorecen el paso de Mn(IV) a Mn(II), que es la forma soluble. En el caso del hierro, la forma biodisponible es la Fe(II), que puede alcanzar concentraciones elevadas en suelos hidromorfos, pudiendo llegar a ser tóxica para los cultivos de arroz.

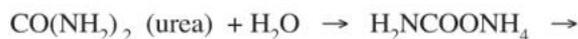
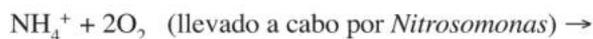
12. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras los resultados expresados en la figura.
b) Formule algunas interpretaciones y posibles efectos para los cultivos.



13. CALCULAR E INTERPRETAR

- E3.** a) Calcular la actividad de H^+ en la solución de un horizonte cuyo pH sea 4,8 y evaluar el valor del resultado. ¿Este suelo puede tener problemas por aluminio intercambiable o por sodio intercambiable? ¿Por qué?
- b) Completar las reacciones y establecer sus efectos



14. CAPACIDAD TAMPÓN DEL SUELO

En los suelos existen distintos componentes que pueden contribuir a amortiguar los cambios de pH al aportar un ácido o una base: **agentes tampón**. Esta resistencia a los cambios de pH o capacidad tampón de los suelos constituye una característica muy importante para la vida en el suelo.

La **capacidad de amortiguación** de un suelo aumenta con el contenido de arcilla, materia orgánica, carbonato cálcico o gibbsita, entre otros agentes. La contribución del agente tampón varía según el intervalo de pH del medio: de 2 a 4 (pirita y otros sulfuros), de 4 a 5,5 (compuestos de aluminio), de 5,5 a 6,8 (arcilla por su capacidad de intercambio catiónico), de 6,8 a 7,2 (arcilla y materia orgánica), de 7,2 a 8,5 (carbonato cálcico y magnésico), de 9,5 a 10,5 (carbonato sódico y sodio intercambiable).

El **factor cantidad** de acidez o de basicidad expresa la cantidad de ácido (n_A) o de base (n_B) aportada. Añadiendo una base o un ácido se obtiene la **curva de neutralización** (p. 230). La forma de la curva permite interpretar la presencia en el suelo de diferentes componentes por su capacidad tampón a determinados intervalos de pH.

FACTOR CAPACIDAD

Expresa el poder de amortiguación o capacidad tampón:

$$\beta_H = \Delta n_A / \Delta pH$$

Siendo Δn_A los moles L^{-1} añadidos para producir una variación de una unidad de pH.

La **capacidad de neutralización de ácido** (CNA) expresa la cantidad de ácido fuerte necesario para cambiar el valor del pH de un sistema acuoso, al pH al cual la carga neta de los iones que no reaccionan con OH^- o H^+ es cero. Análogamente, se define la **capacidad de neutralización de base** (CNB). La acidificación supone una disminución de la capacidad neutralizante ácida (CNA) y/o un incremento de la capacidad neutralizante básica (CNB).

15. ACIDEZ Y PROBLEMAS AMBIENTALES

Se pueden citar algunos ejemplos de problemas medioambientales derivados de la acidez:

- En escombreras de minería del carbón a cielo abierto que contengan pirita, ésta, en contacto con el aire, puede pasar a ácido sulfúrico, que puede ser arrastrado por el agua de escorrentía, provocando contaminación fuera del sitio.
- La oxidación microbiana de azufre reducido puede provocar una degradación del suelo por acidificación. Ello tiene lugar al drenar suelos que contengan sulfuros y que esto no se tenga en cuenta al gestionar suelos de este tipo. Se puede inducir un proceso de degradación de carácter irreversible, tanto desde un punto de vista de su viabilidad técnica, como económica. Previamente al drenaje de un zona debe verificarse si existe pirita y si hay carbonato cálcico. Al oxidarse se producirá ácido sulfúrico que, en ausencia de carbonato cálcico, dará lugar a sulfatos ácidos y jarosita. El suelo resultante tendrá un pH de alrededor del 3, es decir, será extremadamente desfavorable para la actividad biológica.
- Ferrólisis (ver 8.7).

16. GESTIÓN DE SUELOS ÁCIDOS

Las estrategias frente a problemas en suelos ácidos puede ir orientadas a:

- Utilización de especies o variedades tolerantes al aluminio. El grado de tolerancia puede verse influenciada por otros factores. Así, el maíz es más tolerante, si la nutrición nitrogenada es adecuada.
- Aportar enmiendas para hacer disminuir la acidez por encima de 5,5, intentando llegar al intervalo aceptable para el cultivo objetivo, al tiempo que con ello se aportará calcio y magnesio.
- Incorporar al suelo bases que precipiten o formen complejos con el aluminio.
- Inundar el suelo o mantener la capa freática alta gestionando adecuadamente el sistema de drenaje, ya que en estas condiciones el pH aumentará. Esto es aplicable a campos de arroz, por ejemplo.

Cultivos	Sensibilidad a la acidez
Alfalfa, judías, guisantes, trébol rojo.	
espinaca, algodón	Plantas muy sensibles
Trigo, soja, trébol blanco, sorgo	Sensibles
Cacahuete, patata, arroz, maíz	Moderadamente tolerantes
Piña, té, café	Tolerantes

17. ESTUDIAR Y DISCUTIR

E3. Redactar un informe acerca de los siguientes aspectos:

En una zona con problemas en el desarrollo de la vegetación, se hace una calicata y se estudia el modelo de distribución del sistema radicular. Se observa que las raíces se hallan concentradas en la parte superior del suelo, presentan un desarrollado de forma achaparrada, están engrosadas y su color es pardo.

- a) Indicar hacia dónde debería dirigirse la investigación para aclarar cuál es el problema.
- b) Formular alguna hipótesis acerca de los efectos que puede estar teniendo un desarrollo radicular como el observado.
- c) En el caso de querer utilizar un abono químico, recomendar cuáles deberían evitarse de entre los siguientes: nitrato amónico, sulfato amónico y amoníaco líquido. Justificarlo desde la perspectiva de su reacción química en el suelo. Escribir las correspondientes reacciones químicas.

18. ESTUDIAR E INFORMAR

E3. El anteproyecto de una autopista se ha remitido para consulta a un grupo de expertos, entre ellos usted. Al estudiar el documento observa que propone dos trazados alternativos. Uno de ellos supone atravesar una zona

cuyos materiales no son calizos y contienen sulfuros, principalmente pirita, materiales que quedarán al aire en los taludes y túneles. La autopista pretende comunicar importantes núcleos de población de una zona de clima húmedo. Redacte un informe en el que justifique:

- Si este trazado puede suponer algún riesgo ambiental, en cuyo caso fundamente sus argumentos, basándose en los valores de pH y formule las reacciones químicas que podrían tener lugar.
- ¿Cómo podrían verse afectados en su comportamiento el Mn, Cu, Ni, Al y Zn?
- ¿Sería esperable que apareciesen coloraciones rojas y amarillas en los taludes?
- ¿Podrá haber algún impacto sobre las aguas superficiales y la vegetación?

19. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más idóneo según el contexto de entre los cuatro propuestos:

En un suelo con pH de 4,8, las plantas sensibles tendrán problemas por (1) _____. Al poder tampón de este suelo frente a las variaciones de pH contribuirá (2) _____. El valor del pH medido en KCl 1N en una relación suelo: agua de 1: 2,5 y el valor del pH al agua en la misma relación suelo: agua, son (3) _____, ello es debido a una reacción de (4) _____.

Los efectos esperables de una lluvia ácida serán (5) _____ en este suelo que en un suelo calizo, debido al (6) _____ del carbonato cálcico en este último. La persistencia de una lluvia ácida sobre los sillares calizos como los de muchas catedrales góticas producirá un deterioro del edificio y sus esculturas expuestas al aire, con formación de (7) _____.

Los cationes presentes en las sedes de intercambio catiónico de un suelo calizo son (8) _____. Dado que la alfalfa es un cultivo exigente en calcio, el comportamiento esperable de este cultivo en un suelo de pH 5,0 será (9) _____, y la nodulación (asociación de las raíces de la leguminosa con bacterias fijadoras de nitrógeno) será (10) _____. Al aumentar el pH con una enmienda caliza, la biodisponibilidad del aluminio disminuye, ya que por hidrólisis se formará (11) _____ que precipita.

La absorción de nutrientes por las raíces (NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , entre otros) puede provocar una acidificación a corto plazo en el suelo, lo que implica que tiene lugar una reacción de intercambio entre la solución del suelo y la raíz, en la que deben intervenir (12) _____, mientras que la absorción de nitrógeno en forma nítrica implica una liberación de iones bicarbonato e hidroxilos, por lo que el pH de la rizosfera decrece, si la fuente dominante de nitrógeno es (13) _____. Los cambios de pH tienen lugar en micrositos y serán (14) _____ acusados en un suelo arcilloso que en uno arenoso formado por arena cuarzosa, ya que este suelo (15) _____ tamponado.

- | | | | |
|--|------------------------------------|---|--|
| (1) a) sodio | b) $\text{Al}(\text{OH})_3$ | c) Al – intercambiable | d) Al soluble e intercambiable |
| (2) a) el CaCO_3 | b) el Na_2CO_3 | c) la hidrólisis del aluminio | d) la gibbsita |
| (3) a) iguales | b) mayores | c) menores | d) difieren en dos unidades |
| (4) a) hidrólisis | b) oxidación | c) hidratación | d) intercambio |
| (5) a) mayores | b) menores | c) iguales | d) mucho menores |
| (6) a) poder tampón | b) calcio | c) ión bicarbonato | d) ión calcio |
| (7) a) polvo | b) yeso | c) ácido | d) estalactitas |
| (8) a) Ca^{2+} , Al^{3+} | b) Al^{3+} , H^+ | c) Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ | d) Fe^{2+} y Al^{3+} |
| (9) a) malo | b) adecuado | c) regular | d) excelente |
| (10) a) adecuada | b) muy alta | c) deficiente | d) intensa |
| (11) a) yeso | b) alúmina | c) $\text{Al}(\text{OH})_3$ | d) Al_2O_3 |
| (12) a) protones | b) Al^{3+} | c) Ca^{2+} | d) HCO_3^- |
| (13) a) amoniacal | b) nítrica | c) N_2 | d) NH_4NO_3 |
| (14) a) poco | b) más | c) mucho menos | d) mucho más |
| (15) a) está muy | b) puede estar | c) está débilmente | d) no está |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Saber de la existencia de ecosistemas salinos y de la degradación de suelos por salinidad.
Conocer la química de los suelos afectados por salinidad y la respuesta de las plantas.
Saber distinguir entre salinidad, sodicidad y alcalinidad.
Conocer la forma de llevar a cabo diagnósticos en campo y en el laboratorio.
Establecer las bases para la gestión de suelos afectados por salinidad.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Suelos afectados por salinidad: enfoques posibles.
Suelos salinos: concentración de la solución exterior.
 Salinización.
 Criterios de diagnóstico de la salinidad en campo.
 Medida de la salinidad: cantidad y tipo.
 Variabilidad espacio-temporal de la salinidad.
 Efectos de la salinidad sobre los cultivos.
 Gestión de la salinidad del suelo.
Suelos sódicos: el sodio en las sedes de intercambio.
 Sodificación.
 Criterios de diagnóstico de la sodicidad en campo.
 Medida de la sodicidad: unidades.
 ESP y SAR.
 Criterios de diagnóstico de la sodicidad y alcalinidad.
 pH de los suelos sódicos y de los suelos alcalinos.
 Bases para la mejora de suelos sódicos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Ed. Mundi-Prensa, cap. 24. Madrid, 2003.
Chhabra, R.: *Soil Salinity and Water Quality*. A.A. Balkema, 284 pp. Rotterdam. 1996.
Suarez, D.L.: *Chemistry of salt-affected soils*. In: Chemical Processes in Soils. M.A. Tabatabai and D.L. Sparks (eds.). Soil Science Society of America, Special Publication Book Series. Madison, WI, 2005.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término que mejor se adapte al contexto, de entre los propuestos:

Una organización espacial que permite estudiar una cubierta edáfica se denomina (1) _____. Los suelos situados a lo largo de (2) _____ están relacionados funcionalmente y constituyen una (3) _____. Este *contuum* topográfico reconoce la continuidad (4) _____ en un paisaje, por lo que las actuaciones en las partes altas pueden producir un impacto no deseado en los suelos situados en las partes bajas, por el transporte de agua de escorrentía superficial o subsuperficial.

La denominación de un horizonte (5) _____ como Bt_{na}, si bien no es aceptada por todos los Servicios de Suelos, no crea confusión, ya que la t (del alemán *ton*), indica la presencia de (6) _____ y na (del latín *natrium*) indica la presencia de (7) _____. Este último se halla (8) _____ y hace que las partículas de arcilla se hallen (9) _____ y la estructura sea (10) _____.

- | | | | | |
|------|---------------------|----------------|----------------------------|-----------------------|
| (1) | a) edafopaisaje | b) catena | c) toposecuencia | d) pedión |
| (2) | a) una ladera | b) un paisaje | c) un edafopaisaje | d) un meridiano |
| (3) | a) climosecuencia | b) secuencia | c) toposecuencia | d) litosecuencia |
| (4) | a) del suelo | b) del paisaje | c) de la humedad | d) de la vida |
| (5) | a) de diagnóstico | b) genético | c) del suelo | d) edáfico |
| (6) | a) arcilla iluviada | b) arcilla | c) turrículas | d) tixotropía |
| (7) | a) nátrico | b) sodio | c) sodio intercambiable | d) sodio en solución |
| (8) | a) en la doble capa | b) precipitado | c) en la solución exterior | d) en el horizonte |
| (9) | a) dispersas | b) floculadas | c) en dominios | d) agregadas |
| (10) | a) muy favorable | b) buena | c) muy inestable | d) granular compuesta |

2. SUELOS AFECTADOS POR SALINIDAD

Desde un punto de físico-químico son posibles tres situaciones muy diferentes según que:

- Las propiedades del suelo vengán controladas por la concentración de la solución exterior (modelo de la doble capa) y ésta afecte al crecimiento de las plantas sensibles (**suelos salinos**).
- La presencia de sodio en las sedes de intercambio de la doble capa se halle por encima de un determinado porcentaje que, a pesar de no ser muy elevado, determine el comportamiento del suelo (**suelos sódicos y suelos alcalinos**).
- La solución exterior presente una concentración que afecte a las plantas sensibles y, además, haya sodio en las sedes de intercambio (**suelos salino-sódicos**).

Estas tres clases de suelos se agrupan bajo la denominación genérica de **suelos afectados por salinidad**, lo que puede inducir a confusiones conceptuales, por el uso del término salinidad.

3. SUELOS SALINOS: LA CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN EXTERIOR

Los **suelos salinos** constituyen ecosistemas naturales de gran interés, característicos de marismas, llanuras costeras y zonas de interior, en este último caso en medios áridos y semiáridos. Las características edáficas y la vegetación halófila hacen que la conservación de estos ecosistemas sea importante desde un punto de vista medioambiental.

No obstante, la salinidad puede ir asociada a transformaciones en regadío, a perímetros de riego mal gestionados durante años y al uso para riego de aguas de mala calidad. En estos casos han tenido o estarán teniendo lugar procesos de degradación de los suelos por salinización, lo que pone en peligro el objetivo de aumentar las producciones y el bienestar de las personas con el riego. A escala global, la mayoría de agrosistemas de regadío presentan en mayor o menor grado problemas por salinización, por falta de un manejo adecuado.

SUELOS SALINOS

Son aquellos suelos que contienen cantidades importantes de sales más solubles que el yeso, lo que interfiere con el crecimiento de la mayoría de los cultivos y plantas sensibles.

Tal como se indicó al estudiar los elementos en solución, la concentración se mide por medio de la conductividad eléctrica en un extracto de pasta saturada. El umbral para considerar que un suelo es salino se ha establecido en $CEs \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ a 25 °C.

En la WRB (2006) se clasifican como **Solonchak**^{WRB}, mientras que en Soil Taxonomy (2006) pueden constituir una *fase salina*, aplicable a diversos niveles jerárquicos o bien, si la salinidad es extrema, pueden ser incluidos en el Suborden de los **Salid** dentro del Orden de los Aridisoles.

Salinización

La **salinización** es un proceso mediante el cual tiene lugar una acumulación secundaria de sales más solubles que el yeso, por lo general cloruros y sulfatos de sodio y magnesio, lo que provoca una concentración elevada en la fase líquida del suelo (solución exterior). Por la movilidad de los iones implicados (diagrama de Mason), raramente se produce su acumulación *in situ*, derivada de un proceso de meteorización (salinización primaria).

Los procesos de salinización se presentan en suelos con régimen de humedad ascensional, con translocaciones capilares ascendentes a partir de una capa freática salina y lavado en épocas de lluvia. Estos procesos pueden tener lugar en ambientes áridos (régimen de humedad arídico) y semiáridos (régimen de humedad xérico), así como en llanuras costeras, estuarios y deltas y en zonas de cultivo por acción antrópica (riego). Por lo general, las sales tienden a acumularse en posiciones topográficas de fondo, con drenaje deficiente, a donde han sido llevadas por el agua de escorrentía superficial o subsuperficial. En el caso del riego, se acumulan allí donde no se haya previsto un drenaje artificial, asociado al sistema de riego, tal como se requiere.

La salinización de origen antrópico puede producirse, también, en campos petrolíferos, al derramar agua salinas bombeadas asociadas al petróleo.

Criterios de diagnóstico de la salinidad en campo

En campo se puede diagnosticar salinidad en un suelo atendiendo a la presencia de una **vegetación halófila** (*Salicornia*, *Suaeda*, *Arthrocnemum*, *Limonium*, entre otros géneros); por la presencia de **eflorescencias salinas** en la superficie del suelo en la estación seca, de color blanco, y que saben salado (presencia de sodio) o amargo (presencia de magnesio). Un ensayo de cloruros (AgNO_3 5%) y sulfatos (BaCl_2 10%) permite corroborar el diagnóstico de presencia de sales solubles (Porta *et al.*, 2005, pág. 119).

3.1. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras la imagen.
b) Formule alguna hipótesis acerca de las características de la vegetación y del suelo.



J. Porta

Medida de la salinidad: cantidad y tipo

a) Concentración de iones en solución

La forma más sencilla de caracterizar la salinidad de una muestra en el laboratorio consiste en medir la **conductividad eléctrica** (CE) de un extracto de suelo, realizando la medida con un conductímetro. El valor de la CE está estrechamente relacionado con la concentración de sales solubles.

Por lo general se mide la CE_s, que es la CE de un **extracto de pasta saturada**, obtenido saturando la muestra con agua desmineralizada, dejando que se equilibre durante un cierto tiempo y succionando de forma relativamente rápida el líquido haciendo el vacío. La conductividad eléctrica de un extracto de pasta saturada es el mejor indicador cuantitativo de las sales disueltas en condiciones de campo, ya que incluye el factor textura. La unidad SI para la CE es el decisiemens por metro a 25°C: dS m^{-1} a 25°C. Dado que la CE depende de la temperatura, deberá introducirse un factor de corrección que tenga en cuenta la temperatura de la muestra: $\text{CE}_{25} = f_t \times \text{CE}_t$.

Los suelos salinos son aquellos que tienen una CE_s igual o superior a 4 dS m^{-1} a 25°C y, de acuerdo con su definición, su porcentaje de saturación de sodio intercambiable es inferior al 15% y su pH es inferior a 8,5. Los suelos altamente salinos pueden llegar a tener una CE_s de 60 o más dS m^{-1} a 25°C. Un grado de salinización elevado da lugar a la presencia de un horizonte **sálico**, en cuya definición se utiliza el valor de la CE_s y el del producto de la CE_s por el espesor del horizonte. Los criterios son diferentes según el sistema de clasificación utilizado (Porta *et al.*, 2005, pag. 240).

b) Naturaleza de los iones causantes de la salinidad

Los principales cationes causantes de salinidad en el suelo son: Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , que van asociados principalmente a los aniones: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Por consiguiente, serán estos iones los que de forma sistemática se analizarán en estudios para caracterizar la salinidad de un suelo y poder diagnosticar de este modo los posibles efectos, en relación a las distintas especies y variedades de plantas de cultivo. La cantidad de sales (g kg^{-1} o g L^{-1}) a que daría lugar el evaporar un extracto de suelo, no se utiliza como criterio, dado el grado de incertidumbre que presenta su determinación por evaporación. Ello es debido a que las sales que se forman presentan diferentes grados de hidratación, con lo que el peso final se ve afectado por el procedimiento de secado y, por otro lado, al tratarse de sales muy higroscópicas, también interfiere en los resultados de los análisis.

Aunque no se utilice como criterio, interesa saber el orden de magnitud de la solubilidad de las sales solubles, para entender porque no generan efectos salinos todos los compuestos que, desde un punto de vista químico, se denominan sales. Las sales denominadas «más solubles que el yeso» tienen solubilidades en **agua pura** que se encuentran entre 200 y 500 g L⁻¹, frente a los 2,6 g L⁻¹ del yeso (CaSO₄ · 2H₂O), que caracteriza a los **suelos yesosos**, y la casi insolubilidad de la calcita (CaCO₃), que caracteriza los **suelos calizos**. Los efectos sobre las plantas de la presencia de yeso o de carbonato cálcico en el suelo nada tienen que ver con los de la salinidad.

Variabilidad espacio-temporal de la salinidad

Al observar un campo, si la vegetación no está uniformemente distribuida, sino que hay rodales sin vegetación, se puede afirmar que, con mucha probabilidad, se trata de un problema de salinidad que habrá que investigar para corroborarlo. Este modelo de distribución de la vegetación muestra que la salinidad presenta una variabilidad espacial importante en sentido horizontal. Si se hace un sondeo y se mide la CEs a distintas profundidades, se obtiene el **perfil salino** del suelo.

El perfil salino analizado en una época seca y cálida en una zona de clima mediterráneo, se caracteriza por unos valores máximos de salinidad en la parte superior del suelo, ya que predominan las translocaciones capilares ascendentes. Este perfil será distinto del que se obtendría después de unas lluvias, ya que habrá habido un lavado de sales. Por consiguiente, la salinidad, presenta una **variabilidad espacio-temporal**, aspecto a tener en cuenta cuando se trabaja o se investiga sobre estos suelos. El hecho de que la salinidad del suelo presente este tipo de variabilidad se utiliza al plantear estrategias de mejora de estos suelos y obtener una mejor respuesta de los cultivos.

Dada la fragilidad de los perímetros de riego, interesa llevar a cabo un monitoreo del contenido de sales a lo largo del tiempo. El estudio de la salinidad mediante el extracto de pasta saturada constituye un método destructivo (requiere una nueva muestra cada vez) y consume mucho tiempo. Por ello se recurre al empleo de **sensores electromagnéticos** (SEM), método no destructivo y que permite realizar un gran número de medidas en poco tiempo. Para que las lecturas puedan ser comparables, deben realizarse a igual contenido de humedad en el suelo, lo que se cumple 24 horas después de una lluvia intensa o de un riego y se deben utilizar curvas de calibrado específicas.

Efectos de la salinidad sobre los cultivos

Los efectos sobre las plantas dependen tanto de la tolerancia de cada especie y cultivar, como del estadio de desarrollo de la planta. La respuesta de la planta no se corresponde a un valor umbral, sino que va siendo cada vez más acentuada a medida que la salinidad va en aumento.

La acumulación de sales más solubles que el yeso, en la cama de siembra puede provocar un retardo o una inhibición en la nascencia, un tamaño menor de la planta, necrosis en las hojas, disminución de rendimientos y la muerte de la planta antes de completar su ciclo. Ello puede deberse a efectos osmóticos, que dificultan la absorción de agua y a efectos ión-específico origen de toxicidades.

3.2. OBSERVAR E INTERPRETAR

- E3.** 1. Interpretar la siguiente información y redactar un informe al respecto.
- Describa con sus propias palabras el aspecto de este campo.
 - Formule alguna hipótesis acerca de las características de estos suelos. Indique cómo abordaría el estudio del problema.



J. Porta

2. En el siguiente edafopaisaje se puede contemplar una plataforma a lo lejos y un fondo plano en primer plano, en el que se observan eflorescencias blancas en la superficie del suelo y en los márgenes, así como ausencia de vegetación, lo que permite diagnosticar un problema de salinidad. Los agricultores de la zona baja se plantean la posibilidad de pedir una indemnización, por el impacto derivado de la puesta en riego de los suelos situados en la plataforma, ya que sus suelos no presentaban estos problemas de salinidad antes de dicha transformación. Buscar algún argumento científico que pueda respaldar la pretensión de los agricultores y la correspondiente demanda.

- a) Indicar la escala de observación a utilizar.
- b) ¿Cuál puede ser el mecanismo de salinización de los suelos de la zona baja?



J. Porta

Gestión de la salinidad del suelo

a) Estrategias de manejo

Dado que las distintas especies y variedades difieren en su tolerancia a la salinidad y a iones específicos (Na, Cl, B, entre otros), una estrategia de manejo reside en **seleccionar cultivos** de manera que su tolerancia a la salinidad se halle dentro del intervalo de variación de la salinidad del suelo en cuestión.

La tolerancia de los cultivos a la salinidad varía a lo largo de su ciclo, de manera que pueden ser altamente tolerantes en un estadio de desarrollo y sensibles en otro. Por lo general, las plantas son más sensibles durante la germinación y en las primeras etapas de crecimiento que posteriormente. Por ello, una estrategia de manejo puede consistir en **acondicionar la cama de siembra**, de manera que tenga un menor contenido salino en el momento de la siembra, lo que se puede conseguir por medio de un riego que lave las sales, justo antes de la siembra. **Situar las semillas o las plántulas** en aquellas partes de los surcos con menor riesgo de acumulación de sales constituye otra estrategia de manejo.

Los fertilizantes químicos son sales, por lo que su uso debe ser objeto de atención. Puede resultar útil utilizar como criterio el valor del **índice salino** relativo de cada fertilizante, tomado como valor 100 de referencia la conductividad eléctrica correspondiente a una solución de nitrato sódico (Porta y López-Acevedo, 2005, pág. 368).

b) Estrategias ligadas al manejo del riego: requerimientos de lavado y drenaje

Nos podemos preguntar por qué aumenta la salinidad con el riego. Todas las aguas de riego contienen un cierto contenido en sales disueltas, las aguas de buena calidad son, lógicamente, las de bajo contenido salino. Al plantear un riego se puede utilizar como criterio la demanda hídrica de la planta y demanda evaporativa de la atmósfera en las distintas épocas del año. Este tipo de balance no deja margen para que haya un exceso de agua, por lo que si el agua de riego aporta sales, éstas se irán acumulando en el suelo, provocando su salinización.

Por consiguiente, para evitar que haya acumulación de sales en el suelo debe aportarse un exceso de agua con el riego, en relación a las demandas de la planta y las evaporativas, de manera que el excedente permita transferir el exceso de sales fuera de la zona de enraizamiento, ya sea por drenaje natural o con la instalación de un sistema de drenes.

FRACCIÓN DE LAVADO (Ayers y Wescott, 1985)

Se define como la relación entre la cantidad de agua que drena de la zona radicular (L_d) y la cantidad de agua aportada por el riego (L_r).

$$L = \frac{L_d}{L_r} = \text{fracción de lavado}$$

Para que no haya acumulación de sales en el suelo, el porcentaje de agua a incrementar respecto a la requerida (cultivo más la demanda evaporativa de la atmósfera) se puede calcular a partir de la conductividad del agua de riego (CE_r) y la conductividad aceptable en la zona radicular, igual a la CE_d del agua de drenaje, si la eficiencia de lavado fuese igual a la unidad. En este caso se cumpliría:

$$CE_d \times L_d = CE_r \times L_r$$

De forma orientativa, una fracción de lavado de 0,5 (un 50% más) se considera óptima, mientras que un valor de 0,1 puede resultar insuficiente.

c) Estrategias ligadas al sistema de riego: riego localizado.

En Israel se introdujo por primera vez la técnica del riego localizado. Consistente en aportar agua por medio de emisores a baja presión, lo que supone una distribución irregular del agua en el conjunto de la parcela. A partir de cada uno de ellos se genera un bulbo húmedo y el movimiento del agua desplaza las sales existentes en el suelo hacia la periferia del bulbo. Las raíces de las plantas crecerán aprovechando estos volúmenes de suelo con menor salinidad.

d) Estrategias ligadas a la calidad del agua de riego.

Por principio, el **agricultor** riega con el agua de que dispone, intentando adaptarse a ella con diversas estrategias que, si son adecuadas, hacen que la situación sea durable. En caso contrario, los rendimientos de los cultivos irán siendo menores y, posiblemente, se provocará una degradación progresiva del suelo, hasta que se alcancen niveles de salinidad que obliguen a abandonar el campo salinizado.

Por lo general, en cada perímetro de riego existe una **comunidad de regantes**, que puede controlar la calidad del agua, **asesorar** a los agricultores para que manejen los suelos con una mejor base científica: elección de cultivos comerciales tolerantes a la salinidad, índice salino de los distintos abonos y manejo del agua de riego. Igualmente, resulta conveniente llevar a cabo una **monitorización** (seguimiento) para determinar la evolución de los niveles de salinidad en los suelos del perímetro de riego.

Con ello se pasa de lo que está al alcance de un agricultor individual, a lo que puede hacer una comunidad de regantes con asesores técnicos. Dando un paso más, se llegaría al nivel de quienes tienen capacidad para **la toma de decisiones** en materia de riegos. La **política de regadíos**, por lo que hace a los regadíos existentes, puede orientarse, por un lado, a **proteger los suelos de regadío** para que no cambien de uso, como suelos de alta calidad que suelen ser; así como a la **modernización de los sistemas de riego**, para que hagan un uso más eficiente del agua. Por otro lado, desde hace años se dispone de tecnologías para crear **plantas para la mezcla de aguas** de distintas procedencias y calidades, de manera que se puedan aprovechar aguas de peor calidad, asegurando a los regantes una calidad mínima del agua que vayan a recibir, de manera que no pongan en riesgo sus cosechas. Las plantas desalinizadoras constituyen una opción para algunas situaciones, siendo el coste del agua un factor condicionante para su uso en agricultura.

4. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. En la prospección de suelos en el campo se diagnosticaron problemas de salinidad en una determinada área. Preparar un informe a presentar en público a los agricultores y técnicos de la zona. Elaborar la estructura de la exposición que, como mínimo, deberá contemplar los siguientes aspectos:

- a) Análisis que se pidieron al laboratorio para confirmar el diagnóstico de campo.
- b) Propuestas para el manejo de estos suelos.
- c) Criterios que sirvieron para el diagnóstico en campo.
- d) Criterios de calidad para aceptar los resultados recibidos del laboratorio.

5. SUELOS SÓDICOS: EL SODIO DE LAS SEDES DE INTERCAMBIO

SUELOS SÓDICOS

Son aquellos suelos que tienen un horizonte subsuperficial (endopedión nátrico), arcilloso (arcilla iluviada), con estructura maciza, que a veces puede ser columnar, con sodio en las sedes de intercambio en una proporción igual o superior a un 15%. El pH del suelo se mantiene por debajo de 8,5.

SUELOS ALCALINOS

Son suelos que, además de las características anteriores, contienen carbonato sódico, por lo que su pH es fuertemente alcalino: 9–12.

En WRB (2006) se clasifican como **Solonetz**. En Soil Taxonomy corresponde a diversos Grupos de suelos de los Alfisoles (Natrxeralf) y Aridisoles (Natrargid), así como en los Vertisoles y Mollisoles.

Sodificación

El aumento de la proporción de sodio intercambiable, sin que exista una concentración significativa de sales disueltas en la solución exterior, implica que a lo largo de la edafogénesis ha habido una solución exterior rica en iones sodio, con lo que este ión habrá pasado a ocupar posiciones de intercambio. Posteriormente, se habrá producido una pérdida progresiva de iones disueltos en la solución exterior por lavado. Paralelamente, ha tenido lugar un proceso de iluviación de arcillas sódicas, que resultan fácilmente translocables, incluso en presencia de carbonato cálcico o de yeso en el suelo.

Los suelos sódicos se forman a partir de materiales no consolidados, sedimentos de textura fina, a veces depósitos marinos o aluviales salinos, que se han drenado o secado de forma natural. Suelen estar asociados a terrenos llanos o suavemente ondulados en climas con veranos cálidos y secos, en regiones semiáridas, templadas o subtropicales. Las secuencias de horizontes pueden ser: A B_{tna} (nátrico); A E B_{tna} (álbico y nátrico); A B_{tna} (nátrico) B_k (cálcico), AB_{tna} (nátrico) B_y (gypsic). En aquellos casos en que el endopedión nátrico esté bien desarrollado, puede presentar estructura columnar, en otros casos, la estructura del endopedión es en bloques o maciza.

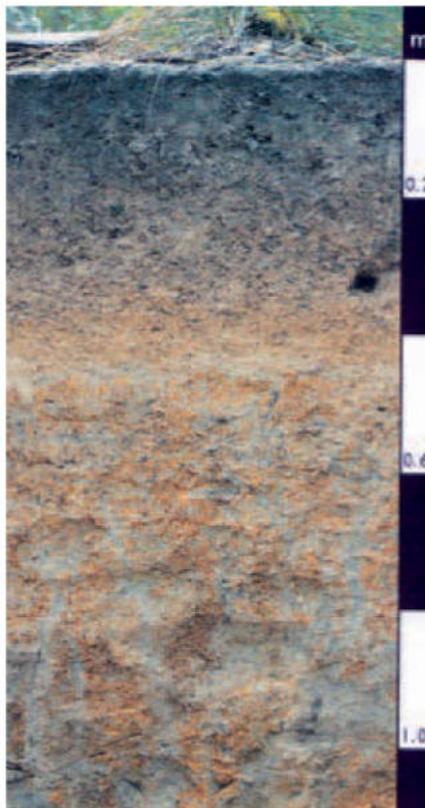
El riego continuado con agua salino-sódica, junto con una precipitación anual escasa y una elevada evaporación, pueden aumentar de forma significativa la sodicidad de un suelo. Ello se traducirá en un deterioro de la estructura y propiedades físicas asociadas a ella, en especial el movimiento del agua y del aire y la erosionabilidad del suelo, así como en un deficiente crecimiento de la mayoría de las plantas.

Criterios de diagnóstico de la sodicidad en campo

Los suelos sódicos presentan una mala estructura en superficie, por lo que pueden ser pulverulentos. En aquellos casos en que el suelo presenta pH de 10–12, puede haber costras negras en la superficie del suelo, debido al ascenso capilar de agua con materia orgánica disuelta. Al evaporarse el agua, la materia orgánica se deposita y da lugar a una costra que impregna el material. Al estudiar el perfil, el diagnóstico resultará fácil en aquellos casos en que los exista un endopedión nátrico bien desarrollado con estructura columnar. En caso contrario, puede resultar difícil un diagnóstico en campo. La conductividad hidráulica es muy baja. La determinación del pH en campo puede ser otro criterio de diagnóstico, en casos extremos, con pH de 10–12 (alcalinidad).

5.1. OBSERVAR E INTERPRETAR

- Describa con sus propias palabras el suelo de la imagen.
- Interprete la morfología descrita.
- Infiera el comportamiento de este suelo para un uso agrícola



Cortesías de CSIRO.

Solonetz de Australia

Medida de la sodicidad: unidades

El grado de sodificación de un suelo se mide a partir del porcentaje de saturación de sodio intercambiable, en teoría corresponde a la expresión:

$$V_{Na} = \frac{Na}{CIC} \times 100 = \text{porcentaje de saturación de sodio}$$

Ahora bien, desde un punto de vista analítico, no se puede calcular este porcentaje a partir del sodio intercambiable y la capacidad de intercambio catiónico, debido a la interferencia de las sales solubles, entre otros aspectos.

ESP y SAR

El sodio de las sedes de intercambio (doble capa) se halla en equilibrio con los iones de la solución exterior, de manera que para un sistema $Ca \Leftrightarrow Na$ la situación de equilibrio se puede escribir como:



La constante de equilibrio K, vendrá dada por:

$$K = \frac{[productos]}{[reactivos]} = \frac{[Na]_i [Ca^{2+}]_e}{[Ca^{2+}]_i [Na^+]_e} \quad [] \text{ mol kg}^{-1}$$

Reordenando: $[]_i = K []_e$ [1]

Expresión que indica que, a partir de los elementos en la solución exterior determinados en un extracto de pasta saturada, se puede establecer la relación entre los iones intercambiables (doble capa) y los solubles (solución exterior) conocida la constante de equilibrio.

Empíricamente se ha puesto de manifiesto que el magnesio tiene un comportamiento semejante al calcio, por lo que se añade a la expresión anterior, que se transforma en la **relación de adsorción de sodio**, SAR o RAS.

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} = K'_G \times []_i \quad \begin{array}{l} Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} \text{ mmol}_c L^{-1} \\ \text{determinados en el extracto de pasta saturada} \end{array}$$

K'_G es la constante de Gapon

Por consiguiente, existe una relación entre el SAR y el porcentaje de sodio intercambiable, **ESP** o PSI, que se utiliza para el cálculo de éste último, en lugar de realizar una determinación directa.

UNIDADES

$$1 \text{ mmol}_c L^{-1} = 1 \text{ meq } L^{-1}$$

$$10 \text{ mmol}_c L^{-1} = 1 \text{ cmol}_c L^{-1} = 10 \text{ meq } L^{-1}$$

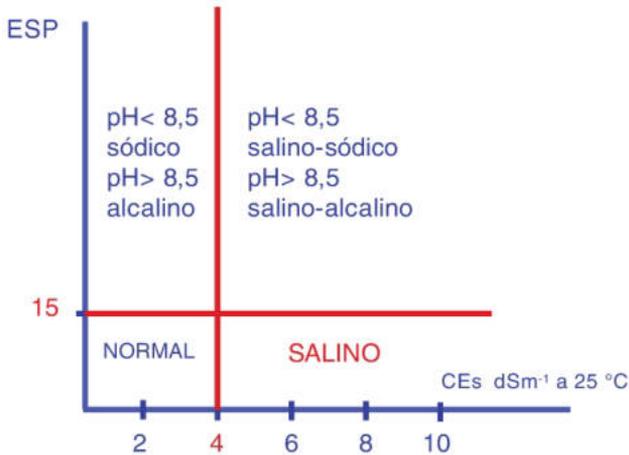
5.2. ANÁLISIS PARA FOMENTAR EL ESPÍRITU CRÍTICO

G2. Discutir los siguientes aspectos:

- ¿Por qué se habrá abandonado la medida de la concentración de sales solubles en el suelo, como tales sales (gL^{-1}) y se utiliza la CE del extracto de pasta saturada?

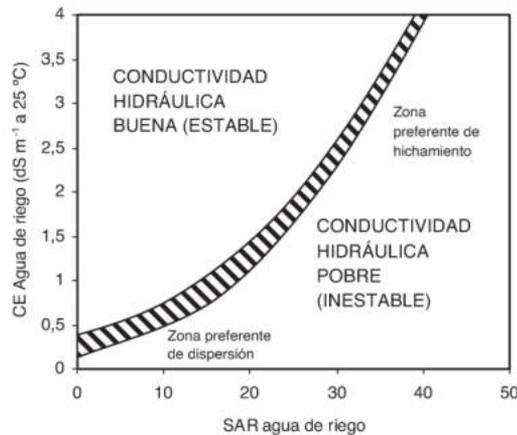
- b) ¿Por qué no se utiliza la expresión $[(Na_i/CIC) \times 100]$ para determinar el porcentaje de sodio intercambiable? ¿Qué problemas analíticos puede haber? ¿Qué solución se ha adoptado?

Criterios de clasificación de la sodicidad y alcalinidad (USSL)



Generalmente se utiliza como valor umbral crítico un ESP del 15%, para establecer que un suelo es sódico. A pesar de que este criterio sea el más utilizado, hay que tener en cuenta que los cambios en el comportamiento del suelo y los efectos sobre los cultivos al aumentar el ESP tienen lugar de forma gradual. Por otro lado, la concentración del suelo, así como la presencia o no de carbonato cálcico hacen que los efectos con un mismo valor del ESP sean distintos. En un suelo sin carbonato cálcico, los efectos del sodio intercambiable se dejan sentir a partir de un ESP de 5–10%. No obstante, el ESP no resulta suficiente como indicador de la sodicidad, sino que ésta se caracteriza mejor por medio del comportamiento del suelo en relación a la dispersión y expansión (Rengasamy y Churchman, 1999).

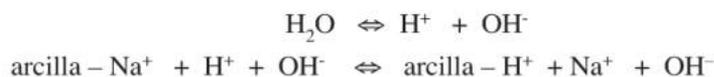
Resulta importante la relación entre la conductividad eléctrica (CE) y el SAR del agua de riego y su efecto sobre la conductividad hidráulica del suelo (Oster y Rhoades, 1984):



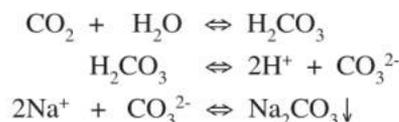
La **alcalinización** implica sodificación y presencia de carbonato sódico, cuya hidrólisis provoca una elevación del pH a valores extremos de 10–12, lo que crea condiciones muy desfavorables para la vegetación no tolerante y para la conductividad hidráulica.

pH de los suelos sódicos y de los suelos alcalinos

El pH del suelo viene controlado por múltiples factores. En el ámbito de la sodicidad y alcalinidad es el resultado de una combinación compleja de reacciones de intercambio y de autohidrólisis del agua:



Las arcillas–H⁺ son inestables y su red cristalina colapsa. Por otro lado, si el pH aumenta suficientemente en condiciones de alcalinidad, se disuelve CO₂ en el agua del suelo:



Al superarse el valor del producto de solubilidad, K_{ps} , del carbonato sódico, éste precipita y tampona el pH del suelo a valores de 10,5.

6. ESTUDIAR Y ASESORAR

Se recibe una consulta acerca de si puede resultar aceptable una propuesta de cambiar el agua de riego que se viene utilizando, por agua procedente de una depuradora, en la que se utilizan polielectrolitos para flocular la materia orgánica. Se propone una compensación económica y un factor de 1,1 en relación al volumen de agua intercambiado. Buscar información acerca de los procedimientos químicos utilizados en la depuración de aguas.

- Indicar qué mecanismos pueden tener lugar en el suelo.
- ¿Qué interés puede tener incorporar yeso a estas nuevas aguas previamente a su utilización para el riego?
- ¿Qué precio debe tener el metro cúbico de agua de riego para que un factor de cambio de 1,1 compense el coste del yeso a aportar?. Buscar la información necesaria para determinarlo.

7. INTERPRETAR INFORMACIÓN

E3. Discutir y redactar un informe con las conclusiones acerca de los siguientes aspectos:

Se recibe una consulta acerca de los suelos de una finca en los que los cultivos fracasaban año tras año, por lo que finalmente se abandonaron. Una prospección de suelos por medio de calicatas ha permitido observar que la estructura de los distintos horizontes es maciza, no hay elementos gruesos y que los horizontes dan efervescencia con HCl del 11%. Los datos de los ensayos de conductividad hidráulica ponen de manifiesto que el movimiento del agua es muy lento. Las muestras analizadas en el laboratorio han dado valores de ESP superiores al 15% para los horizontes por encima de 50 cm y menores de 10% en los más profundos.

- Diagnostique el problema.
- Indique qué procesos químicos quiere provocar para mejorar estos suelos.
- Plantee un plan de mejora. Consultar la bibliografía.

8. CALCULAR E INTERPRETAR

E3. Discutir y redactar un informe con las conclusiones acerca de los siguientes aspectos:

- Buscar alguna explicación basada en la química de suelos al hecho de que al comparar el comportamiento frente a la circulación del agua en dos parcelas de un mismo suelo sódico que da efervescencia con el HCl del 11%, en una de ellas, que permaneció sin vegetación durante años, su conductividad hidráulica sea menor y su porcentaje de sodio intercambiable mayor (ESP igual al 18%), que en otra que tuvo una pradera tolerante a la sodicidad durante el mismo período.
- En el caso en que se quiera hacer disminuir el ESP en un 6% en el espesor correspondiente a la zona radicular (25 cm), calcular la cantidad de enmienda de yeso del 85% de pureza que deberá incorporarse al suelo. La eficiencia en el intercambio es del 90%. La densidad aparente de este horizonte es de 1.390 kg m^{-3} y la CIC de $30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.
- Aunque desde un punto de vista químico sería posible mejorar la situación añadiendo cloruro cálcico, ¿sería recomendable en la práctica? (buscar en Internet las solubilidades y los precios)? ¿qué reacción tendría lugar en caso de utilizarlos a escala de laboratorio?

9. CALCULAR E INTERPRETAR

A1. Calcular el SAR y el ESP de un horizonte a partir del análisis del extracto de pasta saturada: $\text{Ca}^{2+} = 28,4 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$, $\text{Mg}^{2+} = 607,7 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$, $\text{Na}^+ = 9,3 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$.

10. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Una vez estudiadas las explicaciones de clase y revisada esta Unidad, seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos.

Los términos salino y sódico aplicados a un suelo son (1) _____, ya que el primero hace referencia a la presencia de (2) _____ y el segundo se caracteriza por un/a (3) _____. El perfil salino es una característica (4) _____ la textura y el efecto de ésta se integra al caracterizar la salinidad por medio de (5) _____. La salinidad presenta una variabilidad (6) _____.

En un sistema de intercambio monoiónico, el modelo de distribución de iones en la doble capa (7) _____ de la concentración de la solución exterior. A igual concentración de la solución exterior, el espesor de la doble capa será tanto (8) _____ cuanto mayor sea la carga de los iones de signo contrario (contraiones). Entender este aspecto resulta importante para comprender el mecanismo de formación de (9) _____ y, por consiguiente, la (10) _____ de la estructura de los suelos (11) _____. Por ello, el riego de un campo de golf con agua de depuradora que contenga sodio (12) _____ riesgo de deterioro de la estructura del suelo, mientras que si se realiza un monitoreo analizando periódicamente los suelos y el agua de riego empleada, se puede recurrir a añadir un producto que contenga (13) _____, para evitar estos efectos, tal como el (14) _____, lo que sería aceptable para el gerente del club de golf.

- | | | | | |
|------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|
| (1) | a) casi sinónimos | b) totalmente distintos | c) equivalentes | d) parecidos |
| (2) | a) sodio intercambiable | b) $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ | c) sales más solubles que el yeso | d) yeso |
| (3) | a) SAR alto | b) CEs alta | c) $\text{ESP} \geq 15\%$ | d) $\text{CEs} > 4 \text{ dS cm}^{-1}$ a 25°C |
| (4) | a) tan estable como | b) distinta de | c) variable como | d) complementaria a |
| (5) | a) SAR | b) extracto de pasta saturada | c) ESP | d) CE 1:5 |
| (6) | a) espacial | b) espacio – temporal | c) temporal | d) (no varía para un mismo suelo) |
| (7) | a) no dependerá | b) dependerá | c) va en contra | d) --- |
| (8) | a) menor | b) mayor | c) (no depende de ello) | d) igual |
| (9) | a) la textura | b) microagregados | c) macroagregados | d) estructura |
| (10) | a) estabilidad | b) importancia | c) inestabilidad | d) variabilidad |
| (11) | a) salinos | b) calizos | c) ácidos | d) sódicos |
| (12) | a) no supone | b) supone | c) disminuye el | d) aumenta el |
| (13) | a) aluminio | b) sodio | c) magnesio | d) calcio |
| (14) | a) yeso | b) caliza | c) plagioclasa – Ca | d) CaCl_2 |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Entender la química de los procesos redox en el suelo.

Aprender a interpretar procesos redox en el suelo.

Conocer la importancia de los procesos redox en el manejo de los suelos y algunos de sus efectos medioambientales.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Condicionantes oxidantes y reductores en el suelo.

Aceptadores de electrones y reacciones redox.

Caracterización físico-química: potencial redox y secuencia de reducción.

Medida del potencial redox.

Diagramas de estabilidad: diagramas Eh-pH.

Potencial redox, comportamiento de los elementos y funciones del suelo afectadas.

Morfología del perfil y estado redox: modelos de distribución del hierro y el manganeso.

Ferrolisis.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo y Roquero, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3.^a edición. Ed. Mundi-Prensa, cap. 14. Madrid, 2003.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de campo de suelos*. Ed. Mundi-Prensa, cap. 10. Madrid, 2005.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Completar los huecos con los términos propuestos:

El estado de oxidación del calcio es (1) _____ por lo que (2) _____ interviene en procesos de oxidación – reducción (redox) en sistemas naturales. La oxidación se define como la pérdida de electrones de un elemento con un aumento de su valencia o de su número de oxidación. El hierro, al pasar de Fe(II) a Fe(III) ha (3) _____ electrones, por consiguiente se ha (4) _____. La regla del octeto hace referencia al hecho que un átomo adquiere una estructura electrónica en su capa externa que le hace más (5) _____. En el caso del carbono, su valencia es siempre 4+, mientras que su número de oxidación es de (6) _____ en el metano y de (7) _____ en el anhídrido carbónico, por lo que el primero se presentará en medios muy (8) _____ y el segundo se halla en la atmósfera junto con el oxígeno. Ello es así debido a que los electrones ganados o perdidos lo son totalmente en compuestos iónicos y parcialmente en los covalentes.

El tipo de enlace químico permite explicar la distinta solubilidad de los componentes del suelo, así, mientras los sulfatos, tales como la tenardita (Na_2SO_4), son altamente solubles al tener un enlace (9) _____, los sulfuros de hierro, como por ejemplo la pirita (FeS_2), son altamente insolubles, ya que en este caso el azufre se une al hierro por medio de enlaces (10) _____.

- | | | | | |
|------|--------------|---------------------------|----------------------------|------------------|
| (1) | a) cero | b) único | c) número negativo | d) cuatro |
| (2) | a) si | b) siempre | c) a veces | d) no |
| (3) | a) perdido | b) ganado | c) transportado | d) cedido |
| (4) | a) oxidado | b) hidrolizado | c) reducido | d) hecho soluble |
| (5) | a) estable | b) inestable | c) soluble | d) insoluble |
| (6) | a) 4+ | b) 4- | c) 2+ | d) 0 |
| (7) | a) 4+ | b) 4- | c) 2+ | d) 0 |
| (8) | a) oxidantes | b) reductores | c) reducidos | d) oxidados |
| (9) | a) covalente | b) iónico | c) de puentes de hidrógeno | d) débil |
| (10) | a) iónicos | b) covalentes coordinados | c) de puentes de hidrógeno | d) débiles |

2. CONDICIONANTES OXIDANTES Y REDUCTORAS EN EL SUELO

La existencia de condiciones oxidantes o reductoras en el medio determina las condiciones ecológicas que rigen muchos procesos en el suelo, entre otros:

- Los procesos de meteorización.
- Las pérdidas, transformaciones y translocaciones que pueden tener lugar en el suelo.
- La respiración en el suelo. Las raíces de la mayoría de las plantas, los animales del suelo y casi todos los hongos sólo pueden respirar aeróbicamente, por lo que requieren la presencia de oxígeno.
- Los microorganismos existentes en el suelo, que pueden ser aerobios, anaerobios facultativos y anaerobios estrictos
- La descomposición de la materia orgánica, que se acumula al descomponerse muy lentamente, cuando hay saturación de agua (turberas).
- El uso del suelo para la agricultura, zonas de ocio, etc., viene condicionado por la presencia de un exceso de agua.

Las condiciones de aireación de un suelo dependen de la eficacia en el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera. En un suelo bien aireado puede haber entre un 18 y un 20% de oxígeno, que se va renovando a medida que va siendo consumido por las raíces, al estar el suelo en contacto con la atmósfera. De este modo queda asegurado un suministro adecuado de oxígeno para las raíces y microorganismos aerobios del suelo y el medio se mantiene en condiciones oxidantes.

Las disponibilidades de oxígeno en la atmósfera del suelo disminuirán si el espacio de huecos pasa a estar ocupado por agua, medio en el cual la difusión de gases es aproximadamente unas 10^4 veces más lenta que en el aire. La actividad respiratoria de las raíces y de los microorganismos aerobios consume rápidamente oxígeno que, al quedar el suelo sumergido, no podrá ser reemplazado a suficiente velocidad, por lo que dentro de uno o dos días después de haber sido saturado de agua el suelo, el oxígeno se agota y, por consiguiente, deja de actuar como aceptador de electrones terminal y las condiciones del medio cambian radicalmente: pasan a ser reductoras.

Para que tenga lugar la reducción del suelo deberán concurrir las siguientes condiciones simultáneamente:

- Ausencia de suministro de oxígeno (suelo saturado de agua, sin que ésta se renueve).
- Presencia de materia orgánica.
- Presencia de microorganismos anaerobios

3. ACEPTORES DE ELECTRONES Y ECUACIONES REDOX

Los términos *oxidación* y *reducción* en sistemas suelo-agua hacen referencia a los procesos potenciales de transferencia de electrones entre diferentes especies. Ello hace posible que los elementos alcancen su máxima estabilidad (regla del octeto, ocho electrones en la capa externa del átomo), en un medio que ha cambiado, de estar bien aireado a estar saturado de agua o viceversa.

Oxidación (dador: cede electrones): azúcar + H₂O → CO₂ + H⁺ + e⁻

Reducción (aceptor: capta electrones): H⁺ + 0,25 O₂ + e⁻ ⇌ 0,25H₂O

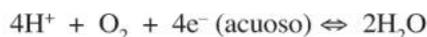
Los elementos químicos que tienen capacidad para cambiar de estado de oxidación (pueden actuar con más de una valencia o de número de oxidación), pueden actuar como aceptores o dadores de electrones.

En medios aerobios, el oxígeno actúa como aceptor de electrones terminal, produciendo agua, siendo posible la respiración aeróbica de los organismos del suelo. Cuando el suelo pasa de condiciones oxidantes a reductoras, al inundarse y permanecer saturado de agua de forma prolongada, otros sustratos (inorgánicos u orgánicos) harán posible la respiración, actuando según una determinada secuencia de reducción los posibles aceptores de electrones. Al agotarse el oxígeno, la demanda respiratoria será satisfecha por el NO₃⁻ que pasa a N₂; al agotarse éste actuará el Mn⁴⁺ que pasa a Mn²⁺; luego la materia orgánica al fermentar y producir ácidos orgánicos; el Fe³⁺ que pasa a Fe²⁺; con unas condiciones muy reductoras, el SO₄²⁻ que pasa a H₂S y finalmente, el CO₂ que pasa a metano.

En un sistema suelo-agua, para el par redox Fe(III)/Fe(II) se tendrá:



Esta es una **semirreacción de oxidación** y, dado que en la naturaleza no hay electrones libres, para que la oxidación tenga lugar deberá haber otro elemento que capte los electrones (se reduzca). Por ello se trata de procesos de oxidación-reducción en simultáneo, en los que hay una transferencia completa de electrones de una especie a otra. La otra semirreacción podría ser:



La **reacción de oxidación-reducción completa** o reacción redox será una combinación de las dos semirreacciones conceptuales, que no corresponden a una separación física real de estos dos procesos. Para un **par redox** Fe(III)/Fe(II), sin visualizar los electrones, se tendrá:



En un suelo ácido, las reacciones de reducción son reacciones que consumen protones, por lo que el pH del suelo aumentará. Por tanto, la acidez del medio influye en las condiciones en las que tiene lugar la oxidación y la reducción de un determinado par redox.

Al escribir estos ejemplos de reacciones redox se han aplicado algunas convenciones:

- En los pares redox Fe³⁺ / Fe²⁺, SO₄²⁻ / S²⁻, etc. se escribe primero la especie que se oxida.
- Para escribir una reacción redox completa se iguala previamente el número de electrones entre las dos semirreacciones.

El Fe³⁺ es el estado de oxidación en que se presenta más frecuentemente el hierro en los suelos bien aireados, a los que confiere coloraciones rojizas y pardas.

4. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA: POTENCIAL REDOX Y SECUENCIA DE REDUCCIÓN

Las reacciones redox se caracterizan por un cambio de estado de oxidación de los átomos que intervienen en cada una de las semirreacciones, que progresarán dependiendo de las energías libres de Gibbs (G) de reacciones relativas. El cambio de energía (ΔG) que tiene lugar durante una reacción redox se puede expresar:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E_h$$

donde n = número de electrones intercambiados.

F = número de Faraday.

E_h = potencial redox (la h indica que está referido a un electrodo estándar de hidrógeno). Se mide en voltios (V) y expresa la tendencia de una sustancia a aceptar electrones.

Para una reacción redox : $pOx + ne^- + mH^+ \leftrightarrow rRed + (m/2) H_2O$

Ox = forma oxidada (se reduce, pierde electrones).

Red = forma reducida (se oxida, gana electrones).

De acuerdo con la ecuación de Nerst, siendo E^0 el potencial del electrodo estándar, potencial normal o potencial de reducción, el potencial redox viene dado por:

$$E_h = E^0 - \frac{RT}{nF} \times \log \frac{[productos]^p}{[reactivos]^r} = E^0 - \frac{RT}{nF} \times \log \frac{(Red)^r}{(Ox)^p (H^+)^m} = E^0 - \frac{RT}{nF} \left[\log \frac{(Red)^r}{(Ox)^p} + mpH \right]$$

En el caso en que $m = n$ y $t = 25$ °C:

$$E_h = E^0 - 0,059 \text{ pH}$$

Semirreacciones	E^0 en V	Potencial redox a pH 7 en V
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+ 1,229	+ 0,820
$Mn^{4+} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	+ 1,23	
$NO_3^- + 4H^+ + 4e^- \rightarrow NO_2 + 2H_2O$	+ 0,85	+0,420
Materia orgánica (fermentación) \rightarrow ac. orgánicos		+ 0,400
$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	+ 0,771	-0,180
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \rightarrow H_2S + 4H_2O$	+ 0,68	-0,220
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	0	
$Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$	0,440	
$CO_2 + e^- + 4H^+ \rightarrow CH_4$	-0,44	-0,240

El aceptor de electrones terminal que actúe en el suelo en un momento dado y en un sitio concreto vendrá determinado por el potencial redox en aquel punto (micrositio).

El valor del potencial redox de un suelo constituye una medida indirecta de las disponibilidades de oxígeno para las raíces y microorganismos. Valores superiores a 300 mV indican condiciones aerobias, mientras que por debajo de 200 mV el medio es anaerobio.

Partiendo de un suelo bien aireado, a medida que las condiciones reductoras vayan en aumento, una vez agotado todo el oxígeno, el proceso de reducción irá afectando a distintos elementos. De acuerdo con los valores del potencial de la semirreacción, en primer lugar entrarán a actuar como aceptores de electrones los nitratos (+420 mV a pH 7,0) y, sucesivamente hierro por acción de bacterias anaerobias facultativas. La reducción de los sulfatos (-220 mV a pH 7,0) requiere la presencia de suficiente materia orgánica y tiene lugar por acción de bacterias anaerobias estrictas; mientras que se requieren unas condiciones reductoras extremas para que se produzca metano (CH_4). La existencia de aceptor de electrones con un determinado estado de oxidación inhibe la que aquellos cuyo estado de oxidación sea más bajo.

No obstante, dado que el potencial redox presenta una gran variabilidad espacial dentro del suelo a nivel de microambiente, resulta posible que actúen simultáneamente más de un aceptor de electrones en distintos micrositos de un mismo suelo.

5. MEDIDA DEL POTENCIAL REDOX

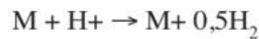
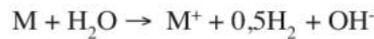
La medida del potencial redox sólo tiene significación en suelos saturados de agua, suelos hidromorfos, tales como en los Gleysoles (WRB) y los suelos con carácter ácuico (ST).

En estudios de química de suelos, el estado de oxido-reducción de un sistema suelo-agua se caracteriza por medio del potencial electroquímico o potencial redox, Eh, que expresa la tendencia de un suelo a aceptar o ceder electrones. Las medidas de Eh requieren equipos específicos y son difíciles de llevar a cabo con precisión. Para ello deben instalarse en campo electrodos de platino combinados y disponer de sistemas para el almacenamiento informático de las medidas, que se suelen tomar en continuo. Si se manipulan las muestras, el Eh variará considerablemente de forma muy rápida por la entrada de oxígeno.

6. DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD: DIAGRAMAS Eh-pH

La existencia de una especie química en medio acuoso dependerá de si el valor de su potencial normal se halla entre los valores límites del campo de estabilidad del agua, que puede actuar como agente oxidante reduciéndose a H_2 y como agente reductor oxidándose a O_2 .

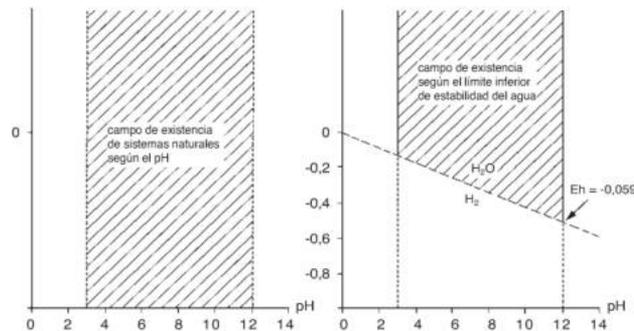
El agua como oxidante (se reduce):



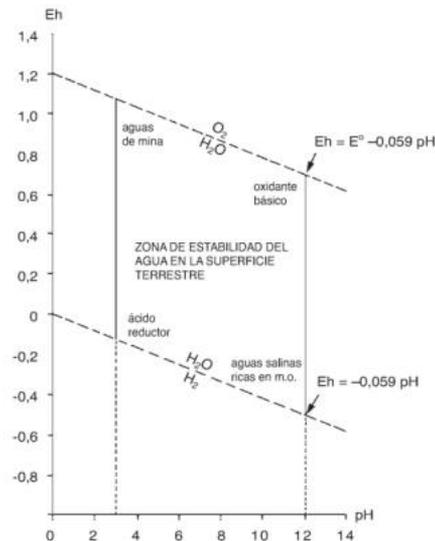
El agua como reductor (se oxida):



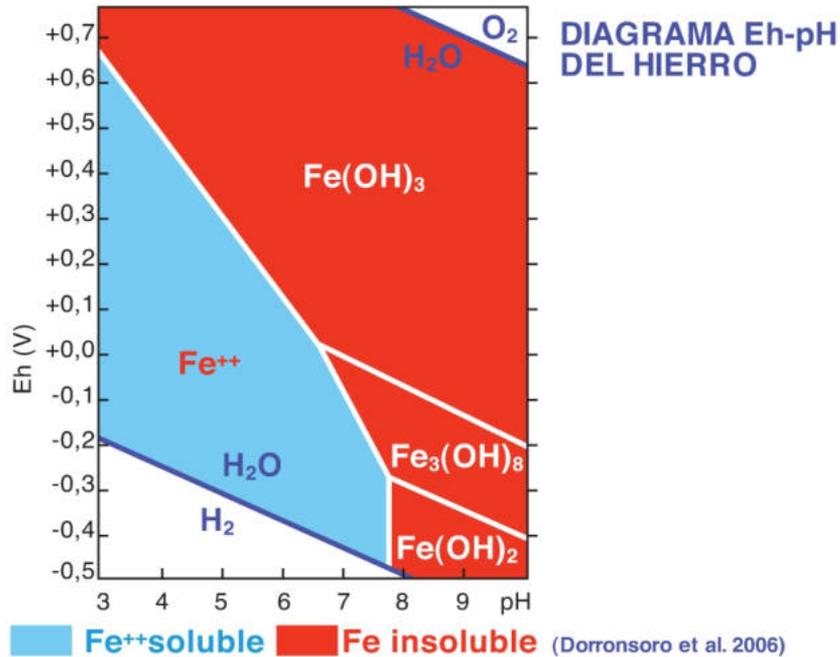
En un diagrama Eh-pH, sabiendo que en los medios naturales el pH se halla entre valores de 3 y 12, el campo de existencia de las aguas naturales viene delimitado por:



Los campos de estabilidad del agua a 25 °C expresados en un diagrama Eh-pH son los siguientes:



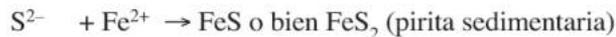
En el caso del hierro, el diagrama de estabilidad de los distintos compuestos viene definido por:



7. POTENCIAL REDOX, COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS Y FUNCIONES DEL SUELO AFECTADAS

El comportamiento de los elementos en el suelo viene controlado por su estado de oxidación.

En el caso del Fe y del Mn, los estados de oxidación más bajos se corresponden a formas más solubles que sus estados de oxidación más altos. El Fe(II) y el Mn(II) estarán en solución, siempre y cuando no reaccionen con otros iones y precipiten, cosa que puede ocurrir de forma limitada, en medios moderadamente reducidos en los que haya iones sulfatos, dado el elevado K_{ps} del FeSO_4 . Por el contrario, en medios fuertemente reducidos con presencia de S(II), el Fe(II) precipitará en forma de sulfuro de hierro FeS o de FeS_2 (pirita), ambos altamente insolubles, al presentar enlaces covalentes coordinados.



Cabe destacar que el estado de oxidación de un elemento incide (Evangelou, 1998) sobre:

- La solubilidad (Fe^{2+} es soluble, mientras que el Fe^{3+} es insoluble).
- Movilidad en el medio.
- La disponibilidad para las plantas. La biodisponibilidad de los elementos, en unos casos puede resultar positiva, al poner a disposición de las plantas nutrientes, mientras que en otros casos los elementos pueden resultar tóxicos para el organismo enfrentado con su presencia.
- Persistencia o toxicidad de especies químicas. Así el As(III) es altamente tóxico, mientras que el As(V) presenta una baja toxicidad.
- El contenido salino de un suelo y la conductividad eléctrica: los sulfuros son insolubles, mientras que los sulfatos de sodio, potasio y magnesio son altamente solubles, por lo que su presencia en el suelo crea problemas para los cultivos.
- Volatilidad de especies químicas, como ocurre con el N_2 frente al NO_3^- .

Por consiguiente, los procesos redox controlan la especiación y el comportamiento de muchos elementos en el suelo, tanto nutrientes, como contaminantes (minerales u orgánicos), aspectos a tener en cuenta al querer plantear tratamientos para resolver problemas de contaminación por alguno de ellos.

8. OBSERVAR E INTERPRETAR

- Describa con sus propias palabras la imagen.
- ¿Qué procesos deben predominar en estos suelos si la situación que se observa se mantiene durante períodos prolongados?
- ¿Qué rasgos será esperable encontrar en el perfil del suelo al hacer una calicata?
- ¿Qué horizontes genéticos pueden existir?
- ¿Cuál será el régimen de humedad de estos suelos?
- ¿Qué uso se estará dando a este suelo?



Suelos del Delta del Ebro (Cataluña, España)

J. Porta

9. REFUERZOS DE LABORATORIO

E3. Buscar información y redactar un informe.

En las prácticas de laboratorio se realiza la determinación de la materia orgánica del suelo con un doble objetivo:

- Conocer el contenido de materia orgánica de la muestra.
- Utilizar reacciones redox y entender los procesos redox.

Buscar en el cuaderno de prácticas en la biblioteca o en Internet, entre otros en: www.iec.cat/mapasols/ → Documentos de interés → Técnicas y Experimentos en Edafología, cómo se determina la materia orgánica y quién se oxida y quien se reduce. Formule las dos semirreacciones que tienen lugar.

10. ANALIZAR E INTERPRETAR

G2. Estudiar los siguientes supuestos y proponer las explicaciones pertinentes, justificando lo que se indique:

- ¿Qué especies químicas actuarán como agentes oxidantes más energéticos, las que tengan potenciales normales más altos o más bajos?
- Estudiar si los pares redox $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ y Fe^{2+}/Fe pueden existir en medios acuosos, en caso afirmativo, cuál de los dos sería más probable encontrar en suelos con unas condiciones reductoras moderadas. ¿Por qué?
- Completar la reacción redox: $4\text{Fe}^{2+}(\text{ac}) + \text{O}_2(\text{gas}) + 4\text{H}^+(\text{ac}) \rightarrow$ indicando si será una reacción espontánea y si será rápida.

11. ESTUDIAR E INTERPRETAR

- G2.** a) ¿Cómo puede verse afectado el comportamiento de un suelo de una zona templada húmeda por el hecho de que progrese la formación un horizonte de acumulación de arcilla?
- b) ¿Qué efectos pueden tener estos procesos en una masa forestal en este suelo.

12. ENTENDER Y EXPONER

E3. Buscar información para poder explicar a un grupo de técnicos qué incidencia tienen en la nutrición del arroz: la profundidad a la que se localice un abono nitrogenado y la forma en que se aporte el nitrógeno: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o NH_4NO_3 .

El arroz se cultiva en el mundo bajo riego (zona mediterránea, por ejemplo) y en secano (arroz pluvial, en zonas con pluviometrías superiores a los 1500 mm). Las plantas de arroz son capaces de transportar oxígeno a través de las raíces, por lo que son capaces de mantener un microambiente oxidado, manteniendo inocuos los productos tóxicos resultantes de los procesos reductores. Al cultivar en condiciones de sumersión se crean dos capas en el perfil del suelo, la que está cerca de la superficie mantiene unas condiciones aerobias (capa oxidada), debido a que en ella el oxígeno se encuentra disponible al difundirse a través del agua. Por el contrario, la capa inferior se halla reducida (capa anaerobia), ya que la demanda de oxígeno es muy superior al suministro.

- Explicar el comportamiento del nitrógeno en los distintos supuestos.
- Formular las reacciones que tendrán lugar.
- Explicar cuál será el comportamiento paralelo del hierro en estos suelos desde el momento en que tiene lugar la inundación.

13. MORFOLOGÍA DEL PERFIL Y ESTADO REDOX: MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DEL HIERRO Y EL MANGANESO

Por lo general, el estado de oxidación-reducción de un suelo se puede inferir a partir del modelo de colores de sus horizontes y de la clase de drenaje. Cabe distinguir tres modelos:

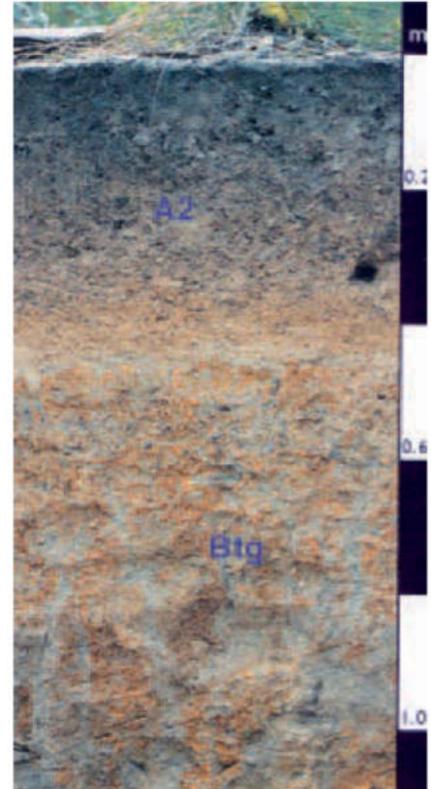
- Los **suelos bien aireados** se caracterizan por tener colores rojizos a pardos, debido a que el hierro se halla forma férrica (Fe^{3+}). En este estado de oxidación el hierro es inmóvil, encontrándose precipitado en forma de óxidos. El oligisto, Fe_2O_3 , tiene color rojo.
- Modelo de color gléico.** Los horizontes permanentemente saturados de agua, por la existencia de una capa freática alta y que no se renueva, presentan una falta de oxígeno. Estas condiciones reductoras hacen que el hierro se halle en forma de Fe^{2+} , cuyo color es de gris a gris verdoso. Esta forma del hierro es soluble en agua y puede ser movilizado. Al estudiar el comportamiento en la zona de oscilación de la capa freática a escala de un agregado, se observará que, mientras dure la saturación con agua, el hierro presente en el agregado estará como Fe^{2+} y el color del agregado en su conjunto será gris. Al bajar el nivel de la capa freática, entrará oxígeno por los huecos que dejan los agregados entre sí (macroporos), con lo que, a escala de microsítio, tendrá lugar la oxidación del hierro en la superficie de los agregados. Si se parte un agregado, éste presentará una aureola oxidada (color pardo), mientras el núcleo del agregado permanece reducido (color gris), ya que los microporos que puede haber en él resultan mucho menos eficientes para la transmisión de oxígeno.

Si la capa freática tiene un movimiento, que si bien siempre será muy lento, si se prolonga a lo largo de mucho tiempo, con el agua puede haber una remoción del hierro. En este caso el color gris del horizonte afectado será debido a la decoloración por empobrecimiento en hierro.

- c) **Patrón de color pseudogleico.** En este caso la saturación con agua tiene lugar en la parte superior del suelo debido al agua aportada desde la superficie, debiendo existir a cierta profundidad una capa cuya baja permeabilidad provoque un mal drenaje.

En aquellos casos en los que no tengan lugar reacciones de precipitación, el Fe(II) y Mn(II) se mantendrán en solución en un suelo saturado de agua. Se pueden dar distintas circunstancias:

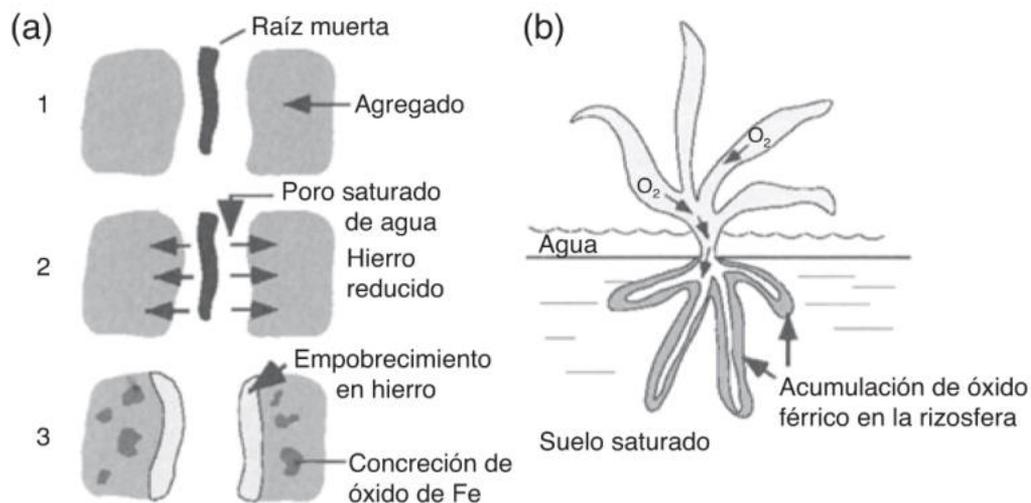
- a) **Condiciones de pseudogley:** El suelo está saturado de agua durante algún período del año, ya sea por una capa freática poco profunda, submersiones ocasionales y mal drenaje (llanuras aluviales, por ejemplo); o puede existir una capa freática colgada temporal, alimentada por el agua de lluvia, por lo que se saturará la parte superior del suelo, si el drenaje está impedido. En estos casos habrá procesos de reducción con movilización de hierro y manganeso que, al desaparecer las condiciones de anoxia, reprecipitarán en forma de óxidos Fe(III) y Mn(IV), dando lugar a moteados en las caras de los agregados en la zona de oscilación de la capa freática y haberse repetido el proceso a lo largo de muchos años. Se puede llegar a formar concreciones deleznables y pisolitos (concreciones de hierro y manganeso esferoidales y endurecidas).
- b) **Condiciones de gley:** El suelo presenta horizontes que están permanentemente saturados de agua. Por ello, el hierro reducido confiere coloraciones grises al horizonte afectado, que también pueden deberse a decoloraciones por pérdida de hierro y manganeso solubles en tales condiciones. En este caso, al exponer una muestra al aire permanecerá gris.



McKenzie *et al.*

14. OBSERVAR Y EXPLICAR

G2. Estudiar la figura, recomponer los procesos y formular las reacciones químicas (In Dixon y Schulze (ed.), 2002).



15. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.** a) Describa con sus propias palabras la imagen.
b) Formule alguna hipótesis que explique el origen de lo observado en la imagen y sobre el comportamiento de este suelo frente a un posible uso agrícola y para área de acampada.



J. Porta

16. ESTUDIAR E INTERPRETAR

- G2.** Justificar por qué habrá poca formación de FeSO_4 cuando el Fe(II) y el SO_4^{2-} estén en presencia en un sistema suelo-agua.

17. ANALIZAR Y DISCUTIR

- E3.** Preparar un informe acerca de los siguientes aspectos:
- ¿Tiene alguna incidencia el pH del suelo sobre el estado de oxidación – reducción de un elemento como el hierro en los suelos?
 - Sabiendo que el agua de mar contiene sulfatos, ¿qué ocurrirá en aquellas áreas de una zona de estuario con conexión al mar, en las que el drenaje sea muy deficiente y por ello el suelo presente condiciones anaerobias? Escribir la ecuación equilibrada que represente el proceso.
 - Se ha observado que al inundar un suelo ácido, su pH aumenta. ¿Cómo se puede interpretar este fenómeno?
 - Al inundar un suelo ácido para sembrar arroz ¿las disponibilidades de zinc para el cultivo tenderán a aumentar o a disminuir?
 - Ordenar la secuencia de reducción: NO , NO_3 , N_2 , N_2O , NO_2 .

18. ANALIZAR Y EXPLICAR

- E3.** Estudiar el tema que se plantea, buscar información y redactar el informe preceptivo para una evaluación de impacto ambiental:

El cromo, descubierto en 1797, recibió este nombre por el hecho de los vivos colores de sus compuestos. Tiene múltiples aplicaciones industriales. En la Agencia medioambiental gubernamental en la que usted trabaja, se ha presentado un proyecto para ser informado, lo que se le requiere. Se trata de la instalación de una industria de curtidos. En el documento se plantean dos tecnologías industriales diferentes, una se basa en el empleo de cromo hexavalente y otra en el de cromo trivalente. En su informe deberá justificar si el estado de oxidación del cromo tiene alguna importancia y, dado que la industria se quiere implantar en una zona semiárida, si las aguas residuales se podrán utilizar para regar, siempre que el agua no entre directamente en contacto con el producto a consumir (por ejemplo, se excluirían las hortalizas). Entre otras, se puede consultar la página web de la agencia de protección del medio ambiente de Estados Unidos (EPA): <http://www.epa.gov/OGWDW/dwh/c-ioc/chromium.html> (verificado en 2007).

- b) Determine qué implicaciones puede tener lo expuesto, al proyectar un laboratorio de análisis de suelos, en relación con la calidad ambiental.

19. FERRÓLISIS

La ferrólisis es un proceso complejo, que consiste en la acidificación y destrucción de las arcillas bajo la influencia de condiciones alterantes de oxidación-reducción del hierro, con una acidificación gradual, en suelos hidromorfos que se inundan estacionalmente debido a las lluvias. Ello tiene lugar en suelos sujetos a procesos redox estacionales, en ausencia de carbonato cálcico. La alternancia de condiciones oxidantes y reductoras implican cambios en el estado de oxidación del hierro ($\text{Fe}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$). Debido a la distinta solubilidad de ambos estados de oxidación, se da un progresivo lavado de hierro en forma ferrosa, que es sustituido por H^+ en el complejo de cambio, lo que origina una acidificación creciente del suelo. A medida que el pH disminuye, al no ser estables las arcilla-H, se destruyen.

20. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Completar con el término más adecuado dentro del contexto, de entre los cuatro propuestos:

Un sistema suelo – agua será un medio deficiente en oxígeno si está (1) _____. El manganeso puede presentarse en el suelo con (2) _____ estados de oxidación, de ellos el que se hallará en un suelo con condiciones ácuicas (Gleysol^{WRB}) será el (3) _____. En condiciones aerobias la forma más estable del hierro será (4) _____. El metano, que tiene un efecto invernadero, se conoce vulgarmente como «gas de los pantanos», este nombre se justifica porque estos lugares se caracterizan por unas condiciones (5) _____, que hacen que se produzca y desprenda metano. En estos medios el azufre puede encontrarse en forma de (6) _____ que, con el hierro (7) _____, puede precipitar en forma de pirita (8) _____, compuesto altamente insoluble debido a que presenta enlaces covalentes y fuente potencial de acidificación aguda, si el suelo se (9) _____ y no existe en él carbonato cálcico para tamponar la reacción. La reducción de SO_4^{2-} a H_2S es (10) _____ en presencia de Fe^{3+} , ya que el estado de oxidación de éste último es (11) _____, siendo su potencial de reducción estandar igual a (12) _____ y el del SO_4^{2-} igual a (13) _____.

- | | | | | |
|------|-------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|
| (1) | a) bien aireado | b) saturado de agua | c) abierto | d) inundado temporalmente |
| (2) | a) dos | b) tres | c) cuatro | d) cinco |
| (3) | a) Mn | b) MnO_2 | c) Mn(II) | d) pirolusita |
| (4) | a) Fe(II) | b) ninguna | c) Fe^0 | d) Fe(III) |
| (5) | a) adecuadas | b) oxidantes | c) reductoras extremas | d) reductoras |
| (6) | a) azufre nativo | b) ión sulfuro | c) piro sulfato potásico | d) ión sulfato |
| (7) | a) metal | b) insoluble | c) férrico | d) ferroso |
| (8) | a) FeS_2 | b) FeSO_4 | c) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_2$ | d) Fe_2O_3 |
| (9) | a) concentra | b) dreña | c) cultiva | d) inunda |
| (10) | a) acelerada | b) inhibida | c) aumentada | d) posible |
| (11) | a) más alto | b) más bajo | c) $-0,180$ | d) $+0,770$ |
| (12) | a) $+0,680$ | b) $+0,770$ | c) 0 | d) $-0,220$ |
| (13) | a) $+0,680$ | b) $+0,770$ | c) 0 | d) $-0,220$ |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Introducir el concepto de contaminación de suelos en relación con actividades antrópicas, relacionándolo con el concepto de biodisponibilidad, bioacumulación y los mecanismos químicos que los determinan.

Plantear el tema de la descontaminación de suelos que es objeto de cursos más avanzados.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Contaminación de suelos.

Origen de la contaminación.

Elementos contaminantes.

Niveles de contaminación.

Descontaminación de suelos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*, 3ª edición. Ediciones Mundi Prensa, cap. 9, 10, 27 y 28. Madrid, 2003.

La revista: *Journal of Soil Contamination*.

La página web de la *Environmental Protection Agency*: <http://www.epa.gov/>.

Van der Peck, M: *Soil and Water Contamination from Molecular to Catchment Scale*. Taylor & Francis. 389 pp. 2006.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos.

Una propiedad importante del suelo que hace que pueda retirar elementos contaminantes de carga positiva de un agua que lo contenga es (1) _____. Los nutrientes se pueden agrupar en (2) _____ y en (3) _____. Algunos de estos últimos a ciertas dosis pueden pasar de nutriente esencial a elemento contaminante. Como decía Paracelso en el siglo XVI, «sólo la dosis hace el veneno». La biodisponibilidad de un elemento es una característica (4) _____. La diferencia entre adsorción y absorción estriba en que la primera hace referencia a (5) _____.

La densidad real media de un suelo es de (6) _____ kg m^{-3} .

- | | | | | |
|-----|-----------------|---|--|------------------------|
| (1) | a) la CIA | b) la CE | c) la CIC | d) el pH |
| (2) | a) catiónicos | b) aniónicos | c) macronutrientes | d) abonos |
| (3) | a) necesarios | b) micronutrientes | c) básicos | d) enmiendas |
| (4) | a) constante | b) que depende de la forma del elemento | c) biológica | d) variable |
| (5) | a) la nutrición | b) un fenómeno de superficie | c) la entrada de un elemento a la raíz | d) (no hay diferencia) |
| (6) | a) 2650 | b) 5000 | c) 1350 | d) 2100 |

2. CONTAMINACIÓN DE SUELOS

La **contaminación** del suelo tiene lugar al añadir compuestos inorgánicos u orgánicos no deseables o deseables, si bien en este último caso en exceso. Pueden ejercer efectos adversos sobre la calidad y funcionamiento del suelo. Pueden inhibir el crecimiento de las plantas, resultar tóxicos o servir de sustrato (alimento) para los organismos del suelo, o bien pueden ser transferidos a otro compartimento ambiental (capa freática) pudiendo afectar con ello a la calidad del agua y la sostenibilidad ecológica.

La contaminación de suelos es mucho más persistente que la del aire o la del agua.

El comportamiento de los contaminantes en el suelo está relacionado con las propiedades químicas estudiadas: fenómenos de superficie (adsorción–desorción), formación de complejos con la materia orgánica, reacción del suelo, entre otros, que determinarán su biodisponibilidad, la velocidad con que se moverán en el suelo y en qué dirección lo harán, es decir, en el comportamiento biogeoquímico del elemento en el suelo.

Dado que el suelo tiene capacidad tampón, los efectos negativos derivados de una contaminación pueden tardar un cierto tiempo en hacerse patentes, momento en el que el suelo puede estar extremadamente contaminado, con efectos negativos sobre el agua, el aire, la salud humana y animal. Entre las principales funciones del suelo y aspectos que pueden verse afectados cabe citar:

- Soporte físico, por ejemplo, como patio de recreo para los niños o para construcciones.
- Producción de alimentos con riesgo para la salud de las personas y animales que los consuman.
- Calidad del agua que atraviese un suelo contaminado puede empeorar.
- Como hábitat biológico.
- Potencial conflicto de intereses entre el valor fertilizante de un lodo de depuradora y el riesgo de contaminación del suelo, según las características del lodo y las del suelo.

La Unión Europea ha establecido una normativa para terrenos contaminados, directiva de la que deriva la legislación en los diversos Estados miembros.

TERRENOS CONTAMINADOS

Los terrenos contaminados son aquellos que presentan un riesgo actual o potencial para la salud o el medio ambiente, como resultado de un uso actual o pasado. Presentan sustancias químicas peligrosas (metales pesados, compuestos orgánicos, aceites, alquitranes, sales solubles, entre otras) de origen antrópico.

3. ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN

La contaminación del suelo puede ser debida a residuos industriales, urbanos o radioactivos; a la aplicación de lodos de depuradora si éstos están contaminados; a vertidos incontrolados en campos petrolíferos; a prácticas agrícolas inadecuadas, como puede ser el uso en exceso de agroquímicos (herbicidas, productos fitosanitarios y fertilizantes); o a utilizar mal el suelo para tratar residuos de animales (estiércoles o purines) y de humanos (aguas residuales).

4. ELEMENTOS CONTAMINANTES

Los metales presentes en el suelo pueden desempeñar funciones fisiológicas importantes tras ser absorbidos por la planta (Zn, Fe, Mn, Cu, Co, entre otros), debiendo ser considerados **micronutrientes**, nombre con el que se indica que la planta los requiere en cantidades muy pequeñas. Ahora bien, al aumentar su concentración, pueden llegar a crear problemas, pasando a tener que ser considerados **elementos contaminantes**.

Los contaminantes se suelen dividir en **inorgánicos**, es decir, sin enlaces C—H, y **orgánicos**. Los inorgánicos incluyen los metales pesados (densidad superior a $5.000\text{--}6.000\text{ kg m}^{-3}$); la lluvia ácida, derivada del uso de combustibles fósiles que dan lugar a óxidos de azufre y de nitrógeno que, con la humedad de la atmósfera, producen ácidos; y los radionucleidos. Los contaminantes orgánicos por lo general, son productos xenobióticos aportados al suelo, tales como productos fitosanitarios, vertidos de petróleo, entre otros.

Contaminantes orgánicos

Los contaminantes orgánicos se caracterizan por su elevado **peso molecular** y por su **polaridad** (áreas del compuesto tienen carga positiva y otras negativa, aun cuando la molécula en su conjunto sea neutra). Ambas propiedades, peso molecular y polaridad, determinan el comportamiento de estos compuestos en el suelo y las posibilidades de eliminación. Mientras los compuestos de bajo peso molecular pueden ser volatilizados y, por ello, eliminados rápidamente, los de alto peso molecular serán mucho más recalcitrantes y perdurarán en el suelo durante largo tiempo.

Por lo que hace a la polaridad, puede determinar los puntos de ataque de los microorganismos, ya que éstos suelen atacar las moléculas por el sitio donde haya un dipolo. Por ello, una molécula de alto peso molecular y con carácter no polar constituirá unos de los contaminantes orgánicos más persistentes en el suelo (Ashman y Puri, 2002).

Metales pesados

La mayoría de metales pesados que pueden contaminar los suelos derivan de procesos industriales y de algunos lodos de depuradora. Los metales más frecuentes son: As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn. El orden de toxicidad de los metales pesados para las bacterias es: $\text{Cu} > \text{Cd} > \text{Ni} > \text{Zn}$. Para los animales y plantas los más tóxicos son: Cd, As, Cr y Hg y los menos tóxicos B, Cu y Zn, si bien habrá que tener en cuenta las condiciones de medio, ya que determinan su biodisponibilidad, y los organismos enfrentados. Algunos ejemplos:

- Arsénico: puede ser absorbido por las plantas y pasar a la cadena alimentaria.
- Cadmio: no tiene funciones biológicas esenciales para los humanos, sino efectos tóxicos. Puede acumularse en los riñones, donde puede crear disfunciones si la concentración en el córtex es superior a 200 mg kg^{-1} de peso fresco. El Cd puede proceder de comida y agua contaminadas, puede inhalarse del aire contaminado, o proceder del humo del tabaco. En distinto grado, los abonos fosfatados pueden contener Cd, así como las aguas residuales de industrias de electroplastia, provocando la contaminación de suelos cuando éstas se utilizan para riego, análogamente si las aguas proceden de áreas mineras contaminadas, pudiendo provocar la enfermedad Itai-Itai identificada en Japón. Interfiere con el metabolismo del calcio, la vitamina D y puede dar lugar a osteoporosis (Yang y Chang, 2005).
- Cesio: se presenta en suelos contaminados con radionucleidos procedentes de emisiones derivadas de la generación de energía nuclear, ensayos nucleares y accidentes nucleares. Es un elemento que puede ser bioacumulado en las plantas y ser fácilmente transferido a la cadena alimentaria. Puede ser fuertemente retenido por los minerales de arcilla.

- Cobre: es un micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, pero en concentraciones elevadas resulta tóxico para los cultivos. En suelos no contaminados se suele encontrar a niveles de 2 a 100 mg kg⁻¹, con una concentración media a 30 mg kg⁻¹. El Cu, al igual que el Zn, se añade en pequeñas cantidades a la mayoría de raciones para animales, con el fin de mejorar diversas funciones corporales. La eficiencia en la absorción por los animales es muy baja, por lo que pasan a las deyecciones y con ello a los estiércoles y purines. Por otro lado, el aporte al suelo de lodos de depuradora conteniendo Cu²⁺ puede llegar a crear problemas si resulta biodisponible (Bahaminyakamwe *et al.*, 2006).
- Cromo: El cromo y el níquel pueden encontrarse en suelos contaminados de antiguas zonas industriales y en suelos tratados con lodos de depuradora contaminados. Por otro lado, los suelos desarrollados a partir de serpentinitas, rocas metamórficas subsilíceas (ultramáficas) ricas en Mg, pueden presentar fuertes limitaciones de fertilidad química al tener relaciones Ca/Mg bajas y un enriquecimiento no antropogénico de Cr y Ni, pudiendo contener de 0,5 a 6,0 g Cr kg⁻¹ (Hseu, 2006). Las formas en las que se presenten el Cr y el Ni determinarán su biodisponibilidad y su movilidad. El Cr⁶⁺ es altamente tóxico y no así el Cr³⁺.
- Flúor.
- Mercurio.
- Níquel.
- Plomo.
- Zinc.

En relación a la transferencia de elementos contaminantes del suelo a otros compartimentos ambientales, como puede ser una capa freática, cabe destacar la importancia de la zona no saturada situada encima de aquella, ya que desempeña un papel protector, al actuar como filtro y como reactor en el que estos elementos pueden perder movilidad.

5. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. Estudiar y redactar un informe acerca de los siguientes aspectos:

- a) Forma de presentarse, comportamiento y efectos de los elementos contaminantes citados y no descritos en el texto: As, F, Hg, Ni, Pb y Zn.
- b) El comportamiento del cobre a partir de la siguiente información: «el cobre puede ser retenido en los suelos por adsorción vía interacciones, tanto no específicas, como específicas, así como por medio de reacciones de precipitación con hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos y sulfuros. La adsorción no específica implica la retención relativamente débil del catión Cu²⁺ libre, en forma de un complejo de esfera externa, debido a una atracción electrostática de las superficies cargadas negativamente de los coloides del suelo. La adsorción específica implica la formación selectiva de complejos de esfera interna entre el Cu y la ligandos de superficie sobre las láminas minerales y la materia orgánica» (Burton *et al.*, 2005).

6. NIVELES DE CONTAMINACIÓN

El establecimiento de contenidos estándares aceptables de un contaminante en el suelo resulta difícil, ya que debería basarse en la relación entre la cantidad total del elemento y las características del suelo que pueden determinar su biodisponibilidad y, por ello, los efectos sobre el crecimiento, la absorción, respiración, degradación, desarrollo radicular, actividad enzimática, etc.

Los **test de ecotoxicidad** permiten evaluar la concentración a la que se manifiestan los efectos adversos de un contaminante concreto.

La cantidad máxima de un componente dado que puede llegar a recibir un suelo o un ecosistema, de manera que, a largo plazo, no se presenten efectos nocivos sobre la estructura y funciones del suelo o del ecosistema, según los conocimientos disponibles, se denomina **carga crítica contaminante** (Macías, 2002). La aplicación de este concepto permite sectorizar el espacio en zonas con diferentes grados de sensibilidad frente a este tipo de impactos y cuantificar la disminución de la capacidad de amortiguación del sistema que se produciría.

7. CALCULAR E INTERPRETAR

- E3.** a) Calcular las cantidades de cobre y zinc que se pueden haber acumulado en la capa arable (25 cm) de un suelo cuya densidad aparente es de 1350 kg m^{-3} , por aporte de un estiércol equivalente a $3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, cuyo contenido es de 65 mg Cu kg^{-1} y $459 \text{ mg Zn kg}^{-1}$. El uso del suelo es agrícola, con un monocultivo de maíz (*Zea mays* L.) durante treinta años, con una producción media de $13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de materia seca y una absorción anual aproximada de $0,09 \text{ kg ha}^{-1}$ de Cu y $0,30 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn.
- b) Buscar en Internet información acerca de si el cobre y el zinc se acumulan en las raíces o son translocados a la parte comestible de la planta.

8. DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS

Dado que los procesos de descontaminación son complejos, caros y consumen mucho tiempo, lo más adecuado es disponer de planes de prevención, para evitar las contaminaciones, antes de que éstas tengan lugar. Este es el enfoque en muchos países con una legislación medioambiental avanzada.

No obstante, si no ha habido prevención, los tratamientos de descontaminación se fundamentan en el comportamiento biogeoquímico del elemento contaminante identificado. A pesar del coste elevado, los procesos de descontaminación de hacen imprescindibles en sitios contaminados de uso humano, tales como antiguas zonas industriales reconvertidas en zonas urbanas, jardines, parques, áreas de recreo, zonas de uso agrícola, entre otras. Los principales tipos de tratamientos son:

- a) Procesos físicos y químicos:
- Excavación y extracción del suelo para llevarlo a vertedero.
 - Lavado del suelo con agua.
 - Intercambio iónico.
 - Lavado con agentes complejantes.
 - Ósmosis-ultrafiltración inversa.
 - Sellado de sitios contaminados.

- b) Biorremediación

La biorremediación consiste en aplicar métodos biológicos para eliminar contaminantes. Se hace por medio de plantas que son capaces de extraer el contaminante del suelo o bien de microorganismos que sean capaces de degradar el contaminante al utilizarlo como sustrato.

9. DISCUTIR

E3. Discutir los siguientes aspectos:

- a) ¿En qué suelos serán potencialmente más tóxicos el cobre, níquel y zinc? Indicar en qué criterios se basa la respuesta.
- b) Al estudiar los resultados de unos ensayos de biorremediación para eliminar cesio del suelo, llevados a cabo con material procedente de dos suelos, uno de textura arenoso-franca y otra franco-arcillosa, se observa que los ratios de bioacumulación $[\text{Cs}]_{\text{raíces}} / [\text{Cs}]_{\text{suelo}}$ o $[\text{Cs}]_{\text{retoño}} / [\text{Cs}]_{\text{suelo}}$ son considerablemente mayores en el segundo suelo que en el primero. Formular alguna hipótesis acerca de algún mecanismo que podría permitir explicar la diferente absorción de Cs por parte de las raíces de *Brassica campestris* (col) que es la planta utilizada.
- c) En un nuevo ensayo se trabaja con suelos de textura franca con una CIC de $16,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, y contenidos crecientes de potasio intercambiable. Al analizar los resultados se observa que los ratios de bioacumulación disminuyen a medida que aumenta el potasio intercambiable. Formular alguna hipótesis para explicar este comportamiento.
- d) ¿Qué efectos puede tener la incorporación de materia orgánica coloidal soluble en un suelo contaminado por metales pesados, radionucleidos y algunos pesticidas?

10. BUSCAR INFORMACIÓN Y SINTETIZAR

E3. Buscar información en Internet y redactar un informe en cada caso:

- El Boletín Oficial en el que se legisla acerca de los suelos contaminados y su inventario. Realizar una síntesis y construir un mapa de conceptos clave para una exposición en público y un debate entre todos los equipos.
- En 1950 murieron 65 mujeres en Japón por la enfermedad Itai-Itai, que es endémica en algunas zonas de aquel país. Explicar las causas.
- ¿Cuáles pueden ser causas de contaminación de los suelos en la zona donde nos encontramos? ¿Ha habido casos que hayan trascendido a los medios de comunicación? ¿Qué legislación existe? ¿Cómo se monitorea si los suelos alcanzan niveles de riesgo de contaminación? ¿Puede citar algún otro caso?

11. CONOCER Y COMPRENDER

1. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto de entre los propuestos:

La (1) _____ de un suelo hace referencia a que éste tiene concentraciones elevadas de compuestos, generalmente debidos a actividades antrópicas, que tienen efectos adversos para la salud humana y la actividad (2) _____ en el suelo. Hasta el año 2006 la Unión Europea no ha elaborado (3) _____ cuyo objetivo es la protección de los suelos, que como tal será de obligado cumplimiento para los países miembros.

Las industrias químicas y las refinerías son origen de contaminantes (4) _____, mientras que las industrias de la piel actúan con (5) _____ que, dependiendo de su estado de oxidación puede resultar extremadamente tóxico para los seres humanos y supone un riesgo de contaminación ambiental grande. Los contaminantes (6) _____ constituyen sustratos para los organismos del suelo, a los que proporcionan nutrientes y energía, por lo que su eliminación del suelo por biodegradación puede esperarse que sea efectiva.

La toxicidad de los metales pesados deriva del hecho que afectan a la permeabilidad de las membranas de las células y alteran los procesos bioquímicos en la célula. El contaminante puede quedar bloqueado en la raíz o ser translocado a la parte aérea, de donde puede ser transferido a la cadena trófica. Como cationes que son, pueden ser (7) _____ por las arcillas y la materia orgánica, lo que supone una inmovilización más o menos prolongada, principalmente si pasan a formas (8) _____ y, en mayor grado, si entran a formar parte de una red cristalina (9) _____ en el suelo. El uso de lodos de depuradora puede utilizarse (10) _____.

La lluvia ácida tendrá distintos efectos según sea el receptor. Sobre un edificio construido con bloques calizos, el efecto será «el mal de la piedra», la roca se meteorizará produciendo (11) _____; sobre un suelo calizo sin vegetación, el carbonato cálcico (12) _____ el cambio de pH; sobre un bosque, producirá quemaduras sobre la vegetación; y en las aguas de un lago de montaña puede producir una acidificación progresiva con efectos sobre la fauna.

Los contaminantes orgánicos más recalcitrantes será aquellos que tengan un peso molecular (13) _____ y un carácter (14) _____.

- | | | | | |
|------|----------------|------------------------|------------------------------|---------------------|
| (1) | a) riqueza | b) calidad | c) contaminación | d) valoración |
| (2) | a) biológica | b) química | c) humana | d) zoológica |
| (3) | a) una ley | b) un decreto | c) ordenanza | d) directiva |
| (4) | a) orgánicos | b) inorgánicos | c) químicos | d) volátiles |
| (5) | a) hierro | b) cromo | c) manganeso | d) zinc |
| (6) | a) volátiles | b) inorgánicos | c) químicos | d) orgánicos |
| (7) | a) absorbidos | b) retenidos | c) adsorbidos | d) bloqueados |
| (8) | a) inorgánicas | b) orgánicas | c) insolubles | d) precipitadas |
| (9) | a) neoformada | b) heredada | c) meteorizada | d) transformada |
| (10) | a) masivamente | b) indiscriminadamente | c) con control y seguimiento | d) en suelos ácidos |
| (11) | a) yeso | b) calcita | c) anhidrita | d) agua |
| (12) | a) resuelve | b) tampona | c) acelera | d) aumenta |
| (13) | a) bajo | b) muy bajo | c) alto | d) muy alto |
| (14) | a) dipolar | b) tripolar | c) no polar | d) ácido |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

12. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

E3. El compostaje es la práctica de reciclaje de la materia orgánica en agricultura, especialmente útil donde no se dispone de otras fuentes de materia orgánica para el suelo. En el cuadro que sigue se muestran las características químicas de composts obtenidos a partir de diversas fuentes de materia orgánica.

Características químicas del compost	Fuente de materia orgánica para fabricar el compost		
	Basuras urbanas	Lodos de depuradora de aguas residuales	Restos vegetales de jardinería
pH	8,53	7,53	7,85
Conductividad eléctrica dS m ⁻¹ a 25 °C	5,52	4,10	0,61
Materia Orgánica total %	52,41	62,14	53,35
N – NH ₄ ⁺ mg kg ⁻¹ de compost	619	3.028	25
N – NO ₃ ⁻ mg kg ⁻¹	32	21	0
Zn mg kg ⁻¹	197	1.087	76
Cu mg kg ⁻¹	325	338	42
Ni mg kg ⁻¹	82	54	47
Cr mg kg ⁻¹	-	95	16
Pb mg kg ⁻¹	97	110	38
Cd mg kg ⁻¹	0,3	1,5	0,17

- ¿Qué efectos tiene sobre las propiedades del suelo la incorporación de materia orgánica?
- ¿Basándose en los datos del cuadro, qué compost supone mayor riesgo de contaminación en caso de aplicarlo al suelo? ¿Por qué? ¿En suelos de qué características?
- ¿Qué inconveniente tiene para la agricultura el uso de un compost procedente de restos vegetales?
- ¿Si se aplican 20.000 kg ha⁻¹ del compost procedente de residuos urbanos, qué cantidad de nitrógeno total (amoniaco y nítrico) se aportará al suelo en kg ha⁻¹?

OBJETIVOS

Describir los principales organismos del suelo y los indicadores de la actividad biológica.
Conocer las bases de la ecología del suelo.
Entender el comportamiento cíclico de distintos elementos.
Conocer las posibilidades y riesgos de la gestión de la ecología del suelo.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Observaciones en el campo: escala centimétrica.
Suelo y biodiversidad: Flujos de nutrientes, energía y material genético.
Rizosfera.
Factores abióticos del suelo.
Funciones de los organismos en el suelo.
Ciclos biogeoquímicos de nutrientes.
Gestión de la ecología del suelo: bioindicadores, biofertilización, biorremediación y modificación genética de microorganismos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*, 3.^a ed. Cap. 16. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, 2003.

Gobat, J. M., Aragno, M. y Matthey: *Le Sol Vivant. Bases de Pédologie et Biologie des Sols*. 2.^a ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 568 pp. Lausanne, 2003. Existe una versión en inglés.

Killham, K.: *Soil Ecology*. Cambridge Academic Press, 242 pp. Cambridge, UK, 2001.

Lynch, J.M. (ed.): *The Rhizosphere*. John Wiley & Sons. New York, 1990.

Stevenson, F.J.: *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorous, Sulfur, Micronutrients*. John Wiley & Sons. 2.^a edición, 448 pp. New York, 1999.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más adecuado dentro del contexto, de entre los propuestos.

Los procesos biológicos controlan en gran medida las propiedades morfológicas, por ejemplo las características del horizonte (1) _____ que constituye el mantillo de los suelos forestales; las propiedades físicas, como por ejemplo la (2) _____; y químicas, como las características de los componentes orgánicos del suelo. Por ello, en el esquema de Jenny los organismos vivos son considerados un (3) _____ del suelo.

Un proceso de reducción implica que un elemento que puede actuar con (4) _____ valencia/s (5) _____ electrones, lo cual implica necesariamente que otro elemento se (6) _____. En suelos extremadamente reducidos, lo que se corresponde a períodos de inundación muy prolongado, se puede formar metano, (7) _____, que es un gas con efecto invernadero.

- | | | | | |
|-----|--------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| (1) | a) E | b) B | c) O | d) R |
| (2) | a) textura | b) CIC | c) estructura | d) profundidad efectiva |
| (3) | a) activador | b) catalizador | c) proceso formador | d) factor formador |
| (4) | a) una | b) más de una | c) tres | d) dos |
| (5) | a) gana | b) pierde | c) cede | d) transforma |
| (6) | a) disuelve | b) reduce | c) oxida | d) transforma |
| (7) | a) CH ₃ -COOH | b) CH ₄ | c) R - COOH | d) R - OH |

2. OBSERVACIONES EN EL CAMPO: ESCALA CENTIMÉTRICA

La actividad biológica es muy importante en el suelo y varía de unos suelos a otros. Los organismos que viven en ellos intervienen de forma directa e indirecta en muchas de las funciones que desarrollan los suelos y en todas las reacciones biogeoquímicas. Por ello, tanto la materia orgánica, como los microorganismos constituyen indicadores de la calidad de un suelo.

Al estudiar un suelo se pueden observar turrículas en la superficie de un prado, que son deyecciones de lombrices, mezcla de materia orgánica y mineral. En el mantillo de un bosque los restos orgánicos presentan un cierto grado de descomposición más o menos avanzado, mientras que en el perfil del suelo la materia orgánica ha perdido sus características originales, siendo significativo su contenido en los horizontes O, A y B_h.

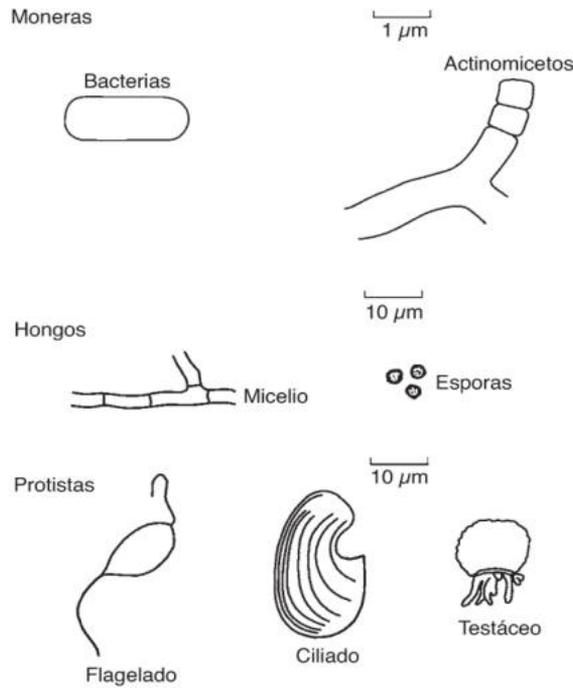
Cabe distinguir entre una materia orgánica que se biodegrada en meses (como las hojas de caducifolios) y una materia orgánica que permanece en el suelo durante cientos de años (humus). Además, en los distintos horizontes se pueden observar signos de actividad biológica, ya sea el modelo de distribución de raíces, que pueden llegar a extenderse varios metros (las raíces de la alfalfa, por ejemplo, pueden alcanzar hasta seis metros de profundidad, lo que le confiere una gran resistencia a la sequía); o bien, galerías, cavidades y excrementos de la fauna del suelo. En suelos de pradera, aunque no sólo en ellos, es posible observar manchas centimétricas de forma circular o elipsoidal, de un color que, si bien es diferente al del horizonte en el que se hallan, se asemeja al del horizonte superior. Se trata de galerías de macrofauna, rellenas con material del horizonte superior, que se denominan krotovinas (del ruso, topo).

3. SUELO Y BIODIVERSIDAD: FLUJOS DE NUTRIENTES, ENERGÍA Y MATERIAL GENÉTICO

Al pasar a una escala de observación más detallada y observar con lupa o con microscopio un horizonte A, se puede identificar una gran diversidad de organismos vivos en diferentes proporciones. Esta enorme diversidad de especies hace que el suelo posea una gran riqueza en material genético, es decir una gran **biodiversidad** y que por ello pueda utilizar fuentes de energía muy diversas.

Forman parte de los **organismos vivos del suelo**, por orden de abundancia: bacterias, hongos, actinomicetos, microalgas, fauna (de protozoos a mamíferos) y la parte subterránea de las plantas. Todos ellos interactúan en el suelo con transferencias mutuas de energía y de masa.

Atendiendo a la forma cómo obtienen **energía y carbono** para sus funciones metabólicas, cabe distinguir los organismos **autótrofos**, que producen carbono orgánico al fijar CO₂ atmosférico durante la fotosíntesis y utilizan la energía de la radiación solar y de otras fuentes inorgánicas. Los organismos que requieren exclusivamente



compuestos orgánicos como sustrato para obtener energía y carbono se denominan **heterótrofos** (entre ellos todos los hongos). Si se alimentan de plantas vivas o de sus productos se denominan herbívoros y son conocidos como **consumidores** primarios. De ellos se alimentan los parásitos y depredadores, que constituyen los consumidores secundarios (protozoos y algunos nemátodos), de los que se alimentan los consumidores terciarios (insectos y arácnidos). Los que se alimentan de materia orgánica muerta se conocen como **saprófagos**, estos descomponedores son de gran importancia por la gran cantidad de materia orgánica existente en los horizontes superiores del suelo.

Los organismos **autótrofos** se pueden agrupar en **fotoautótrofos**, que obtienen **energía** a partir de la fotosíntesis y **quimioautótrofos**, que obtienen energía y carbono a partir de reacciones químicas. Los que sólo pueden respirar en presencia de oxígeno se denominan **aerobios estrictos** (bacterias, tales como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* y los hongos). Los que pueden respirar tanto en presencia como en ausencia de oxígeno se conocen como **anaerobios facultativos** y, si sólo actúan en ausencia de oxígeno, **anaerobios estrictos** (bacterias como *Desulfovibrio desulfuricans*, capaces de utilizar el SO_4^{2-} como aceptor de electrones, o *Methanobacterium* que interviene en la metanogénesis, formación de metano, en medios fuertemente reductores: suelos encharcados durante largos períodos y en los suelos pantanosos).

Los límites de tamaño entre unos y otros se han fijado de forma arbitraria, y no hay coincidencia entre los criterios de los distintos autores. Atendiendo al **tamaño** (Gobat *et al.*, 2003), los organismos del suelo se pueden agrupar en megafauna, macrofauna, mesofauna y microorganismos. La **megafauna** está integrada por vertebrados: ratones, topos, reptiles, perros de las praderas, entre otros; e invertebrados, como algunas lombrices de tierra. La **macrofauna** está representada por los anélidos oligoquetos, entre ellos los enquitreidos y lombrices; los moluscos gasterópodos, como babosas y caracoles; artrópodos, tales como los miriápodos, arácnidos e insectos. La **mesofauna** está integrada por nemátodos, ácaros y algunos insectos, como los colémbolos. Los **microorganismos**, son extraordinariamente abundantes, de tal manera que un gramo de suelo puede contener millones de individuos. Su importancia reside en su capacidad para descomponer muchos tipos de materiales, entre ellos la materia orgánica del suelo. Cabe distinguir la **microfauna**, con protozoos y algunos nematodos; y la **microflora**: bacterias, algunos hongos, actinomicetos y algas).

Dependiendo de las condiciones de medio, las bacterias son los microorganismos más abundantes, más que los hongos. La mayoría de algas requieren de la luz, por lo que se concentran en la superficie. En arrozales y en zonas húmedas, algunas algas pueden proporcionar nitrógeno a las plantas, al reducir el N_2 atmosférico. Los protozoos desempeñan un importante papel en el ciclo de nutrientes por sus hábitos depredadores.

La importancia de los distintos organismos del suelo se pone en evidencia en el siguiente cuadro, donde se observa su abundancia (número de organismos) y cantidad de biomasa.

Organismos	Abundancia		Biomasa en el horizonte labrado Kg ha ⁻¹
	por m ³ de suelo	por g de suelo	
Lumbrícidos	200-2000	< 1	110-1.100
Nematodos	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁴ - 10 ⁵	11-110
Otros invertebrados	10 ⁴ -10 ⁶	variable	17 – 170
Bacterias	10 ¹⁴ -10 ¹⁵	10 ⁸ -10 ⁹	450 - 4500
Actinomicetos	10 ¹³ -10 ¹⁴	10 ⁷ -10 ⁸	450-4.500
Hongos	10 ¹¹ -10 ¹²	10 ⁵ -10 ⁶	1120-11.200
Algas	10 ¹⁰ -10 ¹¹	10 ⁴ -10 ⁵	56-560
Protozoos	10 ¹⁰ -10 ¹¹	10 ⁴ -10 ⁵	17-170

Reelaborado a partir de Brady, 1990.

La elevada biodiversidad de muchos suelos les confiere una **diversidad funcional**, lo que significa que una misma función puede ser realizada por distintos tipos de organismos, es decir, que los suelos presentan una **redundancia funcional**. Esta propiedad confiere al suelo **resiliencia** (capacidad para volver rápidamente a un funcionamiento saludable después de una alteración significativa) y **estabilidad** para continuar manteniendo sus funciones, incluso si hay una perturbación ambiental.

4. ESTUDIAR Y DEBATIR

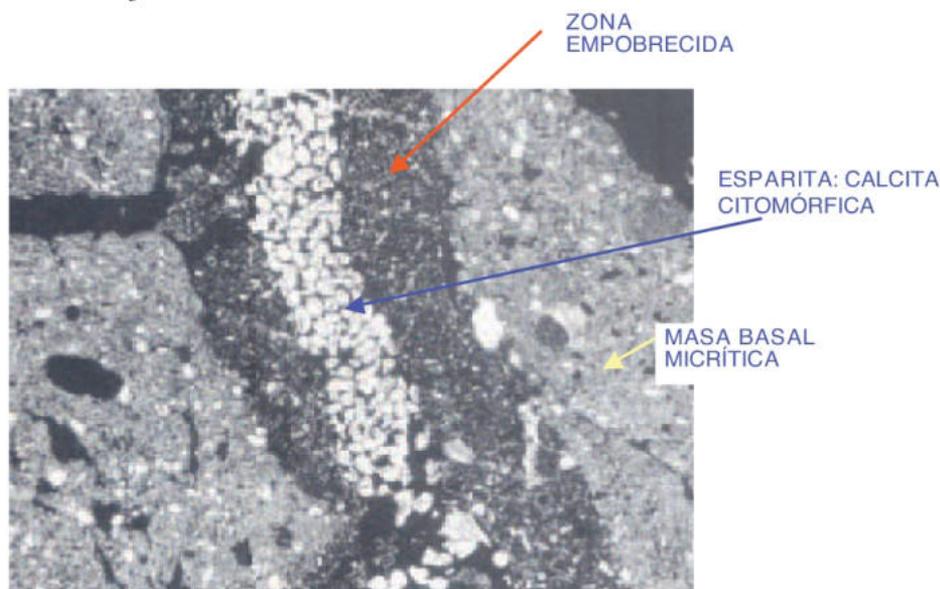
- G2.** a) Discutir si es posible que existan situaciones (microambientes o micrositos) en los que pueden convivir a pocos milímetros de distancia bacterias aerobias estrictas y bacterias anaerobias estrictas.
- b) Indicar con qué propiedad mecánica puede compararse la resiliencia.

5. ESTUDIAR E INTERPRETAR

G2. Estudiar el siguiente texto y evaluar y discutir el significado de las *queras* y de los pseudomicelios de carbonatos, su procedencia y su validez como diagnóstico de horizontes cálcicos.

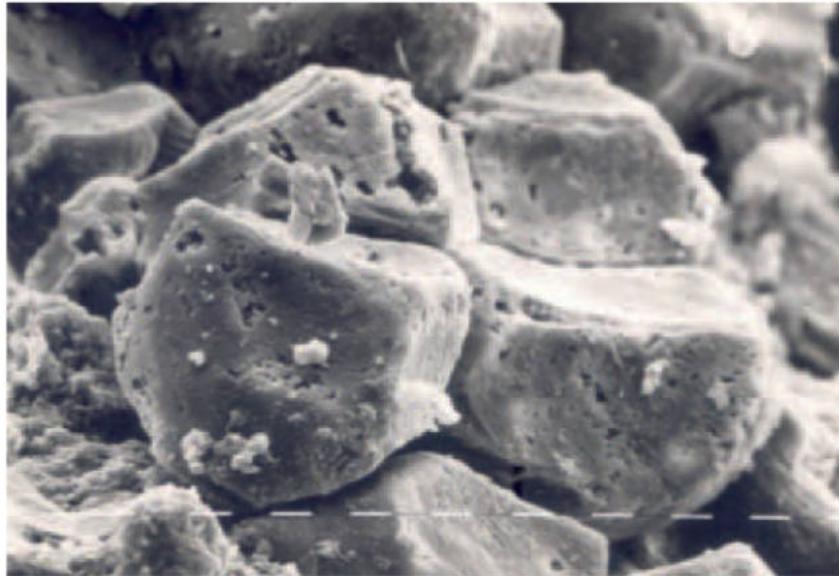
Las *queras* son morfologías edáficas observables a escala microscópica (edaforrasgos) presentes en suelos calizos y yesosos. Consisten en poros rellenos por calcita de origen biológico (calcita biogénica en células calcificadas). La matriz que rodea estos poros está parcialmente descarbonatada. En el campo es difícil distinguir estos edaforrasgos de otros tipos de acumulaciones, tales como los pseudomicelios.

Una de las hipótesis de formación de las *queras* es que las raíces de ciertas plantas, o las hifas de ciertos hongos acidifican la matriz caliza del suelo, disuelven el CaCO₃ y lo concentran en sus células, como estrategia para reducir el contenido de CaCO₃ de la rizosfera.



Cavidad rellena de micrita: quera.

J. Herrero



Granos de esparita: calcita citomorfa de origen biogénico.

J. Herrero

6. RIZOSFERA

RIZOSFERA

La rizosfera, en sentido amplio, es aquella zona de transición entre las raíces y el suelo. Se trata de una interfase en la que tienen lugar los intercambios entre el sistema radicular y el suelo. Biológicamente es muy activa, ya que existen en ella microorganismos, bacterias, hongos y sus depredadores. Sus límites espaciales son imprecisos.

En la rizosfera el número y diversidad de organismos es generalmente mucho más elevado que en el suelo no afectado por la raíz, y los microorganismos decrecen en número a medida que nos alejamos de la zona radicular. Es importante no olvidarlo al realizar muestreos para estudiar los microorganismos del suelo.

Se producen interacciones entre las raíces y los microorganismos de la rizósfera, así como entre los propios microorganismos y con la fauna (especialmente la microfauna). Las interacciones pueden tener efectos positivos y negativos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas y pueden ser de simbiosis, competencia, parasitismo, depredación, antibiosis, mutualismo, entre otras.

Un caso de **simbiosis** de organismos es la asociación alga-hongo para formar líquenes, que pueden actuar como primeros colonizadores de rocas inalteradas (roca fresca); así como entre las raíces y bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico, que dan lugar a la formación de **nódulos** en las raíces. Los hongos, por su lado, al asociarse con las raíces, dan lugar a las **micorrizas**: endomicorrizas (en plantas cultivadas, excepto las crucíferas que no son nunca micorrizadas) y ectomicorrizas (en árboles forestales), que favorecen la disponibilidad de fósforo para la planta.

La **competencia** se da entre bacterias y hongos (competencia por el hierro, por ejemplo). La **depredación** se produce entre aquellos protozoos que se alimentan de bacterias. Los casos de **parasitismo** entre organismos tienen interés en fitopatología.

Por su parte, las raíces proporcionan sustrato (flujo de carbono y energía), que constituye una **rizodeposición** que beneficia el crecimiento de microorganismos heterótrofos. Este sustrato está formado por: **células desprendidas**, que pueden segregar enzimas y otras proteínas hasta ser atacadas por bacterias; **lisatos** de los tejidos rizodérmicos de los que se benefician las bacterias saprófitas; **mucílagos** segregados por la raíz y por microorganismos de la propia rizosfera, importantes para la formación de microagregados; y **exudados**, que son la parte predominante de la rizosfera y se componen de azúcares, ácidos aminados, factores de crecimiento y hormonas (Gobat *et al.*, 2003).

7. ESTUDIAR E INTERPRETAR

E3. Buscar información que permita explicar los siguientes hechos y redactar un informe.

- Al estudiar el comportamiento de dos campos de ensayo de trigo (*Triticum aestivum*), uno de ellos invadido por *Agropyron repens*, se observa en él un menor crecimiento del trigo.
- En un bosque de nogal negro (*Juglans nigra*) se observa que la vegetación bajo los árboles es muy escasa. Estudiar cuáles pueden ser las causas e interacciones posibles que impiden el crecimiento.

8. FACTORES ABIÓTICOS DEL SUELO

Los factores **abióticos** del suelo, tales como su reacción, régimen de humedad y de temperatura, contenido de oxígeno, contenido de carbonato cálcico y de yeso, salinidad, entre otros y la vegetación como factor **biótico** condicionan los organismos que viven en un suelo determinado y, por ello, la biodiversidad en el suelo. Existen especies ubicuistas, es decir, con capacidad para vivir en ambientes muy diversos, por lo que toleran variaciones importantes en el medio; por el contrario, otras tienen una amplitud ecológica estrecha, reflejando rápidamente los cambios en el hábitat, ya sea por contaminación, bioacumulaciones u otros factores, por lo que resultan de gran interés como organismos bioindicadores.

9. FUNCIONES DE LOS ORGANISMOS EN EL SUELO

Los organismos del suelo desempeñan múltiples funciones, entre ellas:

- **Mezclan** material del suelo. En ello son muy eficaces las lombrices de tierra (*Lombricus terrestris*), que excavan galerías, bioporos, lo que mejora la aireación y la permeabilidad. Pueden llegar a ingerir cada día casi hasta diez veces su propio peso, mezclando materia orgánica y mineral en su tracto intestinal y excretando una mezcla estructurada en forma de turrículas; también contribuyen a dividir finamente la materia orgánica. Por todo ello mejoran la calidad del suelo. Su hábitat se caracteriza por ser húmedo, bien drenado, rico en materia orgánica y con un pH próximo a la neutralidad.

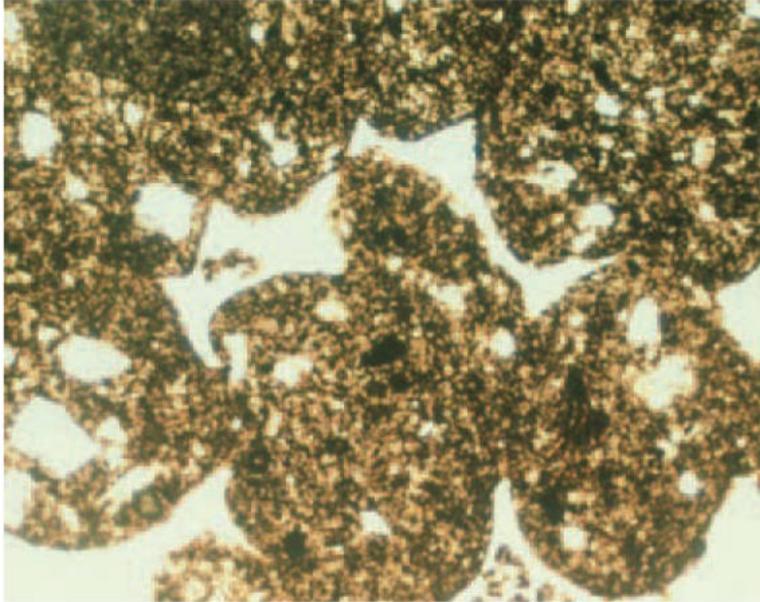


J. Porta



Acción estructurante de la fauna.

Cortesía ASSS.



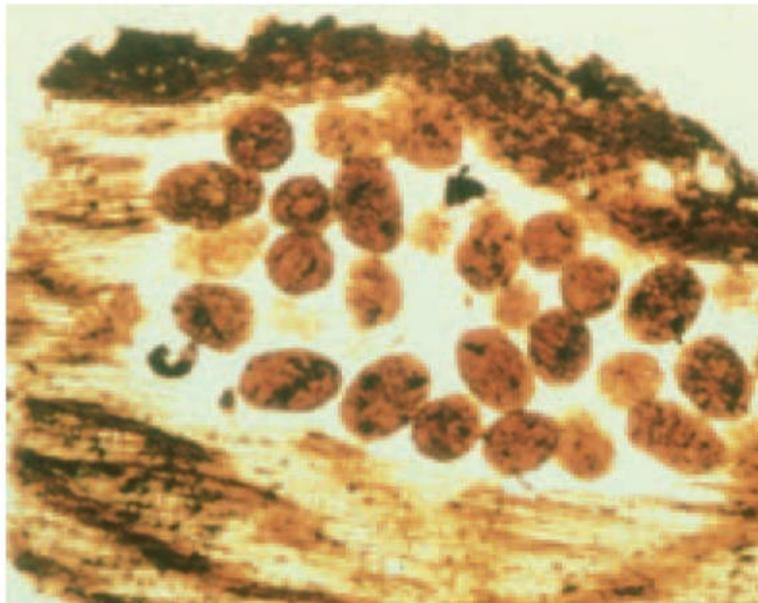
Formas redondeadas debidas a fauna.



Cortesía ASSS. Nido de termitas en Togo.

R.M. Poch

- Mejoran la **estructura** del suelo. Los organismos que viven en la rizosfera producen mucílagos y exudados que unen partículas del suelo. Las bacterias sintetizan polisacáridos muy resistentes a la degradación enzimática, por lo que entran a formar parte del humus y participan en la formación de microagregados. Además, las superficies de las bacterias tienen carga eléctrica negativa, por lo que pueden ejercer un papel semejante al de las arcillas. También intervienen en la formación de agregados los micelios de hongos, que pueden llegar a alcanzar incluso varios metros de longitud.
- Intervienen en el **reciclado de energía y masa** (C, N, etc.), por descomposición de materia orgánica, en la que desempeñan un importante papel las bacterias.



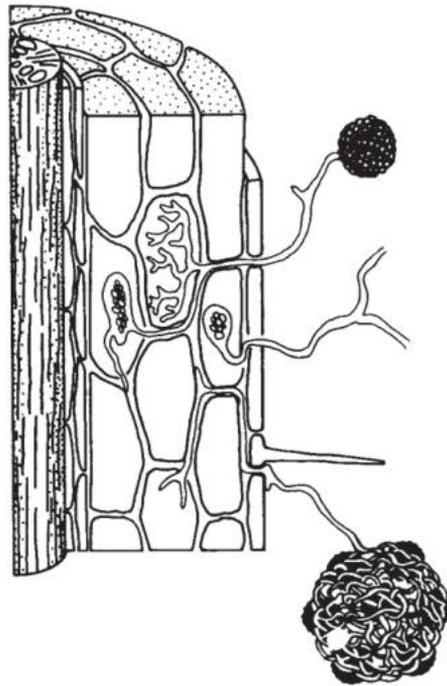
Descomposición de la materia orgánica.

R.M. Poch

- Intervienen en el **reciclado de nutrientes** para las plantas, por la mineralización de la materia orgánica.
- Transmiten y controlan **enfermedades**. Las bacterias, algunos actinomicetos y hongos sintetizan factores de crecimiento (vitaminas) y antibióticos, por lo que ejercen una acción sobre otros organismos. Los hongos microscópicos (*Penicillium*) ejercen un control de ciertas enfermedades. Los microorganismos sinte-

tizan además enzimas y sustancias orgánicas, entre ellas, algunas que pueden formar parte de los compuestos húmicos y compuestos del tipo de los sideróforos que pueden actuar como agentes quelantes frente al hierro.

- **Fijan biológicamente nitrógeno** atmosférico, papel que ejercen las bacterias simbióticas que se asocian con las raíces de las leguminosas y de otras plantas. Las bacterias forman nódulos en las raíces y son capaces de transformar el N_2 atmosférico en formas orgánicas y utilizables por la planta. También ejercen esta acción las algas verde-azuladas (cianobacterias) y algunos actinomicetos.
- Favorecen la **absorción de nutrientes y agua**. La asociación simbiótica de un hongo con las raíces de una planta da lugar a una **endomycorriza** que favorece la nutrición, en especial la absorción de fósforo por parte de las raíces.



Micorriza.

- **Descomponen xenobióticos** (productos orgánicos resultantes de síntesis industrial: compuestos fitosanitarios, herbicidas, entre otros) y productos derivados del petróleo que pueden ser biodegradados.

Para conocer los modos de observación y funciones de algunos de los organismos del suelo se puede consultar: <http://www.agron.iastate.edu/%7Eloynachan/mov/> (verificado en 2008).

10. ESTUDIAR Y DISCUTIR

E3. Discutir y redactar un informe acerca de:

- a) Si el efecto de un vertido contaminante será el mismo a escala de un tipo de microorganismo concreto, que para la función ecológica descontaminante de un suelo.
- b) Buscar información acerca de la función biogeoquímica de las bacterias en la formación y desarrollo del suelo.
- c) ¿Cuál es el papel de los hongos en la edafogénesis de rocas duras?.

11. ESPIRITU CRÍTICO

A1. Al consultar Internet para obtener información acerca del *Agropyrum repens*, en una página web se indica como nombre en español de esta planta «carrizo».

- a) Indicar si es correcta la información.

- b) Indicar qué características tiene el *Agropyron repens* que hacen que los agricultores no quieran ni oír hablar de él para revegetar y proteger canales de desagüe para dar salida de forma no erosiva al agua de escorrentía superficial.
- c) Cuál es el nombre científico del carrizo y en qué información proporciona la presencia de esta planta acerca del hábitat en que vive.

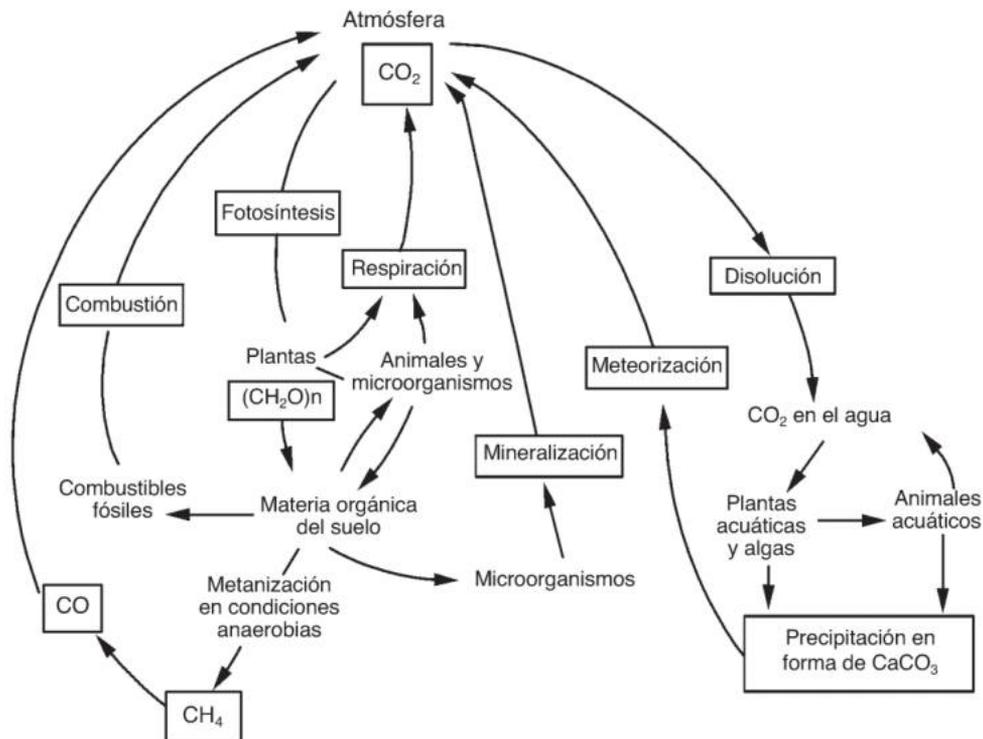
12. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS DE NUTRIENTES

La materia orgánica senescente (materia orgánica fresca) se incorpora al suelo procedente de tejidos vegetales, a lo que hay que añadir las deyecciones animales. En ellos se encuentran en forma orgánica C, N, S, P, entre otros elementos, que han sido introducidos en la cadena trófica al ser absorbidos del suelo por las raíces en forma preferentemente inorgánica como nutrientes. Los microorganismos del suelo intervienen en la mineralización de la materia orgánica, liberando de los compuestos orgánicos los distintos componentes en forma inorgánica: CO_2 , H_2O , NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} . Con ello se cierra un ciclo muy complejo, integrado por el ciclo de cada elemento, que es muy diferente de unos elementos a otros y una parte del cual tiene lugar en el suelo, con intervención de los microorganismos y la fauna. Cada ciclo está integrado por un conjunto de procesos biológicos y abióticos (Stevenson, 1999).

En el ciclo de cada elemento tienen lugar reacciones de descomposición de la materia orgánica, complejación, intercambio iónico con cationes y aniones, y reacciones de sorción.

Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es extremadamente complejo, con procesos aerobios y anaerobios, con compuestos muy efímeros y otros muy recalcitrantes, con intervención de múltiples microorganismos, afectando además a la regulación global del carbono. El mayor reservorio de carbono orgánico son las rocas orgánicas (carbones, petróleos y querógenos) y el inorgánico las rocas carbonatadas, cuya formación tiene a largo plazo un efecto amortiguador del contenido de CO_2 atmosférico.



Ciclo del nitrógeno

Fijación de nitrógeno atmosférico

La fijación biológica de nitrógeno atmosférico se puede representar con la reacción:



que puede tener lugar de forma no simbiótica por parte de la bacteria *Azotobacter* o bien por asociación simbiótica al asociarse bacterias del género *Rhizobium* con las raíces de las leguminosas, dando lugar a nódulos en los que se instala la bacteria. Las bacterias pueden realizar la fijación del N_2 a presión atmosférica y a temperatura ambiente gracias a la intervención de una enzima, la nitrogenasa, similar en todos los organismos fijadores.

Amonificación

La amonificación es el mecanismo complejo, que consta de dos etapas, la aminización (paso de N proteico a aminas R-NH_2) y la amonización (transformación de las aminas a amonio). De manera que el nitrógeno orgánico de la biomasa (proteínas y ácidos nucleicos) es transformado en forma de amonio (NH_4^+). En esta forma el nitrógeno puede ser adsorbido en las sedes de intercambio catiónico, lo que evita que pueda perderse por lavado. Las plantas pueden absorber el nitrógeno en forma NH_4^+ y NO_3^- , si bien en proporciones diferentes. En la amonificación intervienen bacterias aerobias, actinomicetos y hongos.

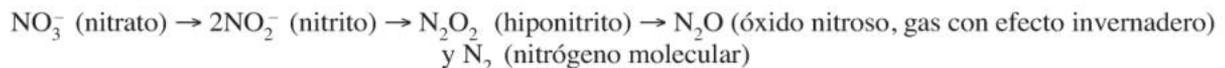
Nitrificación

La nitrificación consiste en la oxidación biológica del ión amonio (resultante de la mineralización de la materia orgánica o aportado en forma de abono) y por la cual pasa a ión nitrato. El oxígeno actúa como aceptador de electrones terminal y el proceso de nitrificación consta de dos etapas consecutivas:

- Nitrosación: $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O}$, en la que intervienen bacterias *Nitrosomonas*.
- Nitratación: $\text{NO}_2^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$, en la que intervienen bacterias *Nitrobacter*.

Desnitrificación

La desnitrificación consiste en la reducción de los nitratos, que sirven de fuente de oxígeno a organismos desnitrificantes heterótrofos, anaerobios facultativos, tales como las *Pseudomonas*:



Ciclo del azufre: procesos redox

Las bacterias anaerobias (*Desulfovibrio*) reducen los sulfatos a sulfuros, que pueden precipitar en forma de pirita (FeS_2); por el contrario, las aerobias (*Acidithiobacillus*) oxidan los sulfuros a sulfatos. En ausencia de carbonato cálcico en el medio se producirá una fuerte acidificación, en caso contrario se formará yeso.

Ciclo del hierro: procesos redox

Los enzimas contienen hierro que actúa en procesos redox. En los suelos las bacterias ferrooxidantes, autótrofas y aerobias aceleran la oxidación del Fe(II) a Fe(III) lo que puede tener lugar espontáneamente en condiciones de buena aireación. Por el contrario, las bacterias heterótrofas y anaerobias reducen el Fe(III) a Fe(II) en suelos con carácter ácuico (condiciones reductoras).

13. BUSCAR INFORMACIÓN E INTERPRETAR

E3. Buscar información en la biblioteca y en Internet y redactar un informe acerca de:

- a) Ciclo del carbono, estudiando los siguientes aspectos:
 - a.1) Indicar cuál es la forma más oxidada y cuál la más reducida del carbono biológico.
 - a.2) Qué microorganismos intervienen en condiciones extremadamente reductoras.

- b) Ciclo del nitrógeno, destacando los siguientes aspectos:
 - b.1) Indicar cuál es la fuente principal de N para los microorganismos y los hongos y cuál para la mayoría de plantas.
 - b.2) Cuál es el proceso implicado en la transformación de una fuente de nitrógeno en otra.
 - b.3) Cuál de las dos fuentes de nitrógeno tiene mayores efectos medioambientales y por qué.
- c) Ciclo del azufre, indicando entre otros aspectos:
 - c.1) En qué condiciones aparece el yeso en el ciclo. Formular las reacciones químicas.
 - c.2) Microorganismos que intervienen a lo largo de un proceso de drenaje de un suelo.
 - c.3) Precauciones a tomar al querer drenar un suelo por el riesgo de existencia de pirita.

14. GESTIÓN DE LA ECOLOGÍA DEL SUELO

Bioindicadores

INDICADOR

Una especie u organismo indicador es aquel cuya presencia sólo se explica atribuyendo al entorno local ciertas propiedades de las que es indicador.

Los organismos (plantas, fauna y microorganismos) responden de distinta manera según sean las condiciones del hábitat en que viven, por lo que pueden utilizarse como indicadores biológicos o **bioindicadores** de diferentes parámetros: régimen de humedad, salinidad, reacción del suelo, presencia de carbonato cálcico, así como de contaminaciones, condiciones microclimáticas o bioacumulaciones. Para poder utilizar esta metodología se requiere conocer los organismos utilizados y su ecología, siendo los de una amplitud ecológica estrecha los que tienen mayor interés como indicadores (Gobat *et al.*, 2003).

Biofertilización

La inoculación es una técnica que permite aportar al suelo un microorganismo del que carezca y que resulte relevante para las funciones que se espera que desempeñe en la nutrición de las plantas u otras. En aquellos casos en que no se haya cultivado previamente una leguminosa en un campo, puede ser necesario inocular con bacterias del género *Rhizobium* como biofertilizante. Cada cultivo tiene capacidad para establecer asociaciones simbióticas con diferentes microorganismos, así por ejemplo, en el caso de la soja sólo nodula *Bradyrhizobium japonicum*. En el caso de árboles las inoculaciones de mayor interés se hacen con micorrizas (ectomicorrizas). Algunas de estas técnicas se practican desde finales del siglo XIX, aportando suelo de otra zona donde el cultivo hubiese prosperado adecuadamente.

Por otro lado, la problemática ambiental derivada de la lixiviación (pérdidas por lavado) de nitratos y su transferencia a una capa freática, en la que, consecuentemente, aumentará la concentración, puede crear riesgos para la salud, en el caso que dicha agua sea utilizada como agua para consumo humano. Para poder disminuir el riesgo de pérdidas de nitrógeno NO_3^- , interesaría poder controlar la tasa de hidrólisis de la urea y la nitrificación en el suelo. Las investigaciones se orientan a encontrar la forma de inhibir estos procesos de una forma efectiva.

Biorremediación

Los organismos que viven en el suelo, además de actuar como bioindicadores, pueden degradar xenobióticos (productos orgánicos de síntesis industrial), extraer elementos contaminantes, absorbiéndolos y acumulándolos y, en el caso de ser eficiente el proceso, se podría llegar a la descontaminación del suelo. El enfoque es muy sugerente, si bien por el momento es objeto de trabajos de investigación. Evidentemente, más que medidas correctoras a aplicar cuando el suelo ha sido ya contaminado, hay que legislar para que se apliquen medidas preventivas, que eviten la degradación y pérdida de calidad de los suelos por contaminación.

Modificación genética de organismos

La finalidad de la biotecnología del suelo reside en incrementar la producción de los cultivos y la eficiencia en agricultura, por lo que es objeto de gran atención, con grandes avances. No obstante, la utilización de microorganismos modificados genéticamente (GMM) exige entender bien la ecología del suelo, para poder dar respuesta a las múltiples preguntas que surgen. Entre ellas, si el GMM puede sobrevivir, multiplicarse y migrar en el suelo, o si el nuevo gen puede ser transferido a otros organismos o si el GMM puede liberar productos que puedan suponer algún tipo de riesgo al afectar a otros procesos en el suelo. En definitiva, qué riesgos ambientales pueden existir, lo que ha generado un debate social importante. Se requiere información predictiva y ésta sólo se obtendrá dedicando esfuerzos a la investigación. En muchos casos puede ser preferible modificar genéticamente la planta para que sea resistente a enfermedades, que inocular el suelo con GMM, ya que los riesgos ambientales pueden ser más controlables en plantas.

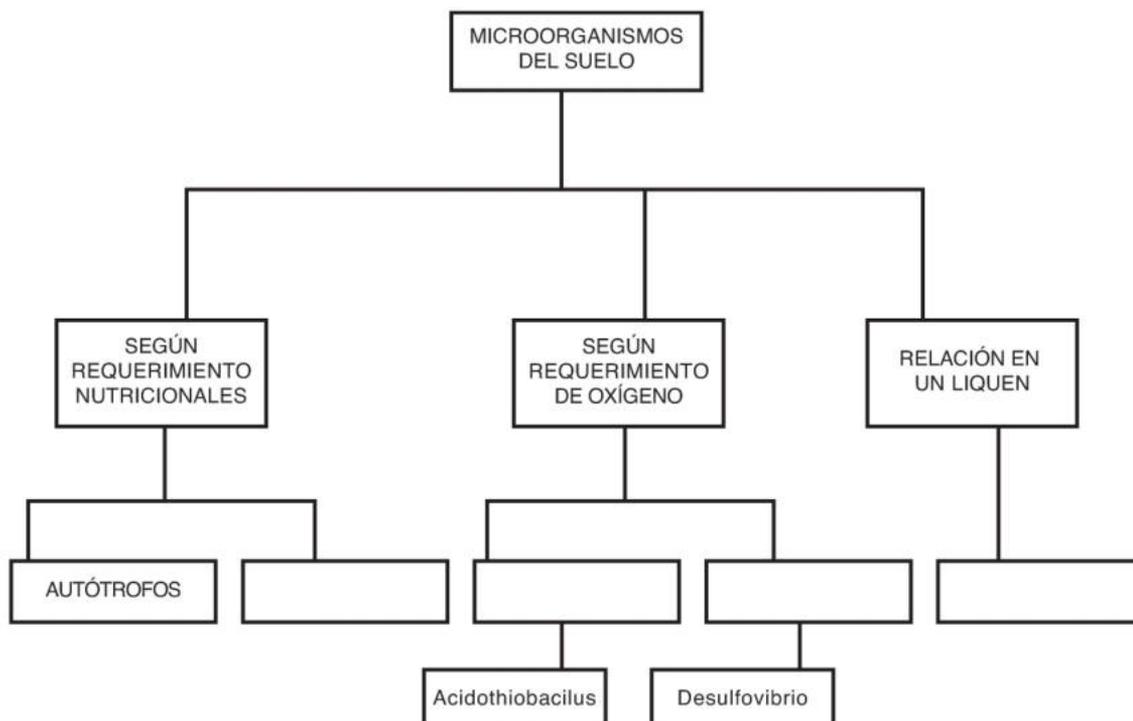
15. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Buscar información en Internet y en la biblioteca y redactar un informe acerca de:

- Qué tiene que ver la urea con el riesgo de contaminación de una capa freática con ión nitrato y cómo se orientan las investigaciones para evitarlo. Indicar si son medioambientalmente equivalentes el ión nitrato y el ión amonio.
- Qué papel desempeñan las bacterias del género *Nitrobacter* y las del género *Nitrosomonas*; los organismos saprófitos; los quimiorganótrofos y los quimiolitótrofos; y las bacterias sulfo-oxidantes.
- Qué incidencia tiene la presencia de aluminio soluble e intercambiable en el suelo sobre las bacterias del género *Azotobacter*; y del Mn^{2+} sobre las bacterias del género *Rhizobium* y sobre las posibilidades de cultivar alfalfa.
- Las algas del suelo como biocombustible.

16. ESQUEMA CONCEPTUAL

A1. Completar el siguiente esquema conceptual referente a los microorganismos del suelo:



17. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los cuatro propuestos:

Las lombrices de tierra, que forman parte de la (1) _____, desempeñan un importante papel en (2) _____ y en la calidad del suelo. En este intervalo de tamaño se hallan también las termitas, que viven en suelos de regiones tropicales y subtropicales. Los nemátodos forman parte de (3) _____ y se alimentan de bacterias y hongos, pero también pueden infectar las raíces de las plantas, facilitando la entrada de otros patógenos. La zona afectada de forma directa por las raíces y que, por consiguiente, está influenciada por ellas y sus exudados se conoce como (4) _____ y sus características pueden ser muy diferentes a las del suelo circundante. Las algas forman parte de la microflora y son organismos (5) _____, que si se asocian con (6) _____ dan lugar a un líquen. Los hongos son (7) _____ y forman parte de la flora del suelo, algunos de ellos poseen un aparato vegetativo formado por filamentos integrados por ramas de cadenas largas de células, que se denominan (8) _____ son de color blanco, visibles en el mantillo, y en el horizonte (9) _____. Contribuyen a la unión de partículas minerales y, en consecuencia, a la (10) _____ del suelo. Su asociación con una raíz da lugar a (11) _____ que supone un beneficio para las plantas, ya que favorecen la (12) _____. Los hongos predominan en medios ácidos, en los que el crecimiento de las bacterias se ve inhibido, excepto el género *Acidithiobacillus* (anteriormente *Thiobacillus*) que está adaptado a condiciones de extrema acidez interviniendo en la (13) _____ de la pirita a (14) _____. Las bacterias son los microorganismos (15) _____ en el suelo. Presentan una gran (16) _____ funcional, por lo que desempeñan numerosas funciones biogeoquímicas en el suelo. La asociación de bacterias del género *Rhizobium* con las raíces de las leguminosas es importante, ya que contribuye a la (17) _____ y forman (18) _____ en las raíces. Las *Nitrosomonas* son bacterias que intervienen en el ciclo del nitrógeno (19) _____. Las bacterias del género *Nitrosobacter* son (20) _____. La bacteria *Azotobacter* interviene en el ciclo biogeoquímico de nutrientes como (21) _____.

- | | | | |
|--|------------------------------------|--|-----------------------------------|
| (1) a) macrofauna | b) microflora | c) microfauna | d) mesofauna |
| (2) a) textura | b) estructura | c) drenaje | d) microporosidad |
| (3) a) microflora | b) mesofauna | c) microfauna | d) krotovinas |
| (4) a) rizosfera | b) zona radicular | c) cavidad | d) epipedión |
| (5) a) heterótrofos | b) quimioautótrofo | c) autótrofos | d) anaerobios |
| (6) a) protozoo | b) nematodo | c) hongo | d) raíz |
| (7) a) autótrofos | b) heterótrofos | c) nemátodos | d) anaerobios |
| (8) a) setas | b) hifas | c) hilillo | d) micelios |
| (9) a) A | b) H | c) O ₂ | d) O |
| (10) a) aireación | b) estructuración | c) nutrición | d) meteorización |
| (11) a) líquen | b) nódulo | c) parásito | d) micorrizas |
| (12) a) nutrición | b) aireación | c) desinfección | d) respiración |
| (13) a) reducción | b) hidrólisis | c) oxidación | d) protonación |
| (14) a) sulfato | b) nitrato | c) sulfuro | d) sulfhídrico |
| (15) a) minoritarios | b) más abundantes | c) intermedios | d) unicelulares |
| (16) a) diversidad | b) uniformidad | c) especificidad | d) actividad |
| (17) a) aireación | b) fijación de CO ₂ | c) fijación de N ₂ | d) fijación de O ₂ |
| (18) a) micorrizas | b) hifas | c) micelios | d) nódulos |
| (19) a) fijan nitrógeno | b) forman nódulos | c) oxidan amonio | d) oxidan nitritos |
| (20) a) anaerobias facultativas | b) anaerobias estrictas | c) forman nódulos con las leguminosas | d) oxidan los nitritos a nitratos |
| (21) a) fijador de nitrógeno no simbiótico | b) fijador simbiótico de nitrógeno | c) fijador de fósforo con la micorriza | d) oxidante del hierro |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Conocer los factores que afectan la presencia y disponibilidad de agua en el suelo.
Caracterizar el agua del suelo desde los puntos de vista estático y dinámico.
Identificar morfologías e indicadores de la presencia de agua en el suelo, como limitante para su uso.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Contenido de agua en el suelo. Definiciones.
Medida del contenido de agua del suelo en el campo.
Estado energético del agua en el suelo: el potencial hídrico y sus componentes.
Curva característica de humedad.
Movimiento de agua en el suelo saturado: conductividad hidráulica.
Movimiento del agua en régimen no saturado.
Infiltración.
Clases de drenaje.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*, 3.^a ed. Cap. 12 y 13. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2003.
Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Cap. 9. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 2005.
Hillel, D.: *Environmental Soil Physics*. Academic Press. 1998
Bohne, K.: *An Introduction into Applied Soil Hydrology*. Lecture Notes in GeoEcology, Catena Verlag, 231 pp., Reiskirchen, 2005.
Koorevar, P., Menelik, G. y Dirksen. D: *Elements of Soil Physics*. Elsevier, 228 pp. Amsterdam, 1983.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CC. Complete el siguiente texto con los términos más adecuados según el contexto, entre las cuatro opciones que figuran en el cuadro.

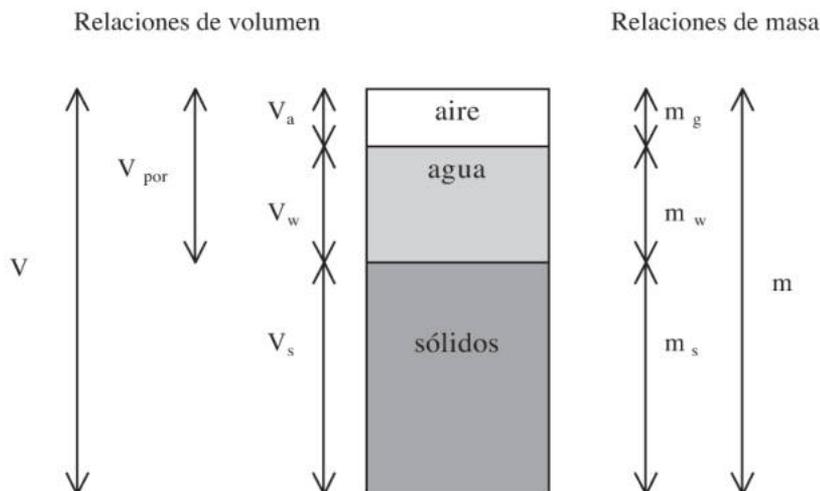
El suelo es un sistema poroso que puede almacenar y transmitir fluidos (agua y aire), lo que lo hace un medio adecuado como soporte y la vida de los organismos vivos. La densidad del suelo se mide en (1) _____. La densidad de un suelo se denomina (2) _____, y es la relación entre la masa y el volumen inalterado que el suelo ocupa en el campo, mientras que la (3) _____ se calcula mediante la relación entre la misma masa y el volumen de las partículas sólidas del suelo. En este caso, normalmente se toma la densidad del (4) _____ como valor estándar. Desde el punto de vista del almacenamiento y circulación de fluidos, es necesario considerar la distribución de tamaños de poros, su morfología, grado de conexión y orientación. En este sentido, los poros mayores dependen de la (5) _____ del suelo, que determina la (6) _____. Por el contrario, la (7) _____ determina la (8) _____, al ser los poros más pequeños los resultantes del empaquetamiento de las partículas más finas de los suelos.

- | | | | | |
|----|------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| 1) | a) kp m^{-3} | b) g m^{-2} | c) kg m^{-3} | d) kPa |
| 2) | a) densidad real | b) Densidad aparente | c) Densidad actual | d) Densidad inalterada |
| 3) | a) Densidad aparente | b) Densidad sólida | c) Densidad real | d) Densidad mineral |
| 4) | a) yeso | b) cuarzo | c) carbonato cálcico | d) diamante |
| 5) | a) textura | b) compactación | c) cohesión | d) estructura |
| 6) | a) macroporosidad | b) porosidad aparente | c) porosidad de agregados | d) estabilidad |
| 7) | a) compactación | b) estructura | c) textura | d) firmeza |
| 8) | a) porosidad entre agregados | b) microporosidad | c) friabilidad | d) fluidez |

2. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO. DEFINICIONES

Uno de los conceptos empíricos más comprobados por la humanidad es la relación entre el contenido de agua del suelo y el crecimiento de las plantas. Tanto el exceso como la carencia de agua son factores que afectan el desarrollo de las raíces, lo que ha llevado a formular teorías sobre cómo el suelo almacena y transporta agua, sobre qué factores controlan la disponibilidad de agua para las plantas y, en general, sobre modelos de circulación de agua en el denominado continuo suelo-agua-planta-atmósfera.

El agua del suelo no se encuentra nunca en estado puro, ya que puede contener solutos y sustancias en suspensión. Para referirse al agua del suelo se definen los siguientes parámetros representando los constituyentes del suelo con el modelo siguiente:



El volumen y masa de las fases cumplen:

$$V = V_a + V_w + V_s$$

$$m = m_a + m_w + m_s$$

Expresadas como fracciones, y siendo 1 la fracción de volumen, resulta:

$$\frac{V_s}{V} + \frac{V_w}{V} + \frac{V_a}{V} = 1$$

$$\theta_s + \theta_w + \theta_a = 1$$

La porosidad (P) es la fracción de volumen ocupada por poros (aire y agua) referida al volumen de suelo. Si el volumen de poros es: $V_v = V_a + V_w$, la porosidad expresada en fracción de volumen de suelo es:

$$\text{porosidad} = \frac{V_v}{V}$$

El ratio de poros (e) es la proporción de poros respecto al volumen de sólidos

$$e = \frac{V_v}{V_s} + \frac{V_v}{(1 - V_v)}$$

La densidad aparente es la relación entre la masa de suelo seco (sólidos) y el volumen de suelo:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V}$$

A veces se utiliza el concepto de densidad húmeda: $\rho_{bw} = \frac{m_s + m_w}{V}$

La densidad de cada fase es:

$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$ Varía entre 2600 y 2650 kg m⁻³ para la mayoría de suelos minerales. También se denomina densidad real. La densidad del material orgánico es muy variable, entre 200 y 1.300 kg m⁻³.

$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$ Es aproximadamente 1000 kg m⁻³.

$\rho_a = \frac{m_a}{V_a}$ Es aproximadamente 0, comparado con las otras fases.

El contenido de agua se puede expresar como fracción de volumen o fracción de masa:

Contenido volumétrico de agua $\theta_w = \frac{V_w}{V}$

Contenido másico de agua $w = \frac{m_w}{m_s}$

Se define asimismo el Índice de saturación (s) como la fracción de la porosidad ocupada por agua, que oscila entre 0 y 1:

$$s = \frac{V_w}{V_v}$$

El ratio de humedad se define como la relación entre el volumen de agua y el volumen de la fase sólida:

$$C = \frac{V_w}{V_s} = \theta_w (1 + e).$$

En el cuadro de la página siguiente se muestran las variables utilizadas en orden alfabético, su simbología y unidades.

Concepto o variable	Símbolo	Ecuación dimensional	Unidades
Densidad aparente	ρ_b	$[M L^{-3}]$	$Kg m^{-3}$
Densidad húmeda	ρ_t	$[M L^{-3}]$	$Kg m^{-3}$
Densidad real	ρ_s	$[M L^{-3}]$	$Kg m^{-3}$
Fracción de masa de agua. Contenido másico de agua	w	$[M M^{-1}]$	Adimensional (%)
Fracción de volumen	θ	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Fracción de volumen de agua. Contenido volumétrico de agua	θ_w	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Fracción de volumen de aire	θ_a	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Fracción de volumen de sólidos	θ_s	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Índice de saturación	s	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Masa de suelo	m	$[M]$	Kg
Masa de aire	m_a	$[M]$	Kg
Masa de agua	m_w	$[M]$	Kg
Masa de sólidos	m_s	$[M]$	Kg
Porosidad	P	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Ratio de poros	e	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Ratio de humedad	C	$[L^3 L^{-3}]$	Adimensional (%)
Volumen de suelo	V	$[L^3]$	m^3
Volumen de aire	V_a	$[L^3]$	m^3
Volumen de agua	V_w	$[L^3]$	m^3
Volumen de sólidos	V_s	$[L^3]$	m^3
Volumen de poros	V_v	$[L^3]$	m^3

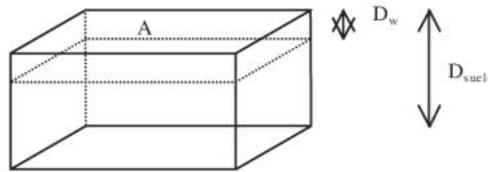
El contenido de agua se expresa a menudo como profundidad equivalente, o espesor de lámina de agua D o D_w (mm):

$D = \text{volumen de agua} / \text{superficie de suelo (unidades de altura de lámina de agua)}$

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} = D_w \cdot \frac{A}{D_{\text{suelo}}} \cdot A = \frac{D_w}{D_{\text{suelo}}} \quad \rightarrow \quad D_w = \theta_w \cdot D_{\text{suelo}}$$

Si el contenido de agua se expresa sobre tierra fina sin piedras (sin elementos gruesos, EG), habrá que descontar el porcentaje volumétrico de los mismos en el cálculo de la lámina de agua:

$$D_w = \theta \cdot D_{\text{suelo}} (1 - EG), \quad \text{donde EG es el volumen ocupado por elementos gruesos en tanto por uno.}$$



3. DEMOSTRAR

G2. A partir de los conceptos introducidos demostrar que se cumple:

- 1) $P = 1 - (\rho_b / \rho_s)$
- 2) $\theta = \rho_b \cdot w$
- 3) $e = V_v / (1 - V_v)$

4. CALCULAR E INTERPRETAR

a) Calcule la densidad real de un suelo con el 95% de fase sólida mineral, y el 5% orgánica (densidad de materia orgánica 1.300 kg m^{-3}).

- b) Se toma una muestra de 134,8 g de suelo que ocupa un volumen de 78,4 cm³. Al secarla en la estufa no pierde peso. Determine el volumen de huecos y la densidad aparente, y complete la siguiente tabla:

Elemento	Masa	Volumen	Densidad
Aire			
Agua			
Huecos			
Sólidos			
Suelo			

5. MEDIDA DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO EN EL CAMPO

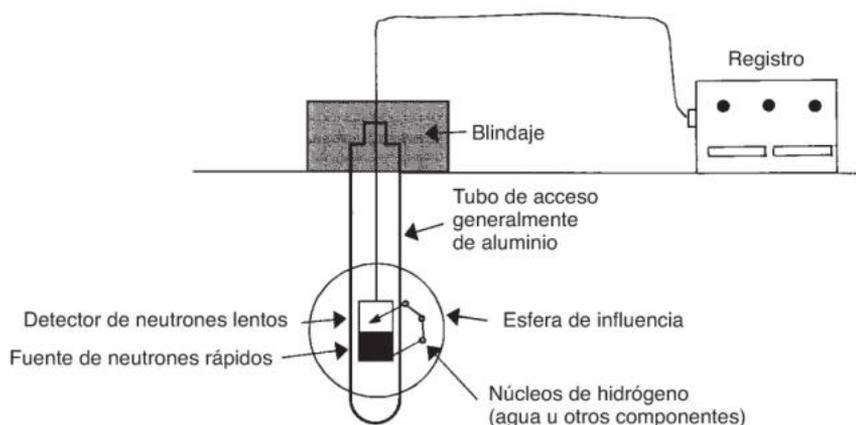
Medida directa: método gravimétrico

Para conocer el contenido volumétrico de agua que tiene un suelo en el campo se determina la masa de agua en muestras inalteradas de suelo de volumen conocido (tomadas mediante un cilindro). Es la diferencia entre la masa húmeda y seca del suelo, mediante secado en la estufa a 105 °C durante 24 h, o hasta peso constante. Hay que operar con las precauciones necesarias para evitar pérdidas por evaporación durante la manipulación de la muestra. En suelos con arcillas expansibles o suelos con yeso la temperatura de secado no puede sobrepasar los 40 – 50 °C, ya que a temperaturas mayores pierden agua constituyente del mineral.

Medidas indirectas: sonda de neutrones

Este método se desarrolló e implementó de forma generalizada en estaciones experimentales donde se requería un control periódico del contenido de agua del suelo. Se basa en una emisión de neutrones rápidos por una fuente de americio–berilio, que son termalizados (reflejados) por átomos de hidrógeno y detectados por un detector de ³He. Los contajes de electrones «lentos» son proporcionales al contenido de hidrógeno alrededor de la fuente radioactiva (esfera de unos 15 – 25 cm de radio). Por lo tanto, puede obtenerse una curva de calibración entre el contenido volumétrico de agua y el contaje de dichos electrones.

El material necesario es una sonda de neutrones de 10 mCi, tubos de acceso de aluminio o PVC, estufa y balanza. La curva de calibración se establece una primera vez tomando como referencia el método gravimétrico. Las lecturas posteriores se refieren a la curva de calibrado para el suelo en cuestión. Los contajes se realizan a lo largo del tubo de acceso, en cada horizonte o sistemáticamente (e.g. cada 10 cm) para obtener perfiles de humedad. Las ventajas del método son que no es destructivo, la resolución (aprox. 2% en volumen), que pueden obtenerse medidas hasta profundidades de 50 m, y que las medidas son repetitivas en el espacio y en el tiempo. Los inconvenientes son la naturaleza radioactiva del método que causa restricciones de uso, que es un método de campo, y la dificultad en tomar medidas cercanas a la superficie del suelo, donde hay un efecto borde importante, lo cual obliga a una calibración especial. También interfieren en las medidas altos contenidos en materia orgánica.





Sonda de neutrones.

Medidas indirectas: reflectometría del dominio del tiempo (TDR)

El TDR fue desarrollado para localizar puntos anómalos de cables coaxiales. Mide el tiempo de ida y vuelta que necesita un impulso electromagnético para recorrer el cable. La velocidad del impulso depende de la constante dieléctrica relativa, característica del material aislante. Si se inserta el cable en el suelo, éste actúa como un medio aislante, y su constante dieléctrica dependerá de la influencia de cada fase del suelo: agua, aire y sólidos. Los valores respectivos de sus constantes dieléctricas son 80.36, 1 y 3-5. El gran contraste entre el valor de dicha constante para el agua y para las dos otras fases permite una buena relación entre la constante dieléctrica del suelo y el contenido de humedad. Cuanta más humedad, más tardará la onda en recorrer el cable. Éste se conecta a unos sensores insertados en el suelo. El método requiere un calibrado, existiendo ecuaciones de calibración empíricas (Topp *et al.*, 1980) y mixtas (Roth *et al.*, 1990).

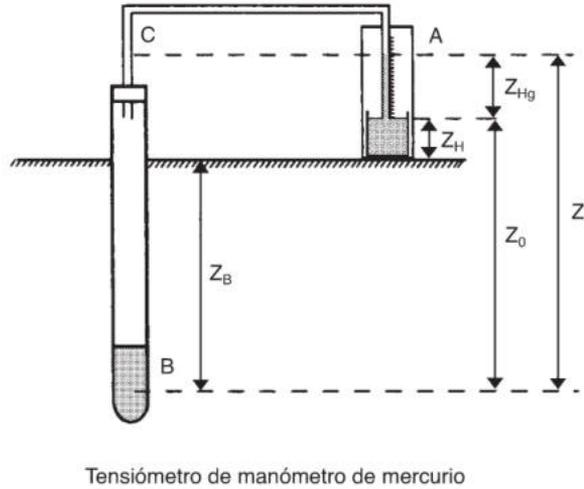
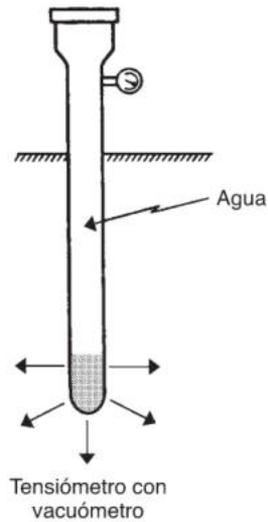
Las ventajas de este método son la facilidad de la calibración, la carencia de riesgos ambientales, buenas resoluciones espacial y temporal, y una precisión del 1 a 2%. Como inconvenientes cabe citar que no da muy buenos resultados en suelos muy arcillosos (el agua cerca de superficies con carga tiene otra constante dieléctrica) y en suelos orgánicos (baja densidad aparente).



TDR.

Medidas indirectas: tensiómetros

Los tensiómetros son instrumentos que miden la presión de succión con la que se encuentra el agua dentro de los poros capilares del suelo. Para cada suelo existe una relación entre este valor de tensión, expresado en unidades de presión, y el contenido de agua, por lo cual se puede conocer indirectamente el contenido de agua del suelo. Se fundamentan en la medida de la succión que ejerce el agua del suelo sobre una columna de agua a través de una cápsula porosa. Sólo puede medir intervalos entre 0 y 80 kPa. Es un método muy utilizado en programación de riegos, que trabaja bien en intervalos saturados. No son muy adecuados en suelos arenosos o pedregosos, ya que es necesario un buen contacto de la cápsula con el suelo. También hay la dificultad de traducir los datos de succión a contenido volumétrico de agua, ya que la relación entre las dos variables (conocida como curva característica de humedad del suelo o horizonte) a veces es poco precisa.



6. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Distribuir las distintas técnicas de medida de agua en el suelo entre los alumnos para que cada grupo recolecte información sobre uno de ellos. Cada grupo tiene que preparar una exposición para explicar sus características, ámbito de trabajo, y su adecuación para medir el contenido de humedad del suelo en los siguientes tipos de estudios:

- Recarga de acuíferos situados a 25 m de profundidad.
- Determinación del régimen de humedad del suelo según *Soil Taxonomy*.
- Determinación de la humedad del suelo en diferentes unidades cartográficas de suelos después de una lluvia erosiva.
- Variable de cultivo en ensayos de crecimiento de plantas hortícolas en una estación experimental.

7. ESTADO ENERGÉTICO DEL AGUA EN EL SUELO: EL POTENCIAL HÍDRICO Y SUS COMPONENTES

El contenido de agua no es suficiente para caracterizar el estado de agua en el suelo. Muy a menudo interesará saber la disponibilidad de agua para las plantas y la posibilidad de movimiento de agua a través del suelo, entre otros aspectos, que están relacionados con el tamaño y forma de los poros y con la energía con la que es retenida el agua.

Ya en 1897, Lyman Briggs y Homer LeRoy Shantz propusieron una primera clasificación con enfoque biológico del agua del suelo: agua gravitacional, agua capilar y agua higroscópica, que a pesar de ser cualitativa distingue distintas fracciones de agua desde el punto de vista de su aprovechamiento. Es un enfoque sencillo que divide artificial y arbitrariamente el agua (toda el agua está sometida a la acción de la gravedad y por ello, toda ella es «gravitacional»). Frente a este enfoque en clases discretas, como si el agua fuera algo discontinuo, Buckingham (1907) propuso el concepto de **estados energéticos del agua**, debido a que ésta está sometida a campos de fuerzas. Más que intentar clasificar el agua del suelo, resulta más adecuado caracterizar su estado de energía potencial (Hillel, 1974).

Dado que la velocidad de circulación del agua es muy baja, la energía cinética será prácticamente nula, por lo que sólo hay que tener en cuenta la energía potencial o simplemente el **potencial de agua en el suelo** (ψ), que es la energía con que el agua se encuentra en el suelo. Depende de las distintas fuerzas que actúan sobre ella, tanto las que la retienen como las que tienden a desalojarla: fuerzas derivadas del campo gravitatorio, de la matriz del suelo, de los iones en solución y de fuerzas externas.

El agua se mueve en y del suelo por diferencias de potencial hídrico entre dos puntos, es decir, cuando existe un gradiente de potencial entre ellos. Cuando el agua fluye de un suelo saturado, el potencial hídrico es positivo (mayor que el agua libre), mientras que cuando el agua está retenida en el suelo su potencial es negativo.

Potencial hídrico o potencial del agua del suelo

El potencial hídrico expresa la cantidad de energía por unidad de cantidad de agua que hay que realizar por fuerzas externas para transferir reversible e isotermalmente una cantidad infinitesimal de agua desde el estado estándar al suelo en el punto considerado.

Se puede expresar de distintas formas:

Energía por unidad de volumen: $[F L L^{-3}] = [ML^{-1} T^{-2}]$, que son unidades de presión (Pascuales, kPa).

Energía por unidad de peso: $[F L F^{-1}] = [L]$, que corresponde a altura de columna de agua (m), equivalente a presión hidrostática.

Los componentes del potencial total del agua del suelo son: $\Psi_t = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_o$

Potencial gravitacional Ψ_g

Debido a la fuerza de la gravedad, el agua tiende a abandonar su posición (Z_0) y a moverse hacia abajo (Z_x). Por lo tanto, tiene un valor positivo, ya que no se requiere aportar energía para ello. Se calcula como la energía potencial de una unidad de masa de agua referida a un plano de referencia, como por ejemplo, la superficie del suelo, o bien la profundidad de la capa freática. Si se expresa como altura de columna de agua, su valor es igual a la altura con respecto a ese plano.

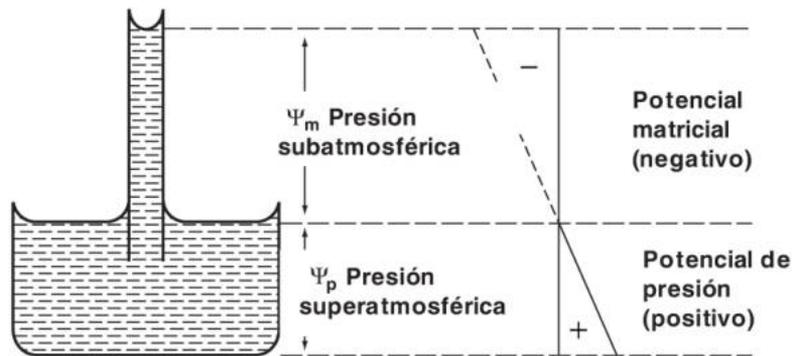
Potencial de presión hidrostática Ψ_p

Es la energía que tiene el agua del suelo cuando está saturado, equivalente a la columna de agua sobre la misma, o presión hidrostática. Debido a que tiende a desalojar el agua, tiene un valor positivo.

Potencial matricial Ψ_m

Es debido a la fuerza con que el agua es retenida dentro de los capilares (poros del suelo) y a las fuerzas de adsorción a las paredes del sólido, cuando el suelo está insaturado. Cuando existe potencial matricial no hay potencial de presión hidrostática y al contrario.

La suma del potencial gravitacional y el de presión define el **potencial hidráulico**: $\Psi_H = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m$.



From Hillel, 1998.

El potencial matricial es un potencial negativo, ya que se requiere energía para extraer agua del suelo, debido a las fuerzas derivadas de la matriz. Depende de la cantidad del agua del suelo y de la arquitectura de los poros. Cuando el suelo está saturado de agua el Ψ_m es 0. A medida que el suelo va perdiendo agua, los primeros poros en vaciarse son los de mayor diámetro, donde el agua está retenida con menos energía. A medida que el suelo se seca, los huecos que retienen agua son cada vez de menor tamaño, lo que equivale a que el potencial matricial es cada vez más negativo (mayor en valor absoluto).

Potencial osmótico Ψ_o

Es debido a la presencia de sales solubles, que causan presión osmótica frente a una membrana semipermeable. El agua estará retenida con más energía, cuantas más sales contenga, por lo que es un potencial negativo. El potencial osmótico puede ser estimado mediante la expresión:

$$\Psi_o = -K \cdot CE$$

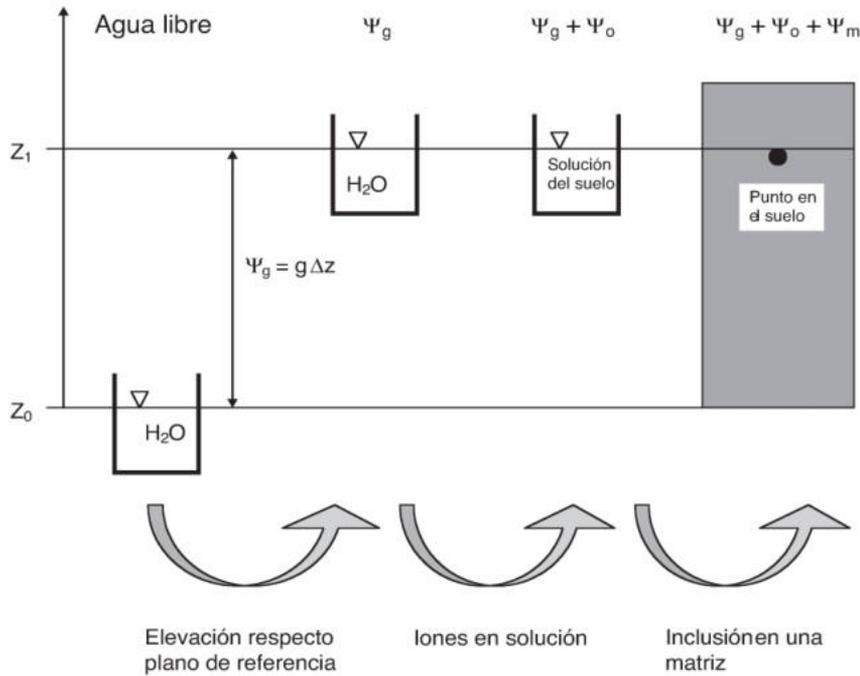
siendo K un factor dimensional que depende del tipo de sales, y CE la conductividad eléctrica de la solución del suelo. Como primera aproximación se puede utilizar:

$$\Psi_o \text{ (kPa)} = -36 \cdot CE_s \text{ (dS m}^{-1} \text{ a } 25 \text{ }^\circ\text{C)}$$

El potencial osmótico sólo tiene influencia en el movimiento del agua cuando existe una membrana semipermeable en el suelo. Las membranas semipermeables más importantes en el suelo son las raíces (membranas orgánicas) y la superficie del suelo desde la que se evapora el agua.

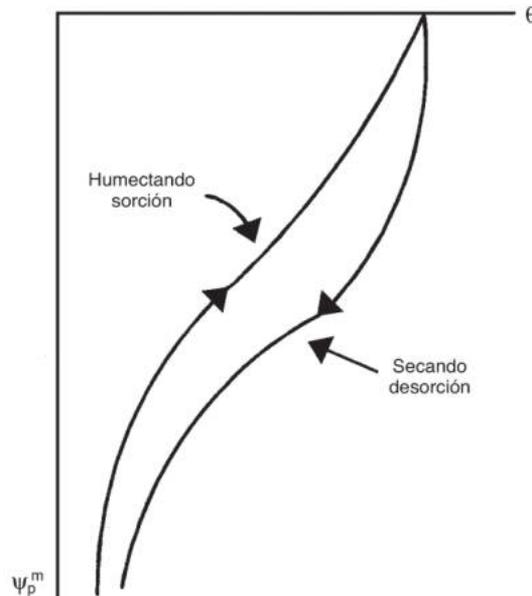
Este potencial es una medida de la salinidad, ya que cuando la concentración de la solución del suelo es mayor que la del interior de las raíces, el agua tiende a fluir de ellas al suelo, causando sequía fisiológica. Se considera un suelo salino cuando la conductividad del extracto de pasta saturada $CE_s > 4 \text{ dS m}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la figura siguiente se muestra una secuencia de incorporación de los componentes del potencial desde una superficie libre de agua a una partícula de agua en el suelo (modificado de Bohne, 2005).



8. CURVA CARACTERÍSTICA DE HUMEDAD

La relación entre cantidad de agua y potencial matricial define la curva característica de humedad, que depende de la textura y estructura del suelo.



El punto de marchitez permanente (PMP) fue propuesto como la mínima cantidad de agua del suelo a la que las plantas se marchitan y no pueden recuperar la turgidez tras 12 horas en una atmósfera saturada. Este concepto fue introducido ya en 1912 por Briggs y LeRoy Shantz. Richards formuló la definición física del PMP, cuantificándolo como el contenido de agua a un potencial matricial de -1500 kPa.

La capacidad de campo (CC) fue un concepto inicialmente propuesto por Israelson y West, y retomado más tarde por Veihmeyer y Hendrickson, para mejorar la eficiencia del uso del agua por los agricultores de California. La definieron como la humedad retenida en el suelo tras el drenaje libre que tiene lugar unos 2 a 3 días después de una lluvia o riego abundantes. Richards y Weaver encontraron que este valor se correlacionaba aceptablemente con el agua retenida en el suelo a -33 kPa. Posteriormente, Veihmeyer y Hendrickson se dieron cuenta de las limitaciones de dicha medida, ya que depende de varios factores que hacen que no sea una constante para un tipo determinado de suelo. En efecto, otros valores de potencial propuestos fueron -1 kPa para suelos orgánicos, -5 kPa para suelos en el Reino Unido, -10 kPa para suelos francos, y -100 kPa para suelos arcillosos.

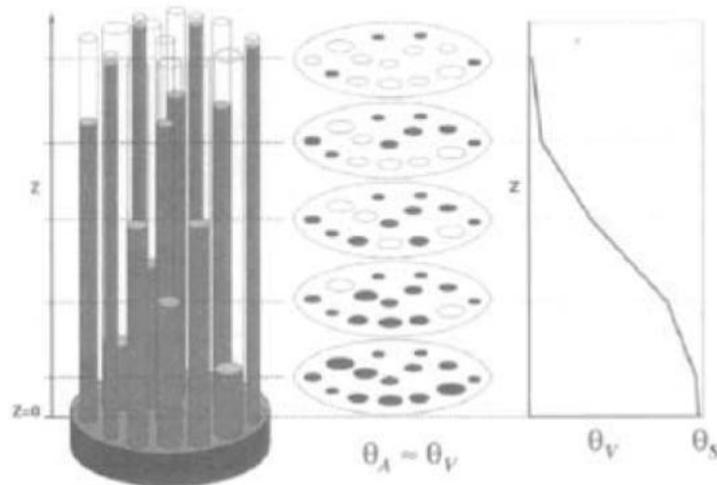
Otras críticas a este concepto derivan del hecho que la CC es una medida estática, mientras que en el campo depende, entre otros factores, del contenido inicial de humedad y de la profundidad de la humectación antes de la redistribución de la humedad, condiciones que no son únicas para un suelo dado.

La curva característica de humedad depende de la distribución del diámetro equivalente de poros, de manera que cada diámetro corresponde a un valor de potencial matricial al cual el agua está retenida en él. Una función aproximada debida a Hansen *et al.* (1980) es la siguiente:

$$D = 0,3/h,$$

donde D es el diámetro equivalente del poro (Unidad 5.4) y h el valor absoluto del potencial matricial, ambos expresados en cm.

En la figura siguiente se muestra un modelo teórico (Or y Wraith; en Warrick, 2002) que relaciona el contenido de agua en poros, potencial matricial y distribución de tamaño de poros.



Según este modelo, la parte de potenciales matriciales más cercanas a 0 (saturación) dependerá de los macroporos, determinados por la estructura del suelo, mientras que los potenciales más negativos dependerán de la porosidad textural intraagregados, que es la más fina. El valor de potencial umbral que divide la porosidad textural de la estructural es aproximadamente la capacidad de campo, por lo cual la determinación de curvas características de humedad se realiza con muestra inalterada en cilindros hasta potenciales de aproximadamente -33 kPa. A potenciales más negativos se puede utilizar muestra disturbada, ya que el potencial depende sólo de la textura.

La cantidad de agua que se encuentra entre -33 kPa y -1500 kPa es el agua que efectivamente pueden aprovechar las plantas. En un suelo determinado, representa la máxima cantidad de agua disponible para las plantas que puede almacenar, denominada Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD, o *Available Water holding Capacity, AWC*).

Algunos autores han relacionado la textura de materiales edáficos con la curva característica de humedad. Estos valores son siempre orientativos, y hay que tomarlos con precauciones sobre todo en la zona cercana a saturación, por la influencia de la estructura del suelo.

Textura	Infiltración y permeabilidad* cm/h	Porosidad %	Densidad aparente pb kg/m ³	Capacidad de campo WCC % másico	Punto de marchitez permanente WPMP % másico	Capacidad de retención de agua disponible CRAD = CC-PMP		
						W %	Θ %	Altura de agua** (mm/cm)
Arenosa	5 (2,5-25)	38 (32-42)	1.650 (1.550-1.800)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	8 (6-10)	0,8 (0,6-1,0)
Franco-arenosa Fr-Ar	2,5 (1,3-7,6)	43 (40-47)	1.500 (1.400-1.600)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)	12 (9-15)	1,2 (0,9-1,5)
Franca Fr	1,3 (0,8-2,0)	47 (43-49)	1.400 (1.350-1.500)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)	17 (14-20)	1,7 (1,4-2,0)
Franco-arcillosa Fr-Ag	0,8 (0,25-1,5)	49 (47-51)	1.350 (1.300-1.400)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	1,9 (1,7-2,2)
Limoarcillosa Ag-LI	0,25 (0,03-0,5)	51 (49-53)	1.300 (1.300-1.400)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	2,1 (1,8-2,3)
Arcillosa Ag	0,05 (0,01-1,0)	53 (51-55)	1.250 (1.200-1.300)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	2,3 (2,0-2,5)

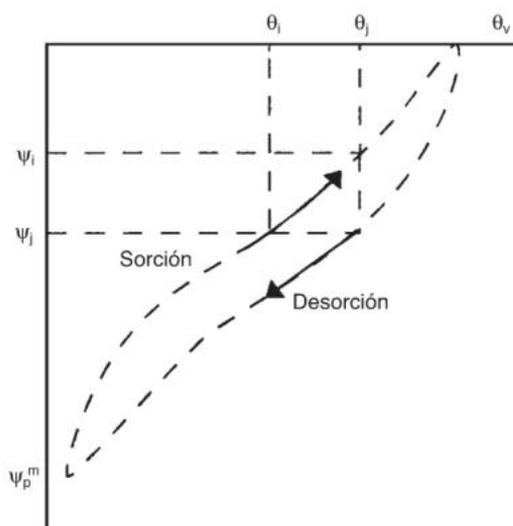
Los valores normales se encuentran entre paréntesis.

* Valores muy variables en función de la estructura del suelo y la estabilidad de agregados incluso fuera del intervalo.

** La altura de la lámina de agua hay que multiplicarla por la profundidad del horizonte en cm y por el porcentaje en volumen de tierra fina (exceptuando el volumen ocupado por elementos gruesos) para obtener el CRAD en mm.

Fuente: Israelson & Hanson, 1962.

A pesar de que la relación contenido de agua–potencial matricial tendría que ser única, en realidad depende de la dirección del proceso, ya que para un mismo valor de potencial, el contenido de agua es mayor cuando el suelo se está secando que cuando el suelo se está humedeciendo. Este fenómeno, denominado **histéresis**, se debe a que el ángulo de contacto entre las paredes de los poros y el agua son mayores cuando el suelo se humedece que cuando se seca. También hay burbujas de aire que quedan atrapadas en los poros cuando se está humedeciendo, además del efecto «cuello de tintero», por el cual los poros irregulares de diámetro variable dificultan el drenaje completo del poro, de manera que la parte del poro de menor radio controla el vaciado, mientras que es la parte de mayor diámetro la que controla el llenado. La hidrofobicidad del suelo, importante en suelos orgánicos, en suelos recién afectados por incendios y en suelos ácidos con predominio de micelios de hongos, incrementa el efecto de histéresis.

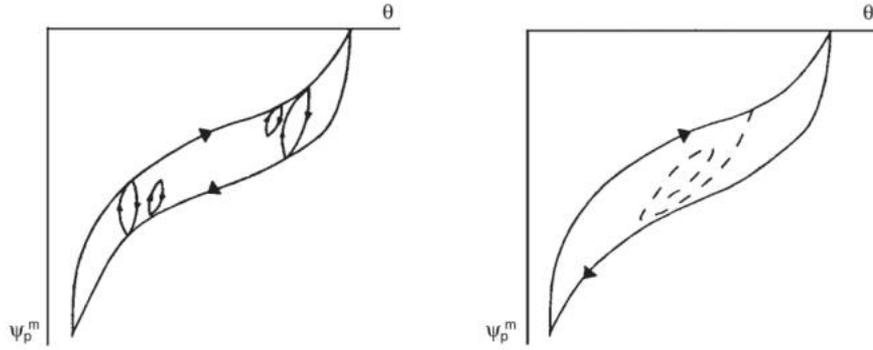


Para un mismo potencial de equilibrio se tendrá que:

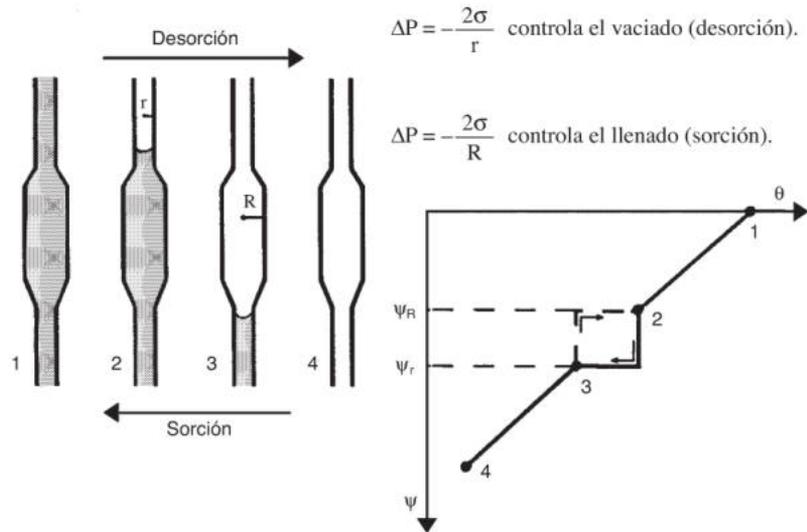
$$\theta_j \text{ (desorción)} > \theta_i \text{ (sorción)}$$

Lo que equivale a decir que un mismo contenido de humedad θ_j es retenido con mayor energía si el suelo se está secando que si se está humectando.

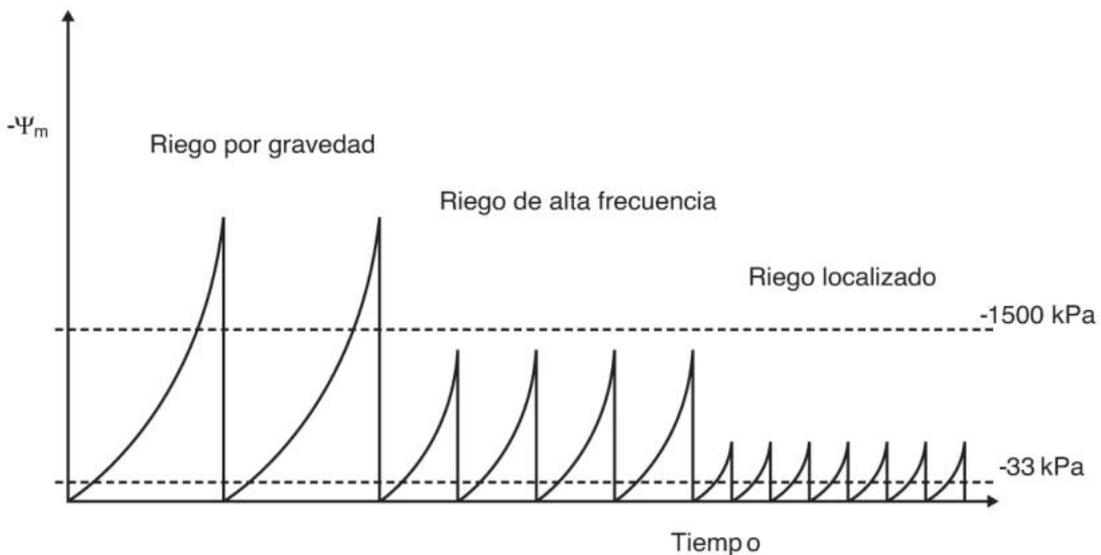
$$\Psi_i > \Psi_j \text{ (el signo es negativo)}$$



— Falta de uniformidad en la geometría de los poros individuales, que se manifiesta en el denominado efecto «botella de tinta».

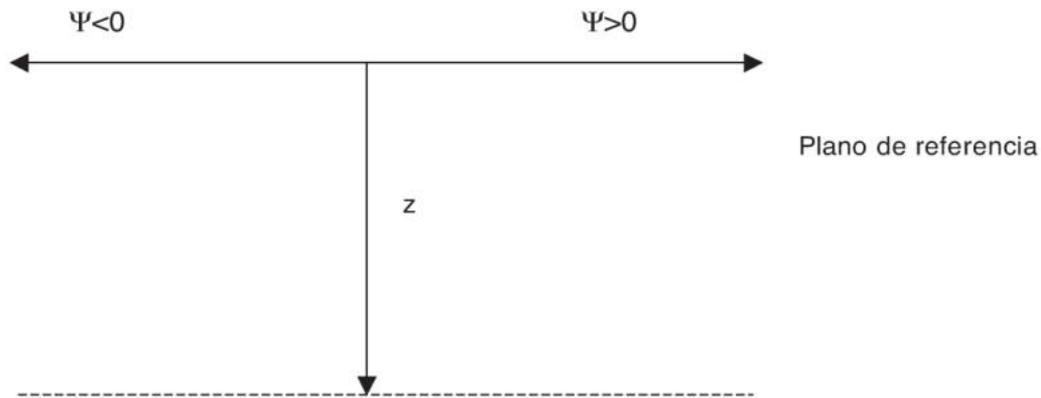


La evolución del contenido de agua de los suelos de regadío depende en gran medida del tipo de riego, básicamente la cantidad y la frecuencia, que determinarán la disponibilidad del agua para las plantas a lo largo del periodo de riegos. La misma cantidad de agua, según se distribuya en pocos o muchos riegos, podrá ser utilizada con más o menos eficiencia por los cultivos. En la figura se muestran las diferencias en potenciales matriciales de un suelo sometido a riego por gravedad, riego de alta frecuencia y riego localizado, para un mismo volumen de aportación de agua.

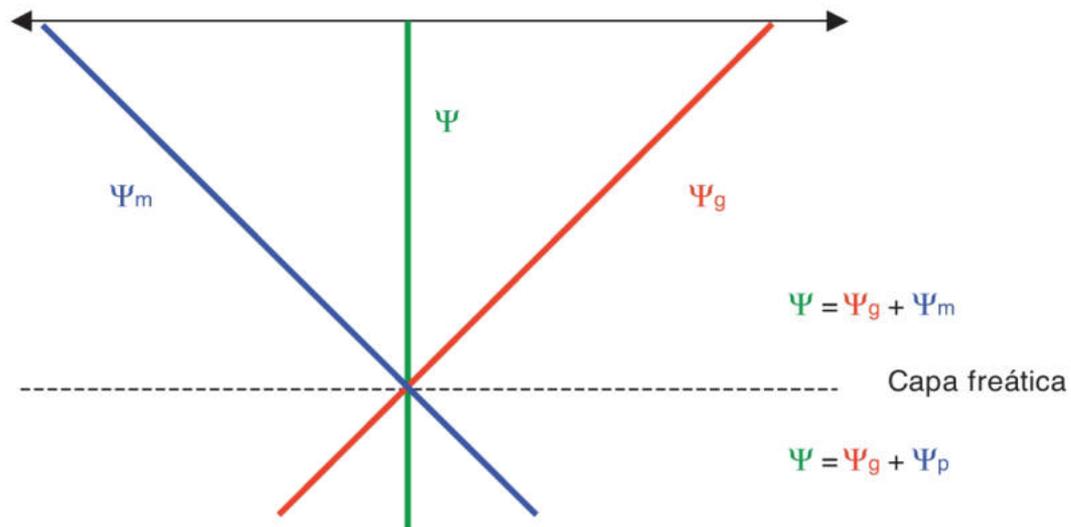


9. ESTUDIAR E INTERPRETAR

A1. Una forma de representar el estado energético del agua en un suelo es por medio de los perfiles de potencial. En ellos se representan los distintos componentes del potencial hídrico en diagramas con el eje de ordenadas representando la profundidad del suelo y el de abscisas el potencial.



En un suelo con una capa freática cuyo nivel se toma como plano de referencia, sin salinidad, ni evaporación ni percolación, el perfil de potencial sería el siguiente:

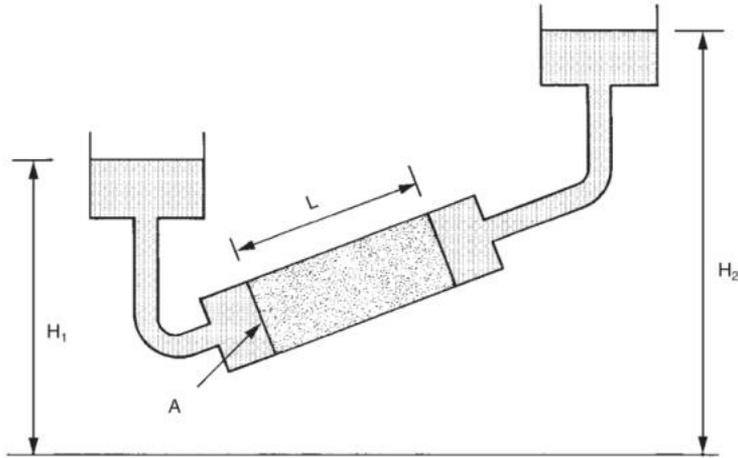


Responder a las siguientes cuestiones sabiendo que el movimiento del agua en el suelo se rige por gradientes de potencial hídrico:

- ¿Cuál es el gradiente en la situación descrita?
- ¿Qué puede decir sobre el contenido y variación de agua en el perfil, desde la superficie hasta debajo de la capa freática?
- ¿Es de esperar movimiento de agua en el suelo?

10. MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SUELO SATURADO: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Las bases de la teoría del flujo de agua en medios porosos se deben a Henry Darcy, ingeniero francés que tuvo que diseñar sistemas de depuración de aguas residuales en Dijon (Francia). A finales de 1855 realizó una serie de experimentos en un antiguo hospital de Dijon, para determinar la relación entre el caudal a través de tubos rellenos de arenas, y la diferencia de potencial (altura) entre los puntos de entrada y salida.



La ley de Darcy, resultado de estos experimentos, muestra que la velocidad de circulación del agua entre dos puntos en un medio poroso saturado es proporcional al gradiente de potencial hídrico entre ellos, al igual que ocurre con otros fenómenos físicos como la electricidad (ley de Ohm) o la energía calorífica (flujo de calor regido por gradientes térmicos). La constante de proporcionalidad en medios saturados es una constante y se denomina conductividad hidráulica saturada, o permeabilidad, que tiene dimensiones de una velocidad:

$$q = -K_{\text{sat}} \frac{\Delta H}{\Delta X} = \frac{\Delta H}{L}$$

donde q = velocidad del agua (m s^{-1}).

$\Delta H/\Delta X$ = gradiente de potencial hidráulico (m/m) = $\Delta\Psi_H$.

K_{sat} = conductividad hidráulica saturada (m s^{-1}).

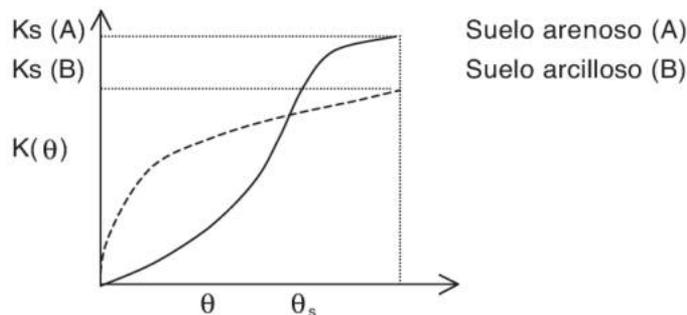
La ecuación dimensional es: $[K] = [L T^{-1}] [L L^{-1}] = [L T^{-1}]$

El signo negativo indica que el movimiento del agua entre dos puntos es de mayor a menor potencial.

11. MOVIMIENTO DEL AGUA EN RÉGIMEN NO SATURADO

La conductividad hidráulica depende del contenido de humedad del suelo. Es máxima en condiciones de saturación, pero a medida que el suelo se va secando, va reduciéndose la parte de porosidad transmisora, de manera que sólo van quedando los poros más finos y continuos como funcionales (poros conductores), que cada vez tienen un volumen menor, hasta que sólo queda el agua higroscópica adherida a las superficies de los sólidos que no se mueve (permeabilidad nula).

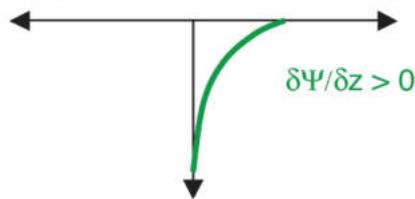
La relación entre la conductividad hidráulica y el contenido de humedad (o potencial matricial) depende básicamente de la textura del suelo. Los suelos de textura gruesa son conductores eficientes en condiciones de saturación de agua, en comparación con suelos de textura fina con estructura masiva. Al irse secando, los primeros pierden pronto esta capacidad, ya que la mayoría de sus poros tienen grandes diámetros, y pierden rápidamente la continuidad del flujo del agua al secarse. Por el contrario, los suelos con mayor volumen de poros finos, incluso en condiciones de poca humedad conservan parte de la porosidad conductora, y permiten el flujo del agua. Ello da lugar a este tipo de curvas:



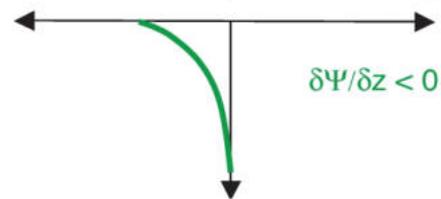
La ley de Darcy, teniendo en cuenta este factor, y expresada de forma diferencial resulta:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z}$$

La representación en diagramas de potencial permite asignar la dirección de flujo en función del gradiente:



Movimiento ascendente (p.e. evapotranspiración)



Movimiento descendente (p.e. drenaje interno)

Las consecuencias en cuanto al movimiento de agua en un suelo son que éste se verá dificultado en aquellos que tengan discontinuidades texturales, ya que tanto en condiciones de alta como de baja humedad, siempre tendrán un horizonte que impedirá el flujo del agua. En suelos homogéneos, tanto si son de texturas finas como gruesas, se asegura la continuidad de los poros a lo largo de todo el suelo tanto en condiciones secas, como en condiciones húmedas.

12. ANALIZAR E INTERPRETAR

G2. En un suelo homogéneo se produce un ciclo de humedecimiento-dsecación, con las siguientes fases:

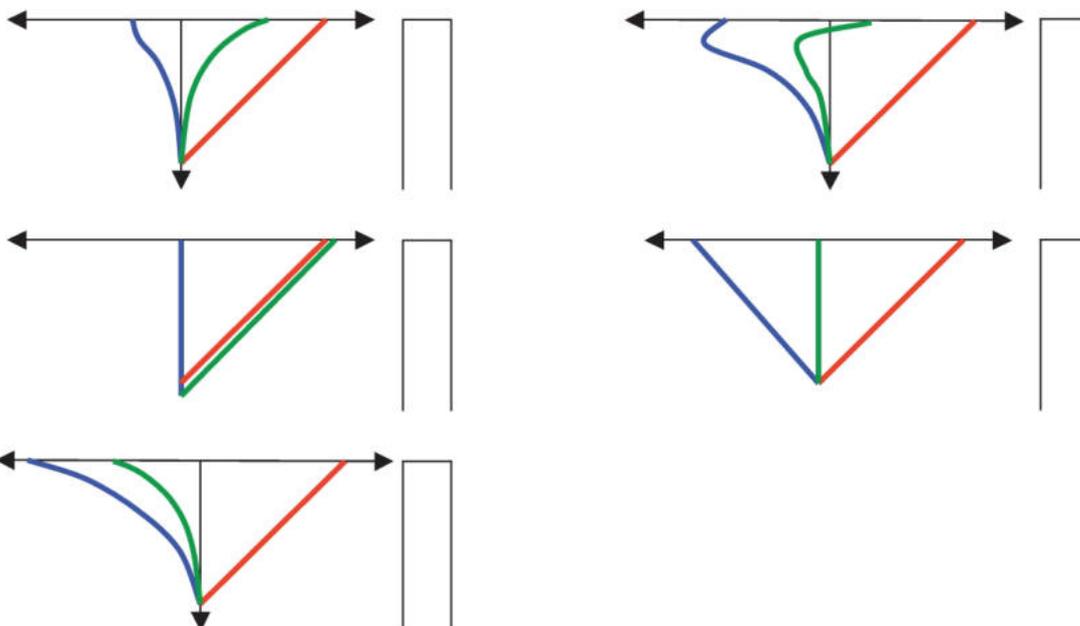
- Suelo saturado, al final de una lluvia o riego abundante, en régimen de recarga máxima del acuífero.
- Primeras horas tras la finalización de la lluvia o riego,
- Condiciones de capacidad de campo, sin evapotranspiración. Finaliza la recarga del acuífero.
- Evapotranspiración desde la superficie del suelo.
- Primeros instantes tras el inicio de un nuevo riego o lluvia.

Relacionar cada una de estas fases con los siguientes perfiles de potencial que se encuentran en desorden, e indiquen en el esquema de perfil adjunto, la dirección del flujo de agua en función del gradiente de potencial. Consideren que $\Psi_0 = 0$.

Potencial matricial Ψ_m — (línea azul)

Potencial gravitacional Ψ_g — (línea roja)

Potencial total ($\Psi = \Psi_m + \Psi_g$) Ψ — (línea verde)



12. BUSCAR INFORMACIÓN E INTERPRETAR

E3. Buscar información acerca de la práctica del enarenado (enmienda textural sobre la superficie del suelo en forma de capa de arena, practicada en sistemas agrícolas de climas semiáridos), y discutan su utilidad como medida de conservación de agua en estos sistemas, basándose en la aplicación de la ecuación de Darcy en flujos no saturados en suelos con discontinuidades texturales.

14. INFILTRACIÓN

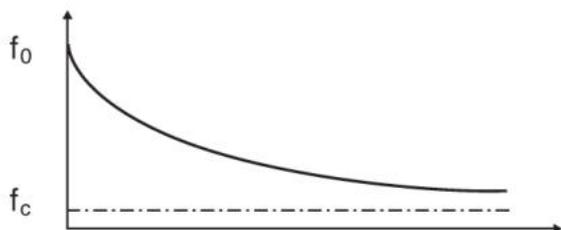
INFILTRACIÓN

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de su superficie. Como todo movimiento de agua en el suelo, se produce cuando hay diferencias de potencial hídrico entre la superficie y el suelo. Las unidades de infiltración son de velocidad del flujo: mm h^{-1} . La ecuación dimensional es $[\text{LT}^{-1}]$.

La medida de la infiltración se realiza con infiltrómetros, que miden a lo largo del tiempo la velocidad de entrada de una lámina de agua en el suelo. El método estándar es el del doble cilindro o método de Muntz, a partir del cual se pueden construir curvas de infiltración.

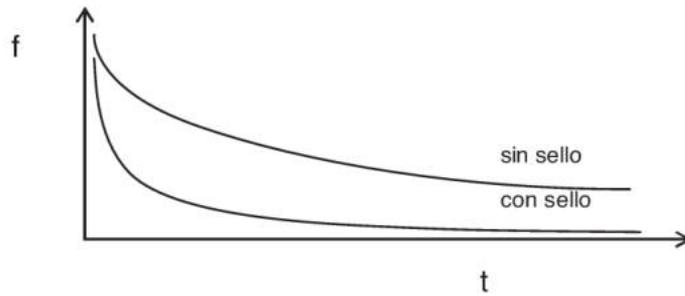


t (s)	h (mm)	f = $\Delta h/\Delta t$ (mm/s)

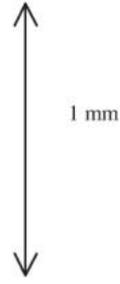
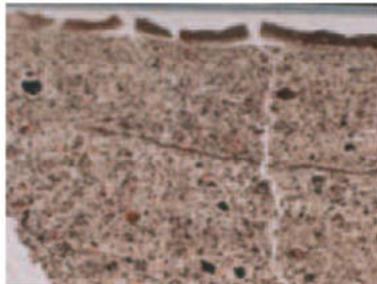


El valor f_0 es el valor inicial de infiltración. Normalmente este valor va disminuyendo a lo largo del tiempo, hasta llegar a un valor estabilizado f_c denominado velocidad de infiltración, y que idealmente es característica para cada tipo de suelo. Así, suelos de texturas gruesas tienen velocidades de infiltración mayores que suelos de texturas arcillosas o pesadas.

Hay otras causas por las cuales la infiltración va disminuyendo, como es el proceso de sellado (Unidad 5). Consiste en la destrucción de la estructura de la superficie, ya sea por el impacto de gotas de lluvia que desestructuran los agregados, como por disrupción de los agregados por humedecimiento y colapso. El resultado es la colmatación de poros superficiales que tapan las vías de entrada del agua. Los sellos, aunque de espesor milimétrico, son muy eficientes en reducir la velocidad de infiltración del suelo. Cuando se secan producen costras superficiales cuya dureza dificulta la emergencia de las plántulas.



Estas imágenes son láminas delgadas de suelos con costras superficiales donde se pueden ver estructuras laminares típicas y su porosidad vesicular no conectada.



Otro factor que reduce la velocidad de infiltración son las capas compactadas o la presencia de hielo. Esta imagen es un corte tras un ensayo de infiltración de 2 horas. Las líneas intermitentes muestran la extensión de una suela de labor que dificulta la penetración del agua, al haberse saturado el suelo encima de la capa compactada.



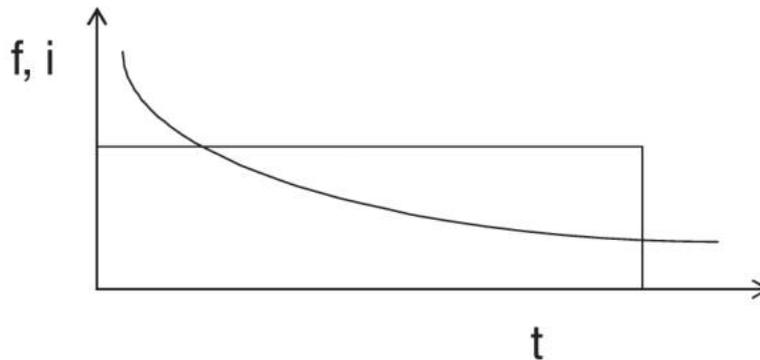
Bajas capacidades de infiltración causan una mayor tendencia a formar escorrentía a partir de una lluvia. Lluvias con intensidades que excedan la capacidad de infiltración del suelo formarán exceso de agua en superficie que se encharcará en caso de terrenos llanos, o formará escorrentía superficial ladera abajo, aumentando el riesgo de erosión.

15. DEMOSTRAR

G2. Basándose en la Ley de Darcy, mostrar con un ejemplo por qué la infiltración cuando el suelo está seco es más rápida al inicio del proceso, que cuando el suelo ya ha infiltrado una cierta cantidad de agua.

16. ANALIZAR E INTERPRETAR

A1. Siendo f la infiltración (curva) e i la intensidad de lluvia, determine en este gráfico cuál va a ser el exceso de agua y el tiempo de encharcamiento desde el inicio de la lluvia.



17. CLASES DE DRENAJE

DRENAJE

El drenaje es la facilidad que tiene un suelo para no encharcarse, es decir, la capacidad que tiene de eliminar el agua que recibe, ya sea por escorrentía superficial o por percolación en profundidad.

Si a un suelo le cuesta eliminar el agua en un cierto tiempo, se dice que el suelo tiene un drenaje imperfecto, lo que puede inducir condiciones de reducción, falta de oxígeno y anoxia radicular.

Los factores que determinan el drenaje dependen de las características propias o intrínsecas del perfil y de su posición en el paisaje. De acuerdo a ello, se puede distinguir el drenaje interno del externo. El primero depende de características como textura o estructura, que afectan la permeabilidad y la capacidad de infiltración. Asimismo, la alternancia de capas con distintas texturas o grado de compactación dificultan el movimiento del agua dentro del perfil.

Las propiedades extrínsecas de un suelo determinan su drenaje externo. Depende de la posición geomorfológica (zona llana / ladera), de la pendiente de la ladera donde se encuentra y de la profundidad hasta un estrato impermeable, características que afectan la capacidad de formar escorrentía superficial o subsuperficial rápida.

Los síntomas de un drenaje deficiente o imperfecto son la presencia de agua en el perfil, el moteado o en general los rasgos redoximórficos (Unidad 8). La situación y distribución del moteado en relación a los macroporos da información sobre el grado de hidromorfismo: una matriz gris, con huecos oxidados corresponderá a una capa freática permanente, en la que en los cortos periodos de aireación sólo los macroporos se oxidan y es donde aparecen las manchas.

En cambio, una capa freática temporal se caracterizará por una matriz oxidada la mayor parte del año, en la que durante los periodos de saturación los poros más grandes son los que se saturan y reducen en primer lugar, adquiriendo un color gris.

Moteado con reducción a lo largo de macroporos de raíces.



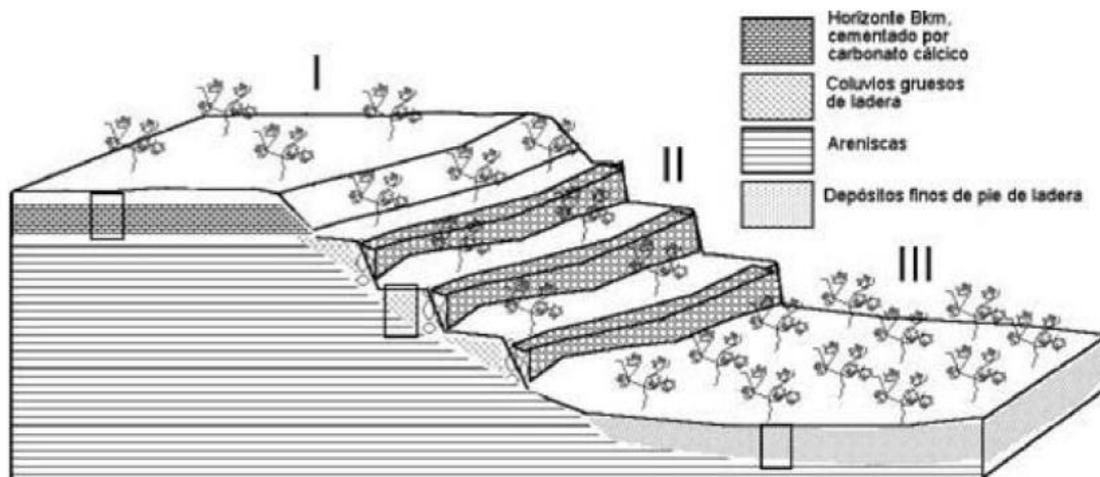
La clase de drenaje condiciona el uso del suelo ya que sirve para diagnosticar zonas inundables, zonas húmedas, limitaciones para el desarrollo de las raíces o para la construcción de edificios. Se determinan básicamente por la profundidad a la que aparece el moteado (Dumanski, 1978; Herreto *et al.*, 1993).

Clases	Criterios
Muy escasamente drenado	Eliminación tan lenta del agua del suelo de forma que la capa freática sin oxígeno permanece en o próxima a la superficie la mayor parte del año. Suelos de posiciones deprimidas con carácter ácuico o suelos orgánicos. Se refleja a nivel de Suborden en Soil Taxonomy.
Escasamente drenado	Eliminación lenta del agua en relación al suministro de forma que el suelo permanece saturado la mayor parte del año. Capa freática. Suelos de aquellos subórdenes y subgrupos (SCS, 1999) con problemas de hidromorfismo. Manchas con Ch < 2 dentro de los 60 cm.
Imperfectamente drenado	Eliminación suficientemente lenta del agua en relación al aporte para que el suelo permanezca saturado una parte significativa de la estación de crecimiento. Fases con hidromorfismo. Moteados entre la parte inferior de A y los 60 cm.
Moderadamente bien drenado	Eliminación algo lenta del agua en relación al aporte. Capacidad de almacenamiento de agua de intermedia a alta. Moteados de Fe-Mn de 2 al 20 % entre 60 y 100 cm.
Bien drenado	Eliminación del agua de precipitación fácil aunque no rápidamente. Capacidad de almacenamiento de agua intermedia. Sin moteado en los 100 cm superiores o con menos de un 2 % entre 60 y 100 cm.
Rápidamente drenado	Eliminación rápida del agua en relación al aporte por la lluvia. Baja capacidad de almacenamiento de agua.
Muy rápidamente drenado (Drenaje excesivo)	El agua es eliminada del suelo muy rápidamente en relación al aporte de precipitaciones. Suelos con baja capacidad de almacenamiento de agua. Texturas gruesas.

18. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

Las bodegas Bolonia producen tres tipos diferenciados de vinos, según las características de las fincas de procedencia de la uva, indicadas en el bloque diagrama adjunto.

Se dispone de la descripción de los suelos de cada finca (I, II y III) y de la información de las etiquetas de los vinos.



Suelo	Horizonte A	Horizonte B
I	10 cm, pedregoso, textura franco-arenosa	10-100 cm, cementado por carbonato cálcico
II	20 cm, moderadamente pedregoso, textura franco-limosa	20-100 cm, moderadamente pedregoso, textura franco-limosa
III	20 cm, ligeramente pedregoso, textura franco-limosa	20-120 cm, no pedregoso, textura franco-limosa

Vinus terrae

Vino color cereza oscuro y reflejos caoba. Procede de nuestras viñas más productivas y más antiguas, sobre suelos profundos y frescales. Actualmente lo elaboramos según los métodos más modernos y que aseguran la máxima calidad. Todo el proceso de producción del vino está completamente mecanizado, empezando por la vendimia, que permite una rápida entrada en la bodega con una mínima alteración de la uva.

Pedra y sol

Dotado de aromas de canela y frutos del bosque, les ofrecemos est vino ecológico de nuestras fincas cultivadas según métodos ancestrales. Los tradicionales bancales de piedra, construidos por nuestros antepasados, han conseguido conservar el agua y los suelos de las laderas, proporcionando un medio ideal para el desarrollo de la vid. Estas condiciones obligan a que la vendimia sea manual, y que se cuide con esmero todo el proceso de producción del vino, desde la cosecha hasta el envasado en botellas artesanas.

Tosal de La Corona

Este vino excepcional tiene un aroma exhuberante de fruta, con un fondo de clavo y laurel. Procede de nuestras viñas más austeras sobre suelos superficiales y pedregosos. Para obtenerlo, sacrificamos las altas producciones en favor de cepas sin carga excesiva. Vino de alta graduación alcohólica, excelente para acompañar asados, pato, jamón cocido y quesos de vaca.

Asigne las etiquetas a los suelos de los que procede el vino.

Suelo	I	II	III
Vino			

a) ¿Cuál es el suelo con menor capacidad de retención de agua? ¿Por qué? Mencione una de las características de la viña y del vino que puedan estar relacionadas con ello.

b) Estas bodegas se plantean mecanizar todas sus fincas para reducir los costos de mano de obra, lo cual obligaría a eliminar las terrazas y los bancales de piedra seca de la finca II. Indique las consecuencias que tendría esta operación para los suelos y el agua.

- c) El suelo de la finca III tiene una capacidad de almacenamiento de agua (CRAD) del 20% en volumen, para una profundidad de 120 cm. ¿Cuál es la capacidad de almacenamiento de agua (CRAD) de este suelo en mm?
- d) A inicios de septiembre, el contenido de agua en el suelo de la fase III es de 50 mm. Durante el mes de septiembre, la lluvia total es de 190 mm, y la evapotranspiración de la viña 162 mm. ¿Cuál es el contenido de agua en el suelo a fin de mes?
- e) Las máquinas vendimiadoras requieren que el suelo no esté encharcado para poder transitar. De acuerdo al resultado anterior, ¿cree que hay riesgo que el suelo se encharque en esta finca durante el mes de septiembre?

OBJETIVOS

Aprender en qué consiste clasificar un suelo.

Estudiar de forma comparada los puntos fuertes y débiles de los dos sistemas de referencia mundiales: *Soil Taxonomy* y *World Reference Base*.

Entender la estructura de *Soil Taxonomy* y de la *World Reference Base* (WRB).

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Clasificar. Las clasificaciones de suelos.

Soil Taxonomy: planteamientos y estructura.

World Reference Base: planteamientos y estructura.

Aprender a leer información taxonómica de suelos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3ª ed. Mundi Prensa, Cap. 19. Madrid, 2003.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Ed. Mundi-Prensa, cap. 17 y 18. Madrid, 2005.

Soil Taxonomy y *WRB* son accesibles en Internet en www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés

NRCS: *Keys to Soil Taxonomy*. 10ª ed. Soil Conservation Service-USDA. 2006. http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys

IUSS Working Group WRB: *World Reference Base for Soil Resources. A Framework for International Classification, Correlation and Communication*. World Soil Resources Reports N. 103: 1-128. FAO, 2006.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Completar los huecos con aquel término que resulte más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos:

Un horizonte genético (1) ___ puede corresponder a un epipedión (2) ____, si en campo su color en húmedo es (3) _____ y su estructura es (4) _____. En laboratorio habrá que verificar si el porcentaje de saturación de bases es (5) _____. En caso de no cumplirse esta característica, podría tratarse de un epipedión (6) _____. El menor volumen para realizar una descripción y muestreo que presenta la naturaleza y disposición de los horizontes y su variabilidad se denomina (7) _____, su superficie horizontal se ha fijado arbitrariamente en (8) _____, para el caso en que los horizontes sean continuos y de espesor y composición prácticamente uniformes. Un conjunto de pediones iguales (isopediones) que ocupen un área de paisaje constituyen un (9) _____ que, por consiguiente, podría representarse en un mapa, si éste fuese suficientemente detallado. Un suelo con régimen de humedad con un exceso de agua y un mal drenaje caracteriza las condiciones (10) _____ que pueden ser desfavorables y condicionar o limitar muchos usos del suelo (agrícola, área de ocio, traficabilidad, etc.) tiene prioridad en la clasificación de un suelo.

- | | | | | |
|------|---------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| (1) | a) E | b) A | c) H | d) O |
| (2) | a) hístico | b) móllico | c) úmbrico | d) melánico |
| (3) | a) claro | b) 7,5 YR 3/3 | c) 7,5 YR 8/2 | d) 5 R 4/2 |
| (4) | a) maciza | b) laminar | c) buena | d) apedial |
| (5) | a) $\geq 50\%$ | b) $> 50\%$ | c) $\geq 35\%$ | d) $< 50\%$ |
| (6) | a) óchrico | b) hístico | c) melánico | d) úmbrico |
| (7) | a) perfil | b) pedión | c) polipedión | d) serie |
| (8) | a) 5 m ² | b) 10 m ² | c) 1 m ² | d) 50 cm ² |
| (9) | a) serie | b) polipedión | c) familia | d) macropedión |
| (10) | a) hídricas | b) acuosas | c) saturantes | d) ácuicas |

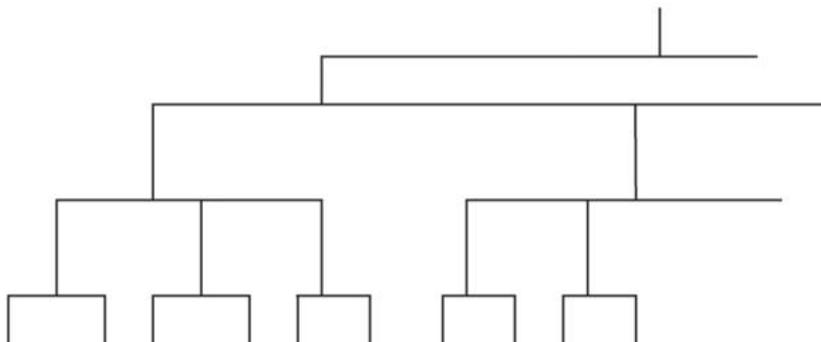
2. LAS CLASIFICACIONES DE SUELOS

El estudio de los suelos en el campo como cuerpos naturales hizo patente la necesidad de establecer un sistema de clasificación.

CLASIFICAR SUELOS

Clasificar consiste en distribuir en clases o categorías los suelos, de acuerdo con un sistema, atendiendo a propiedades existentes en varios de ellos.

Un sistema de clasificación se basa en que existen conceptos y propiedades, que permiten establecer niveles jerárquicos más altos o de mayor generalización y otros que lo son menos. Las categorías establecidas de este modo van estructurando el sistema de clasificación como un esquema jerárquico y las propiedades utilizadas para definir cada clase de suelos varían dentro de intervalos cada vez más estrechos a medida que se va hacia niveles más bajos del sistema de clasificación. Por ello los niveles jerárquicos altos tendrán pocas clases de suelos y el número de éstas aumentará al pasar a niveles de menor grado de generalización.



Una clasificación refleja el nivel de conocimientos en un momento determinado, por lo que a medida que se van conociendo mejor los objetos a clasificar, los nuevos conocimientos se incorporan al sistema de clasificación, por lo que éste debe verse como algo dinámico, cambiante en el tiempo, para incorporar nuevas situaciones, cambios que, a veces, crean un cierto desconcierto en las personas no especialistas en ciencia del suelo.

La clasificación de suelos se desarrolló inicialmente como un medio para comparar perfiles de suelos. Actualmente su interés reside en que constituye un instrumento utilizado en investigación y que resulta imprescindible para una correcta transferencia de conocimientos y tecnología de la zona geográfica en que fueron adquiridos, a otras.

Si bien a lo largo de la historia de la Ciencia del Suelo se han propuesto múltiples sistemas de clasificación de suelos de base nacional (clasificación francesa, alemana, canadiense, brasileña, entre otras), dos son los que se utilizan en la actualidad como referentes mundiales: *Soil Taxonomy* (NRCS-USDA, 1960, 2006) y *World Reference Base* (WRB) (IUSS-WG, 1998, 2006).

3. SOIL TAXONOMY: APORTACIONES

Bajo la dirección de Guy D. Smith, el *Soil Conservation Service* (Servicio de Conservación de Suelos, actualmente, National Resources Conservation Service) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) elaboró y presentó en el Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo celebrado en Madison, Wisconsin. (EE.UU.) en 1960 la primera versión de *Soil Taxonomy* (conocida como *7th Approximation*).

Como antecedentes en Estados Unidos cabe citar la clasificación de suelos de C.F. Marbut (1927) y la de Baldwin-Kellog-Thorp (1937).

Es importante recalcar que *Soil Taxonomy* es un sistema que se propone incluir en las categorías altas (Orden, Suborden y Gran grupo), todos los suelos, inclusive suelos que se pueden identificar en el futuro en categorías más bajas.

Las **principales aportaciones y puntos fuertes** de *Soil Taxonomy* fueron y siguen siendo:

- Estar basado en propiedades intrínsecas de los suelos estudiadas en el campo, a ser posible medibles.
- Introducir los conceptos de pedión, horizonte de diagnóstico (epipedión y endopedión), propiedades y características de diagnóstico, regímenes de humedad y de temperatura, serie de suelo, diferenciar claramente procesos edafogénicos, entre otros.
- Proponer una terminología nueva, definida de forma precisa, para evitar confusiones con términos utilizados previamente. Se forma con neologismos de raíz latina o griega, por lo que no resulta difícil deducir su significado, conociendo español u otro idioma derivado del latín. Por ello resulta muy autoexplicativa después de entender cómo funciona. No requiere traducción a los distintos idiomas.
- Definir de forma cuantitativa las clases establecidas, a ser posible con criterios basados en descripciones y medidas de campo, por lo que se trata de una clasificación morfométrica.
- Ser un sistema comprehensivo de clasificación, que establece y define tanto los niveles jerárquicos altos de generalización taxonómica máxima (Órdenes, Subórdenes, ...), que sirven para estudios y cartografías a pequeña escala, como los bajos (Serie de suelos), que permiten trabajar a escalas detalladas (escala grande).
- Contar con el apoyo del *Soil Conservation Service* (actualmente es *Natural Resources Conservation Service*) del USDA para mantenerla al día.
- Generar y, por consiguiente, tener capacidad para proporcionar mucha información acerca de los suelos clasificados, aplicables para múltiples usos.
- Haber creado grupos de trabajo con especialistas de diversos países para la revisión de los distintos Órdenes de suelos.

Los principales aspectos que en algunas partes del mundo puede crear dificultad para aplicar *Soil Taxonomy* son:

- Requerir mucha información basada en trabajo de campo, lo que requiere disponer de personas muy bien entrenadas, y de análisis de laboratorio, lo que exige disponer de laboratorios automatizados de alta tecnología.
- Utilizar los regímenes de humedad y de temperatura que, si bien desde un punto de vista de uso de los suelos son aspectos muy importantes, es una información de la que no se suele disponer en todas las partes del mundo.
- La terminología, en una primera impresión, parece especialmente compleja, lo que puede crear una cierta prevención.
- Aunque ofrecida a la comunidad científica mundial, no deja de ser una clasificación nacional, lo que ha supuesto una limitación para su aceptación generalizada, por cuestiones más de *edafopolítica*, que de base científica.

4. BASE DE REFERENCIA MUNDIAL DE RECURSOS DE SUELOS (WRB): PLANTEAMIENTOS

Bajo la coordinación de J.A. Deckers, F.O. Nachtergaele y O.C. Spaargaren y con el patrocinio de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (actualmente IUSS), el *International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC) y la *Food and Agriculture Organization* (FAO), en 1998 se presentó la primera edición de la *Base de Referencia Mundial para Recursos de Suelos* (WRB), cuya segunda edición ha sido coordinada por un grupo de expertos integrado por E. Michéli, P. Schad y O. Spaargaren (2006).

Como antecedente directo de este sistema de clasificación de suelos cabe citar la *Leyenda del Mapa de Suelos del Mundo* de FAO, que constituye una lista de unidades de suelos cartografiadas (FAO-UNESCO, 1971, 1988) para mapas de suelos del mundo a pequeña escala y *The Major Soils of the World. Lecture notes on their geography, formation, properties and use* de P.M. Driessen y R. Dudal (1991).

Los principales **planteamientos** de la WRB son los siguientes:

- Es el resultado de una amplia cooperación internacional para disponer de un lenguaje común, lo que estimuló la cartografía de suelos en muchos países y ha favorecido un uso generalizado.
- Constituye una base, un marco para contribuir a una mejor correlación entre los distintos sistemas nacionales de clasificación de suelos, a los que se propone ayudar a continuar su elaboración.
- Utiliza una terminología basada, por lo general, en nombres tradicionales de los suelos originarios de algunos países y ya incorporados en clasificaciones de suelos anteriormente utilizadas en Europa (Kubiens, Duchaufour, entre otras), por lo que resultan familiares a muchos especialistas.
- En el caso de tener que introducir nuevos términos, lo hace como *Soil Taxonomy*, a partir de neologismos de raíz latina o griega, con lo que resulta más fácil deducir su significado.
- Su diseño inicial estaba pensado para mapas a pequeña escala, por lo que los niveles mejor definidos hasta la versión de 2006 han sido los altos, es decir, los de máxima generalización taxonómica.
- Utiliza horizontes de diagnóstico, tomando como referencia *Soil Taxonomy*, por lo que los nombres coinciden en muchos casos, si bien, desafortunadamente, no se han conservado las mismas definiciones, lo que puede dar lugar a confusiones y errores, si se olvida. En Porta *et al.* (2005) pág. 214 y ss. se puede encontrar un estudio comparado de las definiciones de los horizontes de diagnóstico según *Soil Taxonomy* y según la *World Reference Base*.
- Dado que en algunas partes del mundo no se dispone de información de los regímenes de humedad y temperatura de los suelos, ello dificultaría su clasificación, por lo que la WRB no los utiliza. Se integran en otra capa de información al trabajar con Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Como leyenda de mapas a pequeña escala presentaba menor complicación que *Soil Taxonomy*, ya que requería mucha menos información para poder clasificar suelos, pero al pasar a ser un sistema de clasificación de suelos y tener que caracterizar las categorías con mayor detalle, el grado de complejidad se ha ido aproximando mucho al de *Soil Taxonomy*.

5. INTERPRETAR INFORMACIÓN

G2. Discutir las siguientes aseveraciones e indicar si son correctas o no. Redactar un informe para un posterior debate:

- La utilidad de una clasificación de suelos reside en que permite entender mejor las propiedades de los suelos agrupados en una misma categoría, así como las relaciones entre grupos de suelos.
- Las clasificaciones añaden conocimiento acerca de los suelos.
- Los sistemas de clasificación de suelos deben ser cambiados o reorganizados a lo largo del tiempo.
- En un sistema de clasificación de suelos cada clase agrupa suelos que tienen propiedades similares. Los suelos que compartirán un mayor número de propiedades y características son los de niveles jerárquicos altos.

6. APRENDER A LEER INFORMACIÓN TAXONÓMICA DE SUELOS

Para poder obtener información a partir de un mapa de suelos o de una base de datos resulta imprescindible conocer la terminología específica utilizada, el lenguaje especial y familiar que usan entre sí los profesionales de la Ciencia del Suelo. Cualquier jerga se puede ver como un lenguaje críptico, difícil de entender por los no iniciados, procuraremos que no sea así.

En esta Unidad se exponen los dos sistemas de referencia mundial en clasificación de suelos, *Soil Taxonomy* (ST) y *World Reference Base* (WRB), se intentará que, después de estudiarlos, la estructura y la jerga utilizada en cada uno de ellos resulte comprensible, y que la consulta de un mapa de suelos nos resulte útil para derivar información a partir de él. No obstante, hay que tener en cuenta que, en la leyenda que acompaña a todo mapa de suelos, se proporciona más información que la estrictamente taxonómica, para facilitar las interpretaciones.

7. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos:

Se ha traducido una clasificación de suelos y hay que decidir el número de ejemplares a publicar en soporte papel, dado que se dispone de una partida presupuestaria para ello, lo más conveniente será imprimir (1) _____. La primera versión de *Soil Taxonomy* se presentó en (2) _____, dando a conocer de forma oficial los horizontes (3) _____. Al estar basada la terminología de *Soil Taxonomy* en neologismos de raíz latina o griega, resulta fácil deducir el significado de los diferentes términos, por extraños que parezcan de entrada. Así por ejemplo, un Aridisol es el Orden que agrupa los suelos de zonas (4) _____, mientras que el epipedión de un suelo orgánico, de color muy oscuro, en una turbera, se denominará (5) _____. La denominación de los horizontes de diagnóstico en la WRB y en *Soil Taxonomy* no siempre es la misma, pero cuando coinciden los nombres, (6) _____ ocurre lo mismo con las definiciones. Las categorías mejor definidas en la WRB son las (7) _____, ya que inicialmente fue diseñada para elaborar mapas de suelos del mundo a escala (8) _____.

- | | | | | |
|-----|---------------------|-----------------------|--------------|--------------------|
| (1) | a) los más posibles | b) para agotar la ppr | c) 10 000 | d) la menor tirada |
| (2) | a) Alemania | b) 1960 | c) 1998 | d) 1971 |
| (3) | a) de diagnóstico | b) genéticos | c) del suelo | d) móllicos |
| (4) | a) soleadas | b) labradas | c) aradas | d) áridas |
| (5) | a) Túbico | b) Hístico | c) Orgánico | d) Úmbico |
| (6) | a) también | b) no siempre | c) no | d) igual |
| (7) | a) altas | b) bajas | c) Series | d) Órdenes |
| (8) | a) grande | b) 1: 50 000 | c) pequeña | d) de finca |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Entender cómo está organizada *Soil Taxonomy*.

Aprender la terminología básica de *Soil Taxonomy*.

Saber interpretar el nombre de un suelo para poder leer mapas de suelos.

No constituye un objetivo a nivel introductorio el aprender a clasificar suelos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Cómo surge la idea de establecer niveles jerárquicos en clasificación de suelos: del Orden a la Serie de Suelos.

Una panorámica de *Soil Taxonomy*: categorías taxonómicas.

Aprendiendo a leer e interpretar el nombre de la clase de un suelo.

Clasificar un suelo: planteamientos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a ed. Ediciones Mundi-Prensa, 2003. Cap. 19.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 2005. Cap. 7 y 17

USDA Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Staff. 2006. *Keys of Soil Taxonomy*. Tenth Edition (http://soils.usda.gov/technical/classification/tax_keys/).

Internet: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés.

1. CÓMO SURGE LA IDEA DE ESTABLECER NIVELES JERÁRQUICOS EN CLASIFICACIÓN DE SUELOS: DE LA SERIE DE SUELOS AL ORDEN

La persona que hace una descripción del perfil de un suelo genera información utilizando una terminología que somos capaces de entender con lo estudiado hasta aquí. Un ejemplo de descripción podría ser:

Suelo muy profundo, imperfectamente drenado, de textura fina o moderadamente fina y con muy pocos o inexistentes elementos gruesos. Desarrollado a partir de sedimentos detríticos terrígenos finos y que ocupa una posición de fondo, con pendientes muy suaves (< 2%). Con endosaturación y una disminución irregular de materia orgánica. Tiene problemas de drenaje importantes y un nivel freático que varía a lo largo del año.

Alguien podría plantearse la siguiente pregunta: *¿No se podría sintetizar esta información, de forma que cuando haya que hacer referencia a este suelo y se describan otros perfiles cuyas características varíen poco dentro de unos márgenes estrechos respecto a las de este suelo, no sea necesario escribir tanto?*

Supongamos que este suelo se describió por primera vez en un lugar que localmente se conoce como «Laguna». Podríamos utilizar este nombre para designar esta unidad de suelos y aquellas que sean semejantes y se hallen situadas en otros emplazamientos, con ello se simplificará la forma de referirse a esos suelos. Con ello acabamos de establecer la categoría jerárquica más detallada de un sistema de clasificación: la *Serie de suelos*. En el caso expuesto se ha descrito la *Serie Laguna*, término que puede ser utilizado independientemente del sistema de clasificación de suelos que se quiera emplear. La serie de suelos es una unidad taxonómica. Cuando el nombre de una serie de suelos se utilice en el nombre de una unidad cartográfica, dicho nombre sólo se refiere a *Soil Taxonomy*. Básicamente significa que los suelos dentro de esa unidad cartográfica pertenecen a la serie según es definida en *Soil Taxonomy*.

SERIE DE SUELOS

La Serie de Suelos es la categoría de suelos más homogénea en clasificación de suelos, ya que representa una clase específica de suelos con un conjunto de características físicas, químicas y mineralógicas cuyo intervalo de variación es muy estrecho. Suele llevar el nombre del sitio donde se describió por primera vez (pueblos, ríos, etc.) y en cuyos alrededores se halla bien representada.

Una Serie se separa de otras en base a propiedades que reflejan intervalos relativamente estrechos de variación de los factores y procesos formadores.

Para describir los suelos de una Serie se utilizan como criterios propiedades relacionadas con el material originario: fragmentos gruesos, textura (contenido de arena, limo y arcilla), color, contenido de carbonato cálcico y de yeso, profundidad efectiva y expresión de los horizontes. También se utilizan criterios que reflejan la influencia de los procesos formadores y la clase de drenaje. Todas estas propiedades pueden resultar de interés al querer utilizar esta información para aplicaciones agrícolas, medioambientales, de ordenación del territorio o para la protección de los suelos, entre otras.

Para poder representar en un mapa una unidad cartográfica correspondiente a una única serie, se requiere trabajar a escala muy grande: mapas taxonómicamente detallados y cartográficamente detallados.

En el ejemplo utilizado, si el suelo hubiese sido descrito en Galicia el nombre de la Serie de Suelos podría haber sido «Lagoa», en Cataluña «Llacuna», en Euskadi «Aintzira», en Francia «Lagune», etc. Utilizar un término local tiene interés ya que tiene vida en la zona, pero tiene sus limitaciones. Por ello, a nivel científico se utilizan niveles jerárquicos superiores para referirse a los suelos.

CORRELACIÓN DE SUELOS

Correlación de suelos es el proceso utilizado para clasificar los suelos en una forma consistente y de acuerdo con los estándares de calidad requeridos en un programa de inventario de suelos. Este proceso también es utilizado para evitar repeticiones en el nombre de las Series de Suelos.

Existe un registro de las Series de Suelos que se han identificado y establecido. Los científicos de suelos estudian los paisajes y formas del territorio. Durante el curso de un inventario de suelos se identifican Series que no eran conocidas anteriormente. Para proponer una Serie de Suelo se requiere documentación de campo y datos de laboratorio. El especialista que realiza correlación de suelos es el correlator de suelos. Las Series de Suelos, a medida que van siendo aceptadas y aprobadas, podrán ser utilizadas.

El razonamiento realizado para llegar a la idea de Serie de Suelos, agrupando suelos semejantes, se puede repetir con clases semejantes, pasando sucesivamente a niveles jerárquicos superiores, hasta llegar al nivel jerárquico máximo que, en *Soil Taxonomy*, es el Orden. Históricamente no se hizo así, sino en paralelo y en un momento determinado hubo que hacer un gran esfuerzo para unificar ambos enfoques de abajo arriba y de arriba abajo.

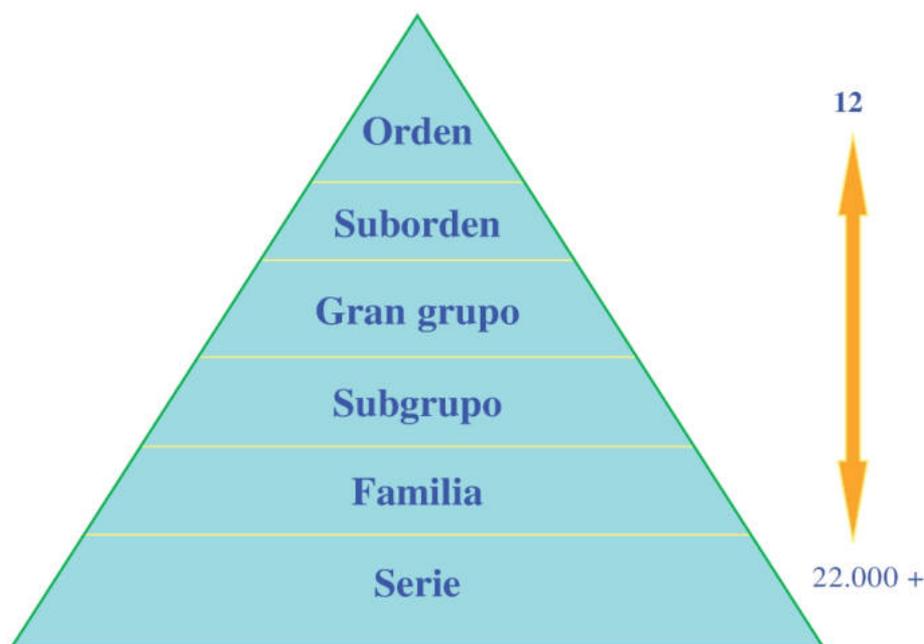
2. COMPARAR Y CONTRASTAR

- E3.** a) Describir las diferencias entre los epipedones móllico, úmbrico y melánico. Consultar la Clave, accesible por Internet en www.iec.cat/mapasols (Documentos de interés).
- b) En su momento se introdujo el concepto de *pedión* y ahora se ha definido la *Serie de suelos*. Comparar y contrastar ambos conceptos atendiendo a su realidad y utilidad.

3. UNA PANORÁMICA DE SOIL TAXONOMY: CATEGORÍAS TAXONÓMICAS

En *Soil Taxonomy* se han establecido seis **categorías taxonómicas** o niveles jerárquicos que van del Orden a la Serie de suelos. Las **clases** incluidas en cada categoría son mutuamente excluyentes. Los criterios para separar las distintas clases se denominan características diferenciadoras, que son propiedades observables y, a ser posible, medibles. La presentación de las categorías y de las clases dentro de cada una de ellas se hace por prioridades, de manera que si un suelo cumple las características de una clase en el orden jerárquico establecido en la Clave, ya no se seguirá con las restantes (de menor prioridad). Por otro lado, si en un suelo se han descrito dos características de diagnóstico (por ejemplo, un endopedión álbico y condiciones ácuicas), la más desfavorable se utiliza para incluir el suelo en un nivel jerárquico superior (por ejemplo, suborden: Aqualf) y la otra en un nivel jerárquico inferior (por ejemplo, Grupo: Albaqualf).

En un sistema jerárquico, las categorías superiores (Órdenes) tienen menos clases y son más inclusivas que las clases de las categorías inferiores y suponen un nivel de generalización mayor.



4. CARACTERÍSTICAS DIFERENCIADORAS

Las propiedades y rasgos que constituyen características diferenciadoras o de diagnóstico son:

- a) Los horizontes de diagnóstico: epipedones y endopediones.
- b) Características de diagnóstico complementarias.
- c) Regímenes de humedad y regímenes de temperatura.



Entisol: Xeropsamment.

J. Porta



Andisol

J. Porta – C. Roquero



Alfisol.

C. Roquero



Vertisol.

Ph. Duchaufour.



Oxisol con contacto petroférico.

R.M. Poch

5. APRENDIENDO A DESPIEZAR Y A LEER EL NOMBRE DE UN SUELO

Al establecer nombres para las distintas clases de suelos se optó por evitar denominaciones que tuviesen significaciones previas para evitar confusiones y que pudiesen utilizarse en otros idiomas sin necesidad de traducirlos. Por ello se optó por una nomenclatura totalmente nueva que fue dada a conocer en el Congreso de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo que se celebró en Madison, Wisconsin en 1960.

Siguiendo con el ejemplo, se nos dice que los suelos de la *Serie Laguna* se han clasificado como perteneciente a la Familia de suelos: **Natrixeralf típico, fina, mezclada, méstica** (SSS, 1992, 6.^a ed.). Vamos a aprender a despiezar esta denominación aparentemente complicada.

DESPIECE DEL NOMBRE DE UN SUELO

La denominación incluye un nombre **Natrixeralf** y un conjunto de adjetivos que le califican: típico, fina, mezclada y méstica.

El nombre se puede despiezar del siguiente modo:

$$\text{Natrixeralf} = \text{Natri} + \text{xeralf} = \text{Natri} + \text{xer} + \text{alf}$$

La terminación de los nombres de un suelo en *Soil Taxonomy*, en este caso **alf**, se denomina **elemento formativo del Orden** (EFO) e indica siempre el **Orden** al cual pertenece el suelo.

REGLAS DE NOMENCLATURA: ÓRDENES

Los nombres de los doce **ÓRDENES DE SUELOS** se forman con:

$$\text{ORDEN} = \text{ELEMENTO FORMATIVO DEL ORDEN (EFO)} + \text{i/o} + \text{SOL}$$

Se utilizan doce EFO, uno para cada Orden.

ÓRDENES Y ELEMENTOS FORMADORES DE ÓRDENES

Los doce **Órdenes** establecidos en *Soil Taxonomy*, referidos en un secuencia jerárquica con fines taxómicos, sin que ello exprese una relación edafogenética son los siguientes (en negrita se destaca el EFO):

G + el + i + sol	(gelu, hielo)	= Gelisol (suelo congelado)
H + ist + o + sol	(histos, tejido)	= Histosol (turba, suelo orgánico)
Esp + od + o + sol	(spodos, ceniza)	= Espodosol (suelo ácido, queluviación, espódico)
And + i + sol	(ando, negro)	= Andisol (propiedades ándicas y suelos volcánicos)
Ox + i + sol	(oxide, óxido)	= Oxisol (suelos ácidos, endopedión óxico)
V + ert + i + sol	(vertere, voltear)	= Vertisol (arcillas expansibles)
Ar + id + i + sol	(aridus, árido)	= Aridisol (régimen de humedad arídico)
Ult + i + sol	(ultimus, último)	= Ultisol (suelos ácidos, con argílico o kándico)
M + oll + i + sol	(mollis, mullido)	= Mollisol (epipedión móllico, V ≥ 50%)
Alf + i + sol	(pedalfer, Al, Fe)	= Alfisol (argílico o nátrico o kándico)
Inc + ept + i + sol	(inceptum, incipiente, por lo que hace al grado de desarrollo)	= Inceptisol
Ent + i + sol	(recent, reciente)	= Entisol (perfil poco desarrollado)



Histosol: turbera de Sphagnum. Pirineos.

J. Porta

DESPIECE DE UN SUBORDEN

Natrixeralf = **Natri** + **xeralf** = Natri + **xer** (régimen de humedad xérico) + **alf** (Alfisol).

Xeralf = SUBORDEN que pertenece al ORDEN de los Alfisoles.

En el caso del Suborden **Aquod** = aqu (exceso de agua) + od (Espodosol, queluviación).

REGLAS DE NOMENCLATURA: SUBÓRDENES

Los nombres de los **SUBÓRDENES DE SUELOS** se forman con:

SUBORDEN = ELEMENTO FORMATIVO DEL SUBORDEN + EFO

Se utilizan 29 elementos formativos de Subórdenes.

ELEMENTOS FORMATIVOS DE SUBÓRDENES

Proporcionan información acerca de:

- **Régimen de humedad:** ud (údic), ust (ústico), xer (xérico), aqu (condiciones ácuicas), per (perúdic), torr (tórrico).
- Procesos formadores por la presencia de determinados **horizontes de diagnóstico:** alb (álbico), anth (antrópico o plaggen), ar (mezcla de horizontes), arg (argílico), calc (cálcico), camb (cámbico), dur (duripán), gyps (gypsico), sal (sálico).
- **Régimen de temperatura:** cry (frío), gel (suelos congelados).
- Caracteres relacionados con los **materiales orgánicos:** fibr (fibras orgánicas), fol (masa de hojas), hem (materia orgánica parcialmente descompuesta), hist (materiales orgánicos), hum (presencia de m.o.), sapr (m.o. muy descompuesta).
- **Caracteres especiales:** fluv (carácter fluvéntico); orth (común, central); psamm (textura arenosa); rend (elevado contenido en CaCO₃), turb (cryoturbación), vitri (presencia de vidrio volcánico).

Las definiciones íntegras deben consultarse en la Clave (www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés) y, de forma simplificada, en Porta *et al.* (2005, pág. 466).

DESPIECE DE UN GRUPO

Natrixeralf = **Natri** (endopedión nátrico) + **xer** (regimen de humedad xérico) + **alf** (Alfisol)

Natrixeralf = GRUPO que pertenece al SUBORDEN de los Xeralfs

En el caso del Grupo Cryaquod = Cry (frío) + aqu (exceso de agua) + i + od (Espodosol)

REGLAS DE NOMENCLATURA: GRUPOS

Los nombres de los **GRUPOS DE SUELOS** se forman con:

GRUPO = PREFIJO DEL GRUPO + SUBORDEN

PREFIJOS DE GRUPOS

Se han establecido 57 prefijos de Grupo. Cada uno de ellos añade información acerca del suelo para la presencia de algún horizonte de diagnóstico u otra característica:

Ejemplos: acr (extremadamente meteorizado), alb (álbico), dur (duripán), dystr (distrofia, pobre en bases), epi (capa freática colgada), fluv (carácter fluvéntico, llanura de inundación), gloss (endopedión glósico), hal (salino), melan (negro), natr (endopedión nátrico), pale (muy desarrollado, antiguo), petr (cementado), psamm (arenoso), quartz (alto contenido en cuarzo), rhod (rojo), sulf (presencia de sulfuros), verm (mezcla por animales), vitr (presencia de vidrio volcánico), etc. Existe una definición precisa y cuantitativa para cada uno de estos caracteres, que se pueden consultar en la Clave (www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés) y, de forma simplificada, en Porta y López-Acevedo (2005, pág. 470).

Ejemplo:

Melanocryand = melano + cryand = melano + cry + and

and indica el Orden: **Andisoles**, suelos con propiedades ándicas (generalmente formados a partir de materiales volcánicos).

cryand: Andisoles de zonas frías (régimen de temperatura del suelo cryico).

melano: epipedión melánico, con alto contenido de materia orgánica, color muy oscuro (en húmedo brillo y croma iguales o menores de 2).

DESPIECE DE UN SUBGRUPO

Petrocalcic Calcixerept = calci + xerept + petrocalcico = petrocalcic + calci + xer + ept.

ept indica el Orden = Inceptisol.

xerept es el Suborden = Inceptisol de régimen de humedad xérico (mediterráneo).

calcixerept indica el Grupo = xerept calizo y con endopedión cálcico o petrocálcico.

Petrocalcic Calcixerept = Calcixerept con endopedión petrocálcico (a menos de 1 m).

REGLAS DE NOMENCLATURA: SUBGRUPO

SUBGRUPO = GRUPO + CALIFICATIVO (central, extragrado o intergrado)

CALIFICATIVOS DE SUBGRUPOS

Central: carácter medial del Subgrupo.

Typic Argiudoll = Mollisol con régimen údico y endopedión argílico

Extragrado: clase taxonómica a nivel de Subgrupo que tiene propiedades que no son características de ninguna clase en una categoría superior y que no indica una transición a ninguna clase de suelo conocida.

Argiudoll páquico = Mollisol con régimen údico y endopedión argílico y un epipedión móllico de gran espesor (pachic), lo que constituye un extragrado.

Intergrado: clase taxonómica a nivel de Subgrupo que posee características distinguibles moderadamente bien desarrolladas de dos o más clases genéticamente relacionadas.

Vertic Argiudoll = Mollisol con régimen údico y endopedión argílico, con rasgos debidos a la presencia de arcillas expansibles, por lo que se intergrada a los Vertisoles.

Ejemplos de calificativos para Subgrupos: abruptic (cambio textural abrupto), albico (endopedión albico), arénico (arenoso), crómico (colores claros), cumulic (mollico de gran espesor), grossarénico (arenoso de gran espesor), gypsic (endopedión gypsic), hístico (con epipedión hístico), lítico (contacto lítico a menos de 50 cm), móllico (no cumple para móllico por el espesor), nátrico (endopedión nátrico), plántico (con plintita), típico (concepto central), petrocálcico (endopedión petrocálcico), udóllico (no cumple para Udoll), úmbrico (no cumple para úmbrico por espesor), vérmico (bioturbación), vértico (rasgos derivados de arcillas expansibles), xérico (régimen de humedad próximo al xérico), entre otros muchos. Existe una definición precisa y cuantitativa para cada uno de estos caracteres consultable en la Clave.

REGLAS DE NOMENCLATURA

Los nombres de las **FAMILIAS DE SUELOS** se forman con el régimen de temperatura, mineralogía, actividad de la CIC, entre otros.

FAMILIA = SUBGRUPO + 2 o más DESCRIPTORES

Debiendo recurrir a la Clave de *Soil Taxonomy* para las definiciones de los descriptores y, forma simplificada, en Porta y López-Acevedo (2005). Como ejemplo:

Typic Natrixeralf, fina, mezclada, mésica (NRCS-USDSA, 2006, 10.^a ed.)

alf indica el Orden: Alfisol

fina, mezclada y mésica son los descriptores de la Familia.

Dado que el sistema de clasificación cambia a lo largo del tiempo, deberá reseñarse siempre el año de la versión utilizada.

6. OBTENER INFORMACIÓN

G2. En un mapa de suelos se lee que una de las unidades cartográficas representadas corresponde en un 70% de la superficie a un Aquic Dystrustert.

- Indicar Orden, Suborden, Grupo y Subgrupo al que pertenece este suelo.
- Inferir si resulta favorable el régimen de lluvias para los cultivos de verano de la zona.
- Justificar si se trata de un suelo básico o ácido.
- Estudiar si existe algún factor condicionante para realizar una plantación de melocotoneros (duraznos) en este suelo.
- Se nos consulta, además, si el aporte de purines a este suelo podría suponer algún riesgo ambiental para una capa freática.

7. ORDENAR SEGÚN UNA JERARQUÍA

E3. a) Reordenar los siguientes términos atendiendo a su nivel jerárquico. Justifique el criterio utilizado para establecer la secuencia establecida: natrixeralf, udoll, xerofluvent, palexeralf petrocálcico, argiudoll típico, udult, dystroxerept ácuico, acraquox, sulfaquent, palexeralf nátrico. Puede consultarse *Soil Taxonomy* en: www.iec.cat/mapasols (→ Documentos de interés).

- Indicar a qué Orden y Suborden pertenece cada uno de estos suelos.
- Reordenarlos atendiendo a si son más a menos favorables para un uso agrícola, a partir del nombre.
- Indicar qué procesos edafogénicos pueden haber actuado en cada uno de estos suelos de acuerdo con lo que se indica:

- | | | |
|---------------------------------------|--|------------------------------|
| (a) meteorización extrema | (b) acidificación extrema | (c) translocación de arcilla |
| (d) translocación de arcillas sódicas | (e) translocación de CaCO ₃ | (f) procesos redox |
| (g) oxidación de sulfuros | (h) formación de un móllico | (i) acumulación de yeso |
| (j) queluviación | (k) acidificación | (m) sodificación |

- Indicar si hay algún intergrado y extragrado y qué información proporciona cada uno de ellos.

8. CLASIFICAR UN SUELO EN EL CAMPO

Al finalizar la descripción de un suelo se pueden hacer hipótesis acerca del Orden al cual pertenece. Para clasificar había que recurrir a la clave de *Soil Taxonomy* tras haber establecido los horizontes de diagnóstico que hay en el suelo, cuál es el régimen de humedad, entre otras características diagnóstico. En Internet (www.iec.cat/mapasols) se puede acceder a la Clave completa para poder clasificar un suelo.

9. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. Resolver este crucigrama. Los criterios indicados y la terminología utilizada son estrictamente los propuestos por *Soil Taxonomy*. No se incluyen todas las casillas de separación entre palabras.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2			■									
3				■								
4		■	■									
5								■	■			
6												
7				■			■					
8							■	■	■			
9	■							■	■			
10							■	■	■		■	
11												
12												

Horizontales

- Denominación de un horizonte genético orgánico de un suelo mineral (mayúscula) / Subíndice para un horizonte genético enterrado / Calificativo del Subgrupo de suelos formados en una llanura de inundación (al revés).
- Símbolo utilizado para representar el grado de saturación de cationes basificantes / Subíndice que indica que un horizonte B tiene color y estructura edáfica, pero no iluviación / Horizonte de más de 15 cm con un pH (1:1) de 3,5 o menor y con concreciones de jarosita (al revés).
- EFO de los suelos de textura arenosa franco fina o más gruesa y con menos de un 35% EG y sin endopediones de diagnóstico / Símbolo del litio (al revés) / EFO de los suelos ácidos con queluviación y endopedión álbico y espódico / EFO de los suelos formados a partir de material volcánico en zonas húmedas / Horizonte genético que sirve para describir un endopedión álbico.
- Símbolo utilizado (letra mayúscula) para designar un horizonte genético formado por una roca dura no fragmentada / Subíndice que indica la presencia de una capa no cementada si bien muy compacta de manera que supone una restricción física para las raíces / Símbolo del cloro / Subíndice que indica la presencia de jarosita en un horizonte / Suborden de suelos de zonas tropicales húmedas, en los que la sección control de humedad del suelo está seca menos de 90 días acumulados en alguna parte y menos de 45 días consecutivos en toda la sección (al revés) / Horizonte a partir del cual se puede haber formado el suelo, compacto y sin grietas a menos de 10 cm entre ellas.
- Calificativo que describe el carácter central, común de un Subgrupo / Segunda letra de la palabra que designa el Orden que agrupa suelos de pradera con un epipedion móllico / Primera y cuarta letra de la palabra que designa el Suborden de los Andisoles con régimen de humedad arídico (al revés) / Primera letra de la palabra que designa el Orden que agrupa suelos con endopedión cámbico, cálcico, petrocálcico, gypico o petrogypico con un régimen de humedad que no sea arídico.
- Suelo con características de transición entre dos clases genéticamente relacionadas / Segunda y cuarta letra de las siglas que indican la capacidad de intercambio catiónico determinada al pH del suelo.
- Símbolo del calcio / Horizonte genético orgánico típico de una turbera (Histosol) / Dos primeras letras de la palabra que describe un agregado de cristales laminares de yeso dispuestos de una forma singular (al revés) / Tercer nivel jerárquico en Soil Taxonomy.
- Horizonte orgánico de un suelo mineral / Tercera y cuarta letra de la palabra que designa el Suborden de los Alfisoles con régimen de humedad ústico / Inicial de la palabra que designa el Orden de suelos tropicales muy meteorizados / Cuarta y quinta letra del Suborden de los Aridisoles con endopedión cámbico (al revés) / Dos primeras letras de la palabra que designa un horizonte iluvial (arcilla) de menos de 7,5 cm de espesor, que se presenta en series verticales de dos o más (argílico en bandas) / Primera letra de la palabra que sirve para designar los minerales muy estables frente a la meteorización.

9. Letra que designa un horizonte genético que corresponde a un contacto lítico / Prefijo para un Grupo de suelos de textura arenosa / Inicial de la palabra que designa el régimen de temperatura en el que la temperatura media anual del suelo se halla entre 15 °C y 22 °C / Inicial de la palabra que sirve para designar acumulaciones (CaCO₃, SiO₂ y otras) de forma esférica a arriñonada de tamaño centimétrico y origen edáfico / Primera letra de un término equivalente a granulometría del suelo.
10. Contacto formado por una roca dura no fragmentada / Inicial de la palabra que designa un horizonte genético que ha perdido componentes cromógenos / Primera letra del Orden que agrupa los suelos orgánicos.
11. Horizonte genético de transición entre uno formado en la superficie del suelo y otro poco afectado por procesos edafogénicos / Elemento formativo de los Espodosoles / Primera letra del Suborden que agrupa los suelos forestales de regiones húmedas, con horizonte móllico de menos de 50 cm de espesor que puede estar encima de una roca caliza / Suborden de suelos de zona tropical húmeda y cálida, con régimen de humedad údico y un endopediación óxico o kándico y una CICE de menos de 1,50 cmolc kg⁻¹ de arcilla y un pHKCl de 5,0 o más (al revés) / Prefijo de Grupo que designa que el suelo está extremadamente meteorizado (al revés).
12. Organización edáfica centimétrica, en forma de capa de límites generalmente paralelos a la superficie del terreno, y que es el resultado de los procesos edafogénicos que han tenido lugar en él / En inglés red (al revés).

Verticales

1. Letra con que se designa un horizonte orgánico de un suelo mineral / Calificativo de Subgrupo para indicar que el suelo tiene rasgos debidos a la presencia de arcilla expansiva (intergrado) / Prefijo de Grupo para indicar salinidad (al revés).
2. Horizonte mineral formado en el interior del suelo con estructura edáfica y sin iluviación / Letra con la que se designa el indicador para la aptitud para el pastoreo (índice de subsidencia) / Subíndice que se utiliza para designar acumulación de yeso / Endopediación con arcilla sódica iluviada.
3. Letra que se utiliza para designar un horizonte caracterizado por estar formado por un mantillo en un bosque / Letra que se utiliza como subíndice de un horizonte genético formado por translocación de arcilla (arcilla iluvial) / Letra que se utiliza como subíndice para designar un horizonte labrado / Calificador de Subgrupo para indicar que el suelo está enterrado / Roca consolidada subyacente y demasiado dura para romperla con la mano, si presenta grietas están separadas más de 10 cm.
4. Símbolo que se utiliza como subíndice con los horizontes orgánicos L para indicar que se trata de una capa límnic de tierra coprógena / Elemento formativo de un Orden que viene definido por un régimen de humedad arídico (al revés) / Letra que designa un horizonte genético caracterizado por una eluviación intensa / Horizonte orgánico de un suelo mineral formado en la superficie del suelo / Símbolo del silicio / Elemento formativo de los Aridisoles (al revés).
5. Letra que se utiliza para designar material orgánico poco descompuesto en un horizonte O / Símbolo de la capacidad de intercambio catiónico a pH 7 / Intensidad cromática / Símbolo del carbono / Símbolo del círculo (al revés).
6. Material originario formado por depósitos glaciares no consolidados poco o nada clasificados / Subíndice que indica la acumulación residual de sesquióxidos / Elemento formativo de Subsorden de los Aridisoles para indicar la presencia de un horizonte argílico (al revés) / Subíndice que indica una cementación continua o casi continua / Elemento formativo del Orden de suelos minerales que tienen un endopediación óxico, de zonas tropicales cálidas y húmedas / Cuarta letra del Suborden de los Oxisoles con condiciones ácuicas.
7. Índice de subsidencia / Color que corresponde a 5R 2/3 / Letra que designa el horizonte subyacente duro, compacto, no meteorizado y que supone un impedimento al paso de las raíces / Subíndice para designar que un horizonte está cementado / Dos primeras letras de la palabra que designa una acumulación esferoidal o arriñonada de tamaño centímetro y origen edáfico (al revés).
8. Primera letra del símbolo que representa el potencial redox / Elemento formativo de un Suborden cuyo régimen de humedad se caracteriza por la abundancia de lluvias / Subíndice utilizado para designar la presencia de un horizonte subsuperficial muy compacto y duro en seco, con densidad aparente elevada, firme y frágil en húmedo / Horizonte genético situado en la parte superior del suelo y que presenta caracteres de fuerte reducción / Primera y cuarta letra del prefijo de Grupo que designa que el medio es pobre en cationes basificantes.
9. Primera letra de la palabra que designa el Orden que agrupa los suelos caracterizados por movimientos internos importantes al humedecerse y secarse / Dos primeras letras de la palabra que designa el quinto nivel

jerárquico en Soil Taxonomy / Primera letra de la palabra que designa el nivel jerárquico de mayor grado de generalización en Soil Taxonomy / Subíndice que indica la presencia de una suela de labor / Letra que se repite tres veces en la palabra que designa el contacto entre el suelo y una capa continua cementada principalmente por hierro / Prefijo de dos letras que indica que un medio es rico en cationes basificantes (al revés).

10. Subíndice utilizado para indicar la presencia de artefactos de origen antrópico en un suelo / Indicativo de matrícula del país en el que se encuentra el Museo de Suelos de Wageningen (al revés) / Subíndice para describir una capa compactada mecánicamente / Elemento formativo de los Espodosoles (al revés) / EFO de los Ultisoles / Elemento formador del Orden que agrupa los suelos con predominio de arcillas expansibles.
11. Dos primeras letras de la palabra que designa una roca sedimentaria terrígena formada por granos de tamaño limo y arcilla / Horizonte de diagnóstico cementado por sílice / Medida de la salinidad del suelo.
12. Subíndice para indicar la presencia de un horizonte o una capa que contiene hielo permanente / Nivel jerárquico más bajo / Elemento formativo de Subórdenes que indica lo común o central del Suborden / Dos primeras letras del término que designa un horizonte con iluviación de arcilla sódica y ESP \geq 15% (al revés).

10. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. La descripción de campo ha permitido establecer tres unidades de suelos a, b y c. Seleccionar suelos de la zona en que nos encontramos. Para cada uno de ellos deben formularse las hipótesis referentes a:

Hipótesis/Suelo de la zona			
Procesos de adición			
Translocaciones y acumulaciones			
Procesos de pérdidas			
Tipo de drenaje			
Horizontes de diagnóstico			
Función priorizada y factores condicionantes			
Rasgos del clima			
Unidad de suelos WRB			
Suborden de Soil Taxonomy			

11. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

A1. Identificar 20 términos referentes a las características de diagnóstico y la estructura de *Soil Taxonomy* (NSRC, 2006). Estructurar las respuestas según un esquema conceptual: Horizontes de diagnóstico, características de diagnóstico, régimen de humedad, Órdenes, Subórdenes, Grupos, Subgrupos, etc.

r	s	u	b	g	r	u	p	o	c	e	m
i	e	f	a	s	e	s	e	r	i	e	n
n	x	o	c	i	r	e	x	s	t	p	o
t	t	r	i	a	u	m	e	u	o	i	i
e	r	l	i	t	i	c	o	b	c	p	d
r	a	s	p	o	d	i	c	o	i	e	e
g	g	o	r	d	e	n	p	r	t	d	p
r	r	x	c	o	l	e	d	d	s	i	o
a	a	r	i	d	i	c	o	e	u	o	d
d	d	m	e	s	i	c	o	n	h	n	n
o	o	r	b	t	o	r	r	i	c	o	e
a	i	l	i	m	a	f	o	c	i	d	u

12. METODOLOGÍA DE TRABAJO

G2. Utilizando las reglas de nomenclatura de *Soil Taxonomy*, establecer el nombre que corresponda en cada caso.

- a) **Orden** de suelos que se caracterizan por tener arcillas expansibles, que provocan movimientos dentro del suelo, como si se tratase de un arado de vertedera (lat. *vertere*, girar). El prefijo del Orden deberá hacer referencia a este comportamiento que limita las funciones de estos suelos:
 - Regla nomenclatural.
 - Denominación del Orden.
- b) **Suborden** al que pertenecen los suelos del Orden anterior y que se hallan en un paisaje cuyos suelos tienen un régimen de humedad xérico (gr. seco)
 - Regla nomenclatural.
 - Denominación del Suborden.
- c) Suponga que una **Serie de Suelos** de este Orden ha sido descrita por primera vez en el predio cuyo topónimo es «Los Girasoles», ¿qué nombre podría darse a la serie de suelos y con qué grado de generalización?
 - Regla nomenclatural.
 - Denominación de la Serie.
 - Grado de generalización.

13. INTERPRETAR INFORMACIÓN

- A1.** 1. Se dispone de dos mapas de suelos, uno a escala grande (1:25.000) y otro de escala mediana (1:100.000). ¿Cuál de ellos tendrá un mayor valor predictivo?
2. A partir del mapa elegido se sabe que en la zona hay Aquic Xeropsamment y Mollic Xerofluvent:
- a) ¿A qué Orden pertenecen?
 - b) ¿A qué Suborden?
 - c) ¿En cuál de ellos tendrá lugar una transferencia más rápida a otro compartimento ambiental en caso de aportar purín? ¿Por qué?
 - d) ¿Qué compartimento ambiental puede recibir los efectos?
 - e) ¿Cuál de ellos será más adecuado para llevar a cabo un ensayo sobre aceptación de purines?

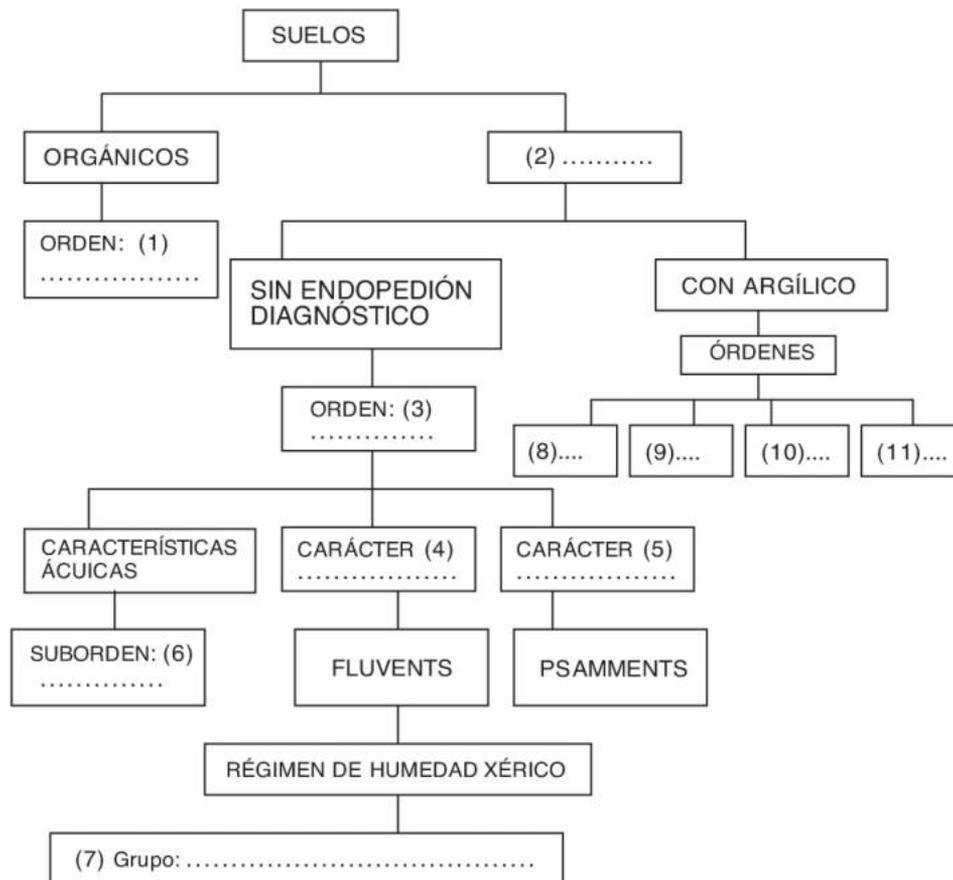
14. RELACIONES ESENCIALES

G2. Indicar cuáles relaciones entre la primera y la segunda columna resultan compatibles (C) o incompatibles (I).

1. Vertisol	a) Endopedión espódico
2. Endopedión cámbico	b) Oxisol
3. Espodosol	c) Endopedión álbico
4. Aridisol	d) Endopedión sálico
5. Endopedión gypsico	e) Entisol
6. Alfisol	f) Endopedión nátrico
7. Endopedión argílico	g) Inceptisol
8. Inceptisol	h) Epipedión ócrico
9. Mollisol	i) Epipedión úmbrico

15. ESQUEMA CONCEPTUAL

A1. Completar el esquema conceptual siguiente, referente a los niveles jerárquicos establecidos en Soil Taxonomy accesible en <http://www.iec.cat/mapasols> (Documentos de interés).



16. INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN

E3. En una zona existen las dos unidades de suelos siguientes. Formular hipótesis verosímiles acerca de los aspectos que se indican. Argumentar las respuestas.

FORMULAR HIPÓTESIS POSIBLES ACERCA DE	Lithic Dystrudept	Fluentic Dystrudept
Orden de suelo:		
Suborden:		
Grupo:		
Subgrupo:		
¿Se puede inferir algo acerca de la textura?		
¿Se puede afirmar algo acerca de la pluviometría de la zona?		
Necesidades de riego: alta/baja		
¿Se puede decir algo acerca de dónde puede estar situada la finca, desde un punto de vista geomorfológico?		
¿Profundidad efectiva?		
¿Se puede afirmar algo acerca de la acidez de este suelo?		
Al desarrollar modelos de predicción de respuesta o en su aplicación, ¿puede considerarse la zona como un todo?		
¿Recomendaría establecer dos unidades de manejo o se puede gestionar toda esta zona de la misma manera?		

17. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término que mejor encaje dentro del contexto, de entre los propuestos.

Un sistema de clasificación debe servir para poder (1) _____ los suelos (identificarlos y localizarlos) y poder predecir su comportamiento y respuesta frente a usos y técnicas de manejo alternativos. Por ello las propiedades y atributos tomados en consideración para clasificar un suelo deben ser aquellos que se consideren importantes para poder realizar interpretaciones relevantes y deben poder ser aplicados de forma (2) _____ al estar definidos a partir de propiedades observables y a ser posible (3) _____ para agrupar suelos, por ello resulta imprescindible (4) _____ la descripción de los pediones.

En *Soil Taxonomy* se han establecido (5) _____ niveles jerárquicos de clasificación, el de máximo detalle corresponde (6) _____, mientras que el de máxima generalización taxonómica es (7) _____, lo que significa que estos/as últimos/as constituyen clases de suelos muy (8) _____, cuyas propiedades varían dentro de un intervalo (9) _____. El número de Órdenes establecidos es de (10) _____, atendiendo a un conjunto de procesos formadores predominantes. Las distintas clases establecidas (11) _____

- | | | | | |
|------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------|
| (1) | a) cartografiar | b) describir | c) conocer | d) ordenar |
| (2) | a) sistemática | b) reconocible | c) objetiva | d) subjetiva |
| (3) | a) medibles | b) reconocibles | c) fáciles | d) adecuadas |
| (4) | a) realizar | b) normalizar | c) actualizar | d) sintetizar |
| (5) | a) cinco | b) doce | c) siete | d) seis |
| (6) | a) al suborden | b) al orden | c) la serie de suelos | d) la familia |
| (7) | a) al suborden | b) al orden | c) la serie de suelos | d) la familia |
| (8) | a) homogénea | b) heterogénea | c) uniforme | d) jerarquizada |
| (9) | a) muy amplio | b) muy estrecho | c) variable | d) corto |
| (10) | a) 1200 | b) diez | c) 12.000 | d) doce |
| (11) | a) se solapan | b) son mutuamente excluyentes | c) son amplias | d) 6000 |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje sigualmente su contenido.

OBJETIVOS

Conocer los principios básicos y estructura de WRB.

Saber utilizar la Clave de WRB.

Saber leer la información contenida en la denominación de un suelo según la WRB.

No constituye un objetivo de un curso introductorio aprender a clasificar suelos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Principios básicos de la WRB.

Arquitectura de la WRB.

Grupos de Suelos de Referencia.

Calificadores de los Grupos de Suelos de Referencia.

Forma de utilizar los calificadores.

Saber leer el nombre de un suelo: obtención de información.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a ed. Mundi Prensa, 2003: Cap. 20.

Porta, J. y López-Acevedo, M.: *Agenda de Campo de Suelos*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, 2005. Cap. 18.

IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. A Framework for International Classification, Correlation and Communication*. World Soil Resources Reports N. 103: 1-128. FAO, 2006. En Internet: www.iec.cat.net/mapasols → Documentos de interés).

1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA WRB

La Base de Referencia Mundial para Recursos de Suelos (WRB) se basa en los siguientes principios (IUSS Working Group WRB, 2006):

- Propiedades del suelo definidas en términos de **horizontes de diagnóstico, propiedades de diagnóstico y materiales de diagnóstico**, a ser posible observables y medibles en el campo y relacionados con los procesos formadores.
- La selección de características de diagnóstico tiene en cuenta su relación con los procesos formadores. Entenderlos contribuye a caracterizar mejor los suelos, pero no se utilizan como criterios de diferenciación para clasificar un suelo.
- Los rasgos de diagnóstico se han seleccionado principalmente por su relevancia en el manejo de los suelos.
- No se utilizan parámetros climáticos para clasificar un suelo.
- La versión de 2006 se plantea ya como un sistema de clasificación comprehensivo de los suelos del mundo, si bien su objetivo fundamental no pretende ir a cartografías de mayor detalle que las de escala 1: 250 000.
- Se han establecido 32 **Grupos de Suelos de Referencia (GSR)**.
- Se definen **calificadores** como prefijos y sufijos a añadir al nombre del GSR, lo que permite una caracterización muy precisa de un suelo individual.
- La nomenclatura conserva términos que se han utilizado tradicionalmente o que pueden ser introducidos fácilmente en el lenguaje corriente. Se definen de forma precisa para evitar confusiones.
- Las clases del nivel jerárquico superior se han establecido atendiendo principalmente a los procesos edafogénicos principales.
- El segundo nivel jerárquico se establece utilizando un proceso formador secundario o características significativas para el uso del suelo.

2. ARQUITECTURA DE LA WRB

La estructura de la WRB ha sufrido modificaciones importantes que se han dado a conocer en la segunda edición (IUSS Working Group WRB, 2006). Se han establecido dos niveles jerárquicos:

Nivel 1: con 32 Grupos de Suelos de Referencia (GSR).

Nivel 2: combinación de los Grupos de Suelos de Referencia con calificadores que se han establecido de forma específica para cada uno de los Grupos de Suelos de Referencia (GSR).

3. HORIZONTES, PROPIEDADES Y MATERIALES DE DIAGNÓSTICO

Para las definiciones completas de los horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico debe recurrirse a la Clave (pág. 11 y ss), accesible por Internet (www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés). Los conceptos y las definiciones simplificadas se han ido introduciendo a lo largo del libro (consultar el Índice alfabético final).

4. GRUPOS DE SUELOS DE REFERENCIA

La Clave simplificada para los Grupos de Suelos de Referencia (RSG) es la siguiente:

- | | |
|---|-------------|
| 1. Suelos orgánicos , epipedión hístico o fólico | Histosoles |
| 2. Suelos con fuerte influencia humana | |
| Suelos con un uso agrícola prolongado e intensivo | Anthrosoles |
| Suelos que contienen muchos artefactos | Technosoles |

3. Suelos con una zona de enraizamiento limitada	
Suelos afectados por hielo, permafrost	Cryosoles
Suelos con poco espesor (<25 cm una roca dura continua) o con mucha grava (< 20% vol. tierra fina)	Leptosoles
4. Suelos influenciados por el agua	
Alternancia de humectación-deseccación y ricos en arcillas expansibles (a >= 30%), grietas, caras de deslizamiento	Vertisoles
Llanuras aluviales, marismas, suelos jóvenes	Fluvisoles
Suelos alcalinos, endopediación nátrico	Solonetz
Suelos enriquecidos con sales por evaporación, horizonte sálico	Solonchaks
Suelos afectados por capa freática, patrón de color gléico y condiciones reductoras a < 50 cm	Gleysoles
5. Suelos controlados por la química del Al/Fe	
Alófanos o complejos humus – Al, propiedades ándicas o vítricas	Andosoles
Queluviación o quiluviación, endopediación espódico	Podzoles
Acumulación de hierro bajo condiciones hidromorfos, Plíntico, pisoplíntico o petroplíntico, zonas tropicales	Plinthosoles
Arcilla de baja actividad, fijación de P, fuertemente estructurados, endopediación nítico	Nitisoles
Dominancia de caolinita y sesquióxidos, endopediación ferrálico, trópicos húmedos	Ferralsoles
6. Suelos con agua estagnica	
Cambio textural abrupto, condiciones reductoras temporales, patrón de color estagnico o horizonte álbico	Planosoles
Discontinuidad estructural o textural moderada, condiciones reductoras temporales, patrón de color estagnico o horizonte álbico	Estagnosoles
7. Acumulación de materia orgánica, rico en cationes basificantes	
Con epipediación móllico muy profundo, muy oscuro, endopediación cálcico, típico de estepas de gramíneas	Chernozem
Transición a clima más seco, móllico (menor espesor y no tan oscuro) endopediación cálcico	Kastanozem
Transición a clima más húmedo, móllico, más lavados	Phaeozem
8. Acumulación de sales poco solubles o sustancias no salinas	
Yeso, endopediación gypsico o petrogypsico	Gypsisoles
Sílice, endopediación dúrico o petrodúrico	Durisoles
Carbonato cálcico, endopediación cálcico o petrocálcico	Calcisoles
9. Suelos con un endopediación enriquecido con arcilla, endopediación árgico	
Con lenguas albelúvicas	Albeluvisol
Pobre en cationes basificantes, arcilla de alta actividad	Alisol
Pobre en cationes basificantes, arcilla de baja actividad	Acrisoles
Rico en cationes basificantes, arcilla de alta actividad	Luvisoles
Rico en cationes basificantes, arcilla de baja actividad	Lixisoles
10. Suelos relativamente jóvenes o suelos con un perfil poco o no desarrollado	
Con un epipediación ácido, oscuro, úmbrico	Umbrisol
Suelos arenosos, con menos del 35% de fragmentos	Arenosoles
Suelos moderadamente desarrollados, endopediación cámbico	Cambisoles
Suelos con un desarrollo del perfil poco significativo	Regosoles

5. CALIFICADORES DE LOS GRUPOS DE SUELOS DE REFERENCIA

Los calificadores se han definido de forma común para todos los Grupos de Suelos de Referencia y se han establecido de forma específica con listas individuales para cada Grupo de Suelos de Referencia y proporcionan información acerca de propiedades del suelo y características frente al uso. Se ha propuesto los:

- **Típicos:** expresan caracteres centrales o mediales del RSG.
- **Intergrados:** reflejan criterios de diagnóstico importantes de otros RSG, como puente entre dos RSG genéticamente relacionados.
- **Otros calificadores:** corresponde al concepto de extragrado de *Soil Taxonomy*, no indica una transición a ningún otro RSG, sino que reflejan características de color, porcentaje de cationes basificantes y otras propiedades físicas y químicas que no resultan típicas en el RSG.

6. FORMA DE UTILIZAR LOS CALIFICADORES

Los calificadores se utilizan como:

- **Prefijos:** hacen referencia a los típicos y los intergrados que se indican en la Clave. Se colocan siempre delante del nombre del GSR, de menor a mayor prioridad (de izquierda a derecha), de manera que el de mayor prioridad esté más cerca del nombre del RSG. Se debe seguir la prioridad establecida en la Clave para cada RSG. La secuencia de uso se indica en la Clave para cada GSR. Ejemplo: Lítico Vético **Ferralsol**. La posición de Vético indica que tiene mayor prioridad.
- **Sufijos:** hacen referencia a los otros calificadores que se indican en la Clave. Se colocan entre paréntesis y separados por comas detrás del nombre del GSR (si no procede ninguno se ponen los paréntesis sin nada entre ellos). La secuencia de uso es: los referentes a horizontes, propiedades o materiales de diagnóstico; a características químicas; a características físicas; a características mineralógicas; a características de superficie; a características texturales y fragmentos gruesos; a color; y los restantes calificadores. Ejemplo **Ferralsol** (Férrico, Rhódico). La posición de Férrico indica que tiene mayor prioridad.

Se deberá evitar el uso de calificadores redundantes, como por ejemplo: Calcáreo y Eutríco. Se puede indicar la expresión de un calificador utilizando **especificadores** tales como Epi-(parte superior), Endo- (dentro), Hypo-, Thapto- (enterrado), Bathy-, Para-, Proto-, Cumuli- y Ortho-.

Al **clasificar** un suelo se indicarán todos aquellos calificadores que le sean de aplicación. En **cartografía** de suelos será la escala la que determinará el número de calificadores a utilizar, teniendo prioridad los prefijos frente a los sufijos:

- Sólo prefijos para mapas a escalas entre 1: 5M y 1: 1M.
- Adicionalmente sufijos para mapas a escalas entre 1: 1M y 1: 250 000.

La introducción de nuevos calificadores debe proponerse al Grupo de trabajo de la WRB, previamente a su utilización.

7. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

E3. Para clasificar un suelo con precisión debe contrastarse la información obtenida en campo y en el laboratorio con los requerimientos indicados en la Clave de WRB, que se puede consultar por Internet en www.iec.cat/mapasols (Documentos de interés). A partir de un mapa de suelos sabemos que en una determinada zona hay Lítico Vético **Ferralsol** (Férrico, Rhódico).

1. Explicar la denominación de este suelo atendiendo a los prefijos calificadores, nombre del GSR y los sufijos calificadores.
2. ¿Qué información nos están transfiriendo acerca de los suelos de esta área para diferentes usos?
 - a) **Turismo:**
 - a.1) ¿Para que parte del mundo nos han sorprendido con unas vacaciones, en Cuba, Turquía, Brasil o Marruecos, si el año pasado ya estuvimos en Cuba?
 - a.2) ¿Sería aconsejable poner un paraguas en el equipaje?
 - a.3) ¿Qué tipo de vacunas habrá que prever?

b) Prospección en campo:

- b.1) ¿Deberíamos llevar HCl del 11% en la caja de reactivos? ¿Por qué?
- b.2) ¿Es esperable poder hacer fotos de perfiles con horizontes bien diferenciados?
- b.3) ¿Habrá mucha arcilla naturalmente dispersa?

c) Procesos formadores:

- c.1) ¿Qué se puede afirmar acerca del grado de meteorización que ha sufrido este suelo?
- c.2) ¿Qué hipótesis se puede formular acerca del tipo de arcillas de estos suelos?
- c.3) ¿Serán importantes los procesos redox derivados de un mal drenaje en estos suelos?

d) Uso agrícola:

- d.1) ¿Se trata de suelos ácidos, de suelos calizos, de suelos afectados por salinidad o de suelos con un contacto lítico a menos de 25 cm de profundidad?
- d.2) ¿Podemos pensar en implantar cultivos de alfalfa?

8. INTERPRETAR INFORMACIÓN

- E3.** a) Dado que se puede plantear clasificar los suelos atendiendo a diversos criterios, unos basados en propiedades intrínsecas de los suelos y otros relacionados más directamente con aplicaciones concretas:
- a.1. Indicar cuál de los dos criterios conducirá a una clasificación de validez más general
 - a.2. Indicar algunas propiedades que deberían haberse obtenido en campo para poder ser utilizadas como criterios de clasificación según que el objetivo sea para el uso agrícola; para soportar un almacén; o se quiera destacar un proceso edafogénico.
- b) Los sistemas de clasificación de suelos puramente utilitarios basados en el uso agrícola o en propiedades de ingeniería resultan científicamente insatisfactorios y cartográficamente limitados. ¿Por qué?

9. AMPLIANDO TERMINOLOGÍA

- A1.** Identificar 12 términos referentes a WRB. Crear un esquema conceptual.

m	e	l	a	n	i	c	o	g	y
g	e	r	i	c	a	a	r	o	g
a	l	i	c	s	a	l	i	c	o
t	e	f	r	i	c	o	g	i	r
g	a	i	a	p	o	r	p	b	g
n	a	t	r	i	c	o	c	l	a
c	a	l	c	i	c	o	e	a	n
t	e	f	l	u	v	i	c	o	i
m	o	l	l	i	c	o	l	a	c
f	e	r	r	a	l	i	c	a	o

10. METODOLOGÍA DE TRABAJO

G2. Los nombres de los Grupos de Suelos de Referencia en la WRB derivan de los términos utilizados en las leyendas de los mapas de suelos del mundo, cuya elaboración fue impulsada por la FAO. La colaboración internacional permitió llevar a cabo un programa de cartografía de suelos de amplio alcance geográfico y la elaboración de una leyenda común para dichos mapas. De ella se ha llegado a un sistema de clasificación de suelos conocido como WRB (Deckers, Nachtergaele y Spaargaren, 1998).

Algunos Grupos de Suelos de Referencia tienen nombres procedentes de la terminología popular de distintas partes del mundo. Los Grupos introducidos más recientemente siguen unas reglas nomenclaturales, basadas en el uso de elementos formativos de etimología por lo general latina o griega. Con los elementos formativos siguientes: *acri*, *ali*, *anthros*, *cambi*, *duri*, *fluvi*, *histos*, *gyps*, *luvi* y *rego* formar los nombres correspondientes a los Grupos de Suelos. Indicar algunas características de cada uno de estos suelos.

11. INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN

E3. A partir de la información obtenida de la lectura de un mapa de suelos a escala 1: 500 000, formular algunas hipótesis acerca de cómo se pueden ver afectadas las funciones que se proponen para los suelos que se indican clasificados según la WRB (<http://www.iec.cat/mapasols> → documentos de interés). Presentarlo en forma de matriz de unidades de suelos y aptitudes compatibles.

- Unidad cartográfica: Gleysoles situados en una llanura aluvial.
- Unidad cartográfica: Crysoles.
- Unidad cartográfica: Technosoles.
- Unidad cartográfica: Histosoles.
- Unidad cartográfica: Alisoles.

Funciones:

- Para una construcción de hormigón.
- Para un cultivo hortícola.
- Para vertido de aguas residuales.
- Para el uso agrícola.
- Para instalar una canalización enterrada.
- Para construir un jardín público para la infancia.

12. TEMAS PARA DEBATE

E3. Constituir equipos de trabajo para montar un debate acerca de las ventajas e inconvenientes de utilizar *Soil Taxonomy* o *WRB*. Buscar información en Internet.

13. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Seleccionar el término más adecuado de acuerdo con el contexto, de entre los propuestos:

La *World Reference Base* (WRB) es un sistema de clasificación de suelos elaborada por (1) _____ para disponer de un sistema de referencia (2) _____. Se plantea para elaborar información cartográfica de suelos a escala (3) _____. La nomenclatura utilizada por la WRB para designar las clases de suelos se basa, en principio, en (4) _____. Clasifica los suelos a partir de sus propiedades en términos de propiedades, materiales y (5) _____, relacionadas con los procesos formadores. Deben ser características (6) _____ en el campo. Los parámetros climáticos (7) _____ en este sistema de clasificación de suelos, considerando que son otra capa de información. El primer nivel de clasificación establece 32 (8) _____. Cada uno de ellos se precisa por medio de (9) _____: los (10) _____ expresan caracteres centrales o mediales del RSG; mientras que los (11) _____ reflejan criterios de diagnóstico de otros RSG; y los (12) _____.

- | | | | | |
|------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| (1) | a) UNESCO | b) FAO-IUSS | c) USDA | d) Unión Europea |
| (2) | a) local | b) internacional | c) europeo | d) nacional |
| (3) | a) 1: 250 000 | b) detallada | c) muy detallada | d) 1: 25 000 |
| (4) | a) neologismos | b) nombres en latín | c) nomenclatura tradicional | d) arcaísmos |
| (5) | a) horizontes de diagnóstico | b) medidas | c) análisis | d) prospecciones |
| (6) | a) muy precisas | b) fáciles de observar y medir | c) estándar | d) importantes |
| (7) | a) se utilizan | b) no se utilizan | c) son esenciales | d) sirven |
| (8) | a) Órdenes | b) Clases | c) Grupos de Suelos de Referencia | d) Categorías |
| (9) | a) calificadores | b) adjetivos | c) intergrados | d) extragrados |
| (10) | a) actuales | b) intergrados | c) extragrados | d) típicos |
| (11) | a) Órdenes | b) Clases | c) Categorías | d) integrados |
| (12) | a) calificadores | b) extragrados | c) prefijos | d) sufijos |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

OBJETIVOS

Profundizar en el estudio de los procesos formadores.
Aplicar muchos de los conceptos estudiados hasta aquí.
Estudiar de forma más avanzada algunos procesos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Aspectos generales.
Procesos de translocación de arcillas: argiluvación.
Procesos de podsolización: queluvación.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi Prensa, 3ª edición, 2003, pp. 469-520.
Van Breemen, N. y Buurman, P.: *Soil Genesis*. Kluwer Academic Press, 377. Dordrecht, 1998.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

Una parte de los procesos edafogénicos básicos hacen referencia a las adiciones, siendo la más importante de ellas el aporte de (1) _____, ya que es la que permite pasar de una saprolita a un suelo. No obstante, sin aporte de (2) _____ no podría tener lugar ninguna reacción química. Los restantes procesos básicos en génesis de suelos son: las pérdidas, las transformaciones y las (3) _____, pudiendo destacar las de arcilla, carbonato cálcico, yeso, quelatos de hierro, entre otras, que suponen una movilización (4) _____. La argiloturbación hace referencia a procesos de (5) _____ de arcillas del grupo de las (6) _____. La identificación de procesos de este tipo tiene importancia para evitar fracasos en el cultivo de (7) _____ y en obras de ingeniería porque se pueden producir (8) _____. Por ello, el estudio de los procesos edafogénicos tiene interés más allá de la génesis de suelos. El aumento de sodio en las sedes de intercambio, proceso conocido como de (9) _____, tiene transcendencia, ya que afecta a la (10) _____ del horizonte en el que tiene lugar, que se hace muy inestable.

- | | | | |
|------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------|
| (1) a) CaCO_3 | b) materia orgánica | c) agua | d) coluvios |
| (2) a) agua | b) CO_2 | c) aluviones | d) sales solubles |
| (3) a) evaporación | b) expansión-retracción | c) movilización | d) translocación |
| (4) a) selectiva | b) no selectiva | c) indefinida | d) indiferenciada |
| (5) a) iluviación | b) expansión – retracción | c) movilización | d) pérdida |
| (6) a) caolinitas | b) ilitas | c) alofana | d) esmectitas |
| (7) a) praderas | b) maíz | c) alfalfa | d) especies arbóreas |
| (8) a) deslizamientos | b) grietas | c) caída de bloques | d) ataques al hormigón |
| (9) a) salinización | b) sodificación | c) dispersión | d) floculación |
| (10) a) textura | b) materia orgánica | c) aireación | d) estructura |

2. ASPECTOS GENERALES

La formación de un suelo es algo extremadamente complejo, por ello en la Unidad 3 se optó por un planteamiento simplificado. Después de haber estudiado las propiedades físico-químicas del suelo resulta posible un enfoque más avanzado de los procesos edafogénicos. Se presenta una panorámica para que se trabaje fuera de clase y se profundice en el estudio de la translocación de arcilla (argiluviación), la podsolización (queluviación).

Los procesos formadores se pueden agrupar según diferentes criterios:

- Procesos físicos: procesos de expansión-retracción de las arcillas.
- Procesos físico-químicos: dispersión y translocación de arcillas; queluviación.
- Procesos biológicos: bioturbación.

Unos procesos conducen a:

- Una diferenciación del perfil: translocaciones.
- Una homogeneización: bioturbación.

Los procesos edafogénicos pueden ser:

- Cíclicos: hidratación/deshidratación estacional, entre otros.
- Alternantes: alternancia de condiciones de oxidación y reducción por la presencia de una capa freática temporal.
- Continuos: presencia de una capa freática permanente.
- De agotamiento: lavado de carbonato cálcico
- Actuales: formación de suelos en la actualidad.
- Antiguos, correspondiendo a condiciones ecológicas del pasado.
- Progresivos: lavado de carbonato cálcico, dispersión y translocación de arcillas.
- Regresivos: rejuvenecimiento del perfil; cambio de ruta de desarrollo.

Atendiendo a las condiciones de medio en las que tenga lugar la edafogénesis se puede establecer:

Medios más representativos	Denominación
Todos los suelos	Humificación
Bosques	<ul style="list-style-type: none"> • Formación de horizontes O • Argiluviación • Queluviación
Suelos mediterráneos	<ul style="list-style-type: none"> • Argiluviación • Rubefacción • Calcificación • Petrocalcificación • Gypsificación • Salinización • Sodificación
Suelos de zonas húmedas	<ul style="list-style-type: none"> • Eluviación • Descarboxilación • Argiluviación • Queluviación
Suelos con exceso de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Gleificación • Formación de turba • Piritización

3. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Repartir los procesos del cuadro anterior entre los alumnos de la clase de manera que se estudien todos ellos y se pueda realizar una puesta en común entre todos los equipos. Preparar la información para hacer una presentación en público.

Buscar información acerca de:

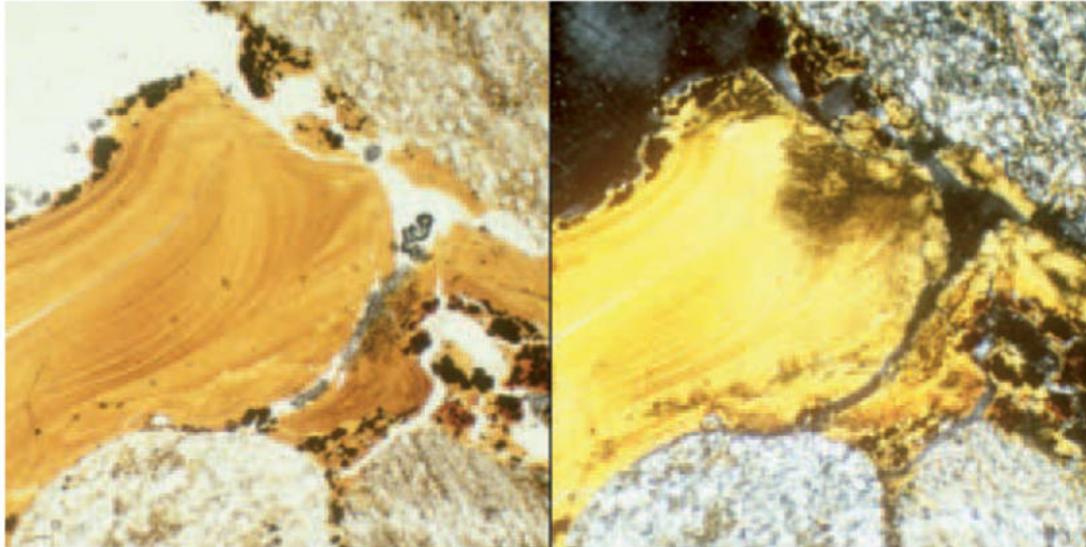
- a) Dos procesos que impliquen una adición de materiales al suelo y relacionarlos con los horizontes de diagnóstico que correspondan.
- b) Un proceso que conlleve una translocación por capilaridad ascendente y descendente.
- c) Cinco procesos que supongan transformaciones dentro del suelo y relacionarlos con los horizontes genéticos y horizontes de diagnóstico que correspondan.
- d) Cinco procesos que supongan translocaciones en suspensión dentro del suelo y relacionarlos con los horizontes de diagnóstico que correspondan.
- e) Dos procesos que supongan pérdida de componentes del suelo.
- f) Dos procesos típicos de suelos de zonas tropicales. Relacionarlos con los horizontes de diagnóstico que correspondan.

4. PROCESOS DE TRANSLOCACIÓN DE ARCILLAS: ARGILUVIACIÓN

(ing. illuviation, translocation; fr. lessivage)

Diagnóstico del proceso

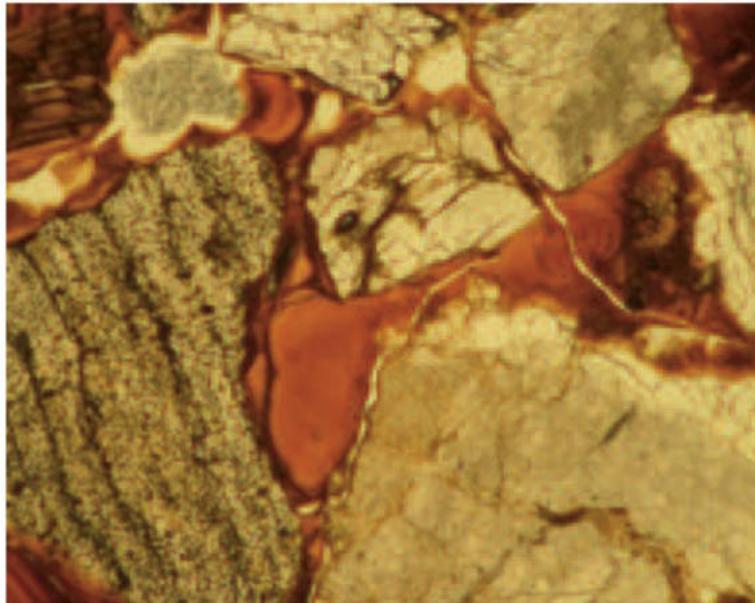
En campo: Al observar con ayuda de una lupa de mano los canales de raíces y poros será posible observar superficies brillantes, generalmente de distinto color, que corresponden a los **revestimientos de arcilla** o cutanes de iluviación. También pueden observarse formando puentes entre granos de arena o recubriéndolos o revestir las caras de los agregados, si bien un aspecto brillante en estas podría deberse a presión. Cuando el horizonte es muy arcilloso, un carácter asociado a la acumulación de arcilla es el desarrollo de una estructura prismática.



Microfotografía de revestimiento de arcilla microlaminada, en polarizadores paralelos y polarizadores cruzados. Longitud de la imagen: 2 mm.

R. M. Poch

En laboratorio: El estudio de láminas delgadas permiten identificar los revestimientos como acumulaciones de arcilla orientada, finamente estratificada y depositada en las paredes de los huecos y caras de agregados y granos. La arcilla iluviada es la arcilla fina (< 0,2 mm) que se redistribuye dentro del suelo.



Revestimiento de arcilla orientada.

R. M. Poch

Condiciones ecológicas

Zonas con una alternancia de períodos secos y húmedos a lo largo del año. Pluviometría suficiente en algunos momentos para provocar translocaciones.

Condiciones físico-químicas para que pueda tener lugar el proceso

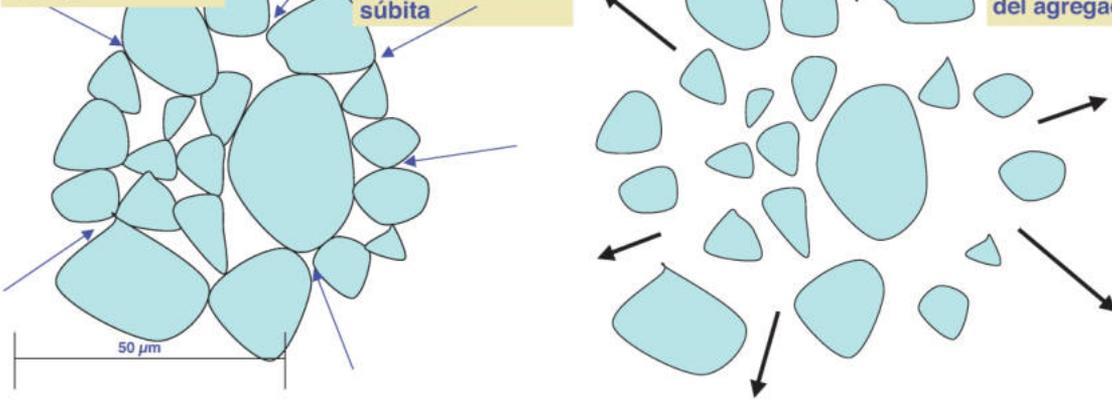
En la Unidad 8 se estudiaron los fenómenos de dispersión-floculación de las arcillas. Para que las partículas de arcilla puedan ser translocadas se requiere que esté en suspensión, para lo que se requiere que esté dispersa. La incorporación de agua de lluvia a un suelo seco contribuye a la dispersión, ya que al humectarse de forma súbita los agregados, la presión generada por el aire atrapado en los microporos puede hacer explotar los agregados, liberando partículas de arcilla. Al quedar en suspensión la arcilla fina puede ser translocada si las condiciones de

medio lo permiten. El pH del horizonte debe hallarse entre 5 y 7.

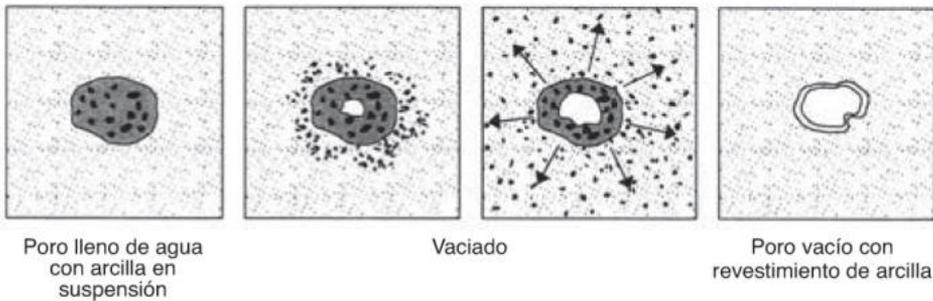
Situación inicial:
Agregado seco

El agregado se
humecta de forma
súbita

Liberación de partículas
por explosión
del agregado



La arcilla se moverá con el agua por los poros grandes en una matriz seca, por lo que el agua tiende a pasar del poro a la matriz y la arcilla se depositará empaquetada en la pared del poro (Dorronsoro y Aguilar, 1988.). Al tratarse de partículas laminares se depositarán unas encima de otras, quedando por ello orientadas. El endopedión que se forma es un argílico de *Soil Taxonomy*, un Bt:

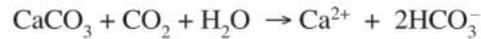


Se puede observar la estructura prismática típica de un endopedión argílico. Argid (Túnez).

J. Porta

Factores limitantes de la dispersión de las arcillas

La presencia de carbonato cálcico en un horizonte inhibe la dispersión, ya que va liberando calcio que tendrá un efecto floculante. Por consiguiente, si se parte de un material originario rico en carbonato cálcico, para que pueda haber argiluviación se requerirá que haya previamente un lavado de carbonato en la parte superior del suelo, para que posteriormente pueda tener lugar la translocación de la arcilla.

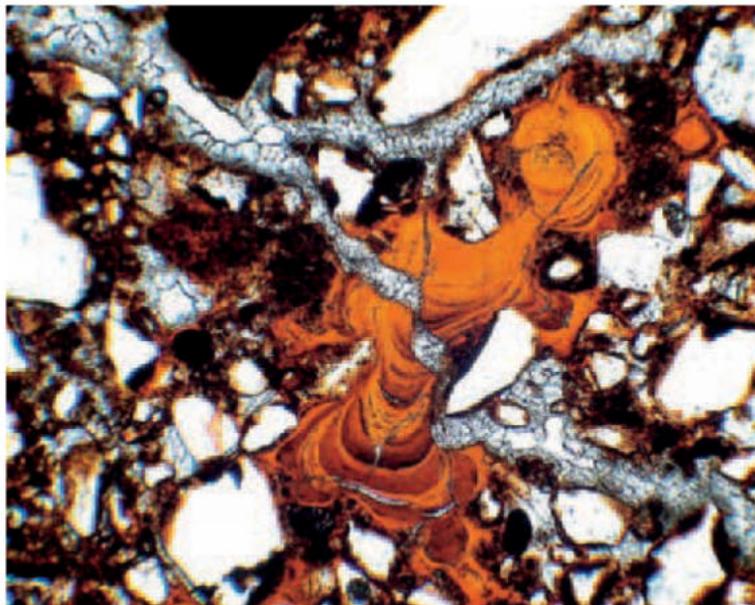


El predominio de Ca^{2+} y Mg^{2+} en el complejo de cambio en suelos de pH básico (suelos calizos) o del Al^{3+} en suelos ácidos, hace que el espesor de la doble capa sea pequeño, las fuerzas de atracción entre partículas predominan frente a las de repulsión, lo que explica que las arcillas estén floculadas.

En suelos con arcillas sódicas, el sodio provoca un efecto dispersante sobre las arcillas (el espesor de la doble capa es muy grande), por lo que puede tener lugar la translocación de las arcillas sódicas, incluso en suelos con carbonato cálcico o con yeso. El pH será 9 o más alto. El endopiedión que se forma es un nátrico (ST y WRB), un Bt_{na}.

En algunos casos las partículas de arcilla forman pseudolimos o pseudoarenas por estar cementadas por óxidos de hierro. En estas situaciones no habrá dispersión ni translocación. Igual puede ocurrir en otros ámbitos geográficos con el carbonato cálcico como cemento.

En ambientes mediterráneos no resulta raro encontrar horizontes con acumulación de arcilla y de carbonatos. Se trata a menudo de antiguos horizontes argílicos que posteriormente a su formación, se han recarbonatado por aportes eólicos o aluviales de materiales carbonatados, en períodos de climas más secos. Esta secuencia de procesos se puede identificar en lámina delgada, en la que se observarán recubrimientos de calcita cubriendo los de arcilla iluviada. Estos estudios micromorfológicos pueden resultar muy útiles para la determinación de cambios climáticos en el pasado.



Revestimiento de arcilla recalificado.

E. A. FitzPatrick

Secuencia de horizontes

Las secuencias posibles son: ABt (argílico) Bk; ABt (argílico) Bkm (petrocálcico) ; ABt (argílico) C

Clases de suelos resultantes (Unidad 11)

En Soil Taxonomy: Alfisoles ($V > 35\%$) y Ultisoles ($V < 35\%$); Aridisoles.

En WRB: Luvisoles (Bt); Albeluvisoles (Bt); Planosoles (Bt); Solonetz (Bt_{na}), entre otros.

Destrucción de revestimientos de arcilla

Un proceso de iluviación de arcilla puede quedar enmascarado si los revestimientos de arcilla, rasgo característico, resultan desorganizados. Las causas más frecuentes de que ello ocurra son: la acción de la fauna, que puede ingerirlos y excretarlos en forma de fragmentos denominados pápulas; así como los procesos de expansión-retracción en suelos ricos en arcillas expansibles.

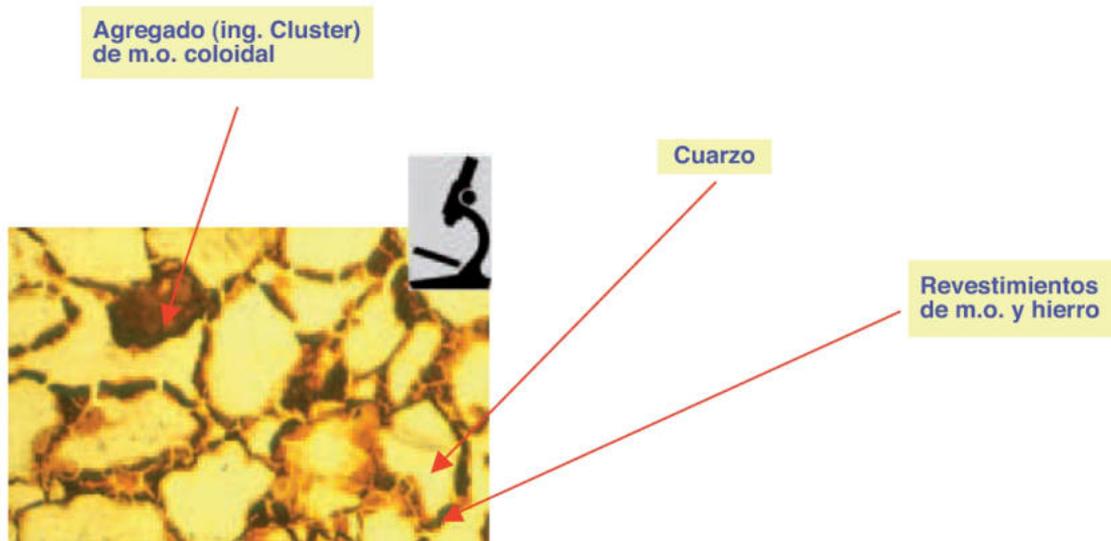
Procesos que pueden dar lugar a suelos con una diferenciación textural en el perfil

Si bien la iluviación de arcilla es uno de estos procesos que da lugar a endopediones de acumulación de arcilla, existen otros, cuyos mecanismos que pueden dar el mismo resultado, si bien en estos casos no se tratará de una translocación de arcilla y, por consiguiente, las arcillas no se hallarán orientadas. Entre estos procesos cabe citar: la meteorización de material originario; el transporte vertical de fracciones finas por la fauna; la pérdida de arcilla de la parte superior por erosión (empobrecimiento); el cultivo; la pérdida de arcilla en arrozales con el agua que circula; la neoformación de arcilla en el horizonte B; la meteorización de arcilla en horizonte A; movimiento vertical de material del suelo por grietas (Van Breemen y Burman, 1998).

5. PROCESO DE PODSOLIZACIÓN: QUELUVIACIÓN

Diagnóstico del proceso

En el laboratorio: El estudio de láminas delgadas de los horizontes Bh permite observar rasgos orgánicos amorfos en forma de revestimientos orgánicos de los granos de arena y de puentes entre granos. En el horizonte Bs se observarán revestimientos de sesquióxidos cuyo color varía de amarillo-parduzco a pardo oscuro, en este caso por contener algo de materia orgánica.



Revestimiento de los granos de arena. Eswaran & Drees.

En campo: La morfología derivada de un proceso de podsolización es de las más características, dado que presenta una clara diferenciación de horizontes: un horizonte orgánico en superficie, un O, encima de un A (úmbrico), debajo del cual hay horizonte casi blanco, un E (endopedión alábico), que se halla encima de un horizonte negruzco, un Bh, y luego otro pardo herrumbroso, un Bs o un Bhs (endopedión espódico). Los suelos resultante son los Podsoles (WRB) o Espodosoles (ST).



Queluviación.

Eswaran & Drees

Condiciones ecológicas

En zonas con clima de tendencia fría y húmeda (regimen de humedad percolante, údico), una vegetación acidificante y una actividad biológica baja son características en este tipo de procesos. Todo ello da lugar a una acidificación progresiva, traducida en una disminución del porcentaje de saturación de cationes basificantes. Los materiales originarios deben ser filtrantes, arenosos, ricos en sílice y pobres en minerales alterables, arcilla y hierro libre. Sobre rocas metamórficas o en suelos con apreciables cantidades de óxidos de hierro y aluminio, la podzolización puede verse frenada rápidamente por el Fe y Al liberados, no llegándose a diferenciar un horizonte eluvial (criptopodsolización). Por el contrario, en suelos arenosos, muy pobres en hierro y aluminio, el horizontes espódico puede llegar a encontrarse a una profundidad de varios metros. Son de destacar los podzoles gigantes de los trópicos húmedos, con horizontes eluviales E de grosor métrico.

Condiciones físico-químicas para que pueda tener lugar el proceso

Los procesos de podsolización son diversos y por lo general complejos:

Movilización: Para que pueda tener lugar la movilización del hierro y el aluminio se requiere la formación de materia orgánica fuertemente ácida, lo que ocurre en el mantillo de bosques. Los ácidos orgánicos solubles y los ácidos fúlvicos, de bajo peso molecular, son lavados a través del suelo provocando acidificación y meteorización. Los minerales de arcilla no resultan estables en tales condiciones, las redes cristalinas colapsan liberando aluminio, silicio y otros elementos.

Este tipo de materia orgánica con elevado contenido de ácidos orgánicos y ácidos fúlvicos, componentes de bajo peso molecular (LMW), es susceptible de interaccionar con el hierro y el aluminio por medio de los grupos carboxílicos ($-\text{COOH}$) y fenólicos ($-\text{OH}$) que contiene. A medida que van descendiendo en el perfil, se pueden formar complejos organo-minerales (quelatos) solubles o pseudosolubles, que hacen posible la translocación del Fe(III) y del aluminio, dando lugar a un proceso de queluviación.

Acumulación: A una cierta profundidad dentro del propio suelo se produce una inmovilización de los quelatos translocados, ya sea por la biodegradación del transportador por microorganismos (hongos, principalmente), o bien por descompensación del quelato por aumento del catión complejoado, o porque el horizonte se seque.

Cuando los ácidos fúlvicos se saturan en hierro o aluminio precipitan y al ir biodegradándose, van liberando lentamente hierro y aluminio, que precipitarán en forma de óxidos e hidróxidos. El aluminio puede precipitar en forma de alófana.

Como se ve, los procesos de podsolización son complejos y variados, por lo que existen diversas teorías para explicar el origen de la morfología de un Podsol (WRB) o Espodosol (ST). La expuesta es la teoría de los complejos orgánicos (del fulvato y de los ácidos de bajo peso molecular). Existen también quienes propugnan que la translocación del hierro y del aluminio tiene lugar en forma de compuestos inorgánicos, tales como aluminosilicatos amorfos en forma de geles, al haber identificado compuestos de tipo imogolita en el horizonte Bs (teoría inorgánica o de la alófana), lo que puede ser cierto en determinadas situaciones.

Por otro lado, la meteorización de los minerales en la parte superior del suelo libera sílice en solución que, al ser translocada, provocará una desilificación del horizonte superior.

6. ANALIZAR Y DESCRIBIR

E3. A partir del conocimiento de las condiciones ecológicas de formación predominantes en la zona donde nos encontramos:

- a) Describir con las propias palabras los procesos formadores esperables en los suelos.
- b) Describir el régimen de lluvias a lo largo del año y el régimen de humedad de los suelos.
- c) Describir el tipo de materiales orgánicos que hay en la zona.
- d) Formular los procesos edafogénicos de acuerdo con las reacciones químicas que hayan podido tener lugar.
- e) Dibujar unos perfiles hipotéticos para los componentes que sean significativos para tales procesos. Explicar la forma que se les haya dado.

OBJETIVOS

Plantear las bases para poder llegar a ser usuario de información georreferenciada y mapas de suelos.
Entender la importancia de la escala de un mapa para poder hacer previsiones con base científica a partir de él con criterios de protección de suelo.
Saber qué implicaciones tiene la forma cómo se hace un mapa de suelos.
Aprender a utilizar información de suelos accesible por Internet.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Edafodiversidad y mapas de suelos.
Cartografía de suelos: enfoques.
Tipos de mapas de suelos según su finalidad.
Base de datos georreferenciada de suelos.
Levantamiento de un mapa de suelos: aspectos a considerar.
Utilización de mapas de suelos: advertencias.
Criterios de calidad de un mapa de suelos.
Sistemas de Información de Suelos.
Cartografía digital de suelos.
Acceso a la información de suelos por Internet.
Utilización de información de suelos para distintos usos.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. 3.^a edición. Ed. Mundi-Prensa, 2003. Caps. 21 y 22.
SECS: *Nota Técnica para la Elaboración de la Cartografía de Suelos a Escala 1: 50 000*. Manual de procedimientos 1.0. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. 70 pp + Anejos. Madrid, 2002.
Post, Ch. J., Mikhailova, E. y Whorter, M. Mc.: *Introductory Soil Science Exercises Using USDA Web Soil Survey*. J. Natural Resources & Life Science Education, 36:19-23. ASA, 2007.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Después de revisar la Unidad 4, completar los huecos con aquel término que se ajuste mejor al contexto, de entre los propuestos:

La intensidad geográfica referida a un trabajo de prospección de suelos indica el número de observaciones por (1) _____, mientras que la intensidad tipológica hace referencia al número de observaciones por (2) _____. El hecho de que la (3) _____ sea elevada hace que los intervalos de variación de las características dentro de cada unidad puedan ser determinados con mayor precisión, lo que dará mayor consistencia a las interpretaciones.

En proyectos de desarrollo en grandes áreas se suelen elaborar mapas de suelos a escala (4) _____, que permitirán tener una visión de conjunto y servirán para seleccionar áreas piloto, que se cartografiarán a escala (5) _____. Comparando los dos mapas de la zona cartografiada a ambas escalas, uno a escala 1:100 000 y otro a escala 1:10 000, el número de delineaciones será (6) _____ en el primer mapa que en el segundo. Ello es debido a que conforme disminuye la escala se van (7) _____, las delineaciones que ocupan (8) _____ extensión. Aquellas delineaciones que dejan de tener representación debido a la escala del mapa pasan a constituir (9) _____ del mapa.

Por consiguiente, la escala del mapa debe ser acorde con la utilidad que se vaya a dar a la información de suelos. Entre los distintos factores ecológicos de formación de los suelos, aquel que resultará más útil en cartografía de suelos será (10) _____, ya que permite establecer (11) _____ de suelos y a partir de ellos (12) _____.

En una prospección de suelos un conjunto de propiedades se observan al estudiar los pediones, mientras que otras podrán ser (13) _____. Un conjunto de pediones iguales contiguos o isopediones constituye un (14) _____, que es un volumen cuya superficie resulta representable, si se trabaja con mapas de escala (15) _____, lo que no suele ser el caso, por lo que, por lo general, habrá que realizar agrupaciones de clases de suelos, es decir, realizar una generalización para llegar a superficies representables de acuerdo con la (16) _____ del mapa. Las superficies de un mapa de suelos ocupadas por terrenos sin suelo, tales como canteras, vertederos, suelos urbanos degradados, entre otros, constituyen áreas (17) _____.

- | | | | | |
|------|--------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|
| (1) | a) cm ² del mapa | b) unidad cartográfica | c) unidad taxonómica | d) ha |
| (2) | a) cm ² del mapa | b) unidad cartográfica | c) unidad taxonómica | d) ha |
| (3) | a) primera | b) segunda | c) densidad | d) intensidad |
| (4) | a) grande | b) 10 000 | c) pequeña | d) 5 000 |
| (5) | a) grande | b) 1 000 000 | c) pequeña | d) 500 000 |
| (6) | a) mayor | b) igual | c) menor | d) 10 veces |
| (7) | a) doblando | b) segmentando | c) aumentando | d) eliminando |
| (8) | a) mayor | b) igual | c) doble | d) menor |
| (9) | a) (nada) | b) manchas | c) deficiencias | d) inclusiones |
| (10) | a) material originario | b) clima | c) relieve | d) tiempo |
| (11) | a) modelos de distribución | b) toposecuencias | c) catenas | d) localizaciones |
| (12) | a) localizar las observaciones | b) drenar | c) abrir calicatas | d) sondear |
| (13) | a) analizadas | b) inferidas | c) medidas | d) evaluadas |
| (14) | a) unidad de suelos | b) edafopaisaje | c) polipedión | d) homopedión |
| (15) | a) grande | b) pequeña | c) muy detallada | d) mediana |
| (16) | a) escala | b) finalidad | c) aptitud | d) resolución |
| (17) | a) misceláneas | b) abandonadas | c) a recuperar | d) urbanizables |

2. EDAFODIVERSIDAD Y MAPAS DE SUELOS

La existencia de una gran variabilidad espacial en la cubierta edáfica hace que haya una gran diversidad de suelos o **edafodiversidad**. No se cartografían perfiles de suelos como puntos aislados, sino que para poder utilizar la información de suelos se definen clases de suelos y unidades de suelos, atendiendo a conjuntos de criterios. La información se plasmaba antes en un mapa de suelos, ahora se integra en una base de datos georreferenciada, a partir de la cual se podrán derivar los mapas.

MAPA

Un mapa es una representación bidimensional de la superficie terrestre. Indica un grupo específico de rasgos en término de su tamaño y posición.

MAPA DE SUELOS

Un mapa de suelos es una modalidad de información geográfica. Constituye una representación bidimensional estructurada del conocimiento sobre la distribución espacial de diferentes clases de suelos y áreas misceláneas en el paisaje.

Esta representación deriva de los modelos que la persona que hace la prospección va construyendo a lo largo del trabajo de campo. Debe proporcionar una información objetiva, confiable y comparable de los suelos y debe servir de base para las actuaciones sobre el territorio y el desarrollo de políticas territoriales que contemplen la protección de los suelos. A pesar de que se sigue hablando de mapas de suelos, a lo que se está haciendo referencia es a bases de datos georeferenciadas.

MODELO

Un modelo es una abstracción intelectual de la realidad observada, en la que se resaltan los aspectos que se pretenden transmitir. Es decir es una simplificación de la realidad del terreno.

Los principales mecanismos de abstracción pueden ser la *generalización*, que selecciona características comunes de los suelos para crear una clase de suelos con intervalos de variación muy amplios; la *agregación* que construye nuevas clases de suelos como conglomerado de componentes, para dar una clase compuesta de nivel jerárquico más alto; y la *asociación*, que vincula dos o más clases y crea un elemento distinto.

Los mapas de suelos se construyen utilizando un lenguaje normalizado, por lo que constituyen un instrumento que facilita la transmisión y el uso de conocimientos de suelos. Con una concepción clásica, la cartografía de suelos consistía en un **inventario** de recursos de suelos de un territorio, realizado para alcanzar determinados objetivos y se editaba en soporte papel: el mapa.

INVENTARIO DE SUELOS, LEVANTAMIENTO DE SUELOS (ing. Soil Survey)

Examen sistemático, descripción, clasificación y localización de la distribución de los suelos de un área dada, atendiendo en gran medida a su potencialidad como recurso natural para desarrollar funciones. El inventario de suelos sigue siendo la primera etapa para obtener información de suelos georeferenciada.

La concepción de los inventarios de suelos está cambiando, en el sentido de que, además de la información habitualmente contenida en los mapas de suelos, se deberán documentar y describir aquellas propiedades y atributos de los suelos que reflejen los cambios que tienen lugar en ellos a escala humana, resultantes no sólo de los factores ecológicos de formación, sino también debidos a la acción antrópica (Tugel *et al.*, 2005).

Desde un punto de vista metodológico, un inventario de suelos se basa en la teledetección (uso de imágenes de satélite y fotografías aéreas), fotointerpretación en visión estereoscópica utilizando estereoscopios de espejos y estereoscopios digitales; trabajo de prospección de campo por medio de calicatas y sondeos, que sigue siendo la parte más importante del trabajo y la que consume más tiempo; análisis de laboratorio y síntesis de la información obtenida para plasmarla en el mapa o en la base de datos.

Inicialmente, los mapas de suelos se producían con un fondo topográfico pero, desde el momento en que se dispuso de **ortofotomapas**, se utilizan éstos como fondo, lo que aumenta la precisión.

ORTOFOTOMAPA

De acuerdo con el Institut Cartogràfic de Catalunya, un ortofotomapa es un documento cartográfico que consiste en una fotografía aérea vertical o una imagen de satélite que ha sido rectificadas geométricamente, de tal manera que se mantiene una escala uniforme en toda la superficie de la imagen (se conservan las distancias y los ángulos). Los elementos de la superficie terrestre son visibles, por lo que un ortofotomapa es una base cartográfica con un elevado nivel de información: toponimia, curvas de nivel, parcelas, vegetación, entre otras.

Al superponer a un ortofotomapa los límites de las delineaciones de las unidades cartográficas de suelos con su correspondiente simbología, se produce un mapa, que permite una localización muy precisa de las clases de suelos en el campo.

3. CARTOGRAFÍA DE SUELOS: ENFOQUES

La cartografía de suelos se ha llevado a cabo históricamente con dos planteamientos muy diferentes, si bien complementarios, para dar respuesta :

- a) Al interés científico en conocer los **suelos existentes** en el mundo y en ámbitos geográficos muy grandes y, de forma genérica, su **distribución geográfica**. Con este fin la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (actualmente IUSS) y la FAO-UNESCO impulsaron la realización de mapas de suelos a **escala pequeña**. Constituyen ejemplos de este enfoque los mapas de suelos del mundo a escala 1: 10M (1927), 1: 5M (1931), el mapa 1: 1M de Europa, entre otros. Los mapas a estas escalas no tienen una gran precisión taxonómica, ni cartográfica. Se trata de **mapas esquemáticos y mapas generalizados** que resaltan la influencia del clima y de los materiales originarios sobre la edafogénesis y que no pueden ser utilizados con finalidades técnicas aplicadas, sino que sus objetivos son científicos y didácticos.
- b) A las demandas de usuarios interesados en disponer de información de suelos para planificación regional y ordenación territorial, para la agricultura y montes, entre otras muchas aplicaciones. Con estos objetivos, a principios del siglo XX, algunos países emprendieron la realización sistemática de **mapas detallados de suelos** a escala grande. En Bélgica, por ejemplo, se cartografiaron los suelos de todo el país a escala 1: 20 000; en Estados Unidos, a escala 1: 12 000 y 1: 24 000; y en muchos países europeos se dispone de los mapas de suelos a escala 1: 50 000.

Los objetivos de los **mapas detallados** de suelos han ido cambiando a lo largo del siglo XX, ampliándose para dar respuesta a nuevas demandas de la sociedad. Así, en un primer momento se dio prioridad a los usos, potencialidades y limitaciones de los suelos para usos agrícolas. Posteriormente, los mapas de suelos debieron dar, además, respuestas acerca de los riesgos de erosión y para el establecimiento de áreas prioritarias para la implantación y fomento de medidas de conservación de suelos y aguas. Años más tarde, se orientaron para servir de base a la planificación territorial, al desarrollo de áreas urbanas y a la localización de infraestructuras en el territorio. A finales del siglo XX y principios del XXI, los mapas digitales de suelos proporcionan, además, información para proteger zonas húmedas, disminuir los riesgos de contaminación de cursos de agua y capas freáticas, así como para poder llevar a cabo actividades de planeamiento urbanístico y ordenación territorial con mayor base científica.

Por consiguiente, en la actualidad la cartografía detallada de suelos se utiliza para proporcionar información para múltiples usos, entre ellos para actuaciones:

- Sobre el territorio: ordenación territorial, planificación de usos del territorio, protección, gestión y ordenación del paisaje.
- En el sector agrario: programación de riegos, transformaciones en regadío, protección de los suelos frente al riesgo de degradación y pérdida de calidad.
- Relacionadas con el agua: evaluar la vulnerabilidad de capas freáticas superficiales, establecimiento de áreas de protección para la captación de agua.
- Relacionadas con las obras públicas: identificar áreas con riesgo de problemas potenciales, evaluar la idoneidad para infraestructuras con lo que se disminuyen costes y riesgos.
- Relacionadas con la calidad ambiental: evitar la pérdida de biodiversidad de los suelos, implantación de planes hidrológico-forestales, modelización ambiental.
- Seguridad sanitaria nacional: identificar áreas para descartar animales.
- Conservación: implementación de programas de conservación

Por consiguiente, el uso de información de suelos tiene beneficios tanto de tipo económico, como social para la población objetivo, así como medioambientales, al permitir proteger mejor los ecosistemas.

4. TIPOS DE MAPAS DE SUELOS SEGÚN SU FINALIDAD

Los mapas de suelos sirven para poder hacer **predicciones** acerca del **comportamiento** esperable de los suelos en una determinada zona y poder asignar de este modo usos al territorio y aplicar técnicas de gestión de suelos con una mayor base científica. La **calidad de las predicciones** dependerá del grado de pureza de las delineaciones de cada mapa, que es función de su escala, de la densidad de observaciones, de la localización espacial y de la propiedad considerada. El **éxito de una cartografía** de suelos residirá en constituir una ayuda para los usuarios de la información en la toma de decisiones en el uso del territorio, la ordenación y planificación territorial y la protección del medio ambiente.

Los **objetivos** de una cartografía de suelos varía según sea la finalidad para la cual se realice. Así, para proyectos de desarrollo, los objetivos de los mapas de suelos suelen ser:

- Identificación de zonas de riesgo: erosión, sequía, salinización, inundaciones, presencia de arcillas expansibles, etc.
- Determinar la aptitud de los distintos suelos para diferentes usos.
- Formular recomendaciones acerca de los cultivos más idóneos.
- Realizar predicciones de producción y recomendaciones de prácticas de manejo para conseguirlo.

Por ello, la cartografía de suelos se lleva a cabo con distintas finalidades y a diversas escalas, si bien existen solapamientos entre unos tipos de mapas y otros. Se puede establecer:

- a) **Grado de abstracción** o nivel de generalización empleado. Cabe distinguir:
 - Mapas **generalizados** o mapas a escala pequeña, en cuya elaboración el proceso de generalización es máximo. Al producir un mapa generalizado se debe descartar una gran cantidad de información, por lo que las propiedades de cada clase de suelos presentarán intervalos de variación muy amplios. Pasar de un mapa de suelos menos generalizado, a otro más generalizado, supone tener que realizar una agrupación de unidades cartográficas, lo que hace aumentar la heterogeneidad de las delineaciones resultantes, es decir, el porcentaje de impurezas o inclusiones. Por ello, los mapas generalizados se utilizan para planificación regional y no para proyectos.
 - Mapas **semidetallados, detallados, muy detallados**: estos mapas suponen una progresiva disminución del grado de generalización, lo que exige trabajar con escalas cada vez de mayor detalle (Porta *et al.*, 2005, Young, 1976).
- b) **Grado de actuación** prevista a partir del mapa.

La metodología de trabajo para elaborar el mapa es muy distinta en unos y otros casos. Cabe distinguir:

- Grado **fundamental**: En un inventario de recursos en ámbitos geográficos extensos se suele trabajar como máximo a escala 1: 400 000, es decir a pequeña escala. El mapa se elabora realizando una síntesis de información preexistente.
 - Grado de **estudio**: al requerir información para planificaciones o proyectos cada vez más concretos se trabaja con escalas sucesivamente mayores. Los mapas se realizan con ayuda de teledetección, análisis digital del terreno y prospección de campo de alta densidad de observaciones. Corresponde a mapas detallados y muy detallados, que requieren un trabajo de campo importante, con unas intensidades geográfica y tipológica altas. Por ello, permiten realizar predicciones de calidad porque el mapa está respaldado por un gran número de observaciones de la realidad del terreno. Evidentemente, el costo de los diferentes tipos de mapas es muy distinto, así como el tiempo consumido en su ejecución.
- c) **Tipo de características** a utilizar para establecer las clases de suelos. De este modo cabe diferenciar:
 - **Mapas básicos** que son aquellos que describen clases de suelos atendiendo a sus propiedades intrínsecas y atributos. Su aplicabilidad abarca distintos usuarios, y se producen a partir de la base de datos, de forma relativamente rápida con los instrumentos informáticos disponibles.
 - **Mapas interpretativos**, que establecen clases de suelos atendiendo a su aptitud para usos concretos, a los factores condicionantes o limitantes. La utilidad de estos mapas queda restringida, por consiguiente, al uso propuesto. A corto plazo pueden resultar de menor coste y requerir menor tiempo de ejecución, pero con una perspectiva más amplia, se trata de productos precederos.

6. ESTUDIAR Y COMUNICAR

- E3.** a) La empresa para la que trabaja quiere concurrir a un concurso público convocado para realizar dos mapas de suelos de una zona de 8000 ha. En el pliego de prescripciones técnicas del concurso se indica que el mapa de suelos de toda la zona deberá realizarse a escala 1: 100.000 y se cartografiarán a escala 1: 25.000 las zonas de mayor riesgo ambiental, determinadas a partir del primer mapa, que pueden suponer como máximo un 25% de la zona. Para ambos casos se requiere que la prospección de campo corresponda a una intensidad geográfica de 1 observación por centímetro cuadrado del mapa a elaborar, con una relación de 1 calicata : 4 sondeos. Para poder preparar la oferta económica deberá calcular el número de observaciones por hectárea a realizar para elaborar cada uno de los mapas y el número de días de trabajo de campo sabiendo que un prospector entrenado con un ayudante puede describir cinco calicatas al día y quince sondeos.
- b) Indique de qué tipo de mapas se trata y si la fiabilidad y utilidad de los dos mapas será la misma para poder hacer predicciones acerca del comportamiento de los suelos y su respuesta frente a diferentes usos. Justificar las respuestas.

7. BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA O ESPACIAL DE SUELOS

Un mapa de suelos en papel constituye un documento rígido y estático. Una vez editado no admite nuevas adiciones de información. En el momento actual, a pesar de que se siga hablando de mapas de suelos, lo que se genera es una **base de datos georreferenciada** o espacial de suelos, a la que se puede ir incorporando nueva información, a medida que ésta vaya siendo obtenida.

BASE DE DATOS

Una base de datos se basa en un modelo y en un esquema conceptual que permiten la descripción de la realidad terreno, integrando los intereses de diferentes grupos de usuarios. Cuenta con una estructura física (hardware), una estructura lógica (software) y una estructura lógica global.

En su diseño debe preverse la posibilidad de modificaciones futuras del sistema y que los datos que se almacenan puedan servir para aplicaciones diversas.

BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA

Una base de datos georreferenciada es una base de datos en la que la información queda rigurosamente almacenada teniendo en cuenta la localización espacial de donde fue obtenida, lo que permite evitar redundancias (repeticiones) innecesarias en la obtención de información.

Actualmente, el instrumento intermedio básico entre el campo (origen de la información) y el usuario (destinatario de la información), ya no es el mapa de suelos en papel, sino una base de datos, a partir de la cual poder producir mapas de suelos.

Una diferencia esencial entre un mapa de suelos y una base de datos de suelos georreferenciada radica en que ésta tiene una elevada capacidad para compilar información. Una base de datos puede contener información de suelos referida a todos los perfiles descritos, modelos y relaciones suelos-paisaje establecidos, datos analíticos, imágenes, unidades cartográficas; y permitir gestionar información geográfica de suelos a diversas escalas.

Para poder almacenar información en una base de datos resulta imprescindible que aquella se obtenga de forma **normalizada**, para que sea compatible, permita interconexiones con otras bases de datos, intercambio de información y comparaciones entre datos espaciales. Estos requerimientos puede que no se cumplan cuando se haya integrado información preexistente, generada en distintos momentos y con criterios no armonizados, por lo que antes de utilizar información de una base de datos se deberá saber cómo fue obtenida la información. Esto ha llevado a introducir el concepto de **metabase de datos** o metadatos. La metabase de datos, además, ayuda al usuario a tener un mejor entendimiento de las limitaciones de los datos.

METABASE DE DATOS O METADATOS

Una metabase de datos informa acerca de los procedimientos utilizados para obtener los datos.

Los elementos importantes de una metabase son el directorio de datos, que contiene las instrucciones, y el catálogo de variables o diccionario que detalla las características de éstas.

Una metabase de datos permite la búsqueda simultánea de información en diversas bases de datos, pudiendo utilizarla para elaborar información con rigor.

Toda base de datos cuenta con un administrador. Es la persona que puede haber diseñado la base de datos y se ocupa de que los usuarios hagan un uso correcto de los datos almacenados y es quien autoriza los cambios en la base de datos.

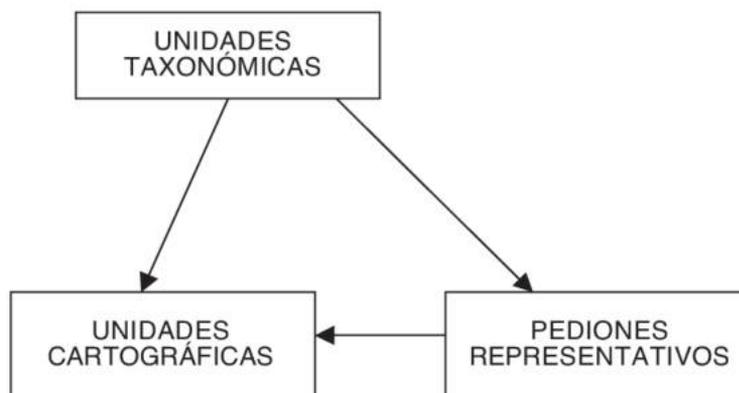
8. LEVANTAMIENTO DE UN MAPA DE SUELOS: ASPECTOS A CONSIDERAR

Al tener que proceder a elaborar un mapa de suelos deben tomarse en consideración los siguientes aspectos:

Unidades taxonómicas

Una **unidad taxonómica** es una clase de suelos, que puede estar definida:

- A un nivel **jerárquico alto**, lo que significa con un grado de generalización taxonómica alto, que en el caso de *Soil Taxonomy* hace referencia a: Orden, Suborden, Grupo o Subgrupo; y en WRB a: los Grupos de suelos de referencia. Se utilizan en mapas a pequeña escala (mapas taxonómicamente generalizados)
- A un nivel **jerárquico bajo**. En *Soil Taxonomy* la Familia y Serie de suelos; y no previsto en WRB. Sólo serán utilizables en mapas a escala grande (mapas taxonómicamente detallados).



Cada observación en el campo está referida a un área concreta, el sitio, que representa y que pertenece a una clase de suelo, taxon o unidad taxonómica determinada, que se puede clasificar a distintos niveles jerárquicos, según el grado de generalización que se quiera utilizar. Cada vez que se pase a un nivel jerárquico superior se está realizando una **generalización taxonómica**, lo que supone agregar información, es decir, juntar clases de nivel jerárquico inferior en una única clase social.

Delineaciones, unidades cartográficas e impurezas de un mapa

Al observar un mapa de suelos se identifican superficies que tienen una misma representación (mismo color, cifra, letras o símbolos alfanuméricos), constituyen las **delineaciones** del mapa, también denominadas **polígonos** o **teselas**, como las de un mosaico.

DELINEACIONES O POLÍGONOS DEL MAPA DE SUELOS

Superficies que agrupan suelos de una forma representable en el mapa.

Dentro de una delineación la variabilidad de los suelos se hallará en un intervalo más o menos amplio o estrecho dependiendo de la escala del mapa y del nivel de generalización.

UNIDAD CARTOGRÁFICA

El conjunto de delineaciones iguales que aparecen en un mapa integran una unidad cartográfica. Se representan del mismo modo (color, simbología, etc.) en el mapa. El conjunto de unidades cartográficas que aparecen en un mapa constituyen la leyenda del mapa de suelos.

Para que una clase de suelo pueda ser representada en un mapa por una delineación, se requiere que ésta ocupe una superficie que, a la escala del mapa, sea superior a un cuadrado de $5 \times 5 \text{ mm}^2$, ya que de ser menor sería muy difícilmente legible. Los polígonos que ocupen una superficie menor pasan a constituir una inclusión o impureza.

INCLUSIÓN O IMPUREZA

Una inclusión es una clase de suelos que, por su poca extensión en el campo, sus delineaciones no llegan a tener representación en el mapa y por ello quedan incluidas dentro de la representación de la clase de suelos principal.

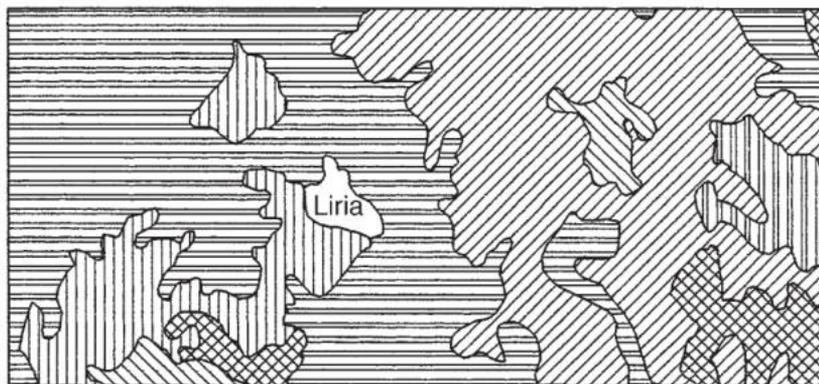
Las inclusiones pueden ser clases de suelos símiles o bien de suelos disímiles.

SUELOS SÍMILES Y SUELOS DISÍMILES

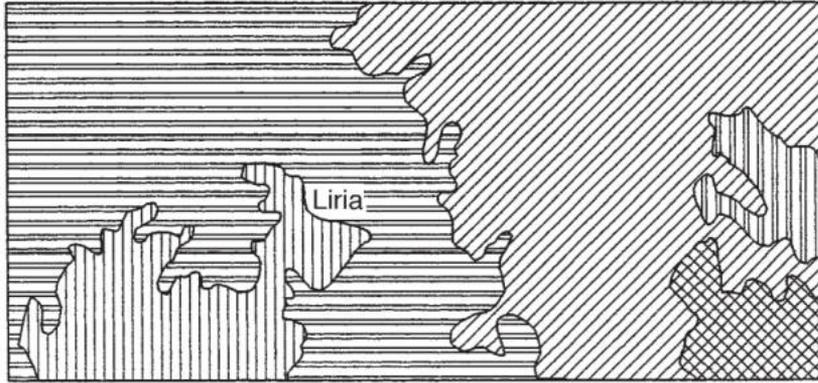
Los suelos símiles son aquellos que, si bien perteneciendo a otra clase de suelos, tienen una respuesta semejante al uso y al manejo, por lo que su presencia como impureza tiene poca significación práctica.

Los suelos disímiles son aquellos que pertenecen a otra clase de suelo y su respuesta al uso y manejo es muy diferenciada. Resulta importante hacer mención a ellos en la leyenda del mapa, precisando la superficie que ocupan (%), si es posible.

La forma de representar las delineaciones de una misma unidad cartográfica como unidades discretas, separadas por una línea, puede inducir a dos **errores**. El primero a hacer pensar que cada delineación es tan uniforme como parece al observar el mapa, lo que no es así, debido a que puede contener impurezas de suelos disímiles, lo que afectará a la calidad de las predicciones. Cuanto menor sea la escala del mapa de suelos, mayor será el porcentaje probable de inclusiones en las unidades cartográficas representadas en él. Por el contrario, en mapas detallados, el porcentaje de inclusiones de suelos disímiles en una unidad cartográfica debería ser menor del 15% de la superficie de la unidad cartográfica, en mapas de Series de suelos (mapas detallados). La clase y cantidad de inclusiones en cada unidad del área cartografiada debería ser una información que constase en la descripción de la unidad cartográfica. El segundo error hace referencia a los límites entre delineaciones.



Mapa de suelos a escala 1:100.000 con seis unidades de suelos representadas.



Mapa de suelos en el que han desaparecido todas aquellas unidades cuya superficie a escala 1:1.000.000 es inferior a 5 mm de lado, por no resultar representables a dicha escala, por lo que pasan a ser impurezas del mapa. El valor predictivo del segundo mapa es mucho menor, ya que la precisión (densidad de observaciones realizadas en el levantamiento) también habrá sido mucho menor.

Límites entre delineaciones

Partiendo de un punto de observación, la teoría de la edafogénesis permite asumir que, al alejarnos radialmente, aparecerán suelos de perfiles semejantes, de manera que forman parte de la misma clase de suelos. Esto será así hasta una distancia a la que alguna combinación de factores y procesos edafogénicos llegue a tener suficiente influencia para provocar un cambio, que se pueda identificar como un suelo distinto. La separación entre una y otra clase de suelos define un límite. Conceptualmente resulta muy clara la existencia de límites entre clases de suelos o entre delineaciones, pero en la práctica, los suelos presentan una variación lateral continua, más o menos gradual y que, además, no es la misma para todas las características que definen la clase de suelos considerada. Por ello, si bien en el mapa los límites se representan por una línea, los límites en campo no son tan contrastados, como podría hacer pensar la línea que los separa en el mapa.

La **identificación de los límites** entre delineaciones resulta complejo y consume tiempo. Se puede proceder de diferentes formas para trazarlos, con variaciones muy significativas en cuanto a precisión y a consumo de tiempo. Este factor y el presupuesto disponible para levantar el mapa son los que justifican la manera de hacerlo, que puede ser:

- Investigando el terreno por medio de observaciones y sondeos de campo, procedimiento que hace que la precisión aumente considerablemente.
- Infiriendo su posición por fotointerpretación.
- En otras cartografías menos precisas, realizadas con menor presupuesto y poco tiempo, los límites se dibujan entre observaciones realizadas en dos sitios.
- Utilizando modelos computarizados de inferencia y el conocimiento de los expertos locales.

Escala, leyenda, tipos de unidades cartográficas y precisión temática

La adecuación de un mapa de suelos a los objetivos que se pretenden alcanzar cuando se extrae información, se determina atendiendo a: escala, leyenda, tipo de unidades cartográficas y precisión temática.

a) Escala del mapa

ESCALA DEL MAPA

Se define como el cociente entre la distancia horizontal que hay entre dos puntos del mapa y los dos mismos puntos en el terreno. Determina la cantidad de información que puede ser visualizada en un mapa. Por ello determina el número de observaciones a realizar en campo, para que la información tenga la consistencia adecuada.

Cuanto más detallada sea la escala de un mapa, menor será la variabilidad espacial de las unidades cartográficas representadas (mayor será su grado de pureza) y, por consiguiente, de mejor calidad podrán ser las predicciones que se pueden realizar a partir del mapa.

Los mapas a escala pequeña sirven para poder tener una visión de conjunto de los suelos de un área grande (mundo, continente, país, región), mientras que los mapas a escala grande informan a nivel local y por ello sirven para planificación detallada.

Se denomina **delineación base** a la mínima superficie de terreno que puede ser representada a la escala del mapa. Corresponde a un cuadrado de 5 mm de lado en el mapa.

b) Leyenda de un mapa

LEYENDA DE UN MAPA

La **leyenda** de un mapa de suelos describe las características y los atributos seleccionados para definir el suelo principal, al que hace referencia cada unidad cartográfica representada y que, por lo general, le da nombre. La leyenda agrupa las unidades cartográficas que han establecido para el área cartografiada en el mapa.

c) Tipos de unidades cartográficas

En mapas detallados de suelos de zonas con un modelo de distribución de suelos sencillo, algunas unidades cartográficas representan áreas dominadas por una única clase de suelos o unidad taxonómica. En este caso, la unidad cartográfica se representa con una unidad taxonómica única.

No obstante, esto no suele ser lo frecuente, ya que en la mayoría de los casos las unidades cartográficas representadas incluyen dos o más clases de suelos o unidades taxonómicas, una de ellas predominará, y será la que dará nombre a la unidad cartográfica. Las restantes constituirán **inclusiones** de suelos símiles o disímiles sin representación, pero cuya presencia deberá señalarse en la leyenda del mapa. A igual escala, el modelo de distribución de los suelos determina la posibilidad de definir unidades cartográficas más o menos homogéneas. Un aspecto a considerar al establecer la leyenda de un mapa es establecer el menor número posible de unidades cartográficas, siempre y cuando ello no vaya a afectar la calidad de las predicciones.

La agregación de unidades taxonómicas en una misma unidad cartográfica se hace atendiendo a la escala del mapa y al modelo de distribución de suelos. Existen distintos tipos de formas de agregación:

- **Unidad simple:** unidad cartográfica caracterizada por una **única clase de suelo** o unidad taxonómica. Es la unidad cartográfica uniforme más detallada.
- **Consociación:** unidad cartográfica **dominada por una clase de suelo** con inclusiones permisibles de suelos diferentes, si bien símiles (no puede haber más de un 10% de suelos disímiles y limitantes). La clase de suelo dominante ocupa de un 50 a un 75% de la superficie, y es la que sirve para dar nombre a la unidad cartográfica. Es la unidad cartográfica más detallada. Ejemplo: Laguna franco limosa, 0 a 3% de pendiente.
- **Complejo de suelos:** unidad cartográfica **compuesta de dos o más clases de suelos**, generalmente disímiles, que se encuentran tan **intrincados** que resulta imposible separarlos, incluso en una cartografía más detallada, si bien presentan una organización espacial (modelo de distribución) que corresponde a una cierta lógica. Ejemplo: Complejo Laguna–Cataluña, 8 a 15% de pendiente.
- **Asociación de suelos:** unidad cartográfica que **contiene dos o más clases de suelos**. Los suelos disímiles agrupados ocupan suficiente extensión y están organizados según un modelo de distribución que se repite de una manera **regular** que puede ser explicada. Por ello se podrían delinear separadamente a una escala más detallada. Se utilizan en mapas a escala pequeña, generalizados, de grandes áreas (un país, por ejemplo). Las asociaciones de suelos se utilizan para disminuir costes sin perder utilidad para la finalidad del mapa. Ejemplo: Asociación Laguna–Cataluña–Molino.
- **Grupo indiferenciado:** unidad cartográfica integrada por **dos o más clases de suelos** que, en general, **no presentan una organización regular**. El modelo de distribución y la proporción de los diferentes suelos no es uniforme. Se incluyen conjuntamente en una misma unidad cartográfica, ya que desde un punto de

vista del uso y la gestión, su **respuesta es semejante**. La unidad cartográfica se denomina con el nombre del suelo predominante y la partícula «y» seguida del nombre del otro suelo, agrupado en la unidad cartográfica, lo que permite distinguirlo de una asociación o de un complejo. Ejemplo: Laguna y Cataluña franco limosa, 3 a 8% de pediente.

- **Taxadjunto**: unidad cartográfica cuyas características no entran dentro de ninguna de las Series de suelos o clases establecidas. Difieren poco de una de las clases establecidas. Prácticamente no se usa en Estados Unidos.
- **Área miscelánea**: todas las superficies de un mapa de suelos deben ser identificadas. Las áreas «sin suelo» se denominan áreas misceláneas y hacen referencia a canteras, afloramientos rocosos, áreas acar-cavadas, dunas, lagos, embalses, entre otras. Los suelos urbanos ya no se incluyen como área miscelánea, sino que se describen como Series de Suelos: http://www.nycswcd.net/files/Gateway_Manuscript.pdf.

d) Precisión temática

La **precisión temática o grado de pureza** de un mapa hace referencia al grado de concordancia entre el mapa y la realidad terreno (Rositer, 2001). El número de características que se utilizan para describir los suelos de un área en un mapa y el número de atributos asignados a la misma área en la base de datos espaciales definen la **precisión temática** del mapa. Cuanto mayor sea la precisión temática, mayor será la utilidad del mapa para usos múltiples.

Un mapa no permite describir un gran número de atributos, ya que, a medida que estos aumentan, disminuye la **percepción del mapa** y se hace más difícil la lectura e interpretación. Por contra, una **base de datos espacial** podrá contener toda la información obtenida en el campo y permitirá editar mapas de precisión temática diversa, tanto por el número, como por el tipo de atributos considerados, siempre que la información deseada haya estado obtenida en el campo en el momento de la prospección.

En la parte geométrica, una base de datos y un mapa temático de suelos a la misma escala son comparables; pero en la parte descriptiva, la base de datos contiene mucha más información que el mapa temático a la misma escala. De ahí la mayor flexibilidad e interés de una base de datos, frente a un mapa tradicional de suelos. A pesar de esto, deberá tenerse en cuenta que un mapa de suelos no es la realidad terreno, sino que es una representación de conocimiento estructurado de la distribución de los suelos en un paisaje. Dado que los conocimientos de suelos, la teoría de la edafogénesis y la clasificación de suelos avanzan a lo largo de los años, también mejorará la calidad de la información de suelos y, por tanto, los mapas de suelos.

Intensidad de observaciones

Para obtener mapas confiables y útiles para realizar predicciones con alta precisión, se requiere que vengan avalados por un número suficiente de observaciones de campo. Al aumentar la intensidad de observaciones disminuye el grado de incerteza de un mapa, ya que aumenta la pureza de sus unidades cartográficas. Cabe distinguir entre **intensidad geográfica** (número de observaciones de campo por unidad de superficie) e **intensidad tipológica** (número de observaciones por unidad cartográfica) (Unidad 4).

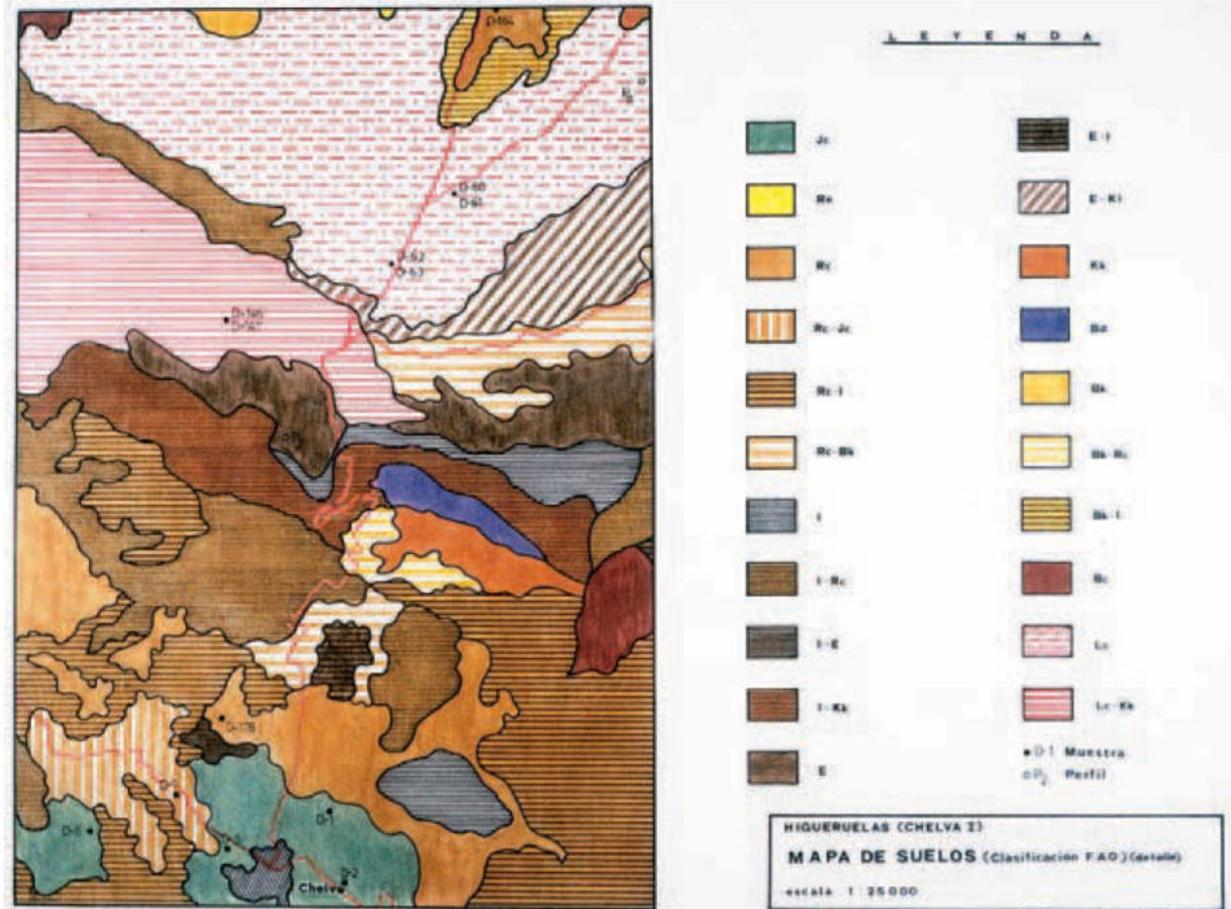
Una densidad de observaciones de 0,2 a 2 observaciones por cm^2 del mapa a elaborar constituye un intervalo generalmente aceptado. Además, resulta importante la comprobación de límites entre delineaciones en campo.

Por consiguiente, interesa destacar que las unidades cartográficas de mapas a pequeña escala, al haberse establecido con una densidad de observaciones mucho menor, presentarán un grado de incerteza muy elevado, por ello, este tipo de mapas **no puede utilizarse** para obtener información específica de los suelos de un lugar determinado, aunque pueda haber quien pensaría que esta «pequeña» dificultad se resuelve haciendo un *enlargamiento* del mapa de suelos (*zoom*).

9. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Estudiar este mapa de suelos de Figueroles de Domenyo (Serrans) elaborado por J. Sánchez *et al.* y contestar a los aspectos que se indican:

- Sistema de clasificación de suelos utilizado.
- Número de delineaciones.
- Número de unidades cartográficas.
- Grado de generalización taxonómica y cartográfica.
- Comentarios adicionales sobre el tipo de mapa.



10. UTILIZACIÓN DE LOS MAPAS DE SUELOS: ADVERTENCIAS

Al utilizar información contenida en un mapa de suelos, para poder hacer predicciones con fiabilidad, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- La **escala** del mapa, ya que determina la densidad de observaciones y, por consiguiente, el conocimiento de la realidad terreno que da soporte al mapa, y el porcentaje de superficie ocupada por impurezas.
- El grado de abstracción o nivel de **generalización** del mapa, que puede haber hecho perder una gran cantidad de información y hacer aumentar el porcentaje de impurezas.
- Los **límites** entre delineaciones nunca son tan abruptos como la línea que los indica en el mapa podría hacer creer, y cómo fueron identificados.

Finalmente hay que tener en cuenta que los suelos constituyen una parte de la información, y que las técnicas de manejo de suelo y otros aspectos deben ser tenidos igualmente en cuenta al hacer predicciones a partir de información de suelos, debiendo utilizar el concepto de *tierras* en las evaluaciones.

11. ESTUDIAR Y DISCUTIR

G2. Discutir los siguientes aspectos:

- ¿A qué tipo de mapa se está haciendo referencia si se nos dice que se representan en él las Series de Suelos?
- ¿Si se pasa la clasificación de las unidades cartográficas a nivel de Suborden, qué se habría hecho? ¿Qué ocurriría con el número de unidades? ¿Y con la cantidad de información?

12. CRITERIOS DE CALIDAD DE UN MAPA DE SUELOS

Al tener que utilizar información cartográfica de suelos puede resultar conveniente considerar el grado de fiabilidad de la misma.

FIABILIDAD

La **fiabilidad** de una cartografía hace referencia a la confianza con la que se pueden predecir las propiedades y el comportamiento de los suelos de un lugar determinado, para atender a las expectativas de los usuarios de información.

Los elementos a considerar para evaluar la fiabilidad están relacionados con:

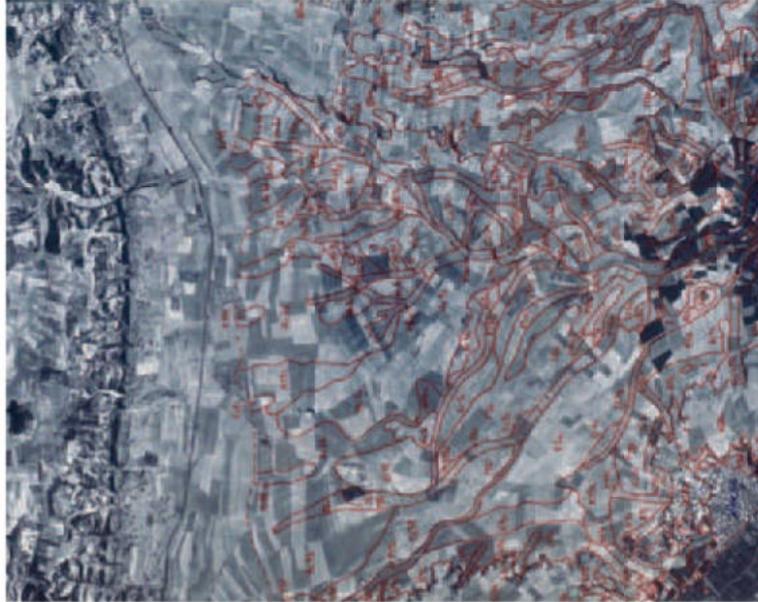
- La **profesionalidad del equipo**: institución y experiencia del equipo que realizó el mapa y laboratorio que hizo los análisis, existencia de un control de calidad interno durante la realización del mapa y de los análisis.
- La **metodología de trabajo**: utilización de una metodología de trabajo normalizada, densidad de observaciones, existencia de un equipo de correlación, equipo digital de fotointerpretación, existencia de una base de datos.
- La **forma de presentar la información**: **precisión del mapa** (un fondo de ortofotomapa permite una mejor localización de la información); **expresión** (tramas y símbolos utilizados); **legibilidad** (facilidad con la que se puede captar la información en el mapa); **eficacia** (el mapa debe ser útil, completo y fiable); **leyenda** (es la que transfiere la información contenida en el mapa, debe ser corta y comprensible).

13. CALCULAR

- A1.**
- ¿Cuál es la superficie de la delineación base en un mapa a escala 10 000 y en otro a escala 1: 250 000?
 - ¿A qué escala de mapa pasará a ser una impureza una delineación que, a escala 1:25 000, tiene una dimensión máxima de 5 cm?
 - Calcular cuánto supone en el campo el ancho de la línea de un límite de separación entre delineaciones, que en el mapa a escala 1: 25 000 es de 0,3 mm y cuál será el error de un desplazamiento de 0,5 mm en el trazado del mapa.
 - Indicar a qué escala de mapa dejará de aparecer una delineación que a escala 1: 10 000 tenga una longitud de 3 cm.

14. OBSERVAR E INTERPRETAR

- A1.** Este mapa de suelos corresponde al proyecto *Mapa de Suelos a escala 1:25 000 de Cataluña*, realizado utilizando Series de Suelos (Boixadera *et al.*, 2006).
- Indicar el grado de generalización taxonómica y cartográfica.
 - Señalar algún aspecto referente a la calidad del mapa.
 - Proponer una leyenda como paso previo al levantamiento del mapa.
 - Discutir el hecho que el mapa proceda de una base de datos georreferenciada.



Escala real: 1:25.000.

15. ANALIZAR E INTERPRETAR

E3. Estudiar y redactar un informe acerca de los siguientes aspectos:

- ¿En qué mapas será mayor el porcentaje de superficie ocupada por las impurezas, en los que escala grande o en los de escala pequeña?
- Se recibe una consulta de un agrónomo que debe asesorar acerca de qué finca hay que comprar para poder realizar plantaciones de melocotoneros (duraznos). Nos remite la información de suelos que ha recopilado:

Área A. Las unidades cartográficas representadas incluyen: Luvisoles, Gleysoles y Planosoles (WRB).

Área B: Las unidades cartográficas representadas incluyen las Series de Suelos: Pentz y Montpellier según la definición establecida en Estados Unidos.

Área C: Las unidades cartográficas representadas incluyen las Series: Oriola y la Bomba (Cataluña, España).

Acceder por medio de Internet a la WRB, a Soil Taxonomy y a las Series de Suelos Oriola y la Bomba (www.iec.cat/mapasols). Para obtener información acerca de la Series en EE.UU. debe consultarse: <http://soils.usda.gov>, luego ir a *Soil Series Extent Mapping Tool* y buscar el nivel jerárquico superior al que pertenece cada Serie de Suelos.

- En la leyenda de un mapa se indica que la unidad cartográfica denominada «El Hondo, franco-limosa, 0 a 3% de pendiente, mezclada, méstica» es una consociación. Se desea saber si la fiabilidad de las predicciones será buena para los suelos de esta unidad.

16. REFUERZO CON TRABAJO DE CAMPO

La realización de un inventario de suelos para elaborar un mapa requiere una gran cantidad de trabajo de campo, y una considerable experiencia, que sólo se adquiere dedicándole tiempo y esfuerzo. Por ello se plantea como un refuerzo del aprendizaje, un trabajo de cartografía de suelos. Debe permitir hacer una síntesis de lo estudiado a lo largo del Curso, y seguir fomentando el trabajo en equipo. La secuencia de actividades para la elaboración de un mapa de suelos (Boixadera, 2002) varía según la escala del mapa a elaborar. La metodología que se propone sería adecuada para realizar mapas de suelos para estudios de viabilidad (1: 50 000) y para la redacción de proyectos (1: 25 000) y es la siguiente:

- a) **Fase preliminar**, que incluirá:
- Establecer los objetivos del mapa (Unidad 1).
 - Recopilar los antecedentes de la zona y material para fotointerpretación.
 - Realizar el reconocimiento de la zona.
 - Determinar la estructura de la leyenda del mapa.
 - Planificar el trabajo de campo.
- b) **Fase de prospección y análisis**
- Fotointerpretar las formas del terreno para establecer unidades supuestamente homogéneas y situar los puntos a observar en campo (opcionalmente realizar un análisis digital del terreno) (Unidad 2).
 - Prospección de campo por medio de sondeos en transectos a lo largo de las laderas, para determinar la variabilidad de los suelos (Unidad 4).
 - Establecer modelos suelo-paisaje (Unidad 2 y 3).
 - Establecer los límites provisionales de las unidades cartográficas, atendiendo a su homogeneidad y poner símbolos en cada unidad: premapa
 - Abrir calicatas y describir los perfiles de referencia de cada unidad cartográfica (Unidad 4 y 13)
 - Establecer la leyenda definitiva del mapa de acuerdo con las características seleccionadas para definir las.
 - Realizar los análisis de laboratorio de los perfiles de referencia (Unidad 14).
- c) **Fase de síntesis cartográfica: redacción**
- Revisar la fotointerpretación.
 - Evaluar todo el material.
 - En un trabajo profesional se transferirá toda la información a una base de datos georreferenciada.
 - Preparar el mapa y la memoria.

17. RELACIONES ESENCIALES

G2. Establecer relaciones esenciales entre los contenidos de ambas columnas:

1. Mostrar la distribución de los suelos y facilitar la transferencia de conocimientos de los suelos	a) Delineaciones en mapas detallados
2. Representar las distribuciones de las propiedades de los suelos incluidos en intervalos estrechos	b) Unidad taxonómica
3. Se pierde información al realizar el proceso de abstracción	c) Cultivo de la viña
4. Clase de suelos dentro de un sistema de clasificación	d) Suelos forestales
5. Uso del territorio a un nivel de generalización alto	e) Elaboración de un mapa de suelos
6. Mapas de suelos generalizados taxonómica y cartográficamente	f) Escalas 1: 2 000 y 1: 25 000
7. Mapa para áreas agrícolas de regadío y para arquitectura del paisaje	g) El suelo
8. Integra y registra sucesos y procesos que le afectan	h) Proceso de generalización taxonómica o cartográfica
	i) Mapas a escala 1: 1M y 1: 5M

18. SISTEMAS DE INFORMACIÓN DE SUELOS (SIS)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) se estructura en una serie de capas de información, cada una de las cuales tiene características temáticas similares y una estructura gráfica y que, al compartir el mismo entorno geográfico, resultan superponibles. Una de estas capas está integrada por información de suelos.

SISTEMA DE INFORMACIÓN DE SUELOS

La información geográfica de suelos incluye la distribución de los suelos en el paisaje, el uso actual y los usos potenciales.

Un Sistema de Información de Suelos (SIS) constituye un caso particular de un SIG. Un SIS consiste en una estructura informática cuya finalidad es recopilar, almacenar, analizar y gestionar la información espacial de suelos, obtenida en un inventario y compilada en una base de datos georreferenciada, para poder atender con soporte institucional las demandas de las personas que utilizan información.

Tanto a nivel global como a escala de país y regional, existe un gran número de iniciativas para poder disponer la información de suelos en un sistema multiescala. La armonización resulta difícil.

19. CARTOGRAFÍA DIGITAL DE SUELOS

En muchos países, el trabajo de los Servicios de Cartografía de Suelos había producido una gran cantidad de mapas en soporte papel, previamente a la introducción del uso de los ordenadores. Para que esta valiosa información cartográfica pueda ser utilizable con equipos informáticos, se ha procedido a su digitalización, produciendo **mapas digitalizados**.

En la era digital, los mapas de suelos se producen a partir de una base de datos espacial, pudiendo hablar en este caso de **mapas digitales** de suelos.

MAPA DIGITAL DE SUELOS (MDS)

Creación de información espacial de suelos asistida por ordenador utilizando métodos de observación de campo y de laboratorio, asociados con sistemas de inferencia espaciales y no espaciales de suelos. Los MDS proporcionan información sobre clases de suelos, sus propiedades y sus distribución espacial.

El *Digital Soil Mapping Working Group* de l'European Soil Bureau Network, en su informe publicado en 2006, indica que el proceso digital de cartografía de suelos debe verse como una técnica avanzada para cartografiar las propiedades de los suelos, para lo cual se requiere un modelo de inferencia espacial. Los MDS pueden utilizarse en dos aplicaciones: las evaluaciones digitales de suelos y las evaluaciones digitales de riesgos de los suelos (Carré *et al.*, 2007).

20. ACCESO A LA INFORMACIÓN DE SUELOS POR INTERNET

A la pregunta ¿qué suelo hay en tal sitio? se puede responder de distinta forma según en qué parte del mundo sea formulada. En muchos casos nos darán una barrena, pico y pala para ir a verificarlo. En otros países habrá que ir a alguna institución y adquirir o consultar los mapas existentes.

Los Servicios de Suelos de muchos países han decidido poner a disposición de los usuarios información de suelos haciéndola accesible por Internet de forma libre. Para ello se han escaneado los mapas preexistentes y también se han digitalizado, en cuyo caso se podrán re trabajar con un sistema de información geográfica. Con ello todos los usuarios pueden acceder de forma rápida a la información más actualizada, seleccionar sólo aquella que les resulte de interés y mejorar la gestión del territorio y la toma de decisiones en planificación territorial y en protección medioambiental. Las limitaciones pueden deberse a que no toda la información disponible haya sido escaneada o digitalizada o a que no se haya completado la información de suelos de todas las áreas.

Como ejemplos cabe citar el espacio web del Institut d'Estudis Catalans: www.iec.cat/mapasols, para información cartográfica y documentación general sobre suelos; el Natural Resource Conservation Service Web Soil Survey del USDA: <http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/> (Post *et al.*, 2007) (verificados en 2007), entre otros.

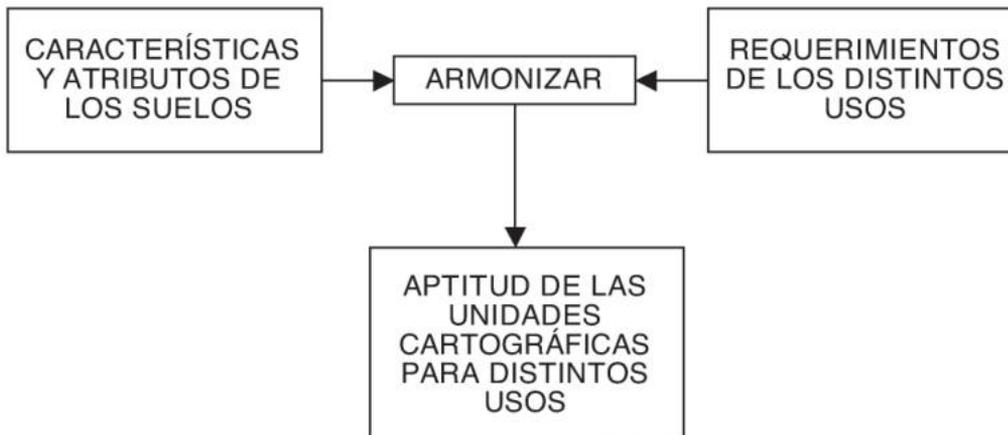
21. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Buscar información en Internet y redactar un informe acerca de:

- Las siguientes bases de datos: SSURGO, STATSGO, NATSGO, NASIS, SOTER.
- En el *Nacional Soil Survey Handbook* determinar el material de referencia para un levantamiento de suelos (*Soil Survey*). Accesible en: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>.

22. UTILIZACIÓN DE INFORMACIÓN DE SUELOS PARA DIFERENTES USOS

Los requerimientos de los diferentes usos por lo que se refiere a suelos deben armonizarse con las características y atributos de los suelos, para determinar la aptitud de cada unidad cartográfica de suelos para usos concretos. La evaluación de suelos tiene este objetivo.



Las características de los suelos que condicionan el crecimiento de las plantas son: riesgo de inundación, clase de drenaje (disponibilidades de oxígeno), salinidad, sodicidad, caliza activa, acidez excesiva, riesgo de encostramiento superficial, profundidad efectiva del suelo, compactación, consistencia y facilidad de enraizamiento, capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD), riesgo de déficit hídrico, pedregosidad superficial. Así, por ejemplo:

Para **campos de golf y céspedes** las características y atributos del suelo a tener en cuenta son:

Textura	Nivel freático
Elementos gruesos	CRAD
Salinidad	Riego de inundación/encharcamiento
Sodicidad	Pendiente
Reacción del suelo	Profundidad a la roca
Materiales sulfurosos	Profundidad a un horizonte cementado
Carbonato cálcico equivalente	

Para **carreteras locales y calles** las características y atributos del suelo a tener en cuenta son:

Textura	Pendiente
Riesgo de subsidencia	Riesgo de inundación
Profundidad a la roca	Densidad aparente
Profundidad hasta un horizonte cementado	Elementos gruesos
Expansión-retracción	Nivel freático
Riesgo de asentamientos diferenciales	Riesgo de movimientos en masa
	Riesgo de hundimiento, sofusión.

23. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Buscar información acerca de los requerimientos de los suelos para diferentes funciones: usos agrícolas, fosas sépticas, campos de golf y tuberías de hierro enterradas.

Para conocer los requerimientos de un determinado uso puede consultarse el *National Soil Survey Handbook* en el sitio web del *National Resources Conservation Service* de los EUA: <http://soils.usda.gov>, <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>, así como los Manuales FAO de Evaluación de Tierras, la *Normativa Técnica Generale de la Carta dei Suoli Regionale Scala 1: 50 000* del Ufficio Pedologico de la Regione Emilia-Romagna, entre una bibliografía muy abundante al respecto.

24. MANEJO DE INFORMACIÓN

E3. Acceder a información cartográfica de suelos de una determinada zona por medio de Internet y evaluar los suelos de acuerdo con los requerimientos para diferentes usos.

25. CONOCER Y COMPRENDER

CC. Revisar los contenidos de la Unidad y seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos:

Al tener que asignar usos al territorio, nos encontramos con que los objetivos de los distintos usos pueden diferir ampliamente tanto en la clase, como en el nivel de (1) _____, por lo que el tipo de información necesaria para poder hacer predicciones respecto a las respuestas esperables también variará. Así por ejemplo, para determinar áreas idóneas para el cultivo del maíz, de la alfalfa o para caracterizar los *terroirs* de la vid, se requerirán mapas de suelos (2) _____, que si se trata de establecer qué zonas son de interés agrícola y cuáles de interés forestal.

Cada clase de suelos (3) _____ sirve directamente para establecer una unidad cartográfica. El mapa que el prospector elabora en campo suele ser de una escala doble a la del mapa y que se publica, en el que, por motivos prácticos, interesará (4) _____ el número de delineaciones para que resulte fácilmente legible. Ello obligará a (5) _____ delineaciones establecidas en campo, lo que supone realizar una (6) _____, con lo que (7) _____ la calidad de las predicciones a realizar a partir de la información contenida en el mapa, ya que cada delineación final contendrá (8) _____ información y tendrá (9) _____ impurezas o inclusiones. Por analogía se puede afirmar que un mapa a escala 1:25 000 tiene (10) _____ interés que un mapa 1: 250 000 para poder realizar predicciones acerca de la vulnerabilidad de las capas freáticas superficiales en relación a vertidos de purines, es decir, que los objetivos de uso del territorio (11) _____ la escala del mapa de suelos a utilizar.

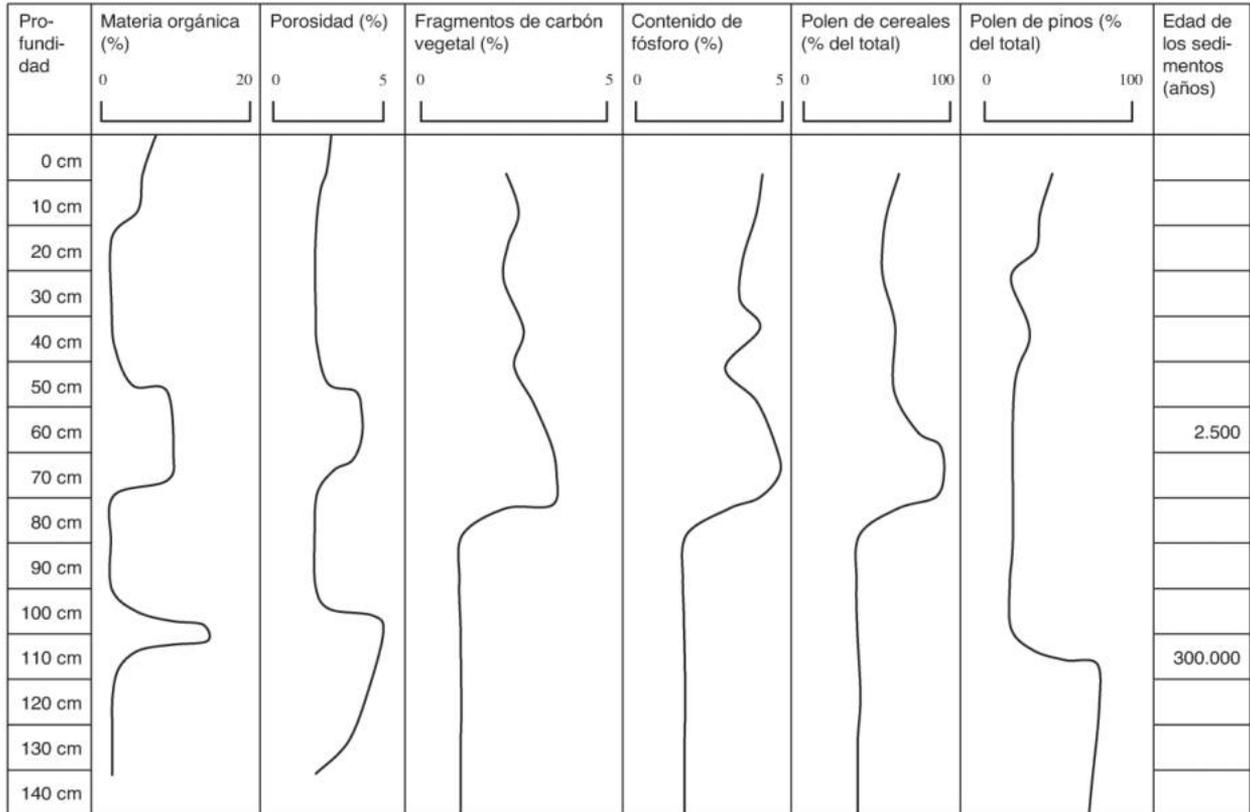
- | | | | | |
|------|-------------------|-----------------|----------------------|--|
| (1) | a) aplicación | b) utilidad | c) generalización | d) concentración |
| (2) | a) más detallados | b) más actuales | c) más generalizados | d) a escala 1:250 000 |
| (3) | a) no | b) -- | c) sí | d) depende de la escala y del modelo de distribución de suelos |
| (4) | a) duplicar | b) disminuir | c) limitar | d) aumentar |
| (5) | a) subdividir | b) agregar | c) absorber | d) suprimir |
| (6) | a) aproximación | b) adición | c) generalización | d) simplificación |
| (7) | a) disminuye | b) aumenta | c) se duplica | d) se incrementa |
| (8) | a) igual | b) más | c) menos | d) mucha más |
| (9) | a) iguales | b) mayores | c) menores | d) mayor porcentaje de |
| (10) | a) mayor | b) igual | c) menor | d) mucho más |
| (11) | a) condicionan | b) determinan | c) no influyen en | d) aumentan |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

26. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

E3. Un equipo de arqueólogos está estudiando la actividad humana de un yacimiento íbero de hace unos 2500 años, situado sobre un cono de deyección. Uno de los puntos de discusión es la ocupación del territorio, ya que si bien se han encontrado azadones y otros instrumentos agrícolas, los habitantes de otros poblados íberos de la misma época eran pastores y recogían productos de los bosques. La edafóloga del equipo ha realizado distintos análisis en un suelo representativo de las afueras del yacimiento, formado sobre el cono de deyección actual, que ha experimentado una sedimentación progresiva desde hace más de 300.000 años. Algunos de los resultados se presentan a continuación.



1. Explique las diferencias entre el suelo forestal que se encontraba en superficie hace 300 000 años y el suelo que se encontraba en superficie en el periodo de ocupación del poblado.

2. Justifique, a partir de la información de cada gráfico, que aquellos íberos eran, efectivamente, agricultores.

OBJETIVOS

- Introducir los conceptos de utilidad, calidad y salud del suelo.
- Estudiar los procesos de degradación de los suelos.
- Aplicar los conocimientos de física y química de suelos estudiados.
- Entender cómo se pueden proteger los suelos frente a su degradación.
- Introducir los conceptos de desertificación y de sostenibilidad.

Cada proceso de degradación podría ser objeto de un curso específico, por consiguiente se adopta un enfoque introductorio, planteando trabajos personales y en equipo, que pueden permitir profundizar en alguno de los procesos, a criterio de cada docente.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

- Utilidad del suelo.
- Calidad y salud del suelo.
- Indicadores.
- Indicadores de calidad del suelo
- Degradación y rehabilitación de suelos.
- Componentes de la degradación.
- Resiliencia.
- Procesos de degradación.
- Desertificación.
- Sostenibilidad/Sustentabilidad.
- Actuaciones sobre el territorio y sostenibilidad.

LECTURAS RECOMENDADAS

- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C.: *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3.^a edición. Ed. Mundi-Prensa, 2003: Cap. 23 (erosión), 24 (salinidad y sodicidad), 27 y 28 (contaminación).
- Barrow, C.J.: *Land Degradation*. Cambridge University Press, 295 págs. Cambridge, 1991.
- En Internet: www.iec.cat/mapasols

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Completar los huecos con el término más adecuado de acuerdo con el contexto:

El suelo es un elemento multifuncional de un ecosistema ya que, entre otras, puede desempeñar las siguientes funciones (1) _____, _____ y _____.

La calidad del agua de riego puede suponer un riesgo de degradación de los suelos, ya sea por provocar un aumento en el contenido de sales más solubles que el yeso, lo que se mide por medio de (2) _____ o bien de sodificación, medido con (3) _____. Por otro lado, al aportar a un suelo una cantidad excesiva de agua con (4) _____, superando los requerimientos de las plantas, se puede dar lugar a un «consumo de lujo», es decir, por encima de las necesidades del cultivo. Debido a la carga (5) _____ de este ión, no existirá interacción con (6) _____, por lo que puede ser lavado y transferido a otro compartimento ambiental, una capa freática, por ejemplo. Si la contaminación fuese grave y se usase el agua de un pozo privado para consumo humano, la mala calidad de este agua puede suponer un riesgo para la salud de los bebés (especialmente los menores de seis meses), ya que puede provocar metahemoglobinemia (síndrome del niño azul) y para las mujeres embarazadas.

En el estudio de un suelo hay propiedades que se observan y otras que se infieren, entre éstas últimas se puede citar (7) _____. La estructura expresa (8) _____. Debido a ello el suelo es un medio poroso, pudiendo diferenciar dos densidades, la real y la (9) _____, ésta hace referencia a (10) _____. Cuanto mayor es su valor, mayor será (11) _____.

El valor medio de la densidad real es de (12) _____ kg m^{-3} .

Una estructura laminar en superficie del suelo resulta (13) _____ para la infiltración del agua, con lo que el agua de escorrentía superficial (14) _____ y la emergencia de algunas plántulas se ve (15) _____. La facilidad de salida del agua de un suelo frente a los aportes define la (16) _____. Si ésta es muy baja, habrá procesos de (17) _____, pudiendo formarse en casos extremos (18) _____ en zonas de marismas y estuarios.

- | | | | | |
|------|--|--|--|---|
| (1) | a) producción de alimentos | b) mejorar la calidad de las aguas | | |
| | c) suministrar nutrientes de forma indefinida a las plantas | d) secuestrar nitrógeno | | |
| | e) absorber radiación solar, si el brillo Munsell de su superficie es alto | f) conservar biodiversidad | | |
| | g) fuente de cinc | | | |
| (2) | a) SAR | b) CE en dS m^{-1} a 25° | c) cmolc L^{-1} | d) ESP |
| (3) | a) SAR | b) CE en dS m^{-1} a 25°C | c) cmolc L^{-1} | d) ESP |
| (4) | a) ión fosfato | b) ión cloruro | c) ión nitrato | d) bicarbonatos |
| (5) | a) uno | b) positiva | c) dos | d) negativa |
| (6) | a) la caliza | b) las arcillas | c) el yeso | d) el ión sulfato |
| (7) | a) color | b) profundidad efectiva | c) clase de drenaje | d) estructura |
| (8) | a) % por tamaños | b) organización de los minerales | c) compuestos orgánicos | d) organización de las partículas individuales y espacio de huecos asociado |
| (9) | a) de la fase sólida | b) aparente | c) de la fase líquida | d) de la m.o. |
| (10) | a) masa de sólidos referida al volumen total | b) que se muestra a simple vista | c) masa de m.o. referida al volumen de total | d) masa de agua referida al volumen total |
| (11) | a) la porosidad | b) la compacidad | c) el contenido de m.o. | d) el % de agua |
| (12) | a) 1350 | b) 900 | c) 2650 | d) depende |
| (13) | a) favorable | b) desfavorable | c) interesante | d) indiferente |
| (14) | a) disminuye | b) se infiltra | c) no se ve afectada | d) aumenta |
| (15) | a) afectada | b) favorecida | c) impedida | d) estimulada |
| (16) | a) permeabilidad | b) porosidad | c) conductividad hidráulica | d) clase de drenaje |
| (17) | a) oxidación | b) aireación | c) formación de Fe(III) | d) reducción |
| (18) | a) sulfatos | b) yeso | c) sulfuros | d) nitratos |

2. UTILIDAD DEL SUELO

UTILIDAD

Aptitud de un suelo para desarrollar determinadas funciones en un ecosistema.

Un suelo útil es aquél que se comporta de una manera beneficiosa para satisfacer las necesidades humanas, entendidas éstas en un sentido muy amplio, desde la aptitud para producción de alimentos, proporcionar información acerca de actividades humanas en el pasado en un determinado territorio, pasando por el valor paisajístico, la mejora de la calidad de las aguas, el secuestro de carbono, entre otros muchos aspectos. Por consiguiente, la utilidad hace referencia tanto a bienes económicos (medibles en unidades monetarias), como a bienes no económicos.

3. ESTUDIAR Y ESCRIBIR

G2. Establecer la utilidad de un bosque expresada en bienes económicos y no económicos, así como las funciones afectadas.

Utilidades expresables en bienes económicos	Funciones del suelo implicadas	Utilidades no expresables en bienes económicos	Funciones del suelo relacionadas
Madera	Producción de biomasa	Biodiversidad	Hábitat biológico
.....

4. CALIDAD Y SALUD DEL SUELO

Concepto de calidad y salud del suelo

Los términos **calidad** y **salud** del suelo se utilizan a veces como sinónimos o como términos equivalentes y a veces complementarios, según quien se refiera a ellos. Definir lo que se entiende por calidad o por salud de un suelo y llegar a una cuantificación resulta difícil, debido al gran número de parámetros que determinan la utilidad y las funciones del suelo. Dada la importancia del tema, ha habido numerosas propuestas a partir de 1990.

CALIDAD DEL SUELO

Es la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter *et al.*, 1997).

Capacidad para funcionar dentro del marco de un ecosistema, sostener la productividad biológica, mantener la calidad ambiental, y promover la salud de las plantas y animales y la salud y bienestar de los seres humanos (Doran y Parkin, 1995).

SALUD DEL SUELO

El estado de las propiedades dinámicas del suelo, como son el contenido de materia orgánica, la diversidad de organismos, los productos microbianos, entre otras, en un tiempo determinado, define la salud del suelo (Romig *et al.*, 1995).

Se puede distinguir entre **calidad heredada**, que es la que deriva de los factores ecológicos de formación y de los procesos edafogénicos que han actuado en la formación del suelo; y **calidad dinámica**, que es la inducida por el uso y manejo del suelo.

El concepto de **calidad de un suelo** puede abordarse con dos enfoques diferentes, ya sea atendiendo a las **propiedades intrínsecas** del suelo, observadas, inferidas o bien calculadas por medio de funciones de edafotransferencia; o bien atendiendo a la **aptitud del suelo** para **realizar determinadas funciones**.

El *USDA Soil Quality Institute* define la calidad como: «lo bien que hace un suelo lo que se quiere que haga». Un suelo de calidad es aquel que promueve la productividad sin deteriorarse, tiene capacidad de amortiguación de contaminantes ambientales y patógenos, y que favorece la salud de las plantas, animales y las personas (Doran y Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997).

Elementos de calidad de un suelo

Entre los **elementos de calidad del suelo** relacionados con las **propiedades intrínsecas clave**, que sirven de indicadores de la potencialidad de dicho suelo para desarrollar determinadas funciones, cabe destacar: la *estructura* (importancia, impacto y umbral de manejo); *mantenimiento del pH* (acidez y capacidad de amortiguación en relación con las propiedades del suelo y la biodisponibilidad de nutrientes y fitotóxicos); *nitrógeno* (disponibilidad para los cultivos, eficiencia en el uso, y transferencia difusa a otros compartimentos ambientales); *fósforo* (biodisponibilidad y transferencia difusa a otros compartimentos ambientales), *potasio* (disponibilidad para los cultivos y manejo); *materia orgánica* (atributo clave, factores de control y cantidad potencialmente almacenable en el suelo, secuestro de carbono); *diversidad microbiana* (efectos sobre la salud del suelo y biología molecular); *compactación de los horizontes subsuperficiales* (impacto sobre las funciones del suelo y prevención), entre otros.

5. INDICADORES

Concepto de indicador

INDICADOR

Un indicador es un número, un descriptor que integra un conjunto de condiciones acerca del estado o la evolución de un sistema. Los indicadores son instrumentos de análisis que permiten simplificar, cuantificar y comunicar fenómenos complejos: calidad, degradación, sostenibilidad, entre otros.

No proporcionan información acerca de cual es la causa del problema, que habrá que investigar con posterioridad.

El interés de trabajar con indicadores reside en que intentan sintetizar una situación compleja y permiten establecer comparaciones entre situaciones distintas o entre distintos momentos para un mismo sistema. En efecto, los indicadores representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias en esta condición (Dumanski *et al.*, 1998). De acuerdo con el valor de los indicadores en relación con los umbrales de interpretación, el uso de indicadores debería complementarse con un estudio posterior del sistema. Con ello se podrá indagar cuáles son las causas de un problema identificado y los efectos del manejo y poder plantear estrategias para intentar resolverlo.

Objetivos de los indicadores

Los indicadores deben permitir: analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible; analizar los posibles impactos antes de una intervención; monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas; y ayudar a determinar si el uso del suelo es sostenible (Hünne Meyer *et al.*, 1997).

Los indicadores pueden servir como instrumento para:

- La *gestión*: identificar áreas bajo estrés, mejorar operaciones en curso, establecer prioridades en la asignación de usos al territorio, medir responsabilidades. Ejemplo: la salinidad media de los suelos de una zona de un perímetro de riego ha aumentado 2 dS m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ en los diez últimos años.
- La *investigación*: sintetizar datos complejos, formular hipótesis.
- La *educación*: informar a los actores de una actividad de forma sencilla y transparente. Ejemplo: en el caso de la salinización, transferir información a los regantes acerca de un problema.
- La *motivación*: disponer de un estímulo para la acción. Ejemplo: los embalses están a un 25% de su capacidad este año. Dar publicidad del problema de forma impactante y motivar a consumir menos agua.
- La *evaluación de un proyecto*: evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos a lo largo del desarrollo del proyecto.
- La *planificación*: disponer de instrumentos para plantear un desarrollo sustentable.
- La *política*: contar con una base que permita justificar decisiones políticas. Ejemplo: en el caso de la salinización de un perímetro regado, poder justificar una política de subvenciones para que los regantes instalen sistemas de drenaje.

Conocimiento: accesibilidad por medio de una web	Especies clave en el suelo
Producción total de biomasa encima del suelo	Diversidad microbiana del suelo
Carbono orgánico total del suelo	Condiciones de la superficie del suelo
pH del epipedión	Extensión y profundidad de laboreo
Capacidad amortiguadora	Área afectada por actividades extractivas

7. ANALIZAR Y DISCUTIR

E3. Se pide que se redacte un informe acerca de la situación de un perímetro de riego de 17.500 ha, tras 30 años de la llegada del agua. La Agencia del Agua desea saber cuál es el estado del sistema de riego y si está bajo estrés. La documentación disponible muestra que se han venido realizando, cada año en la misma época, medidas periódicas de los niveles en los pozos de la zona. El archivo con los recibos del pago del agua permite hacer los cálculos anuales del agua suministrada a los regantes en cada temporada de riego a lo largo de los 30 años. En un conjunto de parcelas piloto se ha monitorizado la salinidad del suelo, realizando el seguimiento medio de medidas con un sensor electromagnético (SEM) realizadas 24 horas después de un riego.

Año	Nivel piezométrico m	Agua bombeada para riego expresada en hectómetros cúbicos	Observaciones	Salinidad media del suelo dS m ⁻¹ a 25 °C
1	75	105,00	No se regaba toda la zona todavía	1,5
5	89			1,8
10	115	140,00		1,8
15	120			1,6
20	138	150,00		1,7-2,0
25	145			1,9-2,5
30	150	166,25	Se riega todo el perímetro	2,0-4,0

- ¿Qué tipo de indicadores se pueden establecer a partir del estudio de la demanda de agua a lo largo de los años?
 - ¿Qué indicador expresa el estado del sistema de riego? Construir las curvas que muestran la evolución del perímetro de riego a lo largo de los treinta años.
 - Proponer algunas medidas alternativas para la zona, de acuerdo con los indicadores establecidos.
- Preparar una presentación en público con medios electrónicos.

8. DEGRADACIÓN Y REHABILITACIÓN DE SUELOS

La degradación de un suelo puede describirse atendiendo a los efectos sobre las características intrínsecas del suelo o bien sobre las funciones que potencialmente podría desempeñar.

DEGRADACIÓN SUELOS

La degradación de un suelo es la **pérdida de utilidad** actual o potencial, con lo que el suelo será capaz de realizar cada vez menos **funciones** de las que se podrían esperar de él, a medida que la degradación progresa.

Se produce una disminución de rango o estatus, como por ejemplo, el cambio de suelo a no-suelo, por una erosión que deje en superficie el material originario, con lo que la pérdida de utilidad sería total; el paso de suelos de interés agrícola a suelos que no lo tienen, por salinización o contaminación, con lo que la producción de biomasa disminuirá; pérdida de suelos por sellado permanente por haber construido encima de ellos.

Análogamente, al erosionarse el suelo y quedar en superficie un material más desfavorable, puede que haya menor infiltración y, por tanto, menor captación de agua para recargar un acuífero.

En lo referente a las **propiedades intrínsecas**, también se puede definir la degradación como una disminución, pérdida o cambio de parámetros de calidad, como por ejemplo, el espesor del epipedión por erosión; la pérdida de material fino en superficie, con aumento de la pedregosidad superficial; la pérdida de materia orgánica por erosión o por un laboreo excesivo; la disminución de la conductividad hidráulica por compactación, entre otros.

Características y selección de indicadores

Los **criterios de selección de indicadores** deben basarse en las siguientes características:

- *Relevancia política*: que sean utilizables en la toma de decisiones, al estar relacionados con los objetivos.
- *Solidez analítica*: que sean sensibles al estrés del sistema, permitan hacer predicciones y sean integrables en relación con las funciones del suelo y procesos.
- *Facilidad de utilización e interpretación*, tanto para expertos como para usuarios, por la existencia de valores umbral y de guías de interpretación.
- *Medibles*: existencia de bases de datos o que el coste de obtener los datos necesarios para el cálculo del indicador sean asumibles.

En el desarrollo de indicadores resulta imprescindible que participe un panel, integrado tanto por expertos, como por representantes de los usuarios, agentes sociales y los responsables de la toma de decisiones, en un proceso basado en la participación, para que los resultados de la aplicación de los indicadores tengan una mejor aceptación.

Tipos de indicadores

En estudios de sustentabilidad, interesa tomar en consideración indicadores de diferentes tipos al mismo tiempo. Se pueden agrupar atendiendo a diversos criterios:

- Indicadores de propiedades: *físicos* (propiedades intrínsecas del suelo), *biológicos* (cubierta vegetal, biodiversidad, cabaña ganadera), *ecológicos* (fertilizantes y fitosanitarios utilizados, características de la capa freática), *sociales* (suficiencia alimentaria, cambios en la población) y *económicos* (renta de los agricultores, mercados para los productos).
- Indicadores de procesos: *presión* (P), que hacen referencia a la causa que ha actuado y actúa en el sistema y está creando tensión o estrés sobre el mismo; los de *estado* (S), que miden las condiciones que rigen dentro del sistema en un momento dado; y los de *respuesta* (R), que describen los efectos de las medidas implementadas para disminuir la presión y el estrés sobre el sistema, y los efectos de las medidas correctoras. Este planteamiento se conoce como **modelo PSR**.

La Agencia Europea del Medio Ambiente, con un enfoque holístico, propone un modelo que tiene en cuenta las relaciones causa–efecto entre los componentes económicos, sociales y medioambientales que interaccionan en un sistema. Para ello utiliza cinco componentes (**modelo DPSIR**): *fuerzas impulsoras* (D, *driving forces*), ya sean ambientales, económicas o sociales, entre otras; *presiones* (P), *estado* (S), *impacto* (I) y *respuestas* (R). Este modelo resulta útil para analizar un sistema dado y poder tomar decisiones para resolver los problemas generados por las fuerzas impulsoras que, en definitiva, son la verdadera causa de la degradación del sistema.

6. INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO

El establecimiento de **indicadores de calidad** de los suelos no resulta fácil, como tampoco lo es la determinación de umbrales y niveles críticos. El tema es objeto de investigación, debido a su interés y a que los indicadores constituyen una buena base para poder comparar los efectos de la gestión de suelos, a corto y largo plazo. El uso de indicadores permite evaluar los beneficios derivados de inversiones en política agraria o de ordenación territorial enfocados a la protección de los suelos y a la sostenibilidad/sustentabilidad.

Los indicadores pueden operar a diferentes niveles. Unos miden propiedades del suelo relacionadas con las funciones potenciales de éste; otros a nivel de un grupo de propiedades ambientales que afectan una función del suelo; y, finalmente, otros son indicadores de nivel alto, ya que reflejan cómo funcionan los suelos en un sistema determinado.

La *Royal Commission on Environmental Pollution* del Reino Unido (Loveland y Thompson, 2001) han establecido un **conjunto mínimo de indicadores** para la calidad del suelo:

Cabe establecer una distinción entre:

- La degradación que supone una **pérdida física del recurso suelo**, debido a procesos erosivos, cuyos efectos se evidencian, por lo general, de forma inmediata, tras un episodio de lluvia.
- La degradación que da lugar a un **aumento del estrés interno**, sin manifestaciones externas. El suelo, aparentemente, está intacto, pero cada vez será necesario un mayor trabajo interno en el sistema, para llegar a los mismos resultados. Cuando aparezcan signos de degradación, ésta se encontrará ya en un estadio avanzado. Por ejemplo, una degradación por procesos de acidificación, por salinización, por compactación, por contaminación, entre otras.

REHABILITACIÓN DEL TERRITORIO

La rehabilitación consiste en volver a hacer útil un espacio determinado, devolviendo sus suelos a un estado que les permita desarrollar un conjunto de funciones, de acuerdo con el plan o proyecto de rehabilitación previsto.

A veces, de forma incorrecta, se utiliza el término *restauración*, como sinónimo de rehabilitación. La restauración, en sentido estricto, consiste en la reduplicación exacta de las condiciones que existían antes de producirse la degradación o alteración. Por consiguiente, se trata de un proceso que sólo puede aplicarse en casos muy especiales, como podría ser en parajes de valor histórico o arqueológico. No es un caso frecuente al querer corregir o evitar la degradación del territorio. Cuando se actúa, por ejemplo, en áreas de minería a cielo abierto, se plantea la rehabilitación de los suelos de la zona, no su restauración.

La degradación del suelo implica un aporte de energía (procesos endotérmicos) en un sistema abierto, por lo que se trata de procesos irreversibles. Por ello, la rehabilitación de suelos degradados requiere siempre de inversiones importantes, lo que puede hacer que las actuaciones necesarias en áreas abandonadas no tengan viabilidad económica, aunque tenga viabilidad técnica. Por consiguiente, será siempre preferible plantear medidas preventivas, que tener que recurrir a medidas correctoras en áreas ya degradadas. No obstante, los riesgos para la salud pública pueden obligar a abordar la rehabilitación, a pesar de que su coste pueda ser elevado. Así por ejemplo, este sería el caso de antiguas áreas industriales, cuyos suelos estén contaminados y que se quieran utilizar como zonas de recreo, a las que vaya a tener acceso la infancia.

Por ello, las políticas de conservación de suelos en minería a cielo abierto y en otros casos se enfocan a la prevención y mantenimiento de la calidad y utilidad de los suelos. Los programas de rehabilitación deben asociarse al proyecto de explotación del recurso y debe presentarse conjuntamente al solicitar la autorización para iniciar una actividad minera.

9. COMPONENTES DE LA DEGRADACIÓN

Algunos de los procesos de degradación de suelos forman parte del ciclo geológico en la naturaleza, por lo que han existido siempre. Así por ejemplo, de no haber habido la erosión a escala global en la Tierra, no existirían las rocas sedimentarias. Por consiguiente, no debe observarse la naturaleza como algo estático, ni se debe pensar que sin la intervención de los seres humanos no habría degradación de suelos. Éstos han sido siempre frágiles y efímeros a escala geológica. Ahora bien, a escala humana, con intervenciones inadecuadas, se pueden **acelerar los procesos de degradación naturales** y hacer que un suelo pierda utilidad mucho más rápidamente de lo que lo haría de forma natural, pudiendo afectar con ello la salud y el bienestar de las personas afectadas por los efectos de la degradación y la calidad ambiental.

Por otro lado, desde el punto de vista de la actividad agrícola, la degradación del suelo comporta que, con el mismo trabajo, se vayan obteniendo cada vez menores rendimientos, a medida que la degradación avance. Por ello, para obtener los mismos rendimientos de los cultivos, será necesario aportar más insumos, con lo que los beneficios irán siendo cada vez menores para el agricultor, y puede que los riesgos ambientales sean mayores.

La degradación de suelos es el resultado de la acción de los siguientes componentes:

+ Procesos naturales	– Procesos de autoregeneración
+ Procesos antrópicos	– Gestión rehabilitadora

La resultante de los procesos causantes de la degradación y de aquellos que la contrarrestan, se conoce como **degradación neta**.

10. RESILIENCIA

En el estudio de los procesos de degradación no debe dejarse de lado la capacidad del propio sistema para recuperarse de forma natural, tras una alteración.

RESILIENCIA

La resiliencia es la capacidad que tiene un sistema natural, en este caso un suelo, de recuperar sus funciones tras sufrir una alteración. Ello será posible siempre que la degradación no supere un determinado umbral, a establecer en cada caso. La resistencia se puede definir igualmente como:

- Capacidad de un suelo para llegar a un nuevo estado de equilibrio después de una alteración.
- Capacidad de un suelo para resistir cambios adversos y recuperar su equilibrio dinámico inicial.

11. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DE SUELOS

El estudio de los procesos de degradación puede abordarse atendiendo:

- Al **ecosistema** en que tienen lugar: degradación de bosques tropicales, degradación de zonas áridas, degradación de bosques mediterráneos, degradación de zonas húmedas, degradación de un agrosistema determinado, degradación de zonas de minería a cielo abierto, entre otros.
- A los distintos **procesos** que tienen lugar en el suelo: erosión, acidificación, salinización, compactación, etc.

Los principales procesos de degradación de suelos pueden agruparse según supongan:

- a) La **pérdida del recurso suelo**: El arrastre de partículas por erosión hídrica, erosión eólica y los movimientos en masa suponen la desaparición física del suelo.
- b) Un **estrés interno** sin manifestaciones externas: La tensión que provoca dentro del suelo la degradación hace que para realizar una misma función se requiera una intensificación del trabajo interno en el sistema, por lo que pierde eficiencia, si bien el suelo permanece *in situ*. Cabe distinguir los siguientes procesos, que se describen más adelante, y pueden consultarse en: www.iec.cat/mapasols.

Deterioro químico:

Disminución de la fertilidad.
Salinización.
Sodificación.
Lavado de iones y acidificación.
Inundaciones y gleyficación.
Contaminación: acumulación de elementos tóxicos.

Deterioro biológico:

Empobrecimiento en materia orgánica.
Pérdida de población microbiana.
Pérdida de biodiversidad dentro del suelo, etc.

Deterioro físico:

Degradación de la estructura.
Compactación.
Sellado y encostramiento superficial.
Sellado por ocupación permanente del suelo con edificaciones e infraestructuras.

Desertificación en zonas áridas y semiáridas: presenta un nivel de complejidad muy superior a los anteriores.

El incremento de la **demanda de suelo** para funciones que supongan un sellado por crecimiento de áreas urbanas, industriales o infraestructuras lineales hace que haya una pérdida preocupante del recurso suelo, en especial de suelos de alta calidad. En la asignación de usos al territorio debería tenerse en cuenta la calidad de los suelos, para evitar que desaparezcan suelos agrícolas de buena calidad y que la agricultura acabe ocupando tierras marginales menos eficientes.

El **monitoreo** o seguimiento de los sistemas frágiles será la única manera de identificar a tiempo la degradación que está teniendo lugar y poder establecer estrategias de protección de los suelos afectados.

12. DEGRADACIÓN POR EROSIÓN HÍDRICA

Erosión, erosividad y erosionabilidad

EROSIÓN HÍDRICA

La erosión hace referencia a la pérdida gradual de material del suelo a medida que va quedando en superficie, siendo liberadas las partículas por impacto de las gotas de lluvia en un suelo desnudo y transportadas vertiente abajo por el agua de escorrentía superficial.

$$\text{Escorrentía superficial} = \text{Precipitación} - \text{Infiltración}$$

La erosión es un proceso relativamente lento, intermitente, recurrente a lo largo de los años, progresivo, que se retroalimenta y que es irreversible a escala humana. Se puede diferenciar la **erosión laminar** o **entre arroyaderos**, que es la que afecta a la superficie del suelo de forma difusa, es decir, sin provocar incisiones; cuando el flujo del agua de escorrentía superficial se concentra, provoca **erosión por arroyaderos**, que son canales de poca profundidad, que desaparecen al labrar. En el caso de terrenos abandonados, los canales pueden ir agrandándose con las sucesivas lluvias, llegando a disectar el terreno y a impedir la circulación de vehículos y el laboreo, se trata de una **erosión por cárcavas**, que pueden evolucionar a barrancos (www.iec.cat/mapasols).

La **erosividad** de la lluvia (R) hace referencia a su capacidad potencial para provocar erosión. Es función de la intensidad, duración, momento y cantidad de precipitación. La **erosionabilidad** del suelo (K) indica la vulnerabilidad de un suelo a la erosión, es decir, la facilidad con que se desprenden las partículas para ser transportadas.

Efectos de la erosión

El impacto de la erosión puede tener lugar:

- **En el sitio:** Disminuye el espesor del suelo, con lo que habrá menos volumen explorable por las raíces y menor capacidad de almacenamiento de agua. Muchas de las funciones del suelo se ven afectadas.
- **Fuera del sitio:** Consiste en el aporte de sedimentos (material erosionado procedente de los epipediones) a los cursos de agua, lagos, embalses y rías, que se irán colmatando. Otros efectos son: el aporte de fósforo transportado con las partículas sólidas, lo que provoca la eutrofización de las aguas; la contaminación difusa por agroquímicos; riesgo de daños en infraestructuras (cortes de carreteras o caminos, daños en edificios inundados con lodos, entre otros) y daños para la acuicultura, entre otros.

En algunos países se han establecido normas ambientales que prohíben el aporte de estiércoles a los campos que presenten un índice de escorrentía de fósforo muy alto.

Evaluación de la erosión

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica se pueden evaluar:

- En campo, ya sea en parcelas control o bien en estaciones de aforo de los ríos de una cuenca hidrográfica en la que se mida la carga sólida transportada.
- A partir de estimaciones por medio de modelos, cuyos resultados deben ser validados a partir de medidas en campo, para determinar su idoneidad para la zona en cuestión.

Entre los modelos, el más utilizado por su aparente simplicidad es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en su versión revisada (**RUSLE**) desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Renard *et al.*, 1994). Con este modelo se estiman las pérdidas de suelo por erosión por arroyaderos y en interarroyaderos (A , $Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$). Es una expresión factorial que toma en consideración factores de riesgo de la

erosión como la *erosividad de la lluvia* (R), la *erosionabilidad del suelo* (K), la *longitud e inclinación* de la pendiente (LS), la *cubierta vegetal* (C) y las *prácticas de conservación* (P). De manera que:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Existen modelos de erosión más precisos, si bien mucho más complejos de aplicar, debido a los parámetros que utilizan, de los que es difícil disponer de información en muchas áreas geográficas, por lo que requieren llevar a cabo trabajos de investigación específicos.

Posibilidades de actuación frente a la erosión

Las posibilidades de controlar la erosión residen en **proteger** la superficie del suelo con vegetación, para que no sufra los efectos del impacto directo de las gotas de lluvia y del agua de escorrentía superficial que circula vertiente abajo. En este último caso se puede **dificultar** el flujo del agua: crear irregularidades (surcos sensiblemente paralelos a las curvas de nivel); acortar el recorrido del agua segmentando la longitud de la ladera, ya sea intercalando franjas de vegetación o construyendo terrazas (canales para conducir el agua de escorrentía) u otras medidas de conservación encaminadas a frenar el agua (bancales) o a canalizar y dar salida de forma controlada al agua de escorrentía superficial (canales de desagüe encespedados).

13. OBSERVAR Y DESCRIBIR

G2. Esta zona se ha visitado después de unas intensas lluvias.

- Describa con sus propias palabras esta imagen (forma del terreno, procesos, usos, etc.).
- Formule alguna hipótesis acerca de algún posible proceso de degradación.



Taret, Argelia

J. Porta

14. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2.**
- Describa con sus propias palabras las dos imágenes indicando las diferencias entre ellas, en relación a los procesos erosivos.
 - Interprete la solución desde el punto de vista de los procesos y de las actuaciones.



J. Porta



R. M. Poch

15. ESTUDIAR E INTERPRETAR

E3. En una zona de clima mediterráneo semiárido (Túnez) se puede llegar a cultivar el olivo, si bien con una marcada vecería (no llega a producir todos los años) debido a la escasez de lluvias. Las tres imágenes corresponden a un mismo olivar, tomadas desde la cabecera a aguas abajo.

- Ordene las imágenes y describa con sus propias palabras lo que observe en relación a la degradación de este campo.
- Interprete los procesos y su dinámica.
- Analice la problemática y proponga alguna medida de control para mitigar los efectos.



J. Porta



J. Porta

16. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. El Priorato (Cataluña, España) es una región vitivinícola de renombre por la calidad de sus vinos. Observar esta imagen y comentar los efectos de las prácticas llevadas a cabo para facilitar la mecanización de las nuevas plantaciones. Este mismo enfoque es el que se ha seguido y se sigue en la región donde se produce la uva para el vino de Porto (Portugal).



Priorat, Cataluña, España.

J. Porta

17. BUSCAR INFORMACIÓN

E3. Redactar un informe acerca de los siguientes aspectos:

- a) Buscar información en Internet acerca del *Índice de Escorrentía del Fósforo*.
- b) En una ladera sin vegetación, después de una lluvia intensa se observan signos de erosión en forma de arroyaderos, ¿qué podría sugerir a quienes gestionen la finca?
 - b.1) ¿Qué se puede afirmar acerca del movimiento de los materiales en una ladera por efecto del agua de escorrentía superficial (excedente entre la lluvia caída y el agua infiltrada)?

- b.2) ¿Es esperable que el comportamiento sea el mismo cualquiera que sea la longitud de la ladera?
- c) Discutir qué relación tiene la erosión en una cuenca hidrográfica con la vida útil de un embalse en dicha cuenca.

18. DEGRADACIÓN POR EROSIÓN EÓLICA

La erosión eólica supone una **pérdida** de partículas de suelo que son transportadas por el viento y depositadas en otro lugar. Los suelos arenosos son poco coherentes, por lo que son muy susceptibles a este tipo de erosión. Pueden tener lugar por dos tipos de procesos: **deflación** (eliminación y transporte de partículas, creando grandes nubes de polvo) y por **abrasión** (el viento puede ir cargado de partículas que producirán desgaste en aquello con lo choquen). Se presenta principalmente en zonas de climas áridos, semiáridos y desérticos, en suelos sin vegetación y estructura superficial débil.

19. OBSERVAR E INTERPRETAR

- G2. a) Describa con sus propias palabras la imagen.
- b) Comente el proceso y la actuación realizada.



Cádiz, España.

J. Porta

20. INTERPRETAR INFORMACIÓN

E3. a) Con un enfoque holístico, elabore el modelo DPSIR, buscando información complementaria en Internet, referente al siguiente caso y redacte un informe a presentar en público.

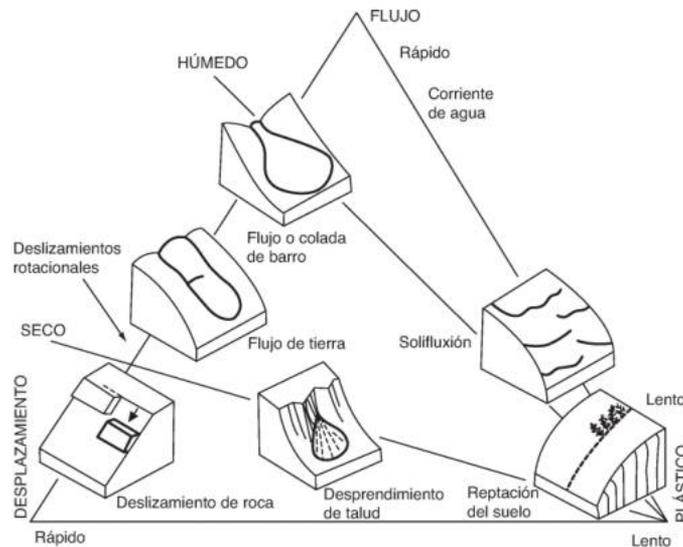
- El estudio de los períodos de sequía a lo largo del siglo XX ha puesto de manifiesto que determinadas zonas del planeta sufren sequías periódicas. Se ha observado la existencia de series de años lluviosos en los que la región es verde y productiva, alternando con series de años de sequía, con secuencias aproximadas de 7 a 10 años, en los que las lluvias están muy por debajo de las medias. La población no puede soportar esta situación de sequía.
- En aquellos períodos en los que las precipitaciones son relativamente más altas se observan dos fenómenos, por un lado una atracción de nuevos pobladores y, por otro, las tierras de cultivo aumentan, ya sea por la transformación de pastos a tierras de labor o bien por extender el cultivo a tierras marginales anteriormente abandonadas.

- Los suelos de praderas que cuentan con mayor humedad no sufren deterioro por erosión, cuando las lluvias caen por debajo de la media.
 - El cultivo deja desnudos los campos durante alguna parte del año, frente a lo que ocurría anteriormente, cuando en la zona predominaban las praderas; la estructura del suelo y el contenido de materia orgánica tenderán a disminuir, siendo mayor el efecto en suelos más arenosos.
 - La Primera Guerra Mundial hizo que en Europa la producción agrícola disminuyera drásticamente y que, hacia 1914, la demanda de trigo en Estados Unidos fuese muy alta, lo que hizo aumentar los precios, coincidiendo con una secuencia de años de lluvias por encima de la media, lo que se mantuvo hasta 1931 en EE.UU., en que se inició una serie de años de sequía, cuya intensidad superó la de años anteriores. En 1940 la lluvia volvió de nuevo y en 1950, la sequía.
 - En 1929 se produjo la gran depresión americana, que se refleja en la película de Elia Kazan titulada *Esplendor en la Hierba*. El país requería de la producción agrícola para poder superar la crisis industrial y de la bolsa.
 - En 1933 tuvieron lugar en Estados Unidos unas importantes tormentas de polvo a partir de los suelos de la zona agrícola, tormentas a las que se dio el nombre de *Dust Bowl*. La zona origen de la erosión eólica se hallaba situada en los Estados de Colorado, Kansas, Oklahoma, Texas y New Mexico y se llegaron a sentir sus efectos hasta la ciudad de Washington. Se formaron dunas. Hubo miseria y la población sufrió serias penalidades. El éxodo de agricultores fue masivo.
 - En 1935 se creó en Washington el *Soil Conservation Service (SCS)* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), legislándose la creación de distritos de conservación de suelos, para proporcionar a los agricultores asistencia y conocimientos técnicos.
 - En 1945 tras estallar la Segunda Guerra Mundial, la producción agrícola norteamericana y argentina fueron necesarias para atender la demanda de trigo (Información obtenida en parte de Dasman, 1984).
- b) Indique qué medidas es probable que se implementasen en la zona de la *Dust Bowl* a la segunda mitad de la década de 1930 y en los suelos más idóneos para la agricultura. Establezca algunas conclusiones acerca de lo aprendido con esta experiencia del pasado.
- c) Con los antecedentes anteriores, busque información para poder interpretar la degradación de suelos y la crisis y las hambrunas en el Sahel en los años 1970.

21. DEGRADACIÓN POR MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa hacen referencia al desplazamiento de grandes cantidades de material (masas no consolidadas, fragmentos de rocas, suelos o materiales resultantes de la meteorización) a lo largo de una ladera, debido a la acción de la gravedad, al superar a las fuerzas de resistencia interna del material.

Se han establecido distintos tipos de movimientos en masa según que el desplazamiento sea **rápido** (deslizamiento rotacional) o **lento** (reptación del suelo, solifluxión); en **seco** (deslizamiento de rocas) o en **húmedo** (colada de barro); afecte a **partículas** o a **bloques**.



22. ANALIZAR Y ESTRUCTURAR

G2. Aplicar el modelo DPSIR de la OCDE para establecer el ciclo causa–efecto, ordenando los siguientes componentes e indicando cuáles corresponden a cada causa o efecto:

- Erosión del suelo por arroyaderos e interarroyaderos de alta intensidad.
- Entra Vietnam en el mercado internacional del café.
- La población emigra a la ciudad.
- Cae el precio del café.
- Disminuye el cuidado de los campos y la restitución de nutrientes.
- Aumenta el paro.
- Respuesta.

Abrir un debate y discutir el interés y la importancia de promover un programa de una Agencia Internacional para el control de la erosión para resolver el problema social de la zona.

23. DEGRADACIÓN POR DISMINUCIÓN DE LA FERTILIDAD

Al hablar de fertilidad de un suelo debe diferenciarse la **fertilidad física**, vinculada a propiedades físicas (estructura, aireación, sellado y encostramiento, compactación, disponibilidades de agua, entre otras) y **fertilidad química**, que hace referencia a la disponibilidad de nutrientes. Centrándonos en esta última, cabe destacar que las extracciones de las cosechas deben ser compensadas de algún modo, de lo contrario el estado de fertilidad del suelo irá disminuyendo.

En zonas tropicales se ha acuñado la expresión *minería del suelo* o *cultivo de rapiña*, para expresar la extracción progresiva de nutrientes del suelo a través de las cosechas, sin reponerlos mediante fertilizantes. Ello conduce a un agotamiento de las reservas en el suelo y a la disminución progresiva de los rendimientos. La agricultura itinerante de roza–tumba–quema pretende evitar este problema, al ir utilizando sucesivos emplazamientos con un ciclo de varios años.

Los niveles de fertilidad de los suelos se pueden evaluar por medio de análisis químicos, por la caída de los rendimientos a valores muy alejados de los potencialmente esperables, y por la presencia de especies adventicias indicadoras. En África, por ejemplo, se puede utilizar como indicadora de baja fertilidad de los suelos la presencia de la adventicia *Striga sp.* (hierba bruja). En Mallorca, la presencia de *Ampelodesmos mauritanica* es un signo de degradación, deforestación y fuegos (Vadell, com. personal).



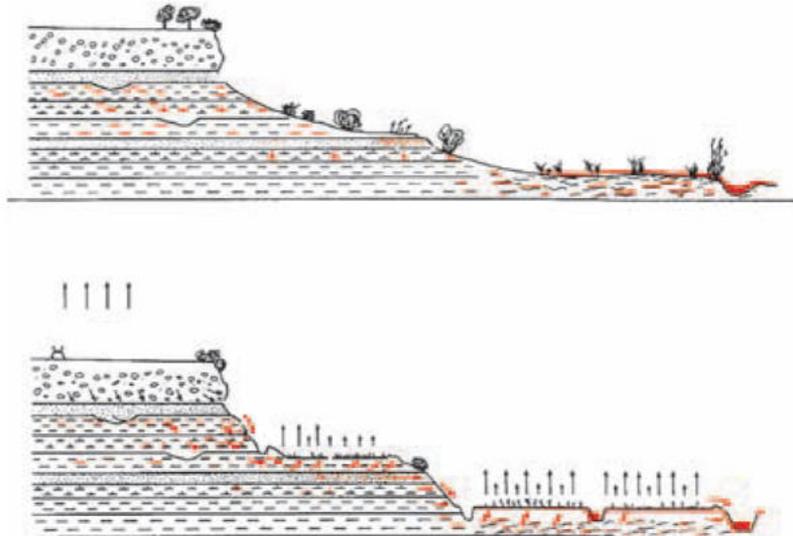
La disminución de la fertilidad hace que se abandone el cultivo, lo que favorece los procesos de erosión laminar que ponen al descubierto un horizonte cementado por óxidos de hierro (horizonte petroplíntico^{WRB}), lo que degrada todavía más el área. Togo. (R. M. Poch).

24. DEGRADACIÓN POR SALINIZACIÓN

La salinización consiste en un aumento de la concentración de sales más solubles que el yeso, principalmente: NaCl , Na_2SO_4 , MgCl_2 , MgSO_4 , lo que afecta a la composición de la solución exterior a la doble capa difusa. Las sales, al ser translocadas a la parte superior del suelo por ascenso capilar en determinadas épocas del año, se depositan en la superficie del suelo y dan lugar a eflorescencias pulverulentas de color blanco y sabor salado (Na^+) o amargo (Mg^{2+}). Se debe asociar a una degradación únicamente cuando tiene un origen antrópico.

El riego continuado con aguas de mala calidad y sin prever una fracción de lavado y el correspondiente drenaje puede provocar una degradación del suelo por acumulación de sales, induciendo su salinización, que afectará a la nascencia, crecimiento y rendimiento de los cultivos. Por otro lado, el vertido de aguas salinas en zonas petrolíferas puede salinizar los suelos afectados; así como el riego con agua en cuya depuración se haya utilizado polielectrolitos que contengan sodio.

En algunas zonas semiáridas, áridas, en marismas y llanuras costeras, los suelos salinos pueden ser el resultado de procesos naturales, constituyendo ecosistemas cuya preservación puede resultar altamente recomendable por sus valores paisajísticos y de biodiversidad.



Los suelos de las distintas posiciones topográficas se hallan relacionados, existiendo entre ellos una transferencia de flujos y materias de partes altas a las más bajas. En el caso de la figura hay transferencia de agua con sales disueltas.

R. Rodríguez

25. DEGRADACIÓN POR SODIFICACIÓN

La sodificación es un proceso por el cual tiene lugar un incremento del porcentaje de sodio en las sedes de intercambio. Afecta a la composición de la doble capa difusa. Se evalúa por medio del ESP, considerando que un suelo tiene problemas de sodicidad cuando el $\text{ESP} > 15\%$.

El sodio intercambiable, incluso a valores inferiores a un 15%, especialmente si el suelo no contiene carbonato cálcico, produce una degradación de la estructura. En suelos sódicos el movimiento del agua en el suelo será muy lento. Las raíces tendrán dificultades en crecer por la mala estructura y el sodio puede resultar tóxico para algunas plantas.

26. OBSERVAR E INTERPRETAR

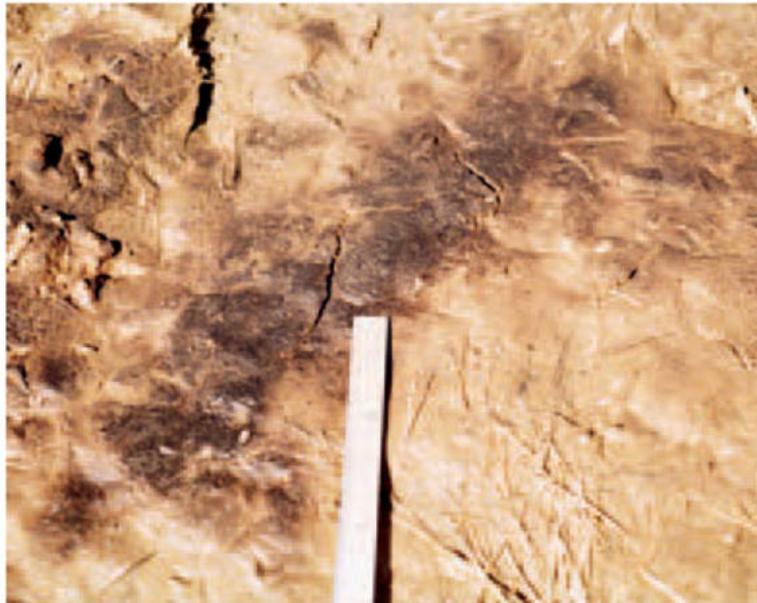
G2. a) Describa con sus propias palabras las imágenes.

b) Formule alguna hipótesis acerca de qué puede ser y cómo puede haberse formado lo que se observa en la superficie de estos suelos.



Alicante (España).

J. Porta



Llanura Indogánica (India).

J. Porta

27. DEGRADACIÓN POR ACIDIFICACIÓN

La acidificación es un proceso natural, que puede verse intensificado por: una elección inadecuada de fertilizantes de reacción ácida, como los amoniacales y la urea; por la fijación biológica de nitrógeno; por la extracción de cationes basificantes por parte de los cultivos, con liberación de protones por intercambio con la raíz; y por lluvias ácidas. No debe olvidarse la capacidad tampón del suelo frente a cambios de pH, para interpretar correctamente los posibles efectos de alguno de estos procesos.

Los suelos que contienen pirita (suelos de sulfatos ácidos o las escombreras de minería de carbón) pueden dar lugar a aguas de drenaje ácidas, pudiendo provocar efectos medioambientales importantes en los cursos de agua y lagos en los que lleguen estas aguas.

Los suelos ácidos pueden ser el resultado de procesos naturales en zonas húmedas templadas o tropicales, constituyendo ecosistemas naturales.

28. DEGRADACIÓN POR INUNDACIONES

La llegada ocasional de agua a un suelo con mal drenaje hace que los poros se llenen de agua y quede anegado durante un cierto tiempo. Ello afectará, por un lado, al número de días disponibles para poder realizar labores de cultivo (labrar o entrar con maquinaria) y, por otro, dependiendo del número de días que dure la inundación, las plantas sufrirán estrés por falta de oxígeno, pudiendo llegar a morir y perderse la cosecha. Si se trata de una ladera, al morir las plantas y quedar el suelo desnudo, será más susceptible a la erosión. Con períodos de inundación prolongados se pueden producir procesos de reducción, con posible formación de productos tóxicos. Los suelos anegados durante períodos largos pueden producir y liberar a la atmósfera metano, gas de efecto invernadero.

El encharcamiento puede presentarse igualmente en perímetros regados, en los que no se haya previsto un sistema de drenaje, con lo que puede favorecerse los procesos de salinización. No obstante, el encharcamiento de los campos puede resultar beneficioso en algún caso, como en el cultivo del arroz.

29. OBSERVAR E INTERPRETAR

G2. Estudiar esta imagen y formular algunas hipótesis.

- Describir la forma de paisaje y el aspecto de los melocotoneros.
- ¿Qué puede haber pasado?



J. Porta

30. DEGRADACIÓN POR CONTAMINACIÓN

La contaminación de un suelo se produce cuando hay un incremento en la concentración de una o varias sustancias potencialmente tóxicas, ya sean minerales (metales pesados: Pb, Hg, Cd, Cu, Cr, Se, As y sus compuestos; materiales radioactivos; asbestos; y otros materiales peligrosos) u orgánicas (xenobióticos: fitosanitarios, dioxinas, hidrocarburos, plásticos, aceites, alquitrán, etc.), procedentes de actividades humanas. La fuente de contaminación procede de residuos industriales, fangos, derrames de petróleo, cenizas industriales, residuos de agroquímicos, entre otros.

Si se conoce la fuente del contaminante se habla de contaminación puntual, mientras que si se desconoce el origen, se tratará de una contaminación difusa, mucho más difícil de resolver.

Los efectos de la degradación dependerán de la naturaleza de los contaminantes, pudiendo interferir con los procesos químicos y biológicos normales en el suelo, con riesgo de que los elementos contaminantes pasen a la cadena trófica, o haya riesgos por contacto directo con suelos que los contengan. Por ello se hace necesario de disponer y utilizar vertederos controlados, situados en sitios adecuados por su geología, distancias a núcleos habitados y por contar con un consenso social.

31. DEGRADACIÓN POR EMPOBRECIMIENTO EN MATERIA ORGÁNICA

Los criterios para la reposición de nutrientes se han basado durante muchos años en la teoría de la fertilidad desarrollada por Liebig, que propugnaba el uso de los fertilizantes minerales de síntesis. Este es el enfoque en el que se ha venido basando la agricultura comercial intensiva para conseguir altos rendimientos de los cultivos. Este planteamiento hace que se haya prestado poca atención a la materia orgánica, un componente que, si bien es muy minoritario en la gran mayoría de los suelos, desempeña un papel de gran importancia en la calidad y comportamiento de los suelos (propiedades físicas, químicas y biológicas, la disponibilidad de nutrientes y actividad biológica).

EMPOBRECIMIENTO EN MATERIA ORGÁNICA

Hace referencia a la disminución del contenido de materia orgánica del suelo (MOS), medida a lo largo de un período de tiempo de varios años.

La disminución de contenido de MOS tiene efectos sobre el propio suelo y repercusiones medioambientales a escala global sobre el secuestro de carbono, la biodiversidad, la pérdida del suelo por erosión y la desertificación.

Las iniciativas encaminadas a disminuir el uso de fertilizantes de síntesis química proponen sustituirlos con aportes de materia orgánica. Estos enfoques requieren conocer los contenidos de nutrientes asimilables en el suelo, así como una adecuada comprensión de los mecanismos en los que se ven implicados los nutrientes en el suelo, la forma en la que son absorbidos por las raíces y las cantidades requeridas según sea el rendimiento objetivo. A partir de ahí se podrá lograr un suministro equilibrado de nutrientes, de manera que se aseguren las disponibilidades de alimentos a la población y unos rendimientos económicamente interesantes. Por otro lado, el incremento de materia orgánica mejora la estructura del suelo, con lo que disminuye el riesgo de erosión.



La agricultura ecológica, así como la agricultura sustentable, se plantean recuperar como una buena práctica agrícola el aporte de estiércol, como fuente de materia orgánica para restituir total o parcialmente la fertilidad del suelo y mejorar su estructura, aspecto poco tenido en cuenta por la agricultura intensiva (Madremanya, Cataluña, España).
J. Porta – N. Teixidor

32. DEGRADACIÓN POR DESTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura es una propiedad que incide sobre la calidad del suelo, al conferirle aptitud para desarrollar un conjunto de funciones: crecimiento de las raíces, desarrollo de los cultivos, entrada, almacenamiento y movimiento del agua, ciclo del C y de los nutrientes, dispersión de agroquímicos, hábitat biológico, entre otras. En sentido amplio, la estructura afecta a la compactación, sellado y encostramiento superficiales, densidad aparente, aireación, susceptibilidad a la erosión y, en general, a lo que se conoce como fertilidad física del suelo.

En la degradación de la estructura existen relaciones causales:

Actividad biológica → mezcla de la m.o. y materia mineral → favorece la estructura

Manejo → aporte/oxidación de la materia orgánica → incide sobre la estructura

Riego → aumento del ESP → inestabilidad de la estructura si el agua aporta sodio

Tráfico → compactación → destrucción de la estructura

Unas acciones tienen efectos positivos, otras pueden dar origen de la degradación de la estructura. Al estudiar el riesgo de degradación de la estructura habrá que tener en cuenta:

ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Capacidad del suelo para mantener la organización de las partículas individuales unidas y el espacio de huecos, cuando el suelo es sometido a presiones, como ocurre cuando se humecta de forma repentina un agregado debido a la lluvia (lo que puede provocar su explosión por la presión del aire atrapado); al labrarlo demasiado húmedo o por favorecer la mineralización de la materia orgánica.

RESILIENCIA DE LA ESTRUCTURA

Capacidad del suelo para recuperar la forma de sus agregados de forma natural cuando las fuerzas aplicadas disminuyen o desaparecen. Al irse secando el suelo de nuevo tras una lluvia o al poco de haberlo labrado se recomponen los agregados estables.

VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

Incapacidad de los agregados para superar la presión a la que han estado sometidos. Refleja la combinación de estabilidad y resiliencia.

33. DEGRADACIÓN POR COMPACTACIÓN

La compactación altera la estructura provocando un aumento de la densidad aparente y una disminución de la porosidad, especialmente de macroporos. La causa generalmente es la presión ejercida por el tráfico de maquinaria o el paso del ganado cuando el suelo está demasiado húmedo. En este estado el agua disminuye la fricción entre las partículas y facilita su movimiento y empaquetamiento. Análogamente, el labrar de forma continuada a una misma profundidad produce la compactación de la capa en la que se apoya el arado, dando lugar a una **suela de labor**.

En el caso en que se vea afectada la microporosidad, el proceso de compactación será difícilmente reversible, al igual que si la compactación afecta a horizontes subsuperficiales, ya que las posibilidades de actuar son mucho más limitadas. La resiliencia en relación a la compactación de los horizontes subsuperficiales es muy baja.

Estos cambios disminuyen la permeabilidad del suelo al agua y al aire; alteran el modelo de crecimiento de las raíces, que explorarán un menor volumen, por lo que dispondrán de menor cantidad de agua y nutrientes; disminuye el hábitat de los microorganismos; aumentará la escorrentía superficial y con ello el riesgo de erosión, por consiguiente, la compactación hace que la calidad del suelo empeore.

Para **evaluar la compactación** se puede determinar la densidad aparente, si bien no ha sido posible establecer un valor umbral a partir del cual se pueda afirmar que hay compactación. En el campo resulta posible identificar cambios en la dirección de crecimiento de las raíces al encontrar un horizonte o una capa compactados; observar la presencia de una suela de labor debida al peso y paso repetido del arado (dentro de los 30 primeros centímetros, por lo general); y pueden existir bolsas de anoxia en suelos húmedos (Batey y McKenzie, 2006). Para eva-

luar la compacidad de un horizonte se realiza un ensayo de consistencia que consiste en intentar introducir la punta del cuchillo. Para medidas cuantitativas se puede utilizar un penetrómetro, en cuyo caso un valor umbral de referencia es el de 1,2MPa.



Suela de labor.

Cortesía del NRCS-USDA

Las raíces, no obstante, pueden presentar un **crecimiento radicular compensatorio** en otra parte no compactada del mismo suelo, con lo que el proceso de compactación puede quedar enmascarado, al no verse afectados los rendimientos de los cultivos.

34. DEGRADACIÓN POR SELLADO Y ENCOSTRAMIENTO

El sellado superficial del suelo implica la formación de una capa delgada, de unos pocos mm de espesor (5 a 10) en la superficie del suelo. Se forma por impacto de las gotas de lluvia, natural o de un aspersor, sobre un suelo desnudo, con estructura inestable. El sello presenta una densidad aparente alta, baja porosidad, generalmente no comunicante. Al secarse el sello da lugar a una costra superficial de estructura laminar, baja porosidad y muy compacta.

El sellado provoca una menor infiltración, con lo que aumentará el volumen de agua de escorrentía superficial en suelos en pendiente y producirá charcos en los llanos. El suelo almacenará menos cantidad de agua. En suelos de regadío produce un retardo en la entrada de agua, lo que obliga a realizar riegos más frecuentes con menores dosis.

El encostramiento provoca un endurecimiento de los primeros milímetros del suelo, lo que puede resultar suficiente para dificultar la emergencia de las plántulas y la nascencia, con lo que disminuirá el rendimiento o habrá que volver a sembrar.

35. DEGRADACIÓN POR SELLADO POR OCUPACIÓN PERMANENTE

El sellado por ocupación permanente se refiere a la ocupación de suelo con construcción de edificios, infraestructuras lineales, u otros, lo que inutiliza el suelo como interfase que permita el crecimiento de las plantas. Por ello, constituye la mayor amenaza para el suelo. Dado que este tipo de infraestructuras suponen costes muy elevados, siempre es posible pagar precios elevados para indemnizaciones, sin tener en cuenta que se puede estar provocando una pérdida irreversible de suelos de muy buena calidad. Para evitarlo, se requiere disponer de información cartográfica detallada de suelos, para conocer la localización de los suelos a preservar por su calidad, y una sensibilidad social que oriente los planes de ordenación territorial.

36. ANALIZAR Y DIAGNOSTICAR

E3. Estudiar y redactar un informe sobre los siguientes aspectos a partir de las dos imágenes que se adjuntan:

1. En un campo cuyo aspecto es el de la figura, se han tomado muestras a distintas profundidades del suelo, se han eliminado los elementos gruesos y se ha introducido cada una de las muestras en un tubo de ensayo, añadiendo agua desmineralizada para realizar un extracto. Se agita y se filtra. A cada uno de los extractos obtenidos se añaden unas gotas de nitrato de plata que da lugar a un precipitado blanco, que con el tiempo se oscurece.
 - a) Describa con sus propias palabras el aspecto del campo de cultivo y formule alguna hipótesis.
 - b) Contraste la hipótesis con el resultado del ensayo de campo que se muestra en la segunda figura.
 - c) ¿Presenta algún tipo de degradación este suelo?
 - d) ¿Si se hubiese añadido BaCl_2 qué se hubiese querido detectar?



J. Porta

(1) precipitado

(2) al cabo de algunos minutos

2. El riego con un pívot produce la formación de un sello y una costra superficial.
 - a) Explicar los procesos químicos y físicos que intervienen en la formación de la costra.
 - b) Efectos que puede tener.
 - c) Indicar si mejoraría la situación aumentando el contenido de sodio intercambiable a un valor del 18% en el epipedión.
 - d) Propuesta de posibles soluciones.

37. DESERTIFICACIÓN

La Conferencia de las Naciones Unidas contra la Desertificación (UNCCD) que tuvo lugar en Nairobi en 1977 generalizó el uso del término desertificación.

DESERTIFICACIÓN

Conjunto de procesos de degradación (erosión, compactación, pérdida de vegetación, etc.) de origen antrópico, que expresa la disminución o destrucción del potencial biológico y de la productividad primaria (biomasa, fertilidad del suelo, rendimiento de los cultivos, capacidad de carga ganadera y biodiversidad) en regiones áridas, semiáridas que, en casos extremos, puede conducir a condiciones de desierto.

La desertificación disminuye la resiliencia del suelo, se producen cambios en el ciclo hidrológico y cambios a condiciones más áridas. La desertificación es la última etapa de degradación de un territorio y conlleva riesgo para la salud y una disminución del bienestar humano, con enormes costes sociales. Con un **enfoque holístico** se puede afirmar que la desertificación afecta a la **seguridad nacional**, en tanto que hace disminuir la seguridad (suficiencia) alimentaria; y a la **estabilidad internacional**, ya que está en el origen de muchos conflictos armados y fenómenos migratorios, al verse obligada la población de tierras degradadas a desplazarse a otras en busca de sustento.

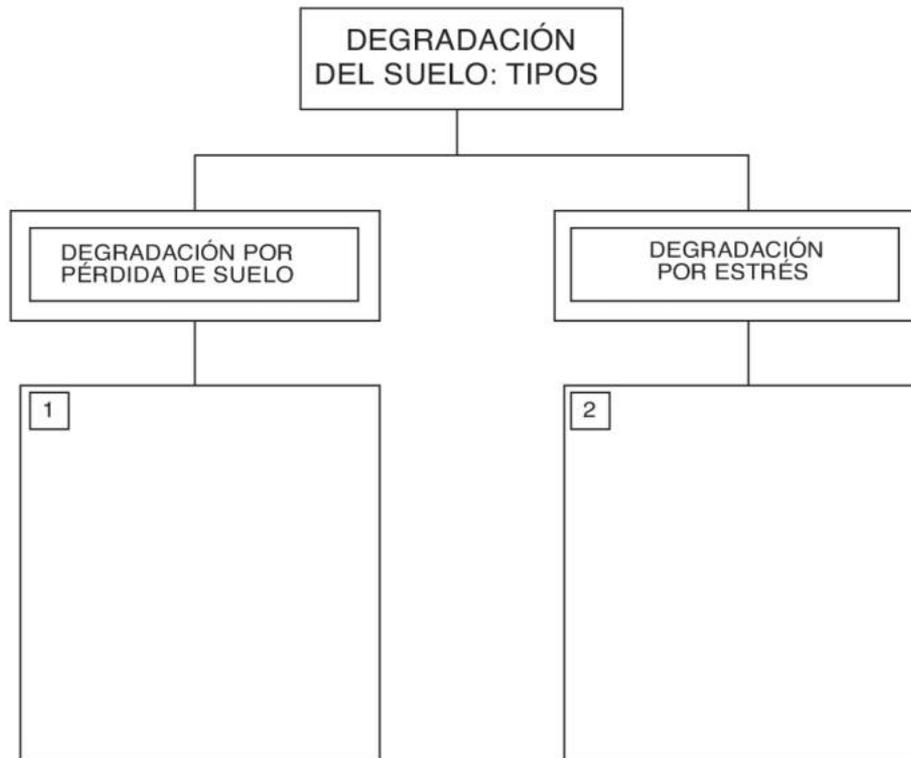
38. ANÁLISIS DE UNA SITUACIÓN

E3. 1. Buscar información en Internet para preparar un informe en el que se analicen las actuaciones de Naciones Unidas en materia de desertificación con la UNCCD, el PNUMA y otros programas, así como la necesidad de un enfoque holístico y no sectorial en el tratamiento del problema. Explicar lo más relevante, cuál es su significación, implicaciones sociales, económicas y de seguridad a escala global. Utilizar el modelo DPSIR en casos concretos.

2. Para comparar el estado de las cuencas hidrográficas de dos países diferentes, se le pide que realice un estudio comparado de los efectos que puede haber tenido a largo plazo el hecho que en uno de ellos se promulgase a mediados del siglo XIX una legislación para prevenir la deforestación de las zonas de montaña y de monte, mientras que en la otra no se hiciese. Abrir un debate como juego de rol.

39. BUSCAR INFORMACIÓN

A1. Completar el siguiente esquema conceptual y establecer las definiciones.



40. SOSTENIBILIDAD/SUSTENTABILIDAD

El concepto de **desarrollo sostenible** (sustentable) surge de los trabajos de la Comisión Brundtland de las Naciones Unidas (1989): desarrollo cuyas demandas están dentro de las aptitudes de los suelos y el medioambiente y que, por ello, no producen degradación.

El concepto de **sostenibilidad** (sustentabilidad) lleva implícitos los principios de equidad inter e intrageneracional: cubrir las necesidades de la población actual sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

Los planteamientos de un desarrollo sostenible/sustentable se proponen alcanzar de forma simultánea los siguientes **objetivos**:

- Satisfacer las necesidades alimentarias: mantener y aumentar la producción y servicios.
- Asegurar la calidad de los alimentos: disminuir los riesgos.
- Proteger la calidad de los recursos naturales.
- Prevenir la degradación de la calidad de los suelos y aguas.
- Ser económicamente viable.
- Constituir un modelo de desarrollo socialmente aceptable.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) tiene una división legislativa que asesora en materia medioambiental y de sostenibilidad/sustentabilidad a los países cuyos gobiernos lo requieren.

41. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN

- E3.** a) Buscar en Internet indicadores físicos e indicadores biológicos de la desertificación y analizar cómo la describen y qué posibilidades hay de disponer de información para determinarlos. Consultar en Internet los objetivos de la *UN Conference on Desertification* que tuvo lugar en Nairobi en 1977 y otras acciones de las Naciones Unidas en relación a la degradación del territorio.
- b) Acceder por Internet a la Directiva Europea de Protección de suelos presentada al Parlamento y a la Comisión europea en noviembre de 2006. Estudiarla y plantear un esquema conceptual para resumirla y poderla exponer más fácilmente en público.

42. UTILIZACIÓN DE INDICADORES

E3. Una ONG dedicada a proyectos de desarrollo en una zona del Sahel se está planteando seleccionar áreas para invertir en programas de lucha contra la degradación del suelo. A continuación figura una relación de variables que pueden ser utilizadas, tanto solas como combinadas, como indicadores para la gestión del proyecto.

- a) Clasificar las variables susceptibles de ser indicadores según el esquema PSR, poniendo cruces en el cuadro según su importancia, y proponer otras diferentes.

	Indicador de presión	Indicador de estado	Indicador de respuesta
Densidad o carga ganadera			
Contenido de materia orgánica del suelo			
Profundidad enraizable del suelo			
Susceptibilidad del suelo al encostramiento frente a lluvias intensas			
Rendimiento del cereal			
Espesor del horizonte O			
Incremento de rendimiento de cultivos al aplicar fertilizante			
Potencial de producción de biomasa			
Distancia a vías de comunicación			
Erosión laminar (Mg/ha) al eliminar la vegetación superficial			
Densidad de población			
Acidez del suelo			
Necesidades de agua de los cultivos			
Densidad aparente del suelo			
Distancia a las fuentes de agua			
Presencia de minas antipersona			
Diferencia de producción al poner en regadío			
Densidad de regueros en campos de cultivo tras las lluvias			
Respuesta al encalado			
Porcentaje de arena fina y limo en el horizonte superficial			
Previsión de evolución del índice de natalidad			
Turbidez del agua de los ríos (g sedimento/L)			
Existencia de escuelas y de ambulatorios			

- b) El objetivo es realizar una asignación de los recursos disponibles para lo que hay que seleccionar áreas degradadas que, con la mínima inversión, puedan mejorar su capacidad para producir alimentos. Proponer un indicador de cada tipo, utilizando las variables anteriores, solas o combinadas, y discutir su utilidad según los criterios de selección de indicadores.

43. ACTUACIONES SOBRE EL TERRITORIO Y SUSTENTABILIDAD: ALGUNOS CASOS

Existe una sensibilidad social creciente en relación con la necesidad de proteger los suelos, para que no se degraden y que, en aquellos casos en que una actuación implique una alteración del suelo, se prevean medidas correctoras para rehabilitarlo y evitar que la zona quede en un estado de degradación. Se estudiarán algunos ejemplos en obras de urbanización, jardinería, minería a cielo abierto y concentración parcelaria.

Capaceo

El capaceo es una técnica preventiva, cuyo objeto reside en hacer posible el beneficiarse de las cualidades del material edáfico para el crecimiento de las plantas, una vez acabada una actividad que ha tenido que afectar a la superficie del suelo: urbanizaciones, minería a cielo abierto, entre otras.

CAPACEO

Consiste en retirar la capa superficial correspondiente al suelo (material edáfico), evitando que se mezcle con el material subyacente (menos favorable, por lo general, para el crecimiento de las plantas), al hacer un movimiento de tierra, una excavación, una nivelación o, simplemente, la ocupación parcial de una superficie de terreno, previsto ajardinar el resto.

El material edáfico deberá ser reservado mientras dure la actividad, apilándolo sin compactarlo y dejando que sea invadido por vegetación espontánea e incluso sembrándolo, para que no se deteriore su calidad. Este material posee una biodiversidad importante que favorecerá la implantación de vegetación espontánea en espacios naturales en los que se haya actuado.



Previamente a proceder a abrir una nueva calle se retiró el material edáfico (capaceo), reservándolo, tal como aparece apilado en forma de artesa invertida, para redistribuirlo posteriormente en las zonas a ajardinar (Lleida, Cataluña, España).

J. Porta

Rehabilitación de suelos en zonas de minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto se generalizó a partir de los años 1970, momento en que se dispuso de maquinaria adecuada para arrancar el material de cobertera y poder realizar grandes movimientos de tierras para acceder al recurso objeto de la explotación. Este tipo de minería provoca impactos de diferentes tipos, uno de ellos son las grandes cicatrices en el territorio que deben ser objeto de rehabilitación una vez acabada la actividad. En relación con el suelo, debe practicarse el capaceo, evitando mezclar el material edáfico con los estériles. Este material contiene semillas de plantas autóctonas de la zona que, por lo general, no se comercializan, por lo que el capaceo favorecerá que se recupere la vegetación que existía antes de la actuación.



*Perfil de un suelo rehabilitado (Cotobello, Asturias, España).
J. Porta.*



Degradación de una escombrera de carbón al no haber diseñado medidas eficientes de control de la erosión. Barcelona, Cataluña, España.

La rehabilitación de una escombrera de carbón explotado a cielo abierto, habiendo realizado un capaceo previamente a la abertura de las fosas para extraer el carbón (Cotobello, Asturias, España) permite redistribuir el suelo encima de los estériles lo que unido a un clima húmedo hacen posible el crecimiento de una pradera a base de trébol, que era la función-objetivo planteada por los ganaderos de la zona, al ceder sus tierras para que se procediese a la extracción del carbón.

Actuaciones en concentración parcelaria

Para poder llevar a cabo actuaciones en concentración parcelaria con una base científica, que supere el mero empirismo, se requiere disponer de información de los suelos de la zona a concentrar. A partir del mapa detallado de suelos se puede realizar la evaluación de suelos, aplicando criterios objetivos, que servirá para realizar la distribución de las nuevas parcelas, con las correspondientes compensaciones superficie-calidad del suelo.

En aquellos países que disponen de información de suelos, pueden integrarla en un SIG y realizar la concentración parcelaria con este enfoque. Así por ejemplo, en Alemania, donde, además, se implementan medidas de conservación de suelos y aguas al diseñar la forma y tamaño del nuevo mapa parcelario.



Concentración parcelaria llevada a cabo con información de las clases de suelos existentes en la zona a concentrar e implementado medidas de conservación de suelos y aguas. Se puede observar como se corta la longitud de la ladera por medio de una franja permanente de vegetación natural, lo que hace disminuir la velocidad del agua de escorrentía superficial y se le puede dar salida de forma controlada no erosiva (Alemania). J. Porta

Técnicas de bioingeniería

Las laderas de pendiente pronunciada son muy susceptibles a la erosión hídrica. Al actuar sobre estas superficies existe un momento especialmente crítico, que coincide con el de acondicionamiento del suelo para proceder a la siembra o a la plantación. Para evitar la erosión del suelo hay que protegerlo temporalmente, por un lado del impacto directo de las gotas de lluvia y, por otro, de la escorrentía superficial, en las etapas iniciales de establecimiento de la vegetación.



Ajardinamiento en ladera utilizando un geotextil que protegerá el suelo de forma temporal contra la erosión, mientras se establece la vegetación. En unos tres años el geotextil se biodegrada, siendo ya innecesaria su protección en aquel momento (Lleida, Cataluña, España). J. Porta.

Las técnicas de bioingeniería consisten en tratamientos puntuales de taludes y cauces artificiales. Utilizan materiales inertes, combinados con vegetación para su estabilización e integración en el medio. Sus objetivos son variados en función del tipo de obra y de los condicionantes del medio: protección del suelo frente a la erosión hídrica, estabilización mecánica de los taludes o mejora del drenaje.

Hay distintos tipos de técnicas: mantas antierosivas de geotextiles y materiales orgánicos (yute, esparto y fibras sintéticas), bloques celulares, setos, fajinas, acondicionadores de suelo, y técnicas de hidrosiembra, entre otras.

44. BUSCAR INFORMACIÓN

Consiga información sobre los siguientes tipos de actuaciones en bioingeniería:

Hidrosiembra de fibra corta, manta antierosiva, manta de polietileno, acondicionador PAM, fajinas, diques filtrantes.

45. CALCULAR Y EVALUAR

E3. Como técnico/a de una empresa dedicada a la revegetación de espacios afectados por obras públicas, tiene que evaluar productos de bioingeniería contra la erosión: mantas de fibra natural, acondicionadores de suelo y algunos geotextiles. A tal efecto, instala unos ensayos en unos taludes de autopista con cajas colectoras de sedimentos sólidos al pie del talud y al cabo de 4 meses mide la erosión en cada tratamiento. A partir de dichos datos y del precio unitario de cada tratamiento:

- Deduzca un índice teórico de calidad-precio, considerando que la calidad está en función de la reducción de la erosión.
- Proponga una solución en relación al producto o tratamiento que se tendría que utilizar en función de dicho índice. Comentar el resultado.

Tratamiento o producto	Erosión total tras 4 meses (Mg ha ⁻¹)	Coste (€/m ²)	Índice de calidad
Mulch de fibra de celulosa	0,38	1	
Estabilizante	0,17	3	
Manta de polietileno	0,25	15,3	
Hidrosiembra	0,13	7,5	

46. OBSERVAR Y COMPARAR

G2. Estudiar estas imágenes que tienen paralelismos claros.

- Describa con sus propias palabras lo observado en cada imagen.
- Interprete los procesos que pueden haber tenido lugar.
- ¿Qué consecuencias se pueden extraer acerca del uso del suelo y los procesos de degradación del territorio?



J. Porta

47. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Después de haber revisado las explicaciones de clase y haber estudiado los contenidos, seleccione el término que mejor encaje en el contexto, de entre los cuatro propuestos:

La mejora de las tierras (ing. land) (1) _____ algo a llevar a cabo cuando algún tipo de degradación haya tenido lugar, sino que (2) _____ mucho más útiles los planteamientos (3) _____: protección, mejora y conservación de suelos, para evitar que éstos se degraden. Las rehabilitaciones de terrenos degradados resultan en muchos casos económicamente (4) _____. La degradación del suelo implica una pérdida de (5) _____, muchos de los procesos de degradación tienen lugar de forma espontánea en la naturaleza, si bien las actividades humanas –usos agrícolas, industriales y urbanos del territorio– pueden acelerarlos, por lo que deben ser tenidos en cuenta sus posibles efectos para proteger los suelos frente a ellos. Dado que ello requiere conocimientos, asistencia técnica y puede que inversiones, la degradación de las tierras constituye uno de los mayores problemas de los países menos desarrollados, poniendo en peligro su (6) _____. Uno de los daños ambientales más importantes en estos países puede ser la (7) _____ incontrolada e injustificada, debiendo estudiar y asesorar acerca de cuánta deforestación es todavía permisible en determinadas condiciones, sin llegar a superar la (8) _____ del medio. La extensión o el desplazamiento de las actividades agrícolas a suelos marginales de mala calidad o a suelos degradados constituye una solución (9) _____, debiendo el agricultor aportar (10) _____ trabajo e inputs para obtener la misma producción que en tierras de mejor calidad. En el estudio de los problemas de degradación de tierras resulta imprescindible un diagnóstico (11) _____ y que las gentes locales puedan aportar sus propias soluciones y estén implicados en la priorización de opciones para tener en cuenta criterios medioambientales, económicos y (12) _____, es decir con un enfoque sea (13) _____ y que se prevean procedimientos de asesoramiento y de seguimiento de resultados.

La degradación del territorio hace referencia a: erosión; salinización y sodificación; residuos orgánicos, principalmente urbanos; plagas y enfermedades (humanos, plantas y animales); residuos industriales inorgánicos, residuos de pesticidas; residuos radioactivos; metales pesados; entre otros. Por ello se requiere una adecuada legislación ambiental y el seguimiento de su cumplimiento, así como programas de (14) _____ ambiental.

Al proyectar una urbanización interesa conocer qué suelos hay donde se vaya a construir, para poder retirar y reservar el material edáfico mientras duren las obras, evitando su (15) _____ y poderlo redistribuir para plantar una jardinería más ecológica, al requerir menos inputs. Esta técnica se denomina (16) _____.

La degradación de las condiciones hidrológicas de una cuenca, así como la degradación de la calidad del agua son tan a tener en cuenta como la degradación de suelos. La primera puede dar origen a un mayor riesgo de inundaciones, a cambios microclimáticos, a un aumento de la profundidad de los (17) _____ por sobreexplotación.

ción, a riesgos para la salud humana, entre otros problemas. Como ejemplo de impactos sobre la calidad del agua cabe citar la contaminación de capas freáticas por (18) _____ y un caso especial en Japón fue la enfermedad conocida como Itai Itai, debida a una contaminación por (19) _____.

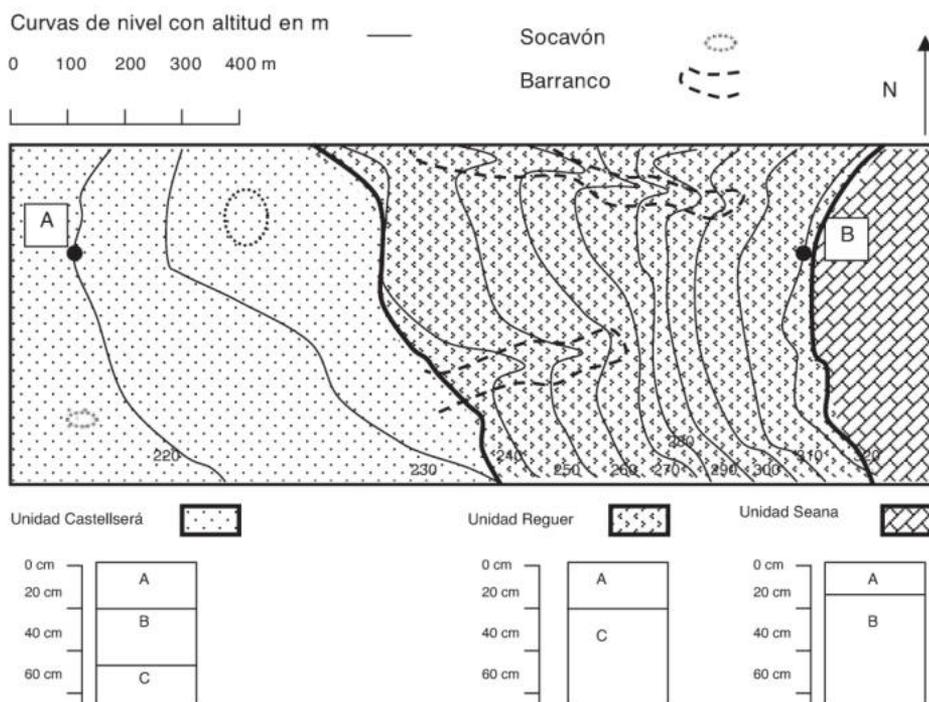
- | | | | |
|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| (1) a) no es | b) es | c) puede ser | d) suele ser |
| (2) a) parecen | b) resultan | c) no resultan | d) suelen ser |
| (3) a) correctivos | b) paliativos | c) generales | d) preventivos |
| (4) a) viables | b) rentables | c) inviables | d) interesantes |
| (5) a) utilidad | b) materia orgánica | c) suelo | d) nutrientes |
| (6) a) suelo | b) seguridad alimentaria | c) independencia | d) medio ambiente |
| (7) a) deforestación | b) labranza | c) economía | d) degradación |
| (8) a) elasticidad | b) legislación | c) resiliencia | d) capacidad |
| (9) a) a corto plazo | b) a medio plazo | c) a largo plazo | d) a reconsiderar |
| (10) a) menos | b) igual | c) muchos menos | d) más |
| (11) a) correcto | b) participativo | c) general | d) científico |
| (12) a) sociales | b) científicos | c) tecnológicos | d) monetarios |
| (13) a) global | b) local | c) mundial | d) holístico |
| (14) a) ayuda | b) financiación | c) educación | d) inversión |
| (15) a) aireación | b) reducción | c) erosión | d) compactación |
| (16) a) restauración | b) rehabilitación | c) protección | d) capaceo |
| (17) a) recursos | b) acuíferos | c) niveles freáticos | d) suelos |
| (18) a) cloruros | b) mercurio | c) nitratos | d) cesio |
| (19) a) asbestos | b) cinc | c) cobre | d) cadmio |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

48. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

E3. Un determinado municipio se plantea transformar en riego parte de su superficie, dedicada tradicionalmente al olivo y al almendro, gracias al nuevo canal que procede de un embalse de reciente construcción. La puesta en riego puede desencadenar procesos de salinización o de erosión de suelos. Para evaluar éstos y otros riesgos de degradación del territorio, se dispone del mapa topográfico y de suelos de la zona, con las leyendas que se muestran a continuación.



Unidad de suelos y horizontes	Conductividad eléctrica dS m ⁻¹ a 25 °C	Yeso (%)	Profundidad a la capa freática (cm)
<i>Seana</i>			
Ap	1,2	0	No accesible
B	0,5	0	
<i>Reguer</i>			
Ap	1,5	0	No accesible
C	1,9	5	
<i>Castellserá</i>			
Ap	3,5	2	60
B	7,4	45	
C	15,3	18	

1. Evaluar el riesgo de salinización de cada uno de los suelos al ponerlos en riego, y razonar las respuestas.

Unidad cartográfica	Riesgo (bajo o elevado)	Razonamiento
Seana		
Reguer		
Castellserá		

2. En la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE o RUSLE) se utiliza un factor (LS) para tener en cuenta la pendiente y la longitud de las laderas, cuya expresión es:

$$LS = \left(\frac{X}{22,1} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{s}{9} \right)^{1,3}$$

siendo:

X = longitud de la ladera en metros.

s = pendiente en porcentaje.

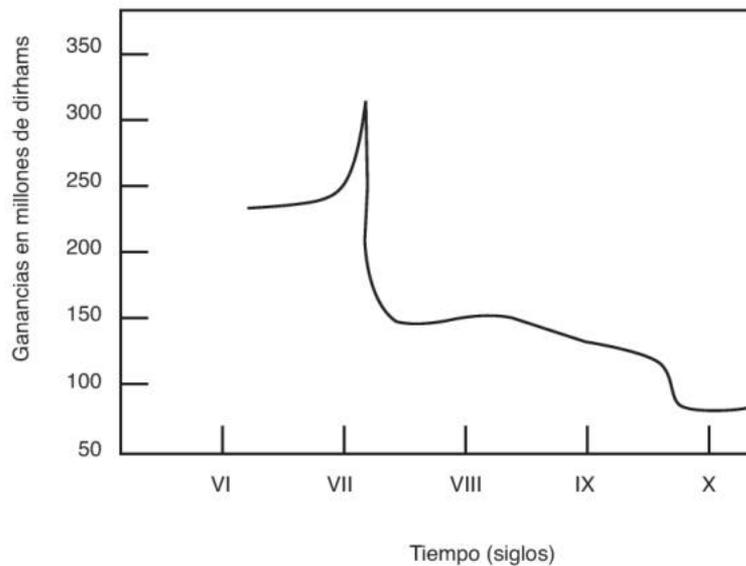
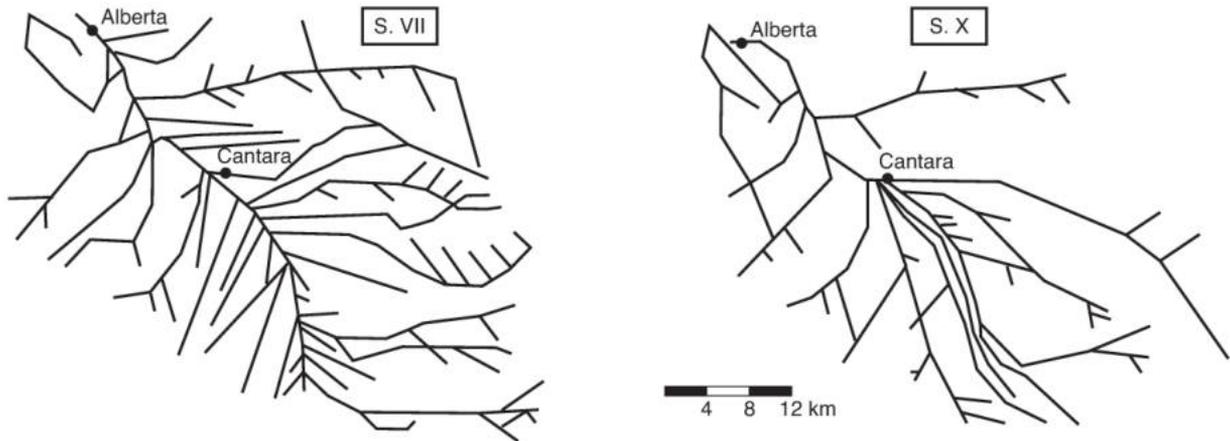
Completar la tabla calculando las pendientes de las unidades Castellserá y Reguer en la línea entre los puntos A y B y calcular los índices LS. ¿Cuál de las dos unidades tiene más riesgo de erosión hídrica? Razonarlo en función del valor del índice y de otros síntomas de erosión a partir de observaciones del mapa.

Unidad de suelo	Longitud de la ladera X (m)	Pendiente s (%)	Índice LS
Otros síntomas			
Reguer	750		
Castellserá	540		

3. Interpretar por qué se han producido problemas en las obras de unos canales de hormigón construidos para drenar el agua en las zonas más bajas (unidad Castellserá), en los que los socavones han provocado roturas.

49. ESTUDIO DE CASOS: GESTIÓN DE INFORMACIÓN

La región de Narwan, en la antigua Mesopotamia (actual Iraq) era una llanura fértil regada por una red de canales artificiales, procedentes del río Tigris. Las figuras muestran la extensión de la red en dos momentos de la época musulmana, y la evolución de la producción agrícola en el tiempo, expresada como su valor en la moneda local. Durante este período hubo diversos procesos de degradación de suelos en la cuenca de drenaje del río Tigris y también en Narwan, que afectaron notablemente el riego de esta región.



1. Relacione cada uno de los tres procesos de degradación de la izquierda con dos consecuencias de la columna de la derecha, teniendo en cuenta que no se repite ninguna.

Proceso de degradación	Consecuencias
Salinización	a) Disminución de la profundidad del suelo.
Erosión	b) Disminución de la capacidad de infiltración de agua.
Compactación	c) Dificultad para la germinación y penetración de raíces.
	d) Aumento de la presión osmótica.
	e) Dificultad para la absorción de agua por las plantas.
	f) Aumento de la cantidad de sedimentos en la escorrentía.

2. En la figura 1 se observa una disminución del número de canales del siglo VII al X. ¿Cuál de los tres procesos, citados en la pregunta anterior, es el responsable de ello? ¿Por qué?

3. Explique la relación entre los mapas (figura 1) y el gráfico (figura 2).

Hay que destacar la importancia del trabajo de campo para llegar a entender la génesis y el comportamiento de los suelos.

Weter W. Birkeland, 1973

Un buen análisis nunca mejorará una mala muestra.

Anónimo

OBJETIVOS

Conocer la manera de obtener una muestra para realizar los análisis.

Adquirir una visión de conjunto acerca de los análisis de suelos.

Conocer los fundamentos de los análisis de suelos y su problemática.

Conocer las bases de técnicas específicas: micromorfología y microscopía aplicadas al estudio de los suelos.

ESQUEMA DE LA UNIDAD

Análisis de suelos: objetivos y tipos de análisis.

Objetivos de los análisis químicos e interpretaciones.

Análisis mineralógicos.

Estudio al microscopio: micromorfología, SEM y TEM.

LECTURAS RECOMENDADAS

Porta, J., López-Acevedo, M. y Rodríguez, R.: *Técnicas y Experimentos en Edafología*. Col·legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya, 282 págs. Barcelona, 1986. Accesible por Internet: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés.

Carter, M.R. y Gregorich, Ed.: *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science - Lewis Publishers, 823 pp. Boca Raton. 2007.

Pevehill, K.I., Sparrow, L.A. y Reuter, D.J.: *Soil Analysis. An Interpretation Manual*. 1999.

Stoops, G.: *Guidelines for Analysis and Description of Soils and Regolith thin Sections*. SSSA. Madison, WI., 2003.

FAO: *World Reference Base for Soil Resources*, 2006.

1. CONEXIONES DE APRENDIZAJE

CA. Seleccionar el término más idóneo según el contexto de entre los cuatro propuestos:

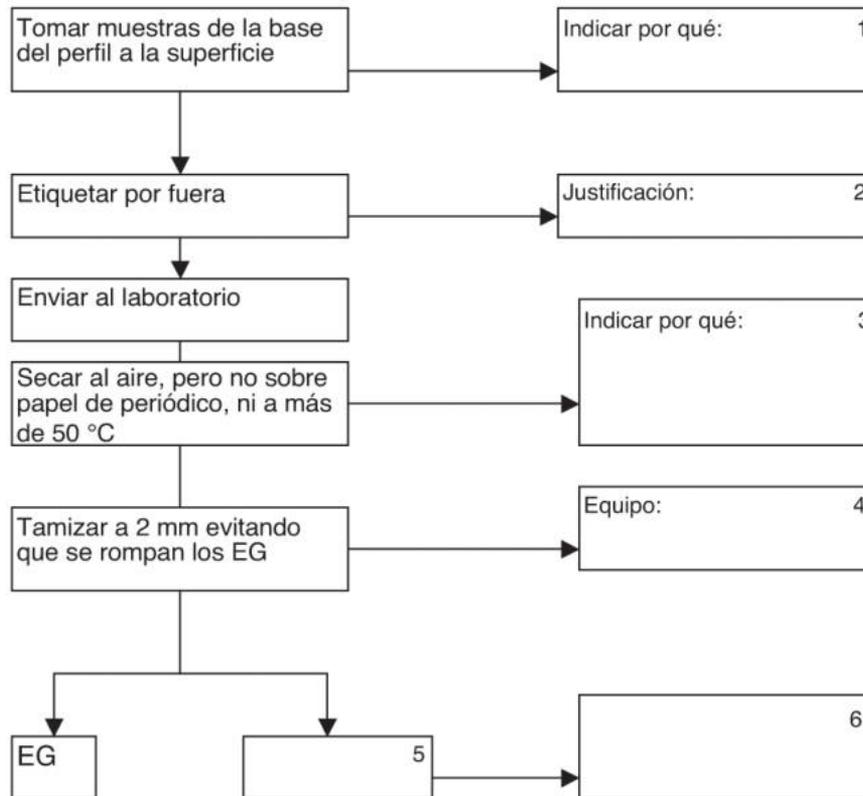
La duración ecológica de desarrollo de un horizonte (1) _____ la edad del suelo, que es un factor ecológico de formación, ya que corresponde al intervalo durante el cual un proceso edafogénico ha sido activo y determina el grado de desarrollo, que precisa el estado en el que se encuentra el suelo. Al cambiar las condiciones de medio se verá afectada la (2) _____. Entre los minerales de la clase de los carbonatos cabe citar (3) _____. La meteorización de una roca carbonatada tiene lugar por (4) _____, que da lugar a iones que de acuerdo con el diagrama de Mason son (5) _____.

Los minerales de arcilla se caracterizan por la (6) _____ entre un plano en un paquete y el correspondiente plano en el paquete adyacente. En una caolinita un paquete está formado por (7) _____ capa/s tetraédrica/s y (8) _____ octaédrica/s. El aluminio que se halla en las capas (9) _____, (10) _____ efectos tóxicos para las plantas. En estas arcillas las sustituciones isomórficas que dan lugar a la aparición de carga eléctrica tienen lugar en la capa (11) _____, por lo que su CIC es (12) _____. En suelos con este tipo de arcillas, además de la capacidad de intercambio catiónico se debe considerar la (13) _____, debido a que puede existir (14) _____.

- | | | | | |
|------|--------------------|-----------------------|------------------------|---|
| (1) | a) coincide con | b) no coincide con | c) equivale a | d) es mayor que |
| (2) | a) edad | b) duración ecológica | c) actividad biológica | d) lluvia |
| (3) | a) caliza | b) calcita | c) halita | d) yeso |
| (4) | a) complexación | b) fragmentación | c) carbonatación | d) disolución |
| (5) | a) solubles | b) insolubles | c) precipitados | d) hidrolizados |
| (6) | a) distancia basal | b) distancia | c) composición | d) carga |
| (7) | a) dos | b) tres | c) cero | d) una |
| (8) | a) una | b) dos | c) tres | d) cero |
| (9) | a) octaédricas | b) tetraédricas | c) --- | d) --- |
| (10) | a) tiene | b) puede tener | c) ha tenido | d) no tiene |
| (11) | a) octaédrica | b) tetraédrica | c) (no hay) | d) de sílice |
| (12) | a) alta | b) intermedia | c) baja | d) 100 cmol _c kg ⁻¹ |
| (13) | a) CICE | b) CE | c) CIA | d) CC |
| (14) | a) carga | b) carga variable | c) carga negativa | d) carga positiva |

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

G2. Completar el siguiente esquema para explicar el porqué de las operaciones que se realizan hasta llegar a disponer de una muestra para su análisis en el laboratorio:





Estudio de un perfil: meticulosidad y ciencia. R.M. Poch

3. ANÁLISIS DE SUELOS: OBJETIVOS Y TIPOS DE ANÁLISIS

Las técnicas instrumentales surgidas a partir de la década de los años 1970 han venido a simplificar enormemente la caracterización química de los suelos, permitiendo además realizar un número considerablemente mayor de análisis, en mucho menos tiempo. Se exponen a continuación los objetivos de los principales análisis, sin entrar en el detalle de las técnicas que se podrán consultar en una bibliografía muy numerosa: Pervill et al. (1999), Porta *et al.* (1986), entre otros.

Objetivo	Análisis más frecuentes
Fertilidad del suelo Recomendaciones de abonado	A realizar: Una vez: Textura, pH, carbonato cálcico equivalente, CIC, cationes de cambio, yeso. Una vez cada diez años: Materia orgánica, nitrógeno, C/N. A realizar cada tres/cinco años: fósforo asimilable, potasio asimilable, nitratos, $CE_{1,5}$
Informaciones especiales complementarias	Salinidad: conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada, cationes y aniones solubles, boro. Clorosis férrica: caliza activa, índice de poder clorosante. Toxicidad en suelos ácidos: CICE, % aluminio intercambiable. Caracterización de pedión y clasificación de suelos A seleccionar según el sistema de clasificación a utilizar y de acuerdo con la información de campo: Análisis y ensayos físicos: textura, densidad aparente, contenido de humedad a diferentes potenciales, densidad aparente a 33kPa, velocidad de infiltración, conductividad hidráulica, COLE, índice de subsidencia (n). Análisis químicos: materia orgánica, nitrógeno, pH_w y pH_K , carbonato cálcico equivalente, caliza activa, yeso, P_2O_5 , CIC y cationes de cambio, % saturación de bases, CICE, CIC de la arcilla, aluminio y hierro extraídos con oxalato amónico, hierro extraído con citrato y ditionito, pH de la pasta saturada, CEs, cationes y aniones solubles en el extracto de pasta saturada, SAR y ESP, pH_w 1:1, material sulfuroso, retención de fosfatos. Elementos totales. Análisis especiales: Estudios micromorfológicos: Microscopio petrográfico Minerales meteorizables en la fracción arena (50-200 μm) Mineralogía de arcillas: Difracción de rayos X Estudios con el microscopio electrónico (SEM y TEM)
Estudios de contaminación de suelos	Investigar el tipo de actividad y sus residuos. Consultar la web de la <i>Environmental Protection Agency</i> (EPA) Análisis de posible interés: Cu, Zn, Hg, Cd, Ni, Pb, As, F, Cr, Co, Be, B, Mo, Se, V. Asbestos y xenobióticos.

4. BUSCAR INFORMACIÓN

- E3.** 1. Teniendo en cuenta las características de los suelos de la zona donde nos encontramos, preparar un plan de análisis para poder calcular el presupuesto para la caracterización analítica de los suelos de un término municipal de 3500 ha. Se van a realizar 20 calicatas, se analizarán todas y se harán 80 sondeos, que se describirán para determinar la variabilidad de los suelos y situar los límites entre delineaciones.
2. Seleccionar una clase de suelos de entre las que se indican y proponer qué análisis resultan necesarios en cada caso:
- Suelos de una finca en la que se quiere plantar un viñedo en clima semiárido.
 - Suelos de bosque de resinosas en clima templado húmedo.
 - Perímetro de riego en el que se quiere realizar una monitorización para poder diagnosticar posibles problemas en relación a la disminución de la productividad de los cultivos.
 - Zona industrial que se quiere reconvertir en urbana con jardines y espacios de ocio para la infancia.

5. ANÁLISIS QUÍMICOS MÁS FRECUENTES: ASPECTOS GENERALES

5.1. Reacción del suelo: intensidad de la acidez

La reacción del suelo, **acidez activa** o **real**, se mide por medio del valor del pH de un sistema suelo-agua, en una proporción determinada de componentes. El valor expresa la intensidad de la acidez, es decir, la actividad de los protones en la solución del suelo, en la que influyen diversos factores. Entre ellos, la relación suelo:agua utilizada, por lo que, para que los resultados sean comparables, se ha normalizado la forma de operar y se utiliza una suspensión suelo-agua 1:2,5. Esta manera de proceder resulta cómoda y permite la automatización de las determinaciones, no obstante, no tiene en cuenta las diferencias texturales entre suelos. Para hacerlo, las medidas deberían realizarse en la pasta saturada, lo que consume mucho tiempo, por lo que esta metodología sólo se sigue si se opera con suelos salinos, para cuya caracterización se trabaja con la pasta saturada y su extracto.

Las medidas de pH se realizan potenciométricamente, utilizando un pH-metro con un electrodo de vidrio y uno de calomelanos. En campo se pueden utilizar métodos colorimétricos. El interés de conocer el valor del pH reside en que permite inferir la biodisponibilidad de los elementos en el suelo (fósforo, toxicidad por aluminio, contaminantes, entre otros), el comportamiento esperable de los cultivos (tolerancia al medio), la actividad biológica (los microorganismos nitrificantes se ven inhibidos en medio ácido), así como la respuesta del suelo frente a diferentes usos (enterrado de tuberías de acero no revestido, por ejemplo). También puede utilizarse para cruzar información en controles de calidad de análisis. Así por ejemplo, un suelo con carbonato cálcico en la tierra fina no puede tener un pH ácido y viceversa.

5.2. Observar e interpretar

- E3.** Estudiar e interpretar los siguientes aspectos y redactar un informe:
- Al estudiar la influencia de la relación suelo:agua, se han obtenido los siguientes resultados: con un 6,3% de humedad, la lectura de pH ha sido 6,4, mientras que con una relación 1:5 ha sido 8,6. ¿A qué puede deberse que con una mayor proporción de agua el valor del pH tienda a ser mayor?
 - ¿Cómo puede influir la temperatura en el valor de la lectura del pH de una muestra de un suelo calizo? ¿Por qué? ¿En qué suelo serán significativos los efectos, en uno de pH menor de 6 o en un suelo calizo?
 - ¿Por qué las lecturas de pH en agua dan, generalmente, valores mayores en 0,5 a 1,0 unidades de pH que si se mide en una solución de cloruro potásico?
 - ¿Por qué lo anterior no se suele cumplir en la mayoría de endopediones óxicos de suelos tropicales?

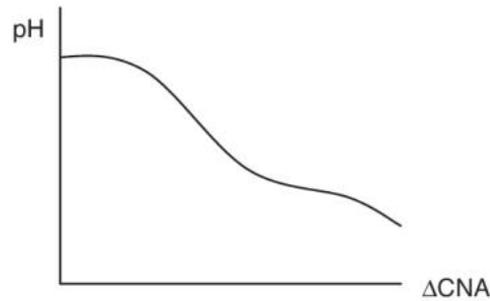
5.3. Acidez total o acidez valorable: factor cantidad

El pH sólo proporciona información acerca de la intensidad de la acidez (actividad de iones H^+), pero no de otros iones que puedan ser fuente de acidez, como el aluminio, hierro y manganeso. Para determinar la acidez total, se deberá realizar la valoración con una base de una suspensión suelo:agua y construir la curva de neutrali-

zación. El estudio de la forma de dicha curva permite identificar los componentes con poder tampón que actúan a diversos intervalos de pH, lo que se traduce en la aparición de plataformas en distintos ámbitos de la curva (Unidad 8.5).

5.4. Observar e interpretar

G2. Al neutralizar una suspensión de suelo con una solución de NaOH utilizando un potenciómetro se obtiene la siguiente curva de neutralización. Interpretar la forma que presenta.



5.5. Materia orgánica

La materia orgánica del suelo (MOS) confiere una coloración oscura al horizonte que la contiene. La importancia de este componente reside en el papel que este componente desempeña en el comportamiento del suelo. Ello es debido a que la MOS condiciona la estructuración del suelo y, por consiguiente, la aireación, el almacenamiento y movimiento del agua; contribuye a la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Además, la mineralización de la MOS libera nutrientes. Por ello es un parámetro que se utiliza como criterio en la clasificación de suelos, así por ejemplo, se utiliza en la definición del horizonte móllico, el úmbrico, el carácter fluvéntico, entre otros.



Monolito de un Umbrisol húmico. Universidad de Granada.

De las distintas formas de carbono orgánico en el suelo, las que presentan mayor interés son las químicamente activas o sea los componentes oxidables: productos de descomposición y el humus. La determinación de la materia orgánica se puede realizar por vía seca y por vía húmeda. En este último caso la oxidación del carbono orgánico se realiza con ácido crómico (dicromato potásico en medio de ácido sulfúrico) en exceso y valorando el residual. El contenido de materia orgánica se estima a partir del contenido de carbono orgánico, aceptando que éste constituye un 58% de aquella (factor de van Bemmelen, deducido estadísticamente). Se han propuesto diversos métodos para determinar el carbono oxidable por vía húmeda: Walkey-Black, Anne, entre otros.

5.6. Utilizar información

E3. Para determinar el carbono orgánico oxidable se dispone de los siguientes reactivos en el laboratorio: dicromato potásico 1N, ácido ortofosfórico, fluoruro sódico, ácido sulfúrico concentrado ($d = 1,84$); hexametáfosfato sódico del 12%; sal de Mohr 0,5N: $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; ácido clorhídrico concentrado y ortofenantrolina. Utilizar aquellos que resulten operativos. Revisar las prácticas realizadas y, si se requiere, buscar información en Internet acerca del método de análisis.

- Indicar el papel desempeñado por cada uno de los reactivos seleccionados.
- Formular las reacciones que van a tener lugar en las distintas etapas del análisis.
- Determinar el contenido de materia orgánica de una muestra sabiendo que se ha tomado 0,7500 g de muestra pulverizada con molinillo de café o con mortero y que, entre otros reactivos, se han añadido con dosificador 10 ml de solución de dicromato potásico 1N, y que al valorar se han utilizado 12,0 ml del reactivo pertinente (viraje de verde a pardo rojizo) con la muestra y 20,2 ml con un blanco. En el método utilizado el factor de recuperación del carbono orgánico es de 1,29.
- ¿Cómo pueden interferir en el resultado del análisis las características de la muestra, en concreto si ésta corresponde a un suelo salino?

5.7. Observar y diagnosticar

- G2.**
- Describir e interpretar esta imagen.
 - ¿Qué tipo de análisis habría que pedir al laboratorio para verificar las observaciones de campo acerca de la naturaleza del componente más evidente que ha permitido formular una hipótesis acerca de la formación de este suelo?



Estado de Puebla, México

J. Porta

5.8. Carbonato cálcico equivalente y caliza activa

Los suelos calizos son importantes por sus características y comportamiento específicos y porque suponen un 30% de la superficie terrestre. La calcita, a pesar de ser un mineral fácilmente meteorizable, es un componente frecuente en suelos de regiones áridas y semiáridas, debido a que estos suelos tienen un régimen de humedad no percolante (árido, xérico o ústico). La duración ecológica de un proceso de acumulación de carbonato cálcico es mucho menor que la edad de estos suelos, ya que los procesos de lavado no progresan por falta de agua y el desarrollo del suelo queda frenado. Si las condiciones de humedad cambiasen a más húmedas, se iniciaría un proceso de descarbonatación (disolución por carbonatación) y el carbonato cálcico iría disminuyendo gradualmente, perdiéndose por lavado.

En campo se identifica la presencia de carbonato cálcico por la efervescencia con HCl 11% y por la presencia de determinadas morfologías: pisolitos, nódulos, acumulaciones masivas (endopedión cálcico) o la existencia de un horizonte cementado (endopedión petrocálcico). El carbonato cálcico se encuentra principalmente en la fracción limo y en la fracción arcilla, por lo que es químicamente activo y hace que el valor del pH sea de 8 a 8,5. Valores más altos, sin la existencia de carbonato sódico, se pueden explicar por la presencia de carbonato magnésico.

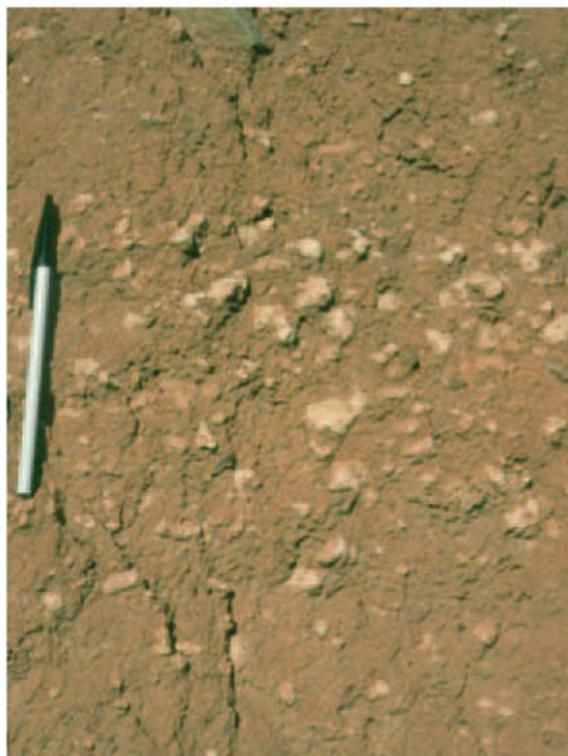
Por sus diferentes efectos, interesa diferenciar los carbonatos totales de la caliza activa (fracción más reactiva debido a que su tamaño es menor de $50\ \mu\text{m}$), por lo que se han establecido métodos analíticos específicos para uno y otro componente. La caliza total se determina o bien midiendo en un calcímetro el volumen de CO_2 desprendido al atacar una muestra con ácido clorhídrico del 50% y comparándolo con el desprendido con una cantidad conocida de CaCO_3 puro; o bien atacando la muestra con un exceso de HCl diluido y valorando el exceso de ácido. Estas maneras de operar no permiten discriminar si se trata de calcita (CaCO_3) o de magnesita (MgCO_3), de ahí que para designar los resultados de utiliza la denominación genérica de **carbonato cálcico equivalente**.

La fracción de tamaño inferior a $50\ \mu\text{m}$, la **caliza activa**, al disolverse en agua da lugar a ión bicarbonato, que bloquea la absorción de hierro por parte de las raíces de algunas plantas, con lo que las hojas presentan un amarilleamiento, conocido como **clorosis férrica**. La caliza activa se determina haciendo reaccionar la muestra con una solución de oxalato amónico y valorando con el calcímetro (calcimetría) el CO_2 desprendido, procedente del carbonato amónico formado (Método Nijelsohn *et al.*, 1960). Existe mucha información acerca de la tolerancia a la caliza activa de los patrones de viñedo y de otras especies susceptibles a la clorosis férrica inducida por los carbonatos. Morlat *et al.* (1981) han introducido un **índice de poder clorosante**, calculado a partir del contenido de hierro extraíble con EDTA.

5.9. Espíritu crítico

G2. En campo, en el perfil de la imagen se ha identificado lo que se podrían considerar «elementos gruesos», atendiendo únicamente a su tamaño. Al no disponer de caja de reactivos, se muestrean para su posterior análisis en laboratorio. En la discusión en campo aparecen dos hipótesis, unos indican que se trata de nódulos calizos, mientras que otros dicen que son nódulos de gibbsita.

- ¿Cómo se puede diferenciar si se trata de *elementos gruesos* o de *nódulos*?
- ¿Qué análisis habría que pedir al laboratorio para confirmar una de las dos hipótesis?
- La confusión en campo es posible si se atiende exclusivamente a la morfología ¿Qué condiciones de medio permitiría descartar una de las dos hipótesis?



5.10. Estudiar e interpretar

E3. Buscar información para poder dar respuesta a los siguientes aspectos:

En algunos países el método clásico para determinar la caliza activa es el método Drouineau (1942), que propone determinar la caliza activa precipitando el carbonato cálcico con un exceso de oxalato amónico y valorando el exceso de oxalato con permanganato potásico.

- Formular las reacciones químicas que tienen lugar en el método Nijelsohn y Drouineau.
- ¿Por qué motivo el método de Nijelsohn tiene una validez más general que el de Drouineau?

5.11. Yeso equivalente

El yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, suele ser un componente importante en suelos de zonas áridas y semiáridas. A medida que aumenta el contenido de yeso, la influencia de los componentes silicáticos va perdiendo importancia, llegando el yeso en los horizontes hipergypsicos^{WRB} a condicionar totalmente el comportamiento del suelo, la respuesta de las plantas, así como determinados usos del suelo (obras de hormigón, conducciones enterradas, entre otras).

La identificación de yeso en campo no suele resultar difícil, ya que se presenta como yeso vermiforme (cilindros de diámetro submilimétrico y longitud milimétrica) que, observado con ayuda de una lupa, tiene apariencia de granos de azúcar. Además da un precipitado blanco con cloruro bórico. Al observar al microscopio petrográfico en una lámina delgada, los cristales de yeso edáfico se identifican por su forma lenticular característica.

Sin embargo, la determinación analítica resulta compleja. Si se extrae con agua, cuanto mayor es la dilución del extracto, mayor será la cantidad de yeso disuelto, lo que supone una dificultad. Cuando, al determinar yeso en un extracto 1:5, obtenido después de agitar durante 30 minutos, se obtiene un valor que supera los $150 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, ello indica que no se ha llegado a disolver todo el yeso presente en la muestra. A efectos de **clasificación de suelos** se requiere determinar el contenido total de yeso y no el soluble en un momento determinado. En muchos casos se recurre al análisis del contenido de ión sulfato, refiriendo los resultados a yeso, en realidad **yeso equivalente**, ya que este anión puede también proceder de otros sulfatos (Na y Mg), presentes en suelos afectados por salinidad.

Existen métodos conductimétricos, basados en disolver todo el yeso en agua, reprecipitarlo con acetona, para redisolverlo de nuevo en agua y medir la conductividad eléctrica de la solución. La lectura se compara con una curva estándar. El método gravimétrico es más preciso pero consume mucho más tiempo. Consiste en disolver el yeso en medio ácido en caliente y precipitarlo con un exceso de cloruro bórico. Un método alternativo es la termogravimetría (TG), basado en la cuantificación de la pérdida del agua de hidratación del yeso, al calentar una muestra progresiva y lentamente.

5.12. Observar y diagnosticar

G2. Al estudiar el perfil en el campo se tomó la imagen de la izquierda, mientras que la de la derecha procede de observar una lámina delgada al microscopio petrográfico.

- Describir ambas imágenes estableciendo relaciones entre ellas.
- ¿Qué ensayos de campo podría haber utilizado con éxito para confirmar el diagnóstico?
- ¿Qué metodología analítica recomendaría utilizar en el laboratorio, cuál es su fundamento?
- ¿Es de esperar que aparezcan problemas al realizar el análisis granulométrico de una muestra de este horizonte, cuáles?
- ¿En qué intervalo debe encontrarse el pH de esta muestra? ¿Es esperable que se presenten problemas de toxicidad por aluminio?



J. Porta



J. Herrero

5.13. Sales más solubles que el yeso

Al referirse a **suelos salinos** se está haciendo referencia a aquellos suelos que contienen sales más solubles que el yeso y al hecho de que se hallen en exceso, lo que tiene efectos sobre la productividad de las plantas, la supervivencia de la vegetación no tolerante (no halófila) y sobre las infraestructuras. Al hablar de sales hay que tener en cuenta que entre ellas las hay que tienen una solubilidad muy baja (CaCO_3 , BaSO_4 por ejemplo), baja ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y muy alta (NaCl , Na_2SO_4 , entre otras). Por ello, los efectos de unas y otras sales serán claramente distintos, tanto sobre el comportamiento del suelo, como sobre la fisiología de las plantas.

Se diferencian por ello: los **suelos calizos**, que son aquellos cuyo comportamiento viene condicionado por la presencia de carbonato cálcico (como ejemplos, los Calcisoles^{WRB}, Regosoles calcáreos^{WRB} o los suelos con endopedión cálcico). Por otro, los **suelos yesosos** condicionados por el yeso (como ejemplos, los suelos con endopedión gypico, Gypsisoles^{WRB} o los GypsidST) y, finalmente, los **suelos salinos**, que son aquellos que contienen sales más solubles que el yeso (como ejemplos, los suelos que constituyen una fase salina o, si la incidencia de las sales solubles sobre las plantas es muy grande, los suelos con endopedión sálico, los Solonchak^{WRB} o los Salorthids). Algunos autores incluyen el yeso como una sal más, al tratar de los suelos salinos, lo que no parece demasiado acertado, ni desde el punto de vista de respuesta de las plantas, ni de la ecología de las formaciones vegetales (gypsófilas frente a halófilas), ni del comportamiento y gestión agrícola o de tecnología de suelos. Lo que ocurre es que los tres componentes pueden estar presentes en un suelo salino, si bien su efecto es claramente diferente.

Adicionalmente, se puede destacar que la caracterización de estas tres clases de suelos (calizos, yesosos y salinos) requiere metodologías analíticas específicas distintas. El método normalizado para determinar la presencia de **sales solubles** de forma suficientemente aproximada, en análisis de rutina, consiste en medir la conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1} a $25\text{ }^\circ\text{C}$) de un extracto de suelo. Para un primer diagnóstico se utilizan extractos 1:5 ($\text{CE}_{1:5}$), por la facilidad en obtenerlos en análisis de rutina. Cuando la $\text{CE}_{1:5}$ supera un valor umbral a 0,2 a $0,25\text{ dS m}^{-1}$, se considera que puede haber problemas por salinidad, y se procede a estudiarlos por medio del extracto de pasta saturada, que tiene en cuenta el efecto textura. En este extracto se mide la conductividad eléctrica (CE_e o CE_s) y se determinan los cationes solubles: Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , y los aniones solubles: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Si la suma de cationes ($\text{cmol}_c\text{ L}^{-1}$) no coincide con la de aniones en más de un 5%, puede que alguno de los análisis esté mal o que haya que determinar algún ión no considerado (NO_3^- , K^+ , entre otros). Esta metodología consume bastante tiempo y, dada la subjetividad en la determinación visual del punto final en la preparación de la pasta saturada, los laboratorios suelen optar por concentrar en una misma persona entrenada la realización de este trabajo.

Los criterios de interpretación de resultados de análisis de salinidad se pueden consultar en Maas & Hoffman (1977), Peverill *et al.* (1999), Porta y López-Acevedo (2005, pág. 339 y ss.) y en Internet (www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés: *Técnicas y Experimentos en Edafología*), entre otros.

5.14. Estudiar e interpretar

E3. La mayoría de datos publicados acerca de la respuesta de las plantas a la salinidad están referidos a valores de conductividad eléctrica en la zona radicular, medidos en extractos de pasta saturada. Dado que es un método que consume mucho tiempo, algunos autores han propuesto relaciones empíricas entre la $CE_{1:5}$ y la CE_S . Realizar un informe en relación a los siguientes aspectos:

- a) Buscar algunas de estas relaciones en la bibliografía ¿Qué se puede deducir del hecho de que haya muchas expresiones para relacionar $CE_{1:5}$ y la CE_S ? ¿Qué criterio se utilizará al querer emplear una de estas relaciones?
- b) ¿Qué incidencia tiene el hecho de que un suelo salino contenga yeso para la validez de una relación $CE_{1:5}$ y la CE_S ?
- c) El extracto de pasta saturada se suele obtener por filtrado en vacío.
 - c.1) Indicar el material necesario y dibujar una instalación para poder realizar diez extracciones a la vez.
 - c.2) ¿Qué problemas pueden presentarse con este tipo de extracciones?
 - c.3) ¿La extracción por centrifugación puede presentar algún tipo de limitación? Explicarlo desde la perspectiva del modelo de la doble capa.

5.15. Complejo de intercambio iónico: CIC, CIA y CICE

Los cationes de cambio y la CIC se determinan haciendo percolar NH_4AcO 1 N a $pH = 7,0$. En el percolado se analizan los cationes basificantes. Con un nuevo intercambio se puede determinar la CIC. Los cationes de cambio o intercambiables se agrupan en **cationes basificantes**: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , principalmente, a veces denominados impropriamente bases de cambio, y los **cationes acidificantes**: Al^{3+} , H^+ , Mn^{4+} , principalmente. La relación entre los cationes basificantes y la CIC indica el porcentaje de saturación del suelo que, para los suelos calizos, los yesosos y los salinos es del 100%.

Las formas intercambiables de los elementos en el suelo constituyen la fuente más importante de nutrientes inmediatamente disponibles, al pasar de la doble capa (sedes de intercambio) a la solución exterior, a medida que su concentración disminuye. Además intervienen en el comportamiento físico de los suelos (el Ca^{2+} mejora la estructura, mientras en Na^+ la deteriora).

Las arcillas mineralógicas, la materia orgánica, los óxidos de hierro y el aluminio, al tener carga eléctrica, son los componentes que contribuyen a que el suelo tenga capacidad para intercambiar iones. El origen de la carga eléctrica hace que el suelo pueda tener **cargas permanentes** (debidas a sustituciones isomorfas en los minerales de arcilla) y **cargas variables** que dependen del pH del medio. El carácter anfótero de algunos de componentes (caolinitas, óxidos de hierro, y materia orgánica) explican la existencia de cargas positivas dependientes del pH del medio. Por ello hace que el suelo pueda tener **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** y **capacidad de intercambio aniónico (CIA)**, según sean las condiciones ecológicas de formación del suelo.

Por otro lado, debido al comportamiento del aluminio y sus formas hidrolizadas se diferencia la CIC medida a $pH = 7,0$ y la **capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)**, que se determina como suma de los cationes basificantes extraídos con NH_4AcO 1 N a $pH = 7,0$, más el aluminio extraído con KCl 1 N.

5.16. Estudiar e interpretar

G2. Estudiar las siguientes cuestiones en relación con la capacidad de intercambio iónico, revisando previamente la Unidad 8, si se requiere:

- a) Formular la reacción de intercambio catiónico que tendrá lugar entre el suelo y una solución de acetato amónico (NH_4OAc) 1 N, tamponada a pH 7, que se haga percolar a través de una columna de suelo. Dibujar el montaje de laboratorio.

- b) ¿Qué problemas pueden presentarse si se trata de un suelo calizo?
- c) Explicar si se puede utilizar este método de análisis para determinar el porcentaje de sodio intercambiable en el caso de un suelo salino. ¿Cómo deberá procederse?
- d) ¿Qué significación tendrá el valor de la CIC determinada, si el suelo tiene un pH de 5? ¿Cómo debería operarse para plantear correctamente un encalado para elevar el pH del suelo?
- e) ¿Cómo se interpreta el hecho de que en un suelo mediterráneo (AlfisolST o Luvisol^{WRB}) la carga eléctrica varíe muy poco con el pH del suelo, frente a lo que ocurre en un suelo tropical (OxisolST, Ferralsol^{WRB})?
- f) ¿En cuál de los suelos anteriores tendrá sentido determinar la CIA? ¿Por qué?
- g) Al consultar un informe sobre los suelos de una zona, los datos de CIC están expresados en meq/100 g de suelo. Transforme una CIC de 37,8 meq/100 g de suelo a $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de suelo.

5.17. Aluminio

La biodisponibilidad del aluminio depende de la forma en que se encuentre en el suelo. Puede hallarse inmovilizado en las redes cristalinas de los aluminosilicatos y de otros minerales, tales como la gibbsita: $\text{Al}(\text{OH})_3$, la bohemia: αAlOOH o el corindón: $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$, para cuya determinación requiere un ataque con reactivos enérgicos que lo liberen y pongan en solución. Puede encontrarse en formas amorfas, tales como el $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ que se determinan con diversos extractantes. Los compuestos cristalinos de Fe, Al y Mn libres se extraen con una solución de ditionito-citrato sódico (método Mehra and Jackson); las formas amorfas o de bajo grado de ordenación se extraen con una solución de oxalato amónico; y las formas orgánicas se extraen con una solución de pirofosfato.

A efectos de clasificación de los **EspodosolesST**, **Podzoles^{WRB}**, interesa determinar las formas amorfas. La identificación del endopedión espódico según *Soil Taxonomy* (2006) requiere conocer el contenido de aluminio y hierro amorfos translocados, por lo que la técnica analítica utiliza el extracto con oxalato amónico, en el que se mide la densidad óptica (ODOE).

Al estudiar el sistema Al precipitado-Al soluble-Al intercambiable se determina que por encima de un pH_w 5,5 el aluminio se encuentra precipitado en forma de gibbsita, mientras que a mayor acidez se halla en formas soluble e intercambiable. Provoca **efectos tóxicos** en las plantas y afecta al desarrollo del sistema radicular que presentará un acortamiento y engrosamiento de las raíces, una menor ramificación y su color es pardo. El volumen que pueden explorar es mucho menor, con lo que son menos eficientes para absorber agua y nutrientes.

Para determinar el aluminio intercambiable se han utilizado soluciones de KCl 1N, que extrae el aluminio de las sedes de intercambio de las superficies de las arcillas y la materia orgánica; y de CaCl_2 0,01M, que sólo extrae una parte del aluminio intercambiable, habiéndose establecido un índice para relacionar la fracción de aluminio disponible con el comportamiento de las plantas. No obstante, Kamprath (1978) propuso utilizar el **porcentaje de saturación de Al** en relación a la CICE como mejor predictor de la respuesta de las plantas. Sin embargo, se ha observado que los valores críticos de %Al intercambiable varían ampliamente para una misma especie, en diferentes localizaciones (Peveřill *et al.*, 1999).

5.18. Observar y diagnosticar

G2. En campo se han estudiado estos suelos.

- a) Indicar qué horizontes genéticos es posible diferenciar.
- b) ¿Qué análisis se requieren para poder confirmar el tipo de horizontes de diagnóstico de este suelo?
- c) ¿Qué propiedades de este suelo condicionan sus funciones?



Urbasa (Navarra, España).

C. Roquero



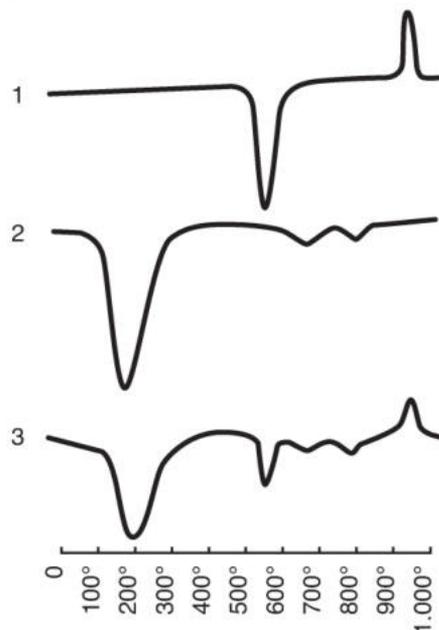
Cortesía de NRCS – USDA.

6. ANÁLISIS MINERALÓGICOS

6.1. Análisis térmicos

Los análisis térmicos se han utilizado desde hace más de un siglo en la identificación y cuantificación de minerales. En ellos se miden los cambios en peso, temperatura o dimensiones cuando una muestra se calienta progresivamente de forma constante. Los más utilizados son: la termogravimetría (TG), que mide los cambios de peso debidos, por ejemplo, a deshidratación, pérdida de gases (CO_2 , SO_3) u oxidación; y el análisis térmico diferencial (ATD) que registra la diferencia de temperatura entre la muestra y un material estándar inerte. La TG es muy útil en análisis mineralógicos cuantitativos, ya que la pérdida de peso atribuida a un componente puede relacionarse con el contenido del mismo en la muestra. El ATD sirve más para la determinación de minerales en mezclas, ya que se pueden identificar la intensidad y tipo de reacciones (exo o endotérmicas) que experimentan al calentarse progresivamente, las cuales serán características de cada mineral.

Con un análisis térmico se obtienen curvas del tipo que se muestra en la figura. La (1) corresponde a una caolinita, la (2) a una montmorillonita y la (3) a una mezcla de ambas arcillas al 50% (Pedro, 1978).



6.2. Difracción de rayos X

Esta técnica se aplica en la identificación de minerales cristalinos, que consisten en planos de átomos apilados a intervalos regulares. Los rayos X son ondas electromagnéticas con longitudes de onda de 0,02 a 10 nm, del mismo orden de magnitud que el espaciamento entre los planos de un cristal, por lo tanto pueden ser difractados por ellos. Cuando un haz de rayos X con una longitud de onda λ incide sobre una estructura cristalina, hay un cierto ángulo de inclinación θ para el cual los rayos difractados se encuentran en fase. La energía de la onda resultante es la suma de las n ondas difractadas, y puede ser detectada por un receptor, en forma de un pico en el difractograma. Este ángulo se relaciona con el espaciamento o distancia basal (d) a la que se encuentran los planos de la estructura cristalina según la ley de Bragg:

$$\frac{d}{n} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

La difracción puede realizarse en muestras al azar o en muestras orientadas. Las primeras producen difractogramas «en polvo», que detectan todas las distancias del sistema cristalográfico. Las muestras orientadas se obtienen por sedimentación y secado de una muestra en suspensión sobre una placa de vidrio. Si contienen arcillas, éstas se orientan horizontalmente, por lo que se detecta preferentemente la distancia basal.

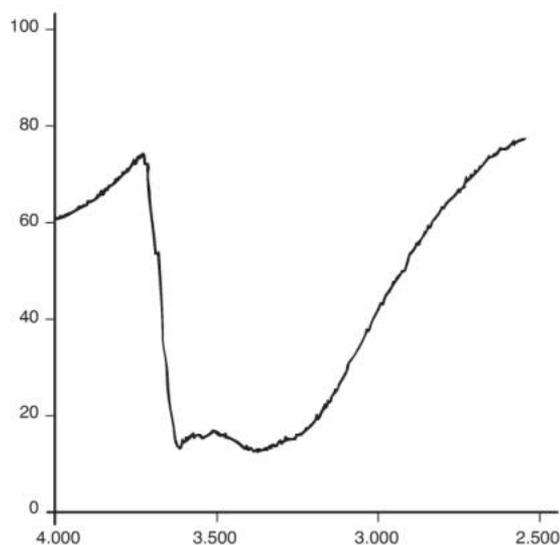
La difracción de rayos X en Edafología se utiliza en la identificación de arcillas, ya que son filosilicatos con distancias basales características, constantes o variables dependiendo del mineral de que se trate y del tratamiento de la muestra.

En el cuadro se muestran las distancias basales tras la aplicación de tratamientos térmicos o distintos solventes, que permite discriminar dos arcillas 2:1 con distancia basal variable.

Tratamiento	Distancia basal (Å)	
	Vermiculita	Esmeclita
Mg ²⁺ + Ca ²⁺	±14,5	±14,5
Mg ²⁺ + Ca ²⁺ + glicol	±14,5	±17-19
Na ⁺	11-12	12-13
Na ⁺ + glicol	12	17-19
K ⁺	10	12
K ⁺ + glicol	10	17-19
K ⁺ + 250 °C	10	10-12
K ⁺ + 400 °C	10	10

6.3. Espectroscopía de infrarrojos

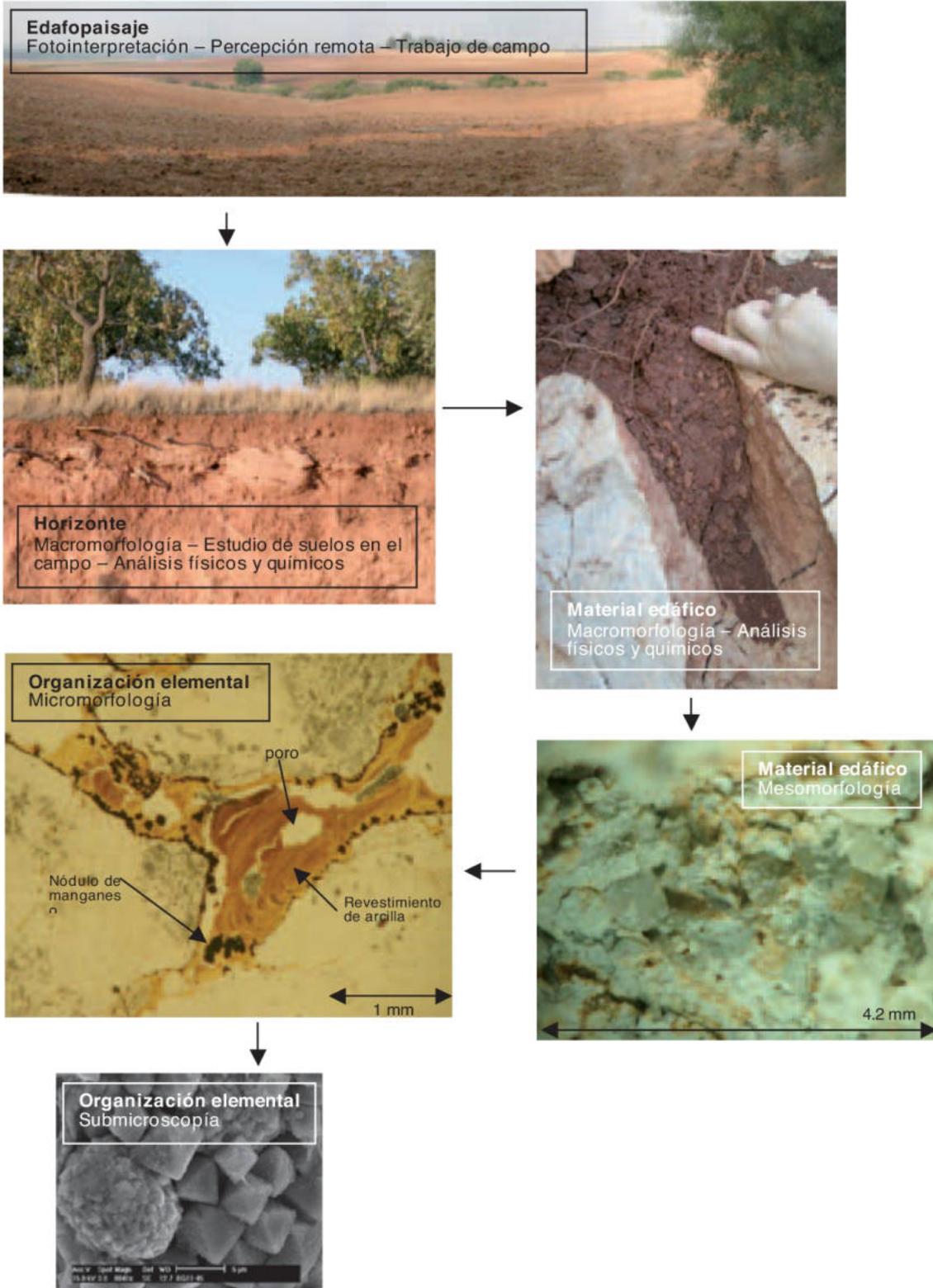
La espectroscopía de infrarrojos (IR) es una técnica de análisis de sustancias en estado gaseoso, líquido o sólido, tanto cristalinas como amorfas, a partir de su espectro de absorción o reflexión en el intervalo del infrarrojo del espectro electromagnético. La información que proporciona es del mismo tipo que la difracción de rayos X, pero con intervalos de distancias mayores. Aunque el espectro infrarrojo se extiende desde 10 a 14000 cm⁻¹, aproximadamente, desde el punto de vista funcional y de sus aplicaciones se divide en tres zonas: IR lejano (560-20 cm⁻¹) IR medio (7.000-560 cm⁻¹) y el IR cercano (14.000-7.000 cm⁻¹). El método permite estudiar el estado de la cristalinidad de la sustancia, apreciar la imperfección de la estructura cristalina y el grado de ordenación de la estructura. Otra aplicación importante de la espectroscopía IR es el estudio del estado del agua y grupos OH en minerales. Son especialmente útiles en mineralogía de arcillas, ya que caracterizan su macroestructura, pureza y dan información sobre las sustituciones isomórficas.



Se usan tanto los espectros de transmisión (absorción) como de reflexión. Los espectros de reflexión corresponden a las facetas naturales de cristales, planos de exfoliación o las muestras pulidas de minerales y rocas. Para los espectros IR de transmisión se suele utilizar la muestra triturada.

7. MICROMORFOLOGÍA DE SUELOS

Consiste en el estudio de suelos indisturbados a escala microscópica. Es la técnica que permite la observación del continuo edafopaisaje-horizonte-material edáfico-organización elemental.



Los inicios de la micromorfología se deben a W.L. Kubiëna, edafólogo austríaco que en su libro *Micropedology* (1938) estableció las bases de esta disciplina. La observación de suelos a escala microscópica es la única técnica de estudio que permite no sólo identificar componentes, sino también establecer relaciones funcionales entre ellos, distribución, cronología de procesos edáficos, alteración de minerales o la observación y estudio de la porosidad, entre otros. Hay distintos enfoques de sistemas de descripción y de terminología utilizada. Tras el sistema genético de Kubiëna se generalizó la terminología y conceptos de Brewer (1964), heredados de la mineralogía. En 1985 un comité internacional de micromorfólogos auspiciado por la IUSS editó el *Handbook for soil thin section description* (Bullock et al. 1985) que ha sido la base de la mayoría de estudios micromorfológicos posteriores. Este *Handbook* ha sido actualizado, ampliado y expuesto por uno de sus autores, G. Stoops (2003). No hay que olvidar tampoco la larga tradición de estudios micromorfológicos en el Instituto Dokuchaev de Moscú, que por limitaciones del idioma no ha sido suficientemente divulgado en el ámbito científico occidental.

7.1. Mesomorfología

La observación de agregados o componentes elementales del suelo a través de lupas de campo (cuentahilos) o lupas binoculares permite llenar el hueco entre los estudios a ojo desnudo y los micromorfológicos. La identificación de rasgos en los bloques indisturbados previa a la fabricación de láminas es muy útil para asociar rasgos microscópicos con su aspecto a simple vista; y permite extrapolar futuras observaciones de campo a rasgos micromorfológicos.

7.2. Micromorfología: fabricación de láminas delgadas

La observación al microscopio requiere de la fabricación de láminas de 20 a 30 μm de grosor a partir de bloques indisturbados. El esquema de fabricación es el siguiente:



a) Muestreo



b) Preparación de muestras



c) Impregnación con resina



d) Obtención de tabletas



e) Corte y pulido de caras de tabletas



f) Pegado de tabletas



g) Rectificado y obtención de láminas

La impregnación con resinas es indispensable para consolidar la muestra y permitir su corte. Las resinas pueden ser de distintos tipos, aunque las más utilizadas son de tipo poliéster o epoxi, que por su carácter apolar, sólo pueden impregnar muestras secas. En todo el proceso de fabricación debe procurarse alterar lo mínimo posible la muestra, que puede contener sales solubles (no hay que utilizar agua) o componentes termolábiles como arcillas expansibles o sales hidratadas (no hay que calentar la muestra). Algunos materiales, como los horizontes orgánicos, suelos volcánicos o vertisoles varían su estructura al perder el agua, lo cual obliga a secar las muestras en acetona o dioxano que substituya el agua de los poros y evite su agrietamiento o retracción.

7.3. Micromorfología: microscopía óptica

El microscopio polarizante o petrográfico es el medio de observación estándar de las láminas delgadas de suelos con aumentos desde 2x hasta aproximadamente 40x. Consiste básicamente en la observación con **luz polarizada transmitida**, ya sea en polarizadores o nicoles paralelos (**PPL**) o cruzados (**XPL**). En este último modo todos los poros y componentes isotrópicos aparecen negros, ya que no son ópticamente activos. La observación con **luz incidente**, ya sea vertical u oblicua permite la identificación de minerales opacos por el color y características del brillo. Ciertos procesos edáficos y su cronología relativa pueden diagnosticarse exclusivamente con el estudio de láminas delgadas, como la iluviación de arcilla, las acumulaciones de carbonatos o yeso, rasgos redoximórficos, o alteración de minerales (tipo e intensidad).

7.4. Submicroscopía

Consiste en la excitación de la muestra de suelo con electrones, los cuales producen distintas respuestas que proporcionan información sobre la composición del suelo. La observación llega hasta orden de magnitud de micras. Hay dos tipos principales: **microscopía electrónica de barrido (MEB o SEM)** y **microscopía electrónica de transmisión (MET o TEM)**. Dentro de los primeros, las respuestas a la excitación con electrones producen imágenes de distintos tipos, siendo las más utilizadas:

1. **Electrones secundarios (SE)**: son los reflejados desde la superficie de la muestra, con poco poder de penetración. Proporcionan imágenes de la morfología en 3D de los componentes del suelo.
2. **Electrones retrodispersados (BESI)**: tienen más poder de penetración, y dan información sobre la composición de la muestra. Los componentes con pesos atómicos más elevados (como las resinas de impregnación, o ciertos minerales) se muestran más claros y brillantes. Sirven para identificar ciertos componentes del suelo, o para obtener imágenes de porosidad, ya que la resina de los poros contiene átomos de bajo peso atómico.

La microscopía electrónica de transmisión (MET) requiere de microcortes o de arcillas muy finas dispersas, y se utiliza para identificar arcillas mediante su morfología.

7.5. Microanálisis

Otra de las respuestas de la muestra al excitarla con electrones es la emisión de rayos X, que pueden ser detectados y convertidos en espectros que informan sobre la composición atómica del punto excitado. La espectroscopía de rayos X puede ser de dos tipos: de energía de dispersión (EDAX, *Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy*) o de longitud de onda de dispersión (WEDAX, *Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy*). Los análisis se pueden realizar en un punto, con lo que se obtiene un espectro con la composición elemental (semi)cuantitativa; en una línea para un elemento, proporcionando la riqueza relativa del mismo a lo largo de la línea; o bien en toda la imagen, proporcionando un mapa del elemento.

7.6. Utilizar información

Busque en este libro fotografías de láminas delgadas de suelos observadas mediante microscopio óptico o electrónico, e indique para qué usuario/a de información de suelos es útil.

8. CONOCER Y COMPRENDER

CC. 1. Seleccionar el término más adecuado según el contexto, de entre los propuestos:

Las técnicas de muestreo varían según cual sea la finalidad del análisis o la determinación a realizar, así por ejemplo para caracterizar un suelo contaminado interesa tomar muestras (1) _____, mientras que para determinar el nivel de fertilidad de un campo de cultivo se toman (2) _____ y en ambos casos forman muestras compuestas para obtener una mejor representatividad. En el caso de querer fabricar una lámina delgada para estudios micromorfológicos con microscopio (3) _____ se deben tomar muestras que conserven su (4) _____ original.

El pH de un suelo se puede determinar de muchas maneras, de ellas (5) _____ son las más frecuentes, siendo una de ellas (6) _____, que mide la acidez (7) _____, cuyo valor suele ser entre 0,5 y 1 unidad de pH más alta de el pH (8) _____. La materia orgánica se determina generalmente por vía húmeda con métodos que se basan en su (9) _____ con ácido crómico producido al añadir dicromato potásico y ácido sulfúrico a la muestra.

El aluminio puede crear problemas de toxicidad a las plantas cuando se encuentra (10) _____. Para determinar las distintas formas de aluminio existen métodos específicos, para las formas amorfas se utiliza una técnica que utiliza como extractante (11) _____, mientras que las formas orgánicas se extraen con (12) _____.

El estudio de suelos al microscopio petrográfico requiere la fabricación de láminas delgadas de suelos. Permite observaciones con luz polarizada paralela y con luz (13) _____, lo que permite observar la birrefringencia que presentan los cuerpos (14) _____, como es el caso de un (15) _____.

El análisis de los minerales de arcilla presenta dificultades debido a su tamaño, inferior a 2 μm y su imperfecta cristalinización. Los métodos son complementarios, siendo una de las técnicas de uso más generalizado en análisis de arcillas la (16) _____.

- | | | | | |
|------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| (1) | a) inalteradas | b) indisturbadas | c) al azar | d) en malla |
| (2) | a) inalteradas | b) en zig zag | c) al azar | d) en malla |
| (3) | a) óptico | b) petrográfico | c) electrónico | d) de transmisión |
| (4) | a) textura | b) densidad real | c) porosidad | d) material |
| (5) | a) cuatro | b) dos | c) tres | d) cinco |
| (6) | a) pH con CaCl_2 | b) pH al agua | c) pH KCl | d) pH pasta saturada |
| (7) | a) actual | b) intercambiable | c) total | d) activa o real |
| (8) | a) pH con CaCl_2 | b) pH al agua | c) pH KCl | d) pH pasta saturada |
| (9) | a) oxidación | b) reducción | c) digestión | d) solubilización |
| (10) | a) en la red cristalina | b) como gibbsita | c) como gysico | d) intercambiable y soluble |
| (11) | a) oxalato amónico | b) pirofosfato | c) ditionito | d) citrato |
| (12) | a) oxalato amónico | b) pirofosfato | c) ditionito | d) citrato |
| (13) | a) polarizada incidente | b) fría | c) polarizada cruzada | d) oblicua |
| (14) | a) isótropos | b) transparentes | c) amorfos | d) birrefringentes |
| (15) | a) cután de manganeso | b) revestimiento de arcilla | c) concreción de hierro | d) slickenside |
| (16) | a) difracción de RX | b) lámina delgada | c) ATD | d) absorción atómica |

2. Seleccionar entre diez y quince palabras clave introducidas en esta Unidad y que resulten relevantes según diferentes criterios.

3. Proponer otro nombre para esta Unidad que refleje igualmente su contenido.

UNIDAD 1. LOS SUELOS: ENFOQUES Y ESTUDIO

1.2. El suelo de avellanos es muy poco profundo, ya que hay un roca compacta muy cerca de la superficie del suelo, mientras que en el de la pradera las raíces pueden explorar un volumen de suelos mucho mayor.

2. 2.2. *Funciones:* Producción de biomasa (madera), secuestro de carbono, filtraje de agua, transformación de sustancias que reciban, entre otras. / 2.3. *Funciones:* Fuente de materias primas (yeso como material de construcción). La presencia de yeso permite inferir que el clima es semiárido o árido. / 2.4. *Características:* escaso espesor. Vientos fuertes.

3. Funciones del suelo. Organizar el debate para contrastar los distintos posicionamientos.

4.

	y	e	s	o	d	i
A	g	u	a	i	e	n
n			s		p	f
i	b		a		u	i
t	i		t		r	l
o	r	o	f	s	o	f
o	m	a	x	p	c	r
g	a	r	e	n	a	i
e	s				o	c
n	a				n	i
o					o	e
	t	u	r	b	a	n
						s

7. 1. a) Escala de observación: km. Organización edáfica: Edafopaisaje. Metodologías: fotointerpretación, análisis digital del terreno, secuencias de suelos a lo largo de una ladera. Usos del territorio: agrícola, forestal y de ocio. / b) Métrica / Suelo individual (pedión) / Calicata para observar un corte vertical (perfil del suelo). / c) Centimétrica / Parte de un horizonte (agregado de forma prismática) / Cuchillo y lupa (cuenta hilos). / d) y e) Submilimétrica / Acumulación de arcilla observada en campo con una lupa de mano y en lámina delgada observada con el microscopio petrográfico. / f) Micrométrica / Granos minerales de calcita / Microscopio electrónico de barrido.

2. Entre otros aspectos: Escala regional: permite disponer de una evaluación general del problema. Resulta de interés para establecer políticas de protección y control de la erosión. Escala de parcela: es la que permite plantear medidas concretas de conservación de suelos, estímulos para llevarlos a cabo y programas de formación: parcela a parcela. En un suelo concreto: permite estudiar la pérdida de material del suelo y su incidencia sobre la calidad del suelo. La integración de los tres enfoques resulta imprescindible, no obstante las evaluaciones a escala global no resuelven el problema.

8. Seleccionar las actividades. Organizar los grupos. Conducir el debate. Redactar los informes para defender la actividad que se quiere promover.

10. a) y b) Buscar información en la biblioteca y por Internet. / c) Angstrom (\AA , ingl. *Angstrom*) = 10^{-10} m / 1 mm de lluvia = 1 L m⁻².

11. 1. El suelo como elemento multifuncional de un ecosistema / 2. Organizaciones edáficas / 3. Sitio / 4. Pedión, perfil / 5. Horizonte.

12. (1) d / (2) c / (3) b / (4) c / (5) a / (6) c / (7) a / (8) b / (9) d / (10) b / (11) a / (12) c / (13) b, c, d / (14) d / (15) b / (16) a, b / (17) d / (18) d / (19) b / (20) d.

UNIDAD 2. PORQUE SON DISTINTOS LOS SUELOS: FACTORES ECOLÓGICOS DE FORMACIÓN

1. 1 b / 2 d / 3 b / 4 a / 5 b / 6 b / 7 b / 8 b.
4. a) / b) Imagen 1: material originario y posición en el paisaje / imagen 2: factores antrópicos: cultivo y aporte de estiércol y purín. / c) En un caso variación sistemática derivada de los factores ecológicos de formación, en el otro se trata de una zona agrícola–granadera: variación debida al uso.
6. a / b) Las diferencias de color permiten identificar tres horizontes genéticos, uno superior de color oscuro, otro blancuzco y otro ligeramente rojizo en la base.
9. a) Roca sedimentaria detrítica, formada por granos de tamaño limo y arcilla, poco consistente. Libera limo y arcilla al meteorizarse. / b) Se trata de una recta. El intervalo de existencia es, para la precipitación ($P \geq 0$) y para la arcilla ($100 > a$). / c) Es lo mismo.
10. Material coluvial (detrítico, poco clasificado, grueso, anguloso, transportado a poca distancia por acción del agua y de la gravedad) y no consolidado. Debe construirse el muro de contención para garantizar la seguridad.
11. a) Sí. / b) Lutita incluye a las limolitas y arcillitas.
12. a) (1) *erosión* / (2) *alóctonos* / (3) *próximas* / (4) *originario* / (5) *difícil* / (6) *procesos formadores* / (7) *tendrán* / (8) *irregular* / (9) *muy fértiles*. b) (1) *sedimentaria* / (2) *aluvial* / (3) *habrá* / (4) *muy vulnerable*.
15. a / b) Fisiografía: zona montañosa y valle. Formas del relieve: laderas y fondo de valle / Usos agrícolas / Funciones: producción de biomasa, captación de agua, captura de carbono, etc. / c) Están relacionados por los flujos de agua y movimiento de partículas.
16. a) La velocidad de circulación del agua será la misma en todas las macetas, pero el drenaje (clase de drenaje) no ha debido ser el mismo (facilidad con que se elimina el agua). Al investigar las macetas con las plantas muertas de observa que, por defecto de fabricación, su agujero para la salida del agua no era operativo: asfixia radicular. / b) Se ha hecho referencia a la conductividad hidráulica: buena circulación de agua, es decir, velocidad de circulación de agua.
17. Los suelos de umbría son más húmedos: más vegetación, más aporte de materia orgánica, mayor cantidad de agua, mayor translocación de sustancias en el suelo, mayor diferenciación de horizontes en el perfil. Efecto solana–umbría.
18. (1) toposecuencia / (2) ladera / (3) poco espesor / (4) erosión / (5) aumentará / (6) más profundos / (7) simples / (8) aumenta / (9) basales / (10) abajo / (11) un fondo / (12) aumentado / (13) basal.
21. 1. a) Mínimo > 0 años, máximo 10^3 años. / b) Igual o mayor. 2. La capa oscura que se halla a cierta profundidad corresponde a un horizonte a enterrado.
22. 1 b / 2 d / 3 b / 4 b / 5 c / 6 a / 7 c / 8 b / 9 d / 10 a / 11 b / 12 a / 13 d.
23. a) Muchos aportes, mineralización rápida: no hay acumulación importante de materia orgánica en la zona tropical. / b) Roca dura: cierto. llanura aluvial: no. / c) Las propiedades que varíen a lo largo del año (salinidad, contenido de humedad, entre otras) obligan a realizar muestreos repetidos. Por el contrario hay propiedades muy permanentes: tamaño de partículas, por lo que no será necesario repetir los análisis para una misma parcela periódicamente. / d) No, el desarrollo puede detenerse, la edad no.
24. b) En primer término material aluvial alóctono: roca terrígena detrítica. / c) Riesgo de inundaciones, efectos sobre la capa freática en actuaciones en la llanura aluvial.
25. Clima: clima, percolante. / Material originario: granito, basalto, mica, sí, al, ca. / Organismos vivos: bioturbación, MOS. / Posición en el paisaje: geomorfología, solana, toposecuencia, fondo. / Tiempo: datación, paleosuelo.

26. 1 - / 2 g / 3 f / 4 - / 5 - / 6 e / 7 b / 8 a / 9 - / 10 - / 11 d / 12 i
27. Consultar un mapa de suelos de la zona o a especialistas que trabajen en ella.
28. 1 material parental / 2 suelo mineral / 3 suelo orgánico / 4 material autóctono / 5 material alóctono / 6 suelo mineral / 7 material autóctono / 8 material preedafizado / 9 material coluvial / 10 material volcánico / 11 material aluvial / 12 till / 13 material eólico
29. 1 b / 2 a / 3 a / 4 b / 5 c / 6 d / 7 b / 8 c / 9 d / 10 a / 11 b / 12 c / 13 a / 14 b / 15 b / 16 a / 17 a.

UNIDAD 3. CÓMO SE TRANSFORMA UNA ROCA EN SUELO: METEORIZACIÓN DE ROCAS Y MINERALES Y EDAFOGÉNESIS

1. 1 a / 2 a / 3 b / 4 d / 5 c / 6 d / 7 b / 8 c / 9 b / 10 b / 11 a / 12 c
3. Se observa: roca fresca (color gris), roca colonizada por líquenes (color amarillo), grietas y oquedades en la roca en la que se ha formado un suelo (Asturias, España).
5. a) Roca de color blancuzco (yeso) con acanaladuras en sentido vertical en su superficie (lapiaz o lenar). / b) Por circulación del agua de lluvia sobre la roca. Disolución. / c) Productos: Ca^{2+} y SO_4^{2-} , que son solubles, por lo que serán movilizados fuera de la zona en la que tiene lugar la meteorización.
6. 1. sedimentarias / 2. esquisto / 3. extrusiva o volcánica / 4. aloquímicas / 5. granito, gabro / 6. basalto, riolita / 7. lutita, limolita / 8. caliza de precipitación / 9. caliza fosilífera.
7. (1) meteorizan / (2) formar / (3) frente de meteorización / (4) pueden ser muy distintas / (5) se pueden / (6) tropicales cálidas y húmedas / (7) albita / (8) no enriquece / (9) fácil / (10) lo contrario.
11. a) Acículas de pino y otros restos procedente de la biomasa depositados en la superficie del suelo y algunas plantas. / b) Adición de materia orgánica a la superficie del suelo en un bosque de pinos (determina las características de la materia orgánica aportada). Se trata de un proceso biológico (deriva de la biomasa). Se forma un horizonte orgánico de un suelo mineral: horizonte O, a partir del cual se forma el horizonte A.
12. a) Vegetación herbácea / horizonte muy oscuro / roca de color blanco. / b) Adición de materia orgánica por las raíces en una zona de clima húmedo y frío, formación de un horizonte órgano-mineral: A / El color de la roca sugiere una caliza. Parece compacta, da la sensación de dura, horizonte R. Proceso de carbonatación (disolución con agua con anhídrido carbónico disuelto) lenta. Las bajas temperaturas favorecen la disolución del anhídrido carbónico en el agua.
14. a) Viñedo. La superficie del campo muestra incisiones de algunos centímetros y de trazado irregular (arroyaderos). / b) Proceso: pérdida de material del suelo por efecto de la circulación incontrolada del agua de lluvia que no se infiltra (escorrentía superficial concentrada). Proceso edafogénico regresivo por desaparición del horizonte de superficie (rejuvenecimiento del suelo).
16. a) Grietas de considerable anchura en la superficie del suelo y superficie brillante inclinada dentro del suelo (slickensidad). / b) Expansión-retracción de arcillas expansibles (montmorillonitas), al humedecerse y secarse.
18. a) Hueco (espacio en negro), alrededor del cual aparece una aureola con una coloración más clara (blancuzca), diferente del material que la rodea, que es más oscuro. / b) Proceso de translocación. Se infiere por la concentración del material claro, posiblemente carbonato cálcico. Habrá llegado por el hueco en solución y ha depositado en la pared del hueco. / c) El clima debe ser semiárido o árido para que no haya llegado a producirse un proceso de pérdida de los iones Ca^{2+} y HCO_3^- por lavado por la base del perfil. Régimen de humedad no percolante (xérico o bien ústico). *Nota.* Se trata de un hiporrevestimiento de calcita (revestimiento por la parte de dentro de la superficie).

19. a) Cristales lenticulares que rellenan un canal. / b) La forma de estos cristales permite inferir que se trata de yeso. Proceso de translocación. / c) Zona árida o semiárida.
20. Tener en cuenta el proceso de meteorización, el diagrama de Mason y los procesos edafogénicos en una y otra zona.
21. (1) duplica / (2) diez / (3) tropicales / (4) muy intensa (5) rojizas / (6) Fe(III) / (7) lavado / (8) deteriora / (9) no muy alto / (10) se mineralizará rápidamente / (11) muy profundos / (12) poco fértiles.
22. a) Confunden el término meteorización con el de erosión.
24. Una vegetación de helechos indica que se trata de un medio ácido, con un clima húmedo. Se observan cinco horizontes, cuyos límites son netos, planos y paralelos a la superficie del terreno. Un primer horizonte muy delgado y de color oscuro corresponde a un O. Debajo hay un A, distinguible por su color oscuro. Debajo un horizonte de color blanco debido a la eluviación, se trata de un E. Debajo un horizonte negruzco, por los factores ecológicos de formación, se puede afirmar que se trata de un Bh, de acumulación de materia orgánica translocada (queluviación), debajo del cual hay un Bs de color parduzco.
25. 1. No existe una correspondencia biunívoca entre material originario y suelo. Tener en cuenta los factores ecológicos de formación que han orientado la edafogénesis en cada caso.
2. a) Hidrólisis muy intensa. Disolución y lavado de iones (Mason). / b) Clima húmedo y cálido. / c) Régimen de humedad percolante.
27. a) Los resultados se expresan en forma de porcentaje de óxidos, lo cual no significa que existan como tales en la roca. / b) No, es la forma de expresar los resultados, no la composición mineralógica de la roca. / c) Tamaño del grano depende de la velocidad de enfriamiento. riolita / granito; basalto / gabro. / d) Basalto. / e) Proceso de translocación frente a lavado según según sea el régimen de humedad. El drenaje condiciona la salida del agua del suelo. / f) Roca ácida: contenido de SiO₂, no tiene que ver con el pH ni con la acidez del suelo resultante.
28. Construir un esquema conceptual.
29. Confunden factores con procesos. Faltarían dos factores.
30. 1/c 2/a 3/- 4/d.
31. 1 a / 2 b / 3 d / 4 a / 5 b / 6 d / 7 b / 8 c / 9 b / 10 b / 11 a / 12 c / 13 b / 14 d / 15 a / 16 b
32. Redistribución de agua y solutos de una posición a otra, inducida por el riego.

UNIDAD 4. ESTUDIO DE SUELOS EN EL CAMPO: MORFOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE SUELOS

1. 1 c / 2 a / 3 a / 4 d / 5 b / 6 c / 7 d / 8 c / 9 b / 10 b / 11 b / 12 d / 13 d / 14 b
5. a) Se observan superficies (manchas irregulares) de distintos colores (o tramas) que se denominan delineaciones del mapa. El tamaño mínimo representable es el de un cuadrado de 5 mm de lado (por legibilidad). Las líneas que separan dos delineaciones contiguas se denominan límites. Las superficies representadas del mismo modo (color o trama) integran una misma unidad cartográfica. La descripción de las unidades cartográficas que aparecen en el mapa constituye la leyenda del mapa. Al aumentar la escala del mapa, lógicamente, se podrán representar en el mapa superficies-terreno de menor tamaño, con tal que en el mapa ocupen un cuadrado cuyo lado sea mayor de 5 mm (para facilitar la utilización del mapa, puede que no sea interesante representarlas, si bien se podría). También se podrían establecer más unidades cartográficas. En el primer mapa se han representado más delineaciones y más unidades cartográficas que en el segundo. / b) El número de observaciones que se han tenido que realizar en campo para cartografiar la zona representada es de 200 en el primer caso y de 50. /

c) El primer mapa ya que se han realizado un mayor número de observaciones. / d) En el primer mapa se han representado 18 delineaciones y en el segundo 7 que corresponden a unidades cartográficas en el primer caso y 5 en el segundo, al generalizar se pierde necesariamente información.

10. 1. a y b) Masa forestal abierta con sotobosque con gramíneas. Suelo dos horizontes, el superior de color oscuro, el subyacente de color claro, continuo y sin grietas: perfil. / Vegetación herbácea. Suelo con horizonte oscuro, debajo una línea de piedras y debajo un material más claro, con pequeños filones curvados. Se puede afirmar que ha habido una superposición de materiales: la línea de piedras evidencia una fase erosiva y un depósito posterior de materiales: perfil A 2C. / c) La roca dura (contacto lítico) supone un factor limitante para las funciones del suelo: enraizamiento, almacenamiento de agua, instalación de postes y conducciones enterradas, entre otras.

2. Hoyo de plantación, a veces tienen una sección vertical rectangular u otras no.

3. Exceso de agua durante períodos prolongados. vegetación de *Sphagnum*, clima húmedo y frío.

14. a) Cada página corresponde a un matiz (longitud de onda de la radiación reflejada) diferente. Una es la 2.5 YR y la otra 5 Y. En cada página los colores están ordenados según dos ejes: ordenadas (brillo, que se hace más claro al aumentar su número); y las abscisas (croma, el color se hace más puro al aumentar su número). / b) La parte superior derecha (brillo alto y croma alto).

15.

Grado de desarrollo	1	2	3	4	5
Sin estructura					
S/estructura por elementos grueso					
Muy débil					
Débil					
Moderada			—		—
Fuerte	—				
Muy fuerte					
Material original					
Material original > 50% volumen					

16. Horizontes genéticos: OAEBsC / límite entre el E y el B_s es ondulado y abrupto.

17. a) Acceder por Internet al *National Soil Survey Handbook* (618) para buscar información acerca de los efectos diversos condicionantes en las funciones y usos del suelo. / b) Son correctas la b.1. y b.2.

18. 1 f / 2 c / 3 a / 4 b / 5 e / 6- / 7 d / 8 h.

19. Revisar la documentación del curso.

20. En la base del primer perfil se observa un fragmento de ladrillo (artefacto). Material de relleno derivado de la actividad antrópica: Technsol^{WRB} / En el otro suelo: horizonte oscuro en la parte superior, un horizonte A, con algún hoyo de plantación; debajo un horizonte de color amarillento, horizonte C; debajo las formas onduladas indican que no se trata de un horizonte edáfico, sino de un material plegado, roca metamórfica.

21. 1 a / 2 a, c / 3 b / 4 c / 5 c / 6 c, d, b / 7 a / 8 b / 9 c / 10 d / 11 b / 12 a.

UNIDAD 5. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

1. 1 a / 2 b / 3 c / 4 a / 5 b / 6 a / 7 c / 8 b / 9 c / 10 d / 11 c / 12 c / 13 c.

3. a) Asfixia radicular y muerte de los melocotoneros (duraznos) por falta de oxígeno si está saturado de agua / b) Los chopos toleran la presencia de una capa freática, pero ésta debe circular, de manera que haya una renovación del oxígeno disuelto en el agua, de lo contrario se mueren. / c) Un área de picnic debe estar seca, por consiguiente, la presencia de una fase líquida que sature el suelo hace que no debe seleccionarse la zona para implantar el área de picnic / d) Requiere agua en permanencia.

5. Masa: kg / [M] / diverso; Volumen: m³ / [L³] / diverso; Densidad real: kg m⁻³ / [ML⁻³]; Densidad aparente: kg m⁻³ / [ML⁻³]; Color: Munsell / — / —; Moteado: — / > 10%; Estructura: — / — / —; Porosidad: % / [L³ L⁻³]; Esfuerzo cortante: ; Humedad: % / [MM⁻¹] o [L³L⁻³]; Infiltración: mm h⁻¹ / [LT⁻¹]; CRAD: [L³L⁻²]; Potencial del agua del suelo: J kg⁻¹ o Pa o m; Conductividad hidráulica (saturada): m día⁻¹ / [L T⁻¹] / 0,01 a > 1.

6. 6.1. El volumen restante es el de huecos, que podrá estar ocupado por aire y por agua, variando continuamente según que el suelo se humedezca o se seque. / 6.2. a) Si. Suelo saturado de agua: fase líquida = 49%, fase gaseosa = 0% Suelo seco: fase líquida = 0%, fase gaseosa = 49% / b) Una sola fase: no / Dos fases: si, suelo totalmente seco; y en el caso de suelo saturado de agua. / c) Suelo saturado de agua: falta de oxígeno para las raíces, anoxia y muerte. Se verán afectadas, la función de producción de biomasa, el papel de filtro del suelo frente al agua que reciba, así como diversos procesos edafogénicos (redox, por ejemplo), la posibilidad de utilizar el área para actividades de ocio, entre otros, según la intensidad. / 6.3. Se pueden distinguir el volumen y masa de cada fase y el volumen total del suelo y su masa. Por consiguiente se pueden definir cuatro densidades diferentes.

8. 1 c, c / 2 d, h / 3 a, b / 4 f, g / 5 i, j.

9. 1 a / 2 d / 3 a / 4 c / 5 b / 6 b.

5.1. COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA Y TEXTURA

1. 1 b / 2 b / 3 a / 4 a / 5 d

3. a) $F_C - F_E - F_F = 0$

$$F_F = 2\pi r \eta \times 3V; \quad F_E = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_w g; \quad F_C = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_s g; \quad V = \frac{2}{9} \frac{g(\rho_s - \rho_w)}{\eta} r^2 = Kdr^2 = h/t,$$

siendo r el radio de las partículas.

b) Diámetro de partícula: 2 μm. Datos necesarios: densidad del agua y de las partículas, la viscosidad del líquido para una temperatura dada. Se puede fijar un tiempo de sedimentación y calcular la profundidad de pipeteado o bien fijar ésta y calcular el tiempo. / c) $V = 0,217 \text{ cm s}^{-1}$; $t = 46 \text{ s}$.

4. 1.a) Cubo de 1 cm de lado: Superficie: 6 cm² / Volumen: 1 cm³ / Sup. esp.: 2,26 cm² g⁻¹. Con cubos de 2 mm de lado: sup. esp: 11,32 cm² g⁻¹ / Con cubos de 2 μm de lado: Superficie específica: 11320 cm² g⁻¹. / b) Al aumentar la superficie específica también lo hace la superficie de contacto con el agua y con ello la reactividad química, que será muy alta en el caso de las arcillas. / c) No. Algunas son esférica, otras como las arcillas son laminares. / d) No. La estabilidad de los distintos minerales determina en qué fracción granulométrica se van a encontrar. Así, el cuarzo, que es muy resistente a la meteorización, por lo que se encontrará en la fracción arena.

2.a) Criterio de calidad: $\Sigma (a + L + Ar) = 100$. La tercera deberá repetirse. b) Se requiere saber si los análisis corresponden a criterios granulométricos USDA o ISSS, ya que los triángulos de texturas son específicos para cada caso. / c) Se representa primero la fracción arcilla, lo que facilitará la identificación de una posible acumulación. Si en campo se han descrito revestimientos de arcilla a la profundidad a la que se presenta la acumulación, se tratará de un horizonte B_p, endopedión argílicoST o argílico^{WRB}.

6. a) Se observan zonas en que el cultivo está verde, mientras que el color marrón de otras indica que ya se ha secado. b) Ello puede indicar una variabilidad espacial de los suelos. Uno de los suelos puede ser más arenoso y por ello con menor capacidad para retener agua, cuya falta puede provocar un adelanto en el secado de la planta al final del cultivo. Nota: Se trata de un Xerorthent y un de Xerosamment.

7. 1. EG / 2. bloques / 3. grava / 4. Ar / 5. L / 6. a / 7. 20 / 8. tierra fina / 9. químicos / 10. meteorizan.
8. a) Criterio de calidad: $\Sigma (a + L + Ar) = 100$. Los análisis están bien según este criterio. Criterio complementario: comparar las clases texturales con las que se dieron en campo. Si hay grandes diferencias el prospector fue una persona entrenada, dar mayor credibilidad al test de campo y hacer repetir el análisis / b) Clases texturales: arcillosa / c) Grafico: profundidades (ordenada) y porcentajes acumulados (abscisa) / d) 17,7%.
9. a) Los agregados no han sido destruidos, por lo que partículas no se hallarán individualizadas. / b) Las partículas de arcilla no se hallarán dispersas / c) En un horizonte bien estructurado, ya que en uno sódico las arcillas están naturalmente dispersas / d) En las arcillosas / e) Capacidad de retención de agua, facilidad de laboreo, susceptibilidad a la erosión eólica, contenido de nutrientes para las plantas, entre otras.
10. 1 c / 2 — / 3 f / 4 — / 5 a / 6 b / 7 d / 8 g / 9e.
11. Secuencia: 3 / 9 / 2 con peróxido de hidrógeno / 1 hexametáfosfato sódico / 7 / 5 / 6 / 4 / 8.
12. a) Haciendo el ensayo del cilindro con una muestra a humedad en el punto de adherencia y previa eliminación de los elementos gruesos / b) sedimentación diferencial según el tamaño de partículas individualizadas / c) por el menor tamaño de partículas de arcilla.
13. 1 b / 2 a / 3 a / 4 d / 5 a / 6 c / 7 d / 8 a / 9 d / 10 a / 11 d / 12 b / 13 d / 14 d.

UNIDAD 5.2. COLOR DEL SUELO

1. 1 b / 2 b / 3 b / 4 a / 5 c.
3. a) Hue = matiz / Value = brillo / b) Mal drenaje: colores amarillentos a grises: entre estas dos páginas se utilizará la de la derecha / c) 2,5 YR 2/4 (croma alto) / d) Los suelos fríos en primavera serán aquellos cuya superficie sea de color claro: 2,5 YR 8/2, por ejemplo
7. a) y b) Procesos: color oscuro en la parte superior: aporte de materia orgánica. Horizonte O y A; color blanco (pérdida): eluviación: formación de un horizonte E; color oscuro: translocación de materia orgánica: Bh y de sexquioxidos: Bs / c) Régimen de humedad: percolante (údic). *Nota.* Suelo bosque. Podzol^{WRB}, EspodosolST.
8. Suelo 1: colores amarillentos: posibles problemas de drenaje / Suelo 2: Color rojizos: suelo bien aireado y con buen drenaje .
9. Muy posiblemente haya una capa freática de nivel oscilante en algún momento del año, por lo que puede existir riesgo de contaminación.
10. 1 c / 2 d / 3 c / 4 c / 5 a / 6 b / 7 d / 8 a / 9 b / 10 c / 11 b / 12 b.

UNIDAD 5.3. ESTRUCTURA DEL SUELO

1. 1 a / 2 b / 3 c / 4 d / 5b.
5. Formas esferoidales entrelazadas por raíces finas. Corresponde a una agregación de partículas en agregados que caracteriza a una estructura granular compuesta. Buena estructura. Típica de suelos de pradera.
7. a) Textura: porcentaje de partículas individuales de diferentes tamaños. Estructura es el ordenamiento de los granos individuales en partículas secundarias o agregados y el espacio de huecos que llevan asociados. En una construcción los ladrillos hacen referencia a la textura, mientras que el edificio resultante es la estructura. b) a n z / b m x / c p y.

9. 1 sin estructura (apedial) / 2 con estructura (pedial) / 3 continua o maciza / 4 prismática / 5 en bloques.
10. 1 e / 2 h / 3 b / 4 a / 5 f / 6 c / 7 g / 8 d / 9 j / 10 –.
12. 1 b / 2 c / 3 a / 4 d / 5 a / 6 b / 7 c / 8 a / 9 b / 10 d / 11 d / 12 b.

UNIDAD 5.4. DENSIDAD REAL, DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD

1. 1 b / 2 a / 3 b.
3. Piezas: anillo metálico uno de cuyos bordes está biselado para poder tomar una muestra inalterada; cabezal cilíndrico para poder presionar e introducir el anillo toma de muestras dentro del suelo sin afectar a la muestra y un gato para poder hacer presión de forma gradual.
5. 1. a) masa: 3250 Mg ha⁻¹ y 25 cm; b) Al ser la clase textural Arenoso-franca se nos dice que el análisis corresponde a los criterios USDA, triángulo de texturas a utilizar: 0 < arcilla < 15%; 0 < limo USDA < 30%; d) ρ_s : 2600 kg m⁻³ / e) masa de agua: 1250 Mg agua ha⁻¹ y 25 cm de suelo / f) drenaje y evaporación (salida de agua) / g) se satura la parte superior a la suela de labor y aumenta la escorrentía superficial, menores disponibilidades de agua para las plantas. // 2. ρ_b : 1404 kg m⁻³. // 3. ρ_s : 2666 kg m⁻³.
6. Seleccionar lo que convenga.
9. 1 b / 2 a / 3 b / 4 d / 5 d / 6 d / 7 b / 8 a / 9 b / 10 c / 11 a / 12 b.

UNIDAD 5.5. CONSISTENCIA, SELLADO, ENCOSTRAMIENTO Y TIXOTROPÍA

1. 1 c / 2 d / 3 c / 4 c / 5 b / 6 a / 7 b / 8 a / 9 b.
7. Las raíces presentan una deformación manifestada por un cambio de dirección a unos 15 cm. Puede ser debido a la existencia de una capa compactada a dicha profundidad. Al encontrar una grieta recuperan su crecimiento vertical descendente.
11. 1. a) Revisar las funciones potenciales del suelo en la Unidad 1. / b) El contenido de agua hace variar la consistencia del suelo, cuando está muy húmedo se manifiesta su plasticidad y adhesividad; cuando está húmedo o ligeramente húmedo, su friabilidad y cuando está seco, su fragilidad o dureza. Esto influye en el comportamiento frente a diferentes usos. / c) La circulación y las labores realizadas en un suelo excesivamente húmedo provocan su compactación.
- 2.a) Sí. Los materiales tixotrópicos de la ladera al ser afectados por un movimiento sísmico pueden adquirir una consistencia fluida y deslizarse ladera abajo. b) La tala de árboles aumentará los riesgos.
3. Sí. En un suelo arcilloso cuanto mejor sea la estructura mejor será la penetración de las raíces, por el contrario en un suelo arenoso los granos están sueltos y el condicionante será la resistencia del suelo al paso de las raíces.
12. 1 d / 2 g / 3 e / 4 c / 5 a / 6 b / 7 j / 8 – / 9 f / 10 i / 11 h / 12 –.
13. a) Al ser un endopedión hipergypsico (acumulación de yeso) el % yeso $\geq 60\%$ / b) Muy compacto, al humedecerse disminuye su compacidad. Muy duro en seco / c) No, al no precisar el estado de humedad / d) Por su compacidad elevada, por su bajo contenido en agua y nutrientes /.
15. 1 c / 2 b / 3 a / 4 b / 5 b / 6 c / 7 d / 8 d / 9 c

UNIDAD 6. COMPONENTES INORGÁNICOS DEL SUELO

1. Tres tectosilicatos: Cuarzo / Ortosa / Microclina.
Tres rocas ígneas: Sienita / Basalto / Granito

Un mineral meteorizable	Olivino
Un tipo de estructura metamórfica	Esquistosa
Dos procesos de formación de rocas sedimentarias	Evaporación / Erosión
Una roca carbonatada	Calcilita
Tres minerales de origen evaporítico	Halita / Mirabilita / Yeso
Dos texturas de rocas plutónicas	Porfírica / Granular
Tres minerales que contienen hierro	Hematita / Pirita / Goetita
Un mineral de arcilla	Illita
Un mineral amorfo	Alófana

3.

	Cuarcitas	Cuarzo	Minerales opacos	Fragmentos de caliza
Elementos gruesos	3	0	0	2
Arena gruesa	3	18	4	2
Arena media	0	27	0	0

a) Material parental: Puede tratarse de un conglomerado formado por cuarcitas cementadas por carbonato cálcico. / b) Se puede encontrar información en: <http://www.hmag.gla.ac.uk/john/teaching/intro.htm> y en <http://www.brgm.fr>

Los minerales isotropos, los minerales anisótropos cuando la sección es perpendicular a un eje de simetría, los minerales amorfos, y los minerales opacos.

4.B. Consultar la Información Complementaria A y la bibliografía.

4.C. a) *Basalto*: plagioclasa, clinopiroxeno y olivino. Como elementos accesorios, hornblenda, biotita, ortopiroxeno, magnetita, ilmenita, apatito, feldespatos, feldespatoides. / *Sienita alcalina*: cuarzo, anfíboles, biotita y ortosa.

b) Meteorización: (Serie de Bowen). De más a menos meteorizables: Basalto: olivino, clinopiroxeno, plagioclasa / Sienita alcalina: anfíboles, biotita, ortosa, cuarzo

c) Composición probable de la fracción arena: Suelos derivados de basalto: principalmente plagioclasas, y residuos alterados de piroxenos y olivinos. / Suelos derivados de la sienita alcalina: cuarzo y ortosa principalmente.

d) Deficiencia de hierro: No. La meteorización del olivino libera hierro en el suelo formado a partir de basalto, así como la biotita, en el caso de la sienita.

4.G. A) Buscar información en la bibliografía.

Sal	Denominación	Solubilidad (gL ⁻¹)

B. (p. 169) Completar información

pH del medio	Estructura	Carga permanente	Carga variable	Carga total
Ácido		-1	+1	0
Neutro		-1	0	-1
Básico		-1	-1	-2

5. 1 b / 2 d / 3 d / 4 c / 5 a / 6 a / 7 b / 8 b / 9 b / 10 c / 11 b / 12 a / 13 b / 14 a / 15 b / 16 b / 17 c / 18 a.

6.

1.a. El perfil CER941A se ha desarrollado sobre coluvios de ladera formados por (1) **rocas metamórficas es carbonatadas**. El edafoclima se caracteriza por un régimen (2) ~~no~~ percolante. El estudio del suelo en el campo y los datos analíticos, concretamente (3) **el carbonato cálcico equivalente**, muestran que el epipedión ha perdido los carbonatos que estaban presentes en la fracción mineral gruesa del suelo, por disolución, ya que los valores son ligeramente (4) **ácidos**. Esta disolución está favorecida por la alta actividad biológica en los epipediones, a pesar de que una parte del año está inactiva por las bajas temperaturas. Los carbonatos se acumulan parcialmente en el horizonte B_w recubriendo los elementos gruesos, pero la matriz del suelo continúa estando descarbonatada, tal como lo indica (5) **la respuesta al HCl 11%**. El material parental no alterado se encuentra a unos 70 cm.

1.b. No reacciona porque los carbonatos están presentes en la solución del suelo por la disolución de los elementos gruesos que son fragmentos de calizas metamórficas.

2. a) Sí, por la presencia de esmecitas. / b) Sí, la lepidocrocita. Está presente en horizontes con el sufijo g, indicador de condiciones reductoras. / c) Considerando unas CIC de 30, 10 y 80 cmol_c kg⁻¹ para la illita, caolinita y esmectita respectivamente, y según el contenido de arcilla y su composición, la estimación es de 22,2 cmol_c kg⁻¹ para el horizonte E, 32,3 cmol_c kg⁻¹ para el horizonte B_{tg2} y 6,6 cmol_c kg⁻¹ para el horizonte 2B_w. / d) Probablemente la illita es heredada, y la caolinita y esmectita son neoformadas, ya que se encuentran en una zona tropical (caolinita), y con riqueza en cationes que permite la neoformación de esmectita. / e) No, por la reacción del medio. f) Falta de oxígeno durante una parte del año. Presencia de arcillas expansibles. Toxicidad por aluminio.

UNIDAD 7. COMPONENTES ORGÁNICOS DEL SUELO

1. 1 a / 2 a / 3 c / 4 b / 5 b / 6 c / 7 a / 8 b / 9 c / 10 c

5. 1. Gran cantidad de m.o. en un espesor considerable. Aporte por las raíces de gramíneas. Horizonte A de un suelo de pradera. Horizonte bien estructurado, con actividad biológica elevada. Posible epipedión móllico. / 2. Gran cantidad de m.o. en poco espesor (mantillo). Aporte por las hojas de una resinosa (se descomponen lentamente). Horizonte O (orgánico de suelos mineral). Suelo de bosque. / 3. Gran cantidad de materia orgánica (un 60%) en un gran espesor. Muy oscura. Horizonte H. Epipedión hístico. Medio saturado de agua. Turbera. Suelo orgánico. / 4. Distribución irregular de m.o. en profundidad. Aportes sucesivos de materiales ricos en m.o. debido a inundaciones periódicas. Característico de una llanura aluvial. Carácter fluvéntico. Si se evitan las inundaciones es un suelo muy fértil. / 5. Contenido de carbono orgánico superior al 0,2% a 125 cm de profundidad. Carácter fluvéntico. Característico de una llanura aluvial. / 6. Gran cantidad de m.o. en la parte más superficial, en poco espesor (Horizonte O); debajo un horizonte con materia orgánica en un cierto espesor (Horizonte A); debajo horizonte de color muy claro, sin materia orgánica (Horizonte E) y de nuevo horizonte con materia orgánica a cierta profundidad (Horizonte Bh, m.o. translocada). Suelo de bosque húmedo. Suelo ácido. / 7 Horizonte con poca materia orgánica en la parte superior. Espesor sin materia orgánica y que da reacción con el HCl del 11%; horizonte con materia orgánica a cierta profundidad (horizonte enterrado, la translocación no es posible en un medio rico en carbonato cálcico).

8. a) En los suelos de selva tropical, húmeda y cálida hay una biomasa importante que aporta gran cantidad de materia orgánica anualmente, ahora bien las elevadas temperaturas y la humedad hacen posible que la mineralización sea muy intensa y la materia orgánica no se acumula en el suelo. / b) La escasez de agua hace que haya poca biomasa y por consiguiente pocos aportes de m.o. La presencia en algunas de estas zonas de suelos ricos en materia orgánica (4-5%) se debe interpretar como heredada de una vegetación del pasado, en un medio más húmedo. Una vez alcanzado aquel grado de desarrollo (duración ecológica de formación de aquellos horizontes) la edad del suelo sigue aumentando, pero la m.o. puede permanecer estabilizada en las condiciones de medio. / c) Turbera de alta montaña > suelos de prado > suelos de regadío > suelos cultivados en secano > suelos de zonas áridas. / d) Restos de un incendio. Dentro del suelo corresponde a raíces quemadas.

10. Aporte de m.o.: prado (por las raíces, formación de un A, una relación C/N baja indica una buena incorporación de la m.o. y la materia mineral, resultando una buena estructura); pinar (por las hojas que se acumulan,

debido a su C/N alto se descomponen muy lentamente, dando lugar a un O a partir del cual se forma un A); hayedo (aporte por las hojas que se descomponen en el año y dan lugar a un A). Los hongos predominan en medios ácidos.

14. 1. Necromasa vegetal y restos de animales / 2. Materia orgánica humificada (humus en sentido estricto).

15. 1 e / 2 d / 3 c / 4 i / 5 f / 6 a / 7 g.

17. 1. Un material orgánico requiere tanto más nitrógeno para su mineralización cuanto más elevada es su relación C/N, por lo que tiene efectos sobre el cultivo siguiente. Para evitarlo se requiere aportar nitrógeno adicional. // 2. a) Al actuar como sustrato para los microorganismos éstos obtienen energía y nutrientes. Cuanto más rápido sea el potencial de descomposición y mineralización del componente orgánico, más rápidamente suministrará energía. Ordenándolos atendiendo a su tasa potencial de descomposición de más rápida a más lenta: azúcares > hemicelulosas > celulosas >> ligninas, ceras, resinas. / b) Macronutrientes: nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^-), fósforo (PO_4^{3-}), azufre (SO_4^{2-}). / c) La presencia de grupos aromáticos frena la mineralización. / d) Los taninos tienen un efecto antiséptico frente a los microorganismos, por lo que inhiben la descomposición de la MOS. // 3. La MOS forma microagregados con las arcillas, pasando a ocupar posiciones que pueden resultar inaccesibles para los microorganismos, con lo que se evita su descomposición y mineralización. // 4. En una ladera predominan los procesos erosivos, por lo que los suelos pierden su horizonte A empobreciéndose en MOS, mientras que en una llanura aluvial, con las inundaciones se pueden depositar materiales con un cierto contenido de materia orgánica. Además, en las zonas con mal drenaje las bacterias no actúan y la materia orgánica se acumula, pudiendo llegar a formarse horizontes y suelos orgánicos, si la saturación de agua es permanente. // 5. Su elevado contenido en lignina la hace especialmente resistente a la descomposición.

18. a) y b) Para un espesor de 20 cm:

	Volumen $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	Masa $\text{kg} \text{ suelo ha}^{-1}$	kg MOS ha^{-1}	MOS %	C.O. %
1	2×10^3	2680×10^3	57.000	2,12	1,23
2	2×10^3	2700×10^3	35.000	1,29	0,75
3	2×10^3	2780×10^3	36.000	1,29	0,75

c) Se supone que ha transcurrido el tiempo de la duración ecológica para que se desarrolle este horizonte órgano-mineral, de manera que los aportes compensan a la mineralización, por lo que el contenido de MOS se considera en equilibrio dinámico.

d) El uso anterior al momento cero hizo disminuir la MOS del suelo originario (pradera virgen) en un 38,6%. La implantación de praderas cultivadas ha supuesto un incremento gradual de la MOS hasta 45 Mg ha^{-1} , decir, de un 28,6% (con los consiguientes beneficios para la estructuración del suelo, porosidad, aireación, entre otros aspectos). Mientras que en el caso del monocultivo de trigo, simplemente se ha evitado que siguiese bajando el contenido de MOS.

19. 1 b, d / 2 b / 3 b / 4 c.

20. 1 b / 2 d / 3 c / 4 b / 5 c / 6 c / 7 a / 8 a / 9 b / 10 d / 11 d / 12 b

21. 1. Rusia

$$\frac{3,4 \text{ cm turba}}{100 \text{ años}} \cdot \frac{1 \text{ m turba}}{100 \text{ cm turba}} \cdot \frac{200 \text{ kg turba}}{1 \text{ m}^3 \text{ turba}} \cdot \frac{1,83 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg turba}} = 0,1244 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$$

$$0,1244 \times 5.000.000 \text{ m}^2 = 622.000 \text{ kg CO}_2$$

Noruega

$$\frac{1,8 \text{ cm turba}}{100 \text{ años}} \cdot \frac{1 \text{ m turba}}{100 \text{ cm turba}} \cdot \frac{200 \text{ kg turba}}{1 \text{ m}^3 \text{ turba}} \cdot \frac{1,83 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg turba}} = 0,0659 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$$

$$0,0659 \times 20.000.000 \text{ m}^2 = 1.317.500 \text{ kg CO}_2$$

	<u>kg CO₂ m² año⁻¹</u>	<u>kg CO₂ año⁻¹</u>
Rusia	0,1244	622.000
Noruega	0,0659	1.317.500

La turbera de Noruega secuestra anualmente más carbono que la rusa, concretamente más del doble.

- Un aumento de la temperatura aceleraría el proceso de mineralización de la turba en las zonas boreales, la velocidad de crecimiento sería menor o incluso nula, y por lo tanto se dejaría de secuestrar carbono e incluso se liberaría más CO₂ a la atmósfera agravando aún más el efecto invernadero.

UNIDAD 8. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO: UNA PANORÁMICA

- 1 c / 2 c / 3 a / 4 d / 5 b / 6 d / 7 b / 8 b / 9 c / 10 a / 11 c / 12 d / 13 a / 14 c

3. a) Forma de la gráfica: Proporciona información desde aproximadamente el año 1100 hasta la actualidad. Presenta cuatro máximos relativos y dos depresiones muy marcadas. De 1400 a 1600 se produjo un primer incremento, si bien el mayor incremento tuvo lugar a partir de mediados del siglo XIX. / b) Las depresiones corresponden, una al final de la Edad Media y otra con la Primera Guerra Mundial. Los incrementos del siglo XVII (ver Praga) y el del siglo XIX (ver Liebig). / c) Buscar información en Internet.

7. 1. Buscar información en Internet acerca de la agricultura itinerante. / 2.a) Buscar la composición de la ortosa y ver si puede liberar potasio. Tener en cuenta que la meteorización es un proceso muy lento. Consultar el diagrama de Mason. b) Ninguna. Debe tener lugar la liberación por meteorización.

8. a) Las cenizas volcánicas se meteorizan rápidamente si hay agua. Las cuarcitas muy lentamente. / b) Consultar en la bibliografía. / c) Naturaleza del material originario, precipitaciones y temperaturas de la zona. / d) Consultar el diagrama de Mason. / e) Que sean liberados con la mineralización de la materia orgánica.

9. Buscar información acerca de los distintos tipos de agricultura: comercial, intensiva, ecológica, biodinámica, sostenible/sustentable. Analizar los puntos fuertes y los puntos débiles de cada una de ellas.

12. a) Depende de su solubilidad / b) KAlSi₃O₈, KCl.

13. Buscar información en la bibliografía en relación a las Kps.

14. 1 c / 2 c / 3 a / 4 c / 5 b / 6 b / 7 b / 8 a / 9 a / 10 c / 11 b

8.1. REACCIONES DE SUPERFICIE: FLOCULACIÓN Y DISPERSIÓN

1. 1 b / 2 a / 3 d / 4 c / 5 b / 6 b / 7 c / 8 a / 9 d / 10 b / 11 c / 12 c / 13 a / 14 b

5. a) Se usan compuestos a base de sodio, ya que este catión al ser monovalente tiene un gran poder dispersante. Buscar en la bibliografía qué reactivos se emplean. / b) El aporte de sodio por el agua de riego tenderá a provocar dispersión: inestabilidad y destrucción de la estructura. / Las arcillas sódicas están dispersas: mala estructura, mala aireación y mala circulación del agua. El comportamiento de un suelo sódico es muy desfavorable.

6. Elaborar un esquema conceptual con ellos.

7. 1. a) Con el calcio mayor interacción, ya que el espesor de la doble capa será la mitad y pueden actuar las fuerzas de London-van del Waals. / b) A medida que aumenta la concentración de la solución exterior el espesor de la doble capa disminuye, con lo que la interacción entre dobles capas se acentúa. Las partículas de arcilla estarán floculadas. Un suelo salino tendrá mejor estructura que si se baja el nivel de la capa freática y es substituida por agua de lluvia cuyo contenido salino es muy bajo. c) Con calcio las arcillas estarán floculadas y no será posible su translocación en suspensión en el agua que circula por el suelo. En el caso del sodio las arcillas están dispersas y, por consiguiente, su translocación es posible. / d) Como catión trivalente a $\text{pH} < 5,5$ interactúa con las arcillas provocando su floculación, por consiguiente la estructuración del suelo se verá favorecida.

8. 1 b / 2 c / 3 a / 4 b / 5 d / 6 b / 7 a / 8 b / 9 c.

8.2. REACCIONES DE SUPERFICIE: ADSORCIÓN DE IONES

1. 1 b / 2 d / 3 b / 4 c / 5 a.

4. a) La ecuación corresponde a una curva de forma parabólica, lo que indica que no se ha previsto un límite de adsorción / b) Ecuación de una recta. / c) Los resultados obtenidos permiten calcular los valores de las constantes k y n de la ecuación, con lo que ya resultará representable. / d) El peróxido de hidrógeno (H_2O_2) destruye la materia orgánica que es uno de los componentes que confiere capacidad para adsorber aniones al suelo, por lo que la adsorción disminuirá.

6. 1 c / 2 d / 3 c / 4 a / 5 a / 6 b / 7 d / 8 b / 9 b / 10 a.

8.3. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

1. 1 b / 2 d / 3 a / 4 a / 5 c / 6 d / 7 c / 8 b / 9 b / 10 a / 11 d.

4. a) b) $20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de suelo.

8. a) $5.440 \text{ kg Ca ha}^{-1}$ / b) El acetato amónico disuelve el carbonato cálcico, con lo que sobrevalorará el calcio con la extracción.

11. $\text{ESR} = K'_G \times \text{SAR}$; es la ecuación de una recta, $y = ax$, que pasa por el origen y su pendiente es K'_G .

14. 1 d / 2 c / 3 e / 4 b / 5 g / 6 i / 7 a / 8 j / 9 — / 10 —.

15. a) Deben determinar la CIC con $\text{NH}_4\text{AcO } 1\text{N}$ a $\text{pH} = 7,0$ y la CICE por suma de los cationes basicantes extraídos con $\text{NH}_4\text{AcO } 1\text{N}$ a $\text{pH} = 7,0$ y del aluminio extraído con $\text{KCl } 1\text{N}$. / b) La CIC, ya que al pH del suelo parte del aluminio Al^{3+} está fuertemente retenido y bloquea sedes de intercambio. / c) La CICE. / d) Se trata de un suelo muy meteorizado. Ácido. Su arcilla debe ser de baja actividad (caolinita), cuya CIC es muy baja. / e) Presentan CIA. La adsorción de fosfatos hace que éstos sean menos disponibles para las plantas, lo que afectará a su productividad.

16. a) $\text{Arena} = 100 - (a + L) = 52 \%$. Clase textural del epipedión: Franco-arcillo-arenosa (FAr): Textura media. / b) $\text{CIC suelos} = \text{CIC arcilla} + \text{CIC m.o} = (\text{CIC}_a \times \% a + \text{CIC}_{\text{m.o.}} \times \% \text{m.o.})$; $\text{CIC}_a = 10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de arcilla. / c) Para praderas en suelos de textura gruesa, el nivel de potasio es bajo. / e) Las raíces de las leguminosas, al tener una CIC alta, tienden a absorber preferencialmente cationes bivalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) en lugar de los monovalentes (K^+). Las gramíneas sobreviven en suelos con un contenido de potasio bajo, ya que sus raíces son más eficientes en la absorción del potasio (ión monovalente), lo que puede explicar la desaparición de las leguminosas.

17. 1 a / 2 d / 3 a / 4 c / 5 c / 6 a / 7 a / 8 b / 9 d / 10 b / 11 b / 12 a

8.4. ADSORCION E INTERCAMBIO ANIÓNICO

1. 1 c / 2 b / 3 b / 4 a / 5 d / 6 a / 7 a / 8 b / 9 c / 10 c / 11 c / 12 a

7. a) Al aumentar el pH disminuyen las cargas positivas (cargas variables) del suelo y con ello es menor la adsorción de fosfatos. Al encalar mejorará la absorción de fosfatos por parte de las plantas. Un exceso de carbonato cálcico (sobreenalado) podría provocar una inmovilización de fosfatos por retrogradación apatítica, además de posibles efectos sobre los organismos del suelo. b) Disminuye un componente (m.o.) que aporta CIA al suelo. c) La adición de anión sulfato hará que éste compita por la sedes de intercambio aniónico con el anión molibdato, que pasará a la solución, aumentando con ello las disponibilidades para las plantas.

9. Buscar el método en la bibliografía. La presencia de materiales amorfos confiere CIA al suelo. En presencia de NaF el suelo adsorberá el anión fluoruro y el Na⁺ hará elevar el pH.

11. a) Dado que se trata de una caolinita y que esta arcilla no tiene sustituciones isomórficas, su carga eléctrica se halla localizada en los bordes, por lo que serán los grupos -OH los que intervendrán. Carga variable que depende del pH del suelo. / b) Al tener lugar una adsorción aniónica, los grupos deben estar como -OH₂⁺, a medida que disminuye el pH del suelo aumentan los grupos funcionales con carga positiva, de ahí que aumente la cantidad de ión fosfato adsorbido. c) Formación de complejos de esfera interna, que son muy estables, por lo que el fósforo queda retenido de forma muy irreversible, disminuyendo con ello las disponibilidades para el cultivo. / d) Las deficiencias en fósforo en maíz se manifiestan porque las hojas presentan en sus bordes bandas de color violáceo. / e) Los suelos en los que predominen las arcillas caolinitas: zonas tropicales cálidas y húmedas. / f) No. En estas condiciones, en el caso de predominar la caolinita, sus cargas serían negativas, por lo que no habría adsorción aniónica. En este caso se produce una retrogradación de los monofosfatos (solubles) a trifosfatos (insolubles).

12. Buscar información y preparar la presentación en público con medios electrónicos.

13. 1 b / 2 a / 3 b / 4 b / 5 c / 6 a / 7 c / 8 d / 9 a / 10 b / 11 d / 12 b.

8.5. REACCIÓN DEL SUELO

1. 1 a / 2 c / 3 c / 4 c / 5 a / 6 b / 7 a / 8 b / 9 b / 10 d.

3. a) $5 = -\log(H^+)$ ($H^+ = 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ la actividad de protones en solución es muy baja. / b) $\text{pH} = 4,0 \rightarrow (H^+) = 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$, $\text{pH} = 6 \rightarrow (H^+) = 10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$, es 100 veces más ácido. / c) Los protones están fuertemente adsorbidos. / d) La acidez de una roca no tiene nada que ver con el pH, se refiere a su contenido en SiO₂, por consiguiente, dependiendo del régimen de humedad de los suelos, a pesar de formarse a partir de un granito pueden ser ácidos (zonas húmedas) o básicos (zonas semiáridas).

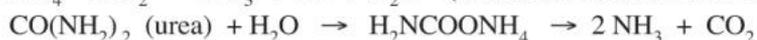
6. Si. $\text{XH} + \text{CaCl}_2 \rightarrow \text{CaX} + \text{H}^+$

10. 1 afectadas desfavorablemente / 2 muy poco / 3 dificultan / 4 muy ácidos / 5 muy ácidos / 6 micorrizada.

12. a) Describir. / b) A medida que disminuye el pH hay mayor porcentaje de aluminio intercambiable, por consiguiente mayor riesgo de toxicidad para las plantas.

13. a) $4,8 = -\log(H^+)$ ($H^+ = 10^{-4,8} \text{ mol L}^{-1}$, este valor sirve para interpretar la biodisponibilidad y movilidad de los elementos en el suelo (Diagrama de Truog), pero no tiene significación para encalar un suelo. Por debajo de un $\text{pH} = 5,5$ el aluminio es biodisponible y por consiguiente crea problemas de toxicidad. Con pH de 4,8 no hay problemas de sodicidad.

b) $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$ (efecto acidificante de un abono amoniacal)



La hidrólisis de la urea, catalizada por la enzima ureasa, puede producir un incremento de pH de 2 a 3 unidades en el micrositio de un gránulo de urea.

17. a) Morfología típica de toxicidad por aluminio: poca elongación de las raíces, color pardo. Medio ácido, $\text{pH} < 5,5$. / b) Un sistema radicular atrofiado limita el volumen de suelo explorado y la absorción de agua y, por ello, menor resistencia a la sequía en los meses más secos del año. Menor disponibilidad de nutrientes. / c) Todos por ser acidificantes.

18. a) Si lo supone. Las aguas de drenaje podrían llegar a tener pH inferiores a 2,5 derivados de la oxidación de los sulfuros. / b) Estudiar en el diagrama de Truog el comportamiento de estos elementos al aumentar la acidez. / c) Si, el Fe(II) pasa a Fe(III) . / d) Acidificación y posibles toxicidades.

19. 1 d / 2 c / 3 c / 4 d / 5 a / 6 a / 7 b / 8 c / 9 a / 10 c / 11 b / 12 a / 13 a / 14 c / 15 d.

8.6. SALINIDAD, SODICIDAD Y ALCALINIDAD DEL SUELO

1. 1 a / 2 a / 3 c / 4 c / 5 b / 6 a / 7 c / 8 a / 9 a / 10 c

3.1. a) Describir las plantas. La planta es *Salicornia* o un *Artrocnemum* (con la foto no se sabe). / b) Vegetación halófila. Suelo con exceso de sales más solubles que el yeso.

3.2. Observar e interpretar

1. a) Describir / b) El modelo de distribución de la vegetación induce a pensar en un problema de salinidad. Ensayos de campo: cloruros y sulfatos. Muestreos de dos momentos del año, como mínimo para investigar la variabilidad temporal del perfil salino. Análisis de laboratorio: pasta saturada, pH de la pasta, CE_s y cationes y aniones solubles. // 2. a) Escala: Km / b) Los suelos situados en un paisaje (plataforma-ladera-fondo) están relacionados funcionalmente. Este *continuum* topográfico reconoce la continuidad de la humedad en un paisaje determinado. Las actuaciones en la plataforma tienen incidencia en los fondos al fluir el agua de aquellas a éstos y atravesar materiales que actúen como redistribuidores de salinidad.

4. Preparar un esquema estructurado para organizar la exposición.

5.1. a) Describir / b) A B_{tna} / c) Suelo sódico, muy desfavorable, con morfología derivada de procesos redox.

5.2. a) La mayoría de estas sales son higroscópicas, por lo que resulta difícil una determinación precisa en laboratorio, ya que dependiendo de la temperatura de secado se pierde parte de dicha agua. Por otro lado, la pasta saturada incluye el efecto textura. / b) La extracción del sodio intercambiable con NH_4OAc puede implicar igualmente al sodio soluble, no existiendo una técnica fiable para separar uno de otro. Por ello el ESP o PSI se calcula a partir del SAR.

6. a) Se deberá analizar en diferentes momentos el agua que se ofrece. Los polielectrolitos suelen aportar sodio, por lo que el agua depurada podría contener más sodio. Posible riesgo de sodificación. Posibles efectos desfavorables sobre la estructura. Posible toxicidad por sodio. / b) Se aporta calcio al agua. / c) Buscar la información para la zona y calcularlo.

7. a) Sodicidad. Degradación de la calidad del suelo: arcillas dispersas, inestabilidad estructural. Disminuye el espacio de huecos: la circulación de agua y de aire serán menores. El suelo será muy susceptible a la erosión (mayor erosionabilidad). En suelos con arcillas expansibles, el sodio intercambiable favorece la retracción y la formación de grietas. b) Difícil. Aporte de una material que aporte calcio soluble, de bajo precio. Intercambio del Na^+ por el Ca^{2+} / c) Propuesta.

8. a) Las raíces liberan CO_2 , que favorecerá la disolución de carbonato cálcico. El calcio solubilizado se habrá ido intercambiando con el sodio, lo que explica la mejora. La tasa de disolución de CaCO_3 es relativamente mayor en condiciones en las que la PCO_2 sea mayor que la PCO_2 atmosférico. Por otro lado, si hubiese carbonato sódico, la mayor PCO_2 hace deslazar el equilibrio carbonato-bicarbonato hacia el bicarbonato, lo que mejora las condiciones químicas del suelo, ya que el bicarbonato es menos tóxico.

b) Enmienda de yeso: 7.032 kg ha^{-1} . Trabajando con factores de conversión:

$$\frac{1,8 \text{ cmol}_c}{\text{kg suelo}} \cdot \frac{100}{90} \cdot \frac{20 \text{ gCa}^{2+}}{1 \text{ mol}_c \text{Ca}^{2+}} \cdot \frac{1 \text{ molCa}^{2+}}{10^2 \text{ mol}_c \text{Ca}^{2+}} \cdot \frac{10^4 \text{ m}^2 \times 0,25 \text{ m}}{1 \text{ ha}} \cdot \frac{1.390 \text{ kg suelo}}{1 \text{ m}^3 \text{ suelo}} \cdot \frac{172 \text{ gyeso}}{40 \text{ gCa}^{2+}} \cdot \frac{100 \text{ gyesocom}}{85 \text{ g yeso}}$$

c) Intercambio del Na^+ por el Ca^{2+} . Desde un punto de vista químico sería más efectivo el CaCl_2 debido a que su solubilidad es mucho más alta que la del yeso, pero su precio hace económicamente inviable su utilización.

9. SAR = 6,59; ESP = 7,8%. Evaluación: Suelo salino. Limitaciones para los cultivos por exceso de sales más solubles que el yeso.

10. 1b / 2c / 3c / 4b / 5b / 6b / 7b / 8a / 9b / 10c / 11d / 12d / 13d / 14a.

8.7. POTENCIAL REDOX

1. 1b / 2d / 3a / 4a / 5a / 6b / 7a / 8c / 9b / 10b

8. a) Describir. / b) Anoxia radicular. Procesos de reducción / c) Colores redoximorfos: colores grises, moteados, según el tipo de saturación por agua. / d) Posibles: A_g , B_g , C_g / e) Condiciones ácuicas / f) Cultivo de arroz en regadío.

9. Reducción del cromo y oxidación de la materia orgánica (cambio del número de oxidación del C).

10. a) Las que tengan E_0 más alto. / b) Sí, porque $E_0 = +0,77$ y $E_0 = -0,44$ se hallan dentro del campo de existencia del agua. En condiciones reductoras moderada: $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$. (Consultar los valores de los potenciales normales). / c) $4\text{Fe}^{2+}(\text{ac}) + \text{O}_2(\text{gas}) + 4\text{H}^+(\text{ac}) \rightarrow 4\text{Fe}^{3+}(\text{ac}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{liq})$. Es una reacción espontánea, ya que $E_0 = 0,46\text{V}$ y al no ser valor muy elevado, la reacción será lenta. / d) Orden: NO_3^- , NO_2^- , NO , N_2O , N_2 .

11. La iluviación provoca el relleno de los poros que irán dejando de ser funcionales, con lo que emperan las condiciones de drenaje y se pueden generar condiciones reductoras y anoxia radicular. Paralelamente podría haber una acidificación creciente, lo que podría derivar en toxicidad por aluminio y manganeso. Problemas de hidromorfismo y de autoregeneración de algunas especies forestales.

12. a) Ión amonio (NH_4^+): puede interactuar con las arcillas y pasar a ocupar sedes de intercambio, con lo que pierde movilidad / En condiciones aerobias tendrá lugar su oxidación biológica (nitrificación) a NO_3^- en dos etapas por las bacterias *Nitrosomonas* y *Nitrosobacter* respectivamente. Ión nitrato (NO_3^-): Se mantiene en solución, por lo que puede pasar a la capa reducida. En ella tiene lugar la desnitrificación, es decir su reducción que puede conducir hasta la formación de N_2 , que se perderá a la atmósfera. / b) Nitrificación: $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NO}_2^- + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$ / Desnitrificación: $\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{NO}_2^-$ (nitrito) $\rightarrow \text{N}_2\text{O}_2$ (hiponitrato) $\rightarrow \text{N}_2\text{O}$ (gas con efecto invernadero) $\rightarrow \text{N}_2$ (nitrógeno molecular). Al situar el nitrógeno como ión amonio en la capa anaerobia, permanece a disposición de la planta, no así la forma nítrica, cualquiera que sea la capa en que se localice. c) Fe (III) en condiciones oxidantes y Fe (II) en condiciones reductoras.

14. Habrá que tener en cuenta que el Fe (II) es móvil, mientras que el Fe (III) se halla precipitado, y que en este suelo hay alternancia de condiciones oxidantes y reductoras.

15. La alternancia de condiciones reductoras y oxidantes hace que con la entrada del aire el Fe(II) y Mn(II) pasen a Fe(III) y Mn(IV) que al ser insolubles precipitarán dando lugar primero a moteados y que al repetirse el proceso a lo largo de años, pueden formar concreciones deleznable. Al cortar una muestra con el cuchillo aparecen estelas orientadas en la misma dirección que ponen en evidencia la existencia de concreciones, quizás poco visibles y que indican condiciones de mal drenaje en el suelo.

16. Por el elevado valor del Kps del Fe SO_4 .

17. a) Si: $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightleftharpoons 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$. / b) Se reducirán a sulfuros pudiendo precipitar en forma de FeS y FeS_2 / c) En un suelo ácido las reacciones de reducción son reacciones que consumen protones. / d) Se provoca reducción, por lo que se consumen protones. La acidez disminuirá, con lo que, de acuerdo con el diagrama de Truog, la biodisponibilidad del zinc disminuye. / e) Secuencia de reducción: $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$.

18. a) El cromo hexavalente Cr^{6+} es muy tóxico para los seres humanos, mientras que el cromo trivalente Cr^{3+} es mucho menos peligroso y es la forma en que generalmente se halla en la naturaleza. De hecho el Cr^{3+} es un micronutriente esencial, necesario para un adecuado funcionamiento de la insulina. En el cuerpo humano el paso de Cr^{3+} a Cr^{6+} no es posible. En los procesos industriales en Cr^{6+} , además de ser tóxico para las personas, supone riesgos ambientales graves, si no se controlan adecuadamente las aguas residuales, que no son aptas para el riego, y puede contaminar la capa freática a la que lleguen y los pozos que se alimenten de ella. / Nota. Si se interesa por el tema del cromo como contaminante medioambiental puede intentar lograr la película *Erin Brockovich* dirigida por Steven Soderbergh. / b) El mangle, *Rhizophora mangle*, presenta vástagos que salen de las ramas y descendiendo hasta en suelo enraizando en él (aerénquimas) y siendo capaces de obtener y transportar oxígeno hasta las raíces que viven en terrenos pantanosos de borde de mar.

20. 1 b / 2 b / 3 c / 4 d / 5 c / 6 b / 7 d / 8 a / 9 b / 10 b / 11 a / 12 b / 13 a.

8.8. CONTAMINACIÓN DE SUELOS

1. 1 c / 2 c / 3 b / 4 b / 5 b / 6 a.

5. a) Buscar información para As, Cr, F, Hg, Ni, Pb y Zn. / b) Los complejos de esfera interna son muy estables, con lo que el cobre queda fuertemente retenido e inmovilizado. No es así en los de esfera externa.

7. a) Hacer el balance entre entradas y salidas. / b) Buscar en Internet.

9. a) Estudiar la movilidad de los diferentes elementos en función del pH del suelo, a partir del diagrama de Truog. / b) La diferencia que se destaca entre los dos suelos es la textura, que traduce un distinto contenido de arcilla. Por consiguiente los resultados pueden evidenciar una fuerte retención de Cs por parte de los minerales de arcilla. / c) El Cs^+ compite con el K^+ en la absorción por la planta (Sánchez *et al.*, 1999). / d) La materia orgánica coloidal soluble puede facilitar el transporte de contaminantes, al ser fuertemente adsorbidos por ella en el suelo y, con ello aumentar el riesgo de lavado y, por consiguiente, de contaminación de una capa freática que reciba el agua de drenaje.

10. a) Buscar en Internet. / b) La población comía arroz con altos contenidos de cadmio (diez veces mayor al de suelos no contaminados), debido a que los arrozales se regaban con agua de un río contaminado con aguas de drenaje y sedimentos procedentes de una mina de cinc. / c) Buscar información.

11. 1 c / 2 a / 3 d / 4 a / 5 b / 6 d / 7 c / 8 b / 9 a / 10 c / 11 a / 12 b / 13 d / 14 c.

12. a) La materia orgánica proporciona al suelo características favorables como: mayor capacidad de infiltración / menor erosionabilidad, protección contra la erosión / porosidad adecuada para el desarrollo radicular / mayor capacidad de retención de agua / actividad biológica adecuada / almacenaje de nutrientes. / b) El procedente de lodos, por la mayor cantidad de metales pesados que se incorporarán al suelo, y de nitrógeno, que puede lixivarse o volatilizarse. / c) Este compost tiene un bajo contenido de nitrógeno, y por tanto no aporta nutrientes. / d) $619 + 32 = 651 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ compost}$. / $[651 \text{ mg N/kg compost}] \times [20.000 \text{ kg compost/ha}] \times [1 \text{ kg N}/10^6 \text{ mg N}] = 13,12 \text{ kg N ha}^{-1}$.

UNIDAD 9. ECOLOGÍA DEL SUELO Y CICLOS DE LOS ELEMENTOS

1. 1 c / 2 c / 3 d / 4 b / 5 a / 6 c / 7 b.

4. a) Sí. Por ejemplo, en un agregado con condiciones oxidantes en su parte externa y reductoras en su interior, al descender el nivel de la capa freática / b) Con la elasticidad.

5. Los rellenos de calcita biogénica son debidos a procesos de carbonatación/descarbonatación a escala microscópica, mientras que otros tipos de acumulaciones pueden resultar de disolución y precipitación a escala de pedión, que resulta en una translocación de carbonatos entre horizontes o incluso debida a un transporte lateral. Las queranas no serían, por lo tanto, un horizonte de acumulación de carbonatos en sentido estricto, sino que representarían una redistribución en el mismo material.

7. a) La interacción se debe a que hay un efecto alelopático, interacción que inhibe el crecimiento del trigo / b) El sotobosque del nogal negro viene condicionado por una sustancia tóxica próxima producida por el nogal.

10. a) El vertido puede afectar a un tipo concreto de microorganismos, pero debido a la redundancia funcional que presenta el suelo, la degradación podrá tener lugar: la función ecológica se mantiene. / b) Mineralización de la materia orgánica; oxidación de compuestos orgánicos reducidos; reducción anaerobia de compuestos inorgánicos oxidados, entre otros. / c) La asociación de un hongo con un alga da lugar a un liquen: colonizador primario.

11. a) No lo es. El nombre correcto en español del *Agropyrum repens* es grama. Se trata de un gramínea. / b) Es una planta rizomatosa, y por ello muy invasora, por lo que crearía problemas con los cultivos. c) El *Phragmites communis*, que es una planta de la familia de las gramíneas. Común en los bordes de cauces de agua más o menos mineralizada. Planta con rizomas.

13. a.1. Forma más oxidada del carbono biológico: CO_2 y la más reducida: CH_4 ; número de oxidación. / a.2. Microorganismos en condiciones extremadamente reductoras: bacterias como *Desulfovibrio desulfuricans*, capaces de utilizar el SO_4^{2-} como aceptor de electrones, o *Methanobacterium* que intervienen en la metanogénesis, formación de metano. / b.1. Microorganismos y hongos: amoniacal; plantas: nítrico. / b.2. Paso de amoniacal a nítrico: nitrificación (reducción). / b.3. El amoniacal al tener carga positiva será adsorbido por las arcillas, mientras que el nítrico será lavado, pudiendo contaminar una capa freática. / c.1. $\text{S}^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$, en presencia de carbonato cálcico se formará yeso. / c.2. Al drenar un suelo: *Acidithiobacillus*. c.3. Para redactar el proyecto de drenaje se debe hacer una prospección de campo. Hacer analizar la posible existencia de piritita y el contenido de carbonato cálcico en el suelo a drenar.

15. a) $\text{Urea} \rightarrow \text{NO}_3^-$. No son equivalentes, uno es adsorbible por las arcillas y el otro no, por lo que resulta más móvil el ión nitrato y, además, a elevadas concentraciones en el agua de consumo humano supone un riesgo para la salud, principalmente en los lactantes y embarazadas. / b) *Nitrobacter*: nitratación; *Nitrosomonas*: nitrosación. / Saprofitos: organismos descomponedores de restos vegetales muertos. Quimiorganótrofos: utilizan los compuestos orgánicos como sustrato. / Quimiolitótrofos: utilizan sustratos minerales para obtener energía. / Bacterias sulfo-oxidantes: utilizan los sulfuros para obtener energía. c) Toxicidad del Al^{3+} para el *Azotobacter*; toxicidad del Mn^{2+} para el *Rhizobium*. Malas condiciones para la alfalfa: acidez, deficiencia en calcio y mala nodulación y mala fijación de nitrógeno. / d) Buscar información en Internet.

16. 1 heterótrofos / 2 aerobio / 3 anaerobio / 4 hongo y alga.

17. 1 a / 2 b / 3 c / 4 a / 5 c / 6 c / 7 b / 8 d / 9 d / 10 b / 11 d / 12 a / 13 c / 14 a / 15 b / 16 a / 17 c / 18 d / 19 c / 20 d / 21 b.

UNIDAD 10. EL AGUA DEL SUELO

1. 1 c / 2 b / 3 c / 4 b / 5 d / 6 a / 7 c / 8 b.

3. 1. Demuestre que $P = 1 - (\rho_b/\rho_s)$. Si volumen poros + volumen sólidos = 1, entonces $P = 1 - (\rho_b/\rho_s) = 1 - (\text{masa suelo/volumen aparente})/(\text{masa suelo/volumen sólidos}) = 1 - (\text{volumen sólidos/volumen aparente}) = \text{volumen poros/volumen aparente}$.

2. Demuestre que $\theta = \rho_b w$. Masa de agua/volumen aparente = (masa suelo/volumen aparente) (masa de agua/masa de suelo).

$$3. e = \frac{V_v}{1 - V} = \frac{V_v}{V_s}$$

4. a) $(0,95 \times 2650 \text{ kg m}^{-3}) + (0,05 \times 1.300 \text{ kg m}^{-3}) = 2.582,5 \text{ kg m}^{-3}$
 b) Densidad aparente = $(134,8 / 78,4) \times 1.000 = 1.719 \text{ kg m}^{-3}$

Elemento	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (kg m ⁻³)
Aire	0	27,5	0
Agua	0	0	1000
Huecos	0	27,5	0
Sólidos	134,8	50,9	2650
Suelo	134,8	78,4	1719

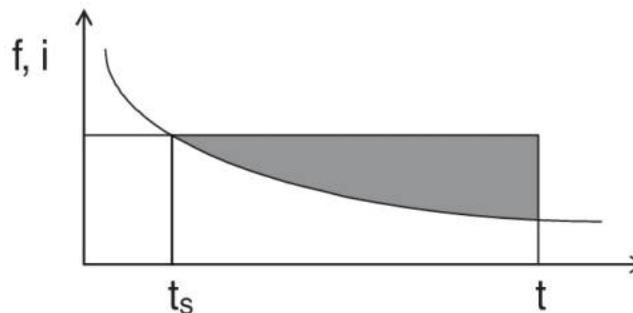
6. a: sonda de neutrones / b: TDR con registro continuo automatizado / c: método gravimétrico o TDR de lectura manual / d: TDR o sonda de neutrones.

9. 1. El gradiente es nulo, ya que el potencial total no varía en profundidad. / 2. El contenido de agua va aumentando en profundidad, tal como lo indica el gradiente de potencial matricial. Por debajo de la capa freática el contenido de agua es constante e igual a la porosidad del suelo. / 3. No, ya que el gradiente de potencial hídrico total es nulo.

12. Una capa de arena encima de un suelo arcilloso creará una discontinuidad de poros finos en el perfil, que son los que conducen el agua a bajos contenidos de humedad. Por lo tanto, en épocas de sequía (alta ETP) la capa de arena limitará el ascenso capilar de agua y por tanto disminuirá las pérdidas de agua por evaporación.

15. En un suelo seco, cuando se aplica una lámina de agua el gradiente de potencial hídrico en los primeros milímetros de la superficie es muy elevado, ya que en poca distancia el potencial varía de 0 a muy negativo, por lo tanto la velocidad del flujo es muy alta. A medida que el suelo se va humedeciendo, el gradiente disminuye y por lo tanto también disminuye la velocidad de infiltración.

16. t_s = tiempo de encharcamiento o de saturación exceso de agua.



18. Suelo I II III
 Vino Tosal de la Corona Piedra y Sol Vinus Terrae

- a) El suelo con menor capacidad de almacenamiento de agua es el I, ya que sólo tiene 10 cm de profundidad, contiene elementos gruesos y tiene una textura franco-arenosa (gruesa). La baja disponibilidad de agua para las plantas hace que la producción de la vid sea baja, y que los vinos tengan un alto contenido de alcohol.
 b) Aumento del volumen y velocidad de escorrentía / Disminución del agua infiltrada en el suelo / Aumento de la erosión hídrica / Reducción del volumen de suelo, o incluso desaparición del suelo. c) $1.200 \text{ mm} \times 0,2 = 240 \text{ mm}$ de reserva máxima de agua. d) El balance hídrico para el mes de septiembre es: Agua del suelo al inicio del mes – evapotranspiración + precipitación = Agua del suelo a final de mes: $50 \text{ mm} - 162 \text{ mm} + 190 \text{ mm} = 68 \text{ mm}$. e) El contenido máximo de agua que el suelo puede almacenar es de 240 mm, mayor que 68 mm, por lo tanto a fin

de mes aún habrá déficit de agua en el suelo y no estará encharcado. Por lo tanto, la vendimia podrá realizarse sin problemas.

UNIDAD 11. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

1. 1 b / 2 b / 3 b / 4 c / 5 a / 6 d / 7 b / 8 c / 9 b / 10 d

5. a) Sí. / b) No, utilizan el conocimiento disponible acerca de los suelos. / c) Sí, a medida que aumenta el nivel de conocimientos sobre las distintas clases de suelos. / d) No, el grado de generalización es mayor por lo que los suelos agrupados son muy diferentes.

7. 1 d / 2 b / 3 a / 4 d / 5 b / 6 c / 7 a / 8 c.

11.1. SOIL TAXONOMY

2. a) Consultar la Clave de Soil Taxonomy accesible por Internet en www.iec.cat/mapasols (Documentos de interés). / b) El pedión es un volumen de suelo definido de forma arbitraria para permitir la descripción y muestreo de un suelo individual tomando en consideración las características y variación de sus horizontes y como tal no se puede representar en un mapa. La Serie de suelos constituye una agrupación de isoperdiones que ocupan una superficie que tiene realidad física, por lo que es representable en un mapa, si bien éste debe ser de una escala suficientemente grande.

6. a) Orden: Vertisol / Suborden: Ustert / Grupo: Dystrustert / Subgrupo: Dystrustert ácuico. / b) Sí. Al ser un régimen ústico. / c) Ácido: distrofia. / d) Rotura de raíces y asfixia radicular. / e) Sí. Capa freática próxima a la superficie del suelo.

7. Consultar *Soil Taxonomy* en: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés.

a) **Orden:** ninguno / **Suborden:** Udoll, Udult / **Grupo:** Natrixeralf, Acraquox, Sulfaquent, Xerofluent / **Subgrupo:** Palexeralf petrocálcico, Argiudoll típico, Dystroxerept ácuico, Palexeralf nátrico / Familia: ninguno / Serie: ninguno.

b) Natrixeralf: Alfisoles, Xeralf / Udoll: Mollisoles, Udoll / Xerofluent: Entisol, Fluvent / Palexeralf petrocálcico: Alfisoles, Xeralf / Typic Argiudoll: Mollisoles, Udoll / Udult: Ultisol, Udult / Aquic Dystroxerept: Inceptisol, Xerept / Acraquox, Oxisol, Aquox / Sulfaquent: Entisol, Aquent / Palexeralf nátrico: Alfisol, Xeralf.

c) De más a menos aptitud para el uso agrícola:

Typic Argiudoll: Mollisol con endopedión argílico, con lluvias importantes. / Udoll: Mollisol de zonas húmedas. / Xerofluent: Son suelos muy fértiles de llanuras aluviales. / Petrocalcic Palexeralf: Alfisol con endopedión argílico y un petrocálcico subyacente. / Udult: Ultisol, suelos ácidos de zonas tropicales húmedas. / Aquic Dystroxerept: Problemas de hidromorfismo. Pobre en cationes basificantes. Ácido. / Acraquox: Oxisol extremadamente meteorizado, suelo ácido con problemas de drenaje. / Natrixeralf: Suelo con endopedión nátrico, muy desfavorable. / Natric Palexeralf: Palexeralf con ESP $\geq 15\%$, muy desfavorable. / Sulfaquent: Inceptisol con horizonte sulfúrico, muy ácido, con problemas de drenaje, muy desfavorable.

d) Natrixeralf: sodificación, translocación de arcillas sódicas. / Xerofluents: Inundaciones periódicas. / Udoll: formación de un móllico. / Palexeralf petrocálcico: translocación de CaCO_3 una vez descarbonatado translocación de arcilla. / Typic Argiudoll: formación de un móllico, translocación de arcilla. / Udult: Acidificación y translocación de arcillas. / Aquic Dystroxerept: acidificación, procesos redox. / Acraquox: meteorización extrema, procesos redox. / Sulfaquent: acidificación, procesos redox. / Natric Palexeralf: translocación de CaCO_3 , sodificación, translocación de arcillas sódicas.

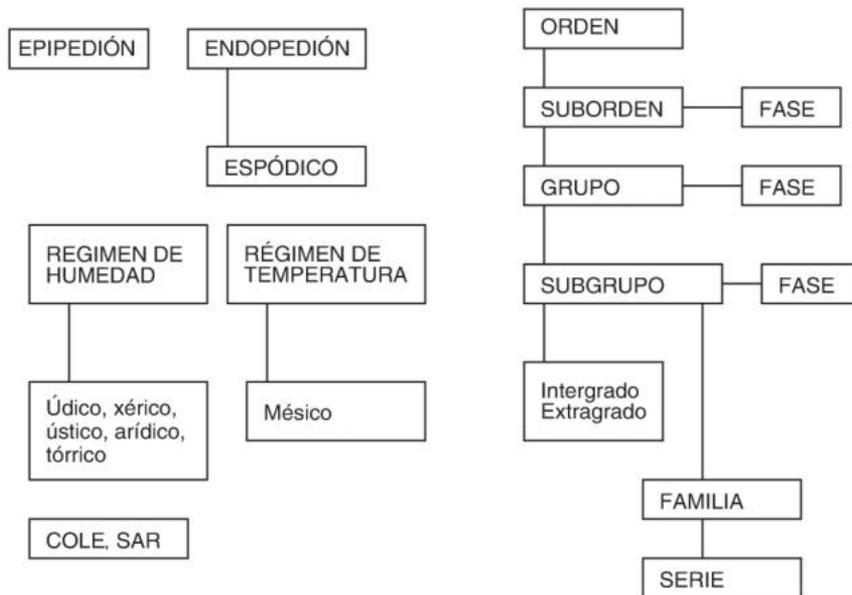
e) Integrados: no; extragados: petrocálcico, ácuico, nátrico.

9.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	o	b	o	c	i	t	n	e	v	u	l	f
2	v	w		o	c	i	r	u	f	l	u	s
3	e	n	t		i	l	o	d	a	n	d	e
4	r			d	c	l	j	x	o	d	u	r
5	t	y	p	i	c	o	o			d	r	i
6	i	n	t	e	r	g	r	a	d	o	i	e
7	c	a	h		o	r		g	r	u	p	o
8	o	t	a	o	m	a				l	a	r
9		r	p	s	a	m	m			t	n	t
10	l	i	t	i	c	o				e		h
11	a	c	o	d	r	x	o	d	u	r	c	a
12	h	o	r	i	z	o	n	t	e	t	e	n

10. A resolver con suelos de la zona.

11.



12. Consultar la Clave de *Soil Taxonomy* en: www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés.

a) Vertisol. / b) Xerert / c) Girasoles; taxonómicamente detallado; cartográficamente dependerá de la escala del mapa y forma de agregación.

13. 1. El 1:25.000, ya que se basa en un mayor número de observaciones de campo. 2. a) y b). Orden. Entisol / Suborden: Psamment y Fluvent / c) Xeropsamment ácuico, por condiciones ácuicas y textura arenosa / d) Capa freática / e) Xerofluvent móllico por el menor riesgo ambiental.

14.

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
1	i	i	i	c	i	c	i	c	i
2	i	i	i	c	i	i	c	c	c
3	c	i	c	i	i	i	i	c	c
4	i	i	i	c	i	c	i	c	i
5	i	i	i	c	i	c	c	c	i
6	i	i	c	i	i	c	i	c	c
7	i	i	c	i	i	i	i	c	c
8	i	i	i	c	i	i	c	c	c
9	i	i	c	i	i	c	i	i	i

15. 1. Histosol / 2. Minerales / 3. Entisol / 4. Fluvéntico / 5. Psamméntico / 6. Aquent / 7. Xerofluvent / 8. Alfisol / 9. Aridisol / 10. Ultisol / 11. Mollisol.

16. Consultar la Clave de *Soil Taxonomy* para conocer las características de estos suelos.

17. 1. a / 2. c / 3. a / 4. b / 5. d / 6. c / 7. b / 8. b / 9. a / 10. d / 11. b .

11.2. BASE DE REFERENCIA MUNDIAL PARA RECURSOS DE SUELOS (WRB)

7. 1. Consultar la Clave, accesible en www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés. Lixico Vético **Ferralsol** (Férrico, Rhódico). / 2. a) Turismo. a.1. Zona tropical húmeda, Brasil. / a.2. Si. / a.3. Consultar la página web de la Organización Mundial de la Salud. / b) Prospección de campo. b.1. No hace falta: suelos ácidos muy meteorizados / b.2. Los Ferralsoles tienen horizontes cuyos límites son difusos / b.3. No. Estos suelos tienen un elevado contenido en óxidos de hierro que forman pseudolimos y pseudoarenas. / c) Procesos formadores. c.1. Muy elevado. / c.2. Pobres en sílice: caolinitas. / c.3. El sufijo calificador «Rhodic» hace referencia al color rojo de este suelo, lo que corresponde a un buen drenaje. / d) Uso agrícola. d.1. Un Ferralsol es un suelo de zonas tropicales húmedas, por consiguiente un suelo ácido / d.2. No. La alfalfa es exigente en calcio. Mala nodulación. Se requerirían enclados importantes y mantenidos a lo largo del tiempo.

8. a.1) Propiedades intrínsecas. / a.2) Uso agrícola: profundidad efectiva del suelo, pH, contenido en carbonato cálcico, salinidad, entre otras. Almacén: existencia de arcillas expansibles. Proceso edafogénico: horizontes de diagnóstico. / b) Buscar información.

9. Organizar un esquema conceptual.

10. Consultar la Clave del WRB. Accesible en Internet en www.iec.cat/mapasols → Documentos de interés.

11. Consultar la Clave de WRB en Internet.

	1	2	3	4	5	6
a						
b						
c						
d						
e						

12. Preparar el debate consultando bibliografía y buscando información en Internet.

13. 1 b / 2 b / 3 a / 4 c / 5 a / 6 b / 7 b / 8 c / 9 a / 10 d / 11 d / 12 b.

UNIDAD 12. INFORMACIÓN DE SUELOS

1. 1 a / 2 b / 3 b / 4 c / 5 a / 6 c / 7 d / 8 d / 9 d / 10 c / 11 a / 12 a / 13 b / 14 c / 15 c / 16 a / 17 a.

5. . Grado de abstracción: mapa taxonómicamente generalizado, cartográficamente generalizado, elaborado como mapa de síntesis. Descripción general de unidades cartográficas Nivel jerárquico de clasificación: alto. Porcentaje de impurezas en las unidades: alto, de suelos disímiles. Asociación de suelos. Grado de actuación posible: fundamental, inventario de recursos. d). Unas 50 delineaciones y 29 unidades cartográficas.

6. a) Tiempos a considerar: pedir autorizaciones, abrir y cerrar calicatas, describir los suelos.

Escala	Superficie terreno ha	Superficie mapa cm ²	Número Observaciones	Calicatas	Sondeos	Días aproximados
1: 100 000	8.000	80	80	16	64	13
1: 25 000	2 000	320	320	64	256	37

b) No: 1:100.000 (generalizado); 1:25.000 (detallado). Para la misma superficie, en un caso la información del terreno se obtiene con 20 observaciones, mientras que en el otro con 320.

9. a) FAO / b) unas 30; c) 21 en la leyenda; d) generalizado.

11. a) Mapa con un grado de abstracción: mapa taxonomicamente detallado y cartográficamente detallado. Escala: mapa de escala grande. / b) Una generalización taxonómica, con lo que se deben agrupar delineaciones, aumentando el porcentaje de impurezas del mapa y perdiendo información.

13. a)

Escala	a y b) Delineación base		c) Ancho línea		c) Error	
	Mapa	Terreno	Mapa	Terreno	Mapa	Terreno
1: 10 000	5 × 5 mm ²	2.500 m ²	0,3 mm	3 m	0,5 mm	5 m
1: 250 000	5 × 5 mm ²	156,25 ha	0,3 mm	75 m	0,5 mm	125 m

d) Escala: 1: 60 000.

14. Ortofotomapa de suelos: un fondo fotográfico permite una gran precisión al situar los límites entre delineaciones y en la identificación de las parcelas. Mapa cartográficamente detallado y taxonómicamente detallado.

15. a) Escala pequeña / b) Los melocotoneros (duraznos) son sensibles a un exceso de agua en el suelo (asfixia radicular). Buscar información en Internet acerca de las clases de suelos que se citan e identificar posibles factores condicionantes. / c) Si, ya que los suelos diferentes son similares al que define y sirve para dar nombre a la unidad cartográfica.

17. 1/e 2/a 3/h 4/b 5/d 6/i 7/f 8/g.

21. Consultar en Internet.

24. Buscar información cartográfica de suelos en la cartoteca y en Internet.

25. 1 c / 2 a / 3 a / 4 c / 5 d / 6 c / 7 a / 8 c / 9 d / 10 a / 11 a.

26. 1. Diferencias: La acumulación de materia orgánica en el suelo de hace 2.500 años es más potente (20 cm) que en el suelo forestal de hace 300.000 años (10 cm), debido a que en el bosque la materia orgánica se incorpora a partir de la hojarasca en superficie. / El contenido de materia orgánica es mayor en el horizonte forestal, ya que probablemente corresponde a un horizonte orgánico (horizonte O). / La porosidad es mayor en el suelo forestal que en el horizonte del suelo de hace 2500 años. Una de las posibles causas puede ser la compactación por laboreo. / Los fragmentos de carbón vegetal y el fósforo se encuentran en el suelo de hace 2500 años pero no en el suelo forestal, lo cual indica que el primero ha estado afectado por cultivo y abonado, y por quema de restos de cosechas. / La composición del polen en cada uno de los horizontes indica el tipo de vegetación.

2. A 60 cm, en materiales de la edad del poblado, hay un horizonte de unos 20 cm de espesor, más poroso y con más materia orgánica, lo cual indica que se formó en superficie (horizonte A), y que posteriormente ha estado enterrado por depósitos del cono más recientes. Las características que indican su uso agrícola son: Fragmentos de carbón vegetal procedentes de quema de rastrojos o aportación de cenizas. / Contenidos de fósforo más elevados que en los horizontes subyacentes, por aportes de fertilizantes o estiércol de ganado. / Contenidos de polen de cereales más elevados que los horizontes subyacentes, lo cual indica los tipos de cultivo. / La incorporación de materia orgánica es más homogénea en profundidad en el suelo agrícola, ya que se incorpora por las raíces de las gramíneas y también por el laboreo.

UNIDAD 13. CALIDAD DEL SUELO. PROCESOS DE DEGRADACIÓN Y CONTROL

1. 1 a, b, f / 2 b / 3 d / 4 c / 5 d / 6 b / 7 c / 8 d / 9 b / 10 a / 11 b / 12 c / 13 b / 14 d / 15 c / 16 d / 17 d / 18 c.

3.

Utilidades expresables en bienes económicos	Funciones del suelo implicadas	Utilidades no expresable en bienes económicos	Funciones del suelo relacionadas
Madera Setas Sirope de arce Carbón	Producción de biomasa	Biodiversidad Captación de agua Valores paisajísticos Valores simbólicos y religiosos	Hábitat biológico

- 7.** a) Indicador de presión o de estrés sobre el acuífero. Se observa que la demanda de agua ha ido en aumento a lo largo de los años. / b) Relación entre las extracciones y la recarga. Se observa que los niveles freáticos van disminuyendo, lo que significa que hay más extracción que recarga. La salinidad media del suelo aumenta. / c) Las medidas propuestas deben disminuir la presión en el sistema. Diversificar las captaciones de agua, mejorar la eficiencia del riego modernizando el perímetro cambiando el método de riego. Prever una fracción de lavado para que no aumente la salinidad. Instalar una red de drenaje para dar salida a la fracción de lavado.
- 13.** a) Ladera de poca pendiente. Uso agrícola, suelo sin cubierta vegetal. Arroyaderos. / b) Erosión por escorrentía superficial concentrada: arroyaderos.
- 14.** a y b) Canales de desagüe en un viñedo, uno erosionado por una incisión y otro revestido para evitar la erosión por el agua que desagua por el canal.
- 15.** a) / b) Erosión remontante en la cabecera. Erosión por arroyadero que en pocos metros aguas abajo pasa a formar una cárcava. Erosión en el fondo del canal y en sus paredes. Erosión muy acelerada. / c) Degradación irreversible, al haberse perdido ya gran cantidad de material, lo que hace que sea económicamente difícil de abordar. Proteger la cabecera para evitar que siga llegando agua a este punto y prosiga la erosión remontante. Instalar micropresas con piedras, leña u otro material disponible en la zona (de bajo costo), para frenar el flujo de agua en el canal tras una lluvia. Dar una salida controlada al agua. La actuación debería haberse realizado al poco de iniciada la incisión.
- 16.** Plantación en bancales a nivel que favorecen la infiltración del agua.
- 17.** Buscar información en Internet y en la biblioteca.
- 19.** Erosión eólica y medida de control.
- 20.** a) Leer detenidamente el texto, interpretar lo sucedido, identificar las fuerzas impulsoras en cada momento, sus efectos y resultados, estableciendo los ciclos causa-efecto y esquemas DPSIR que faciliten la interpretación y exposición en público. / b) Se dejaron sin cultivar las zonas de mayor riesgo de erosión eólica y se implantaron de nuevo praderas de gramíneas. / c) Buscar información en Internet. Una referencia de interés es: Mainguet: *Desertification Natural Background and Human Mismanagement*. Springer-Verlag. 1991.
- 22.** Analizar las causas y efectos.
- 26.** Eflorescencias blancas. Degradación por salinización. / Manchas negras en la superficie del suelo (alcalinidad). La m.o. se disuelve en soluciones alcalinas (pH 9-10). Degradación por sodificación: El agua del suelo fuertemente alcalina (pH = 10-12) al ascender disuelve la materia orgánica del suelo, lo que da lugar a la formación de una costra negra en superficie (Llanura Indogánica, India).
- 29.** a) Llanura aluvial. Riesgo de inundaciones. / Asfixia radicular debida a una inundación.
- 36.** 1. a y b) Rodales sin vegetación. Los tubos de ensayo con un precipitado blanco que se oscurece con el tiempo permite identificar la presencia de cloruros: salinidad / c) Salinidad / d) Ensayo de sulfatos. / 2. Buscar información sobre encostramiento superficial. Disminuir el tamaño de las gotas del aspersor. El sodio intercambiable empeora la situación.
- 38.** 1. Buscar información en Internet. / 2. Efectos sobre la erosión, embalses, producción de alimentos y productos forestales, entre otros.
- 39.** Buscar en la bibliografía en la biblioteca y en Internet.
- 41.** Buscar en Internet.

42. Utilización de indicadores

	P	S	R
Densidad o carga ganadera	X		
Contenido de materia orgánica del suelo		X	
Profundidad enraizable del suelo		X	
Susceptibilidad del suelo al encostramiento frente a lluvias intensas			X
Rendimiento del cereal			X
Espesor del horizonte O		X	
Incremento de rendimiento de cultivos al aplicar fertilizante			X
Potencial de producción de biomasa		X	
Distancia a vías de comunicación		X	
Erosión laminar (Mg/ha) al eliminar la vegetación superficial			X
Densidad de población	X		
Acidez del suelo		X	
Necesidades de agua de los cultivos	X		
Densidad aparente del suelo		X	
Distancia a las fuentes de agua		X	
Presencia de minas antipersona		X	
Diferencia de producción al poner en regadío			X
Densidad de regueros en campos de cultivo tras las lluvias		X	
Respuesta al encalado			X
Porcentaje de arena fina y limo en el horizonte superficial		X	
Previsión de evolución del índice de natalidad	X		
Turbidez del agua de los ríos (g sedimento/L)		X	
Existencia de escuelas y de ambulatorios		X	

44. Buscar información en Internet y seleccionarla.

45. a) Interesa que tanto la erosión como el coste sean lo más bajos posible. Un índice podría ser el producto de ambos factores, seleccionando el producto con el índice menor. De acuerdo con ello, el estabilizante será el producto que reduzca la erosión a un precio más razonable.

Tratamiento o producto	Erosión total tras 4 meses (Mg ha ⁻¹)	Coste (€/m ²)	Coste · erosión
Mulch de fibra de celulosa	0,38	1	0,38
Estabilizante	0,17	3	0,51
Manta de polietileno	0,25	15,3	3,80
Hidrosiembra	0,13	7,5	0,97

46. a / b) y c) Erosión por barrancos en la zona que no se construyeron bancales. / Mayor riesgo de erosión en la parte en la que se han eliminado los muros de piedra seca y los bancales.

47. 1 a / 2 b / 3d / 4 c / 5 a / 6 b / 7 a / 8 c / 9 d / 10 d / 11 b / 12 a / 13 d / 14 c / 15 d / 16 d / 17 c / 18 c / 19 d.

48. 1. La variable indicadora de la salinidad es la conductividad eléctrica del suelo. Seana y Reguer tienen un riesgo bajo, debido a los bajos niveles de conductividad eléctrica que indican bajas cantidades de sales. Castellserà tiene un riesgo elevado, debido a que la conductividad eléctrica aumenta en profundidad, por lo cual la puesta en riego podría causar la salinización del suelo por ascenso capilar de las sales a los horizontes más superficiales desde la capa freática. 2. Factor LS:

Unidad cartográfica	Longitud de la ladera X (m)	Pendiente s (%)	Factor LS	Otros síntomas
Reguer	750	10,7	3,6	Erosión concentrada en forma de barrancos a lo largo de la ladera
Castellserà	540	3,7	0,82	Los socavones, aunque no son debidos a erosión hídrica, pueden ser agravados por ésta.

3. Los problemas se deben a que Castellserá es un suelo con altos contenidos de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Debido a su solubilidad relativamente alta, se puede disolver y formar túneles y galerías en el suelo que pueden colapsar y crear socavones.

49. 1. Salinización: d, e / Erosión: a, f / Compactación: b, c. / 2. Se debe a la erosión de suelos en la cabecera del río Tigris. Los sedimentos y suelos erosionados se depositan en los canales, inutilizándolos. / 3. Se observa un descenso de la productividad durante el mismo periodo, asociado a los cambios de la red de drenaje. Puede deberse a distintas causas: Abandono de los campos por imposibilidad de regarlos / Necesidad de poner en cultivo suelos de peor calidad, por cambios en la distribución de la red de drenaje / Salinización por utilizar agua de peor calidad, o por riego menos frecuente.

UNIDAD 14. ESTUDIO DEL SUELO EN EL LABORATORIO

1. 1 b / 2 b / 3 b / 4 c / 5 a / 6 a / 7 d / 8 a / 9 a / 10 d / 11 c / 12 c / 13 c / 14 d.

2. 1. Para no contaminar la parte no muestreada / 2. Para que no se humedezca y destruya la etiqueta. / 3. El papel de periódico absorbe el agua y con ella sales / Si hay yeso no, se perdería parte del agua de cristalización / 4. Molino cilíndrico mecánico con rodillo de diámetro adecuado que no rompa los EG según sea su naturaleza / 5. Tierra fina / 6. Fracción en la que se hacen los análisis.

4. 1. Consultar la cartografía de suelos de la zona y seleccionar alguno de los suelos. Estudiar su clasificación e indicar qué análisis resultarán necesarios. Para el presupuesto hay que tener en cuenta, por un lado, que en cada calicata se toma un promedio de tres muestras y en los sondeos de dos muestras y, por otro, la lista de precios de los laboratorios accesibles. / 2. a) Viñedo: En una zona semiárida es muy posible que los tengan carbonato cálcico. Caso de ser así se determinará la caliza activa para evaluar el riesgo de clorosis férrica. / b) En suelos de bosque de resinosas en clima templado húmedo el régimen de humedad es percolante, por lo que podría haber Spodosoles, Podzoles^{WRB}; ver requerimientos analíticos en las dos claves de clasificación. / c) Perímetro de riego: análisis para diagnosticar salinidad. / d) Antiguo suelo industrial: metales pesados.

5.2. a) Es debido a que el suelo contiene sales. La dilución de la suspensión suelo:agua tiene como efecto disminuir la concentración de sales. / b) El agua fría disuelve más anhídrido carbónico que el agua a mayor temperatura. Por otro lado, en suelos de pH inferior a 6 al no tener carbonatos, la concentración de anhídrido carbónico tendrá pocos efectos, no así en un suelo calizo. / c) El ión potasio desplaza protones de las sedes de intercambio, lo que hace disminuir el valor del pH. / d) En un endopedión óxico puede haber un exceso de carga positiva al tratarse de horizontes muy meteorizados, ricos en óxidos de hierro, por lo que el ión potasio no tiene el mismo efecto que con los restantes suelos.

5.4. Curva de neutralización. La existencia de plataformas indica que a pesar de estar añadiendo una base (NaOH) el pH no varía, es decir, que algún componente está actuando de amortiguador a ese intervalo de pH.

5.6. a) El dicromato potásico reacciona con el ácido sulfúrico para dar ácido crómico. La sal de Mohr sirve para determinar el exceso de dicromato. El ácido ortofosfórico y el fluoruro sódico tienen el mismo papel, eliminar la interferencia del Fe(III), por lo que se utilizará uno u otro. La ortofenantrolina es el indicador. El ácido clorhídrico y el hexametáfosfato sódico no sirven en este análisis. / b) $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ m.o. - $6\text{e}^- \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ / c) C.O. = 2,12% \rightarrow % m.o. = 1,72 \nless %C.O. = 3,65 / d) Los cloruros pueden oxidarse consumiendo parte del dicromato, con lo que el valor obtenido será por exceso. Para evitarlo se debe precipitar los cloruros con sulfato de plata del 2% añadido al ácido sulfúrico.

5.7. La morfología del perfil permite formular la hipótesis de que se trata de un suelo enterrado: horizonte Ab. Determinar el contenido de materia orgánica para verificarlo.

5.9. a) Los elementos gruesos son constituyentes minerales individualizados, que corresponde a fragmentos elementales de rocas. Son de tamaño superior a 2 mm, mientras que los nódulos tienen un origen edáfico. / b) Con HCl se establece la diferencia. / c) Los nódulos calizos se encuentran en suelos de medios áridos y semiáridos. La gibbsita $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ se asocia con los estados más avanzados de meteorización cuando el lavado de la

sílice ha progresado hasta tal punto que la neoformación de arcillas no es posible, por consiguiente, en condiciones húmedas y cálidas tropicales, principalmente en Oxisoles.

5.10. a) Consultar la bibliografía. / b) La presencia de yeso en el suelo invalida el método Drouineau.

5.12. a) Se observan finos cilindros blancos. Observados a la lupa de mano tienen apariencia de granos de azúcar. Se pueden relacionar con los cristales lenticulares de la otra imagen. / b) Se podría probar a ver qué ocurre con cloruro bórico del 10%. / c) Método conductimétrico o gravimétrico. / d) Sí. / e) Intervalo de pH básicos. / No habrá toxicidad por aluminio.

5.14. a) La existencia de muchas expresiones sugiere que no hay ninguna que tenga un valor universal. Por su carácter empírico, al trabajar en una determinada zona deberá establecerse la relación que integre las características de sus suelos (mineralogía de arcilla predominante, entre otras). / b) Un extracto 1:5 supone realizar medidas en unas condiciones mucho más diluidas que las de campo. El yeso se disuelve a razón de $2,6 \text{ g L}^{-1}$, por lo que el extracto 1:5 disolverá mayor cantidad de él. / c.1) Buscar el equipo en un libro de análisis de suelos y proponer un montaje. / c.2) El filtrado en vacío tiene problemas, entre ellos, en suelos muy arcillosos será muy lento y puede llegar a evaporarse el extracto; en suelos con arcillas que al secarse se retraen, puede ser ineficiente por la entrada de aire. / c.3) La existencia de arcillas sódicas hará que éstas permanezcan en suspensión, lo que interferirá las medidas de la CE.

5.16. a) Formular la reacción (Unidad 8) / b) El AcNH_4 disuelve el carbonato cálcico. / c) No. Se determina a partir del SAR / d) A pH 7 el aluminio que era intercambiable a pH 5 habrá precipitado, con lo que se liberan cargas negativas. Debería determinarse la CICE. / e) Debido a la existencia de sustituciones isomorfas en el primer caso y de cargas variables en el segundo. / f) En el suelo que tenga cargas variables, al poder ser estas positivas. / g) El valor numérico es el mismo.

5.18. a) A E Bs / b) Los requeridos para un endopediación espódico. c/ Acidez. Endopediación álbico muy profundo.

7.6. Ver páginas.

8. Conocer y comprender

1 d / 2 b / 3 b / 4 c / 5 b / 6 b / 7 d / 8 c / 9 a / 10 d / 11 a / 12 b / 13 c / 14 d / 15 b / 16 a.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA A

1. Consultar lo estudiado en cursos previos.

3. Consultar en el libro Manual de Mineralogía de DANA de Cornelis Klein, Cornelius S.Hurtbut, Jr. Editorial Reverté en la biblioteca o consultar en Internet.

11.1. 1 horizontes / 2 sedimentaria / 3 edafogénicos / 4 material originario / 5 inferior / 6 no es / **11.2.** solubilidad: halita > yeso > calcita > feldespato / dureza: cuarzo > zircón > biotita > aragonito / superficie específica: esmectita > vermiculita > illita > caolinita / **11.3.** 1 b / 2 e / 3 a / 4 d / 5 c. / **11.4.** carbonato / muy poco meteorizable / zircón / frías / óxido de aluminio / yeso / fósforo / baja presión / baja temperatura / pasa al suelo / caolínico.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA B

3a. 1 f / 2 j / 3 e / 4 b / 5 a / 6 c / 7 d / 8 i /

3b.

	Bg	2C	Bw	Bt	Bh	Ap	Bq	Ab	Bss	Ct
Exceso agua	x									
M.O.					x	x		x		
Laboreo						x				
Translocaciones				x	x		x			x
Alteración	x	x	x							
A. expansibles									x	
Coluvios		x								

6. R → AR → ACR → A Bw C R → A Bt C R.

7. b) 0 – 28: Ap / 55 – 80: Bk / c. Al atacar con HCl no se diferencia entre carbonato cálcico y carbonato margnésico.

8. 1 H / 2 saturado / 3 el porcentaje de arcilla / 4 orgánicos.

9. Las claves on accesibles en www.iec.cat/mapasols.

10. a. 1 no / 2 puede / 3 oscurecido / 10.b. construir el esquema conceptual.

11. a) bloque inalterado para micromorfología y muestra en bolsa; textura; iluviación / b) bloque inalterado para micromorfología y muestra en bolsa; contenido de hierro y aluminio extraídos con oxalato amónico, pH al agua 1:1, carbono orgánico; queluviación / c) muestra en bolsa; carbonato cálcico equivalente; acumulación de carbonatos.

12. 1 c / 2 a / 3 d / 4 c / 5 d / 6 b / 7 b / 8 b / 9 d / 10 b.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA C

1. 1 b / 2 a / 3 d / 4 a / 5 b / 6 d / 7 d / 8 b / 9 b / 10 d.

3. Buscar información al respecto.

6. Busca acerca de los suelos de la zona.

- Adam, P.: *Saltmarsh Ecology*. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, 461 pp. Cambridge, 1993, 1999.
- Aguilar, J., Dorronsoro, C., Bellver, R., Fernández, E., Fernández, J., García, I., Iriarte, A., Martín, F., Ortiz, Irene y Simón, M.: *Contaminación de los Suelos tras el Vertido Tóxico de Aznalcóllar*. Universidad de Granada, 184 pp. Granada, 2003.
- Bahaminyakamwe, L., Simunek, J., Dane, J.H., Adams, J.F. y Odom, J.W.: *Copper mobility in soils as affected by sewage sludge and low molecular weight organic acids*. *Soil Science*, 171, 1: 29-38. 2006.
- Bará, J., Ruiz, Silvia y Valero, M.: *Aprendizaje Basado en Proyectos* (Project Based Learning). Taller de Formación. Universidad Pública de Navarra, 2006.
- Batey, T. y McKenzie, D.C.: *Soil compaction: identification directly in the field*. *Soil Use and Management*, 22: 123-131. 2006.
- Barettino, D., Loredó, J. y Pendás, F. (ed.): *Acidificación de Suelos y Aguas: problemas y soluciones*. IGME, 210 pp. Madrid, 2005.
- Bigham JM, Fitzpatrick RW & Schulze DG 2002 Iron Oxides. In: Dixon (Ed.) *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. SSSA Book Series N. 7. SSSA, Madison, US.
- Bolt, G.H. y Bruggenwert, M.G.M.: *Soil Chemistry*. Developments in Soil Science 5A. Elsevier, 281 pp. Amsterdam, 1978.
- Brock, E.H., Ketterings, Q.M. y McBride, M.: *Copper and Zinc Accumulation in Poultry and Dairy Manure – Amended Fields*. *Soil Science*, 171, 5: 388-399. 2006.
- Cameron, R.E. *Guide to Site and Soil Description for Hazardous Waste Site Characterization. I. Metals*. EPA/60/4-91/029. Washington, DC. 1992.
- Carré, F., McBratney, A.B., Mayr Th. Y Montanarella, L.: *Digital soil assessments: Beyond DSM*. *Geoderma*, 142: 69-79. 2007.
- Cresser, M., Killham, K. y Edwards, T.: *Soil Chemistry and its Applications*. Cambridge Environmental Chemistry Series 5. Cambridge University Press, 192 pp. Cambridge, 1993.
- Cyzmnek, K.J., Ketterings, Q.M., Geohring, L.D. y Albrecht, G.L.: *The New York Phosphorus Runoff Index. User's Manual and Documentatio*. Cornell University, Ithaca, NY, 2003.
- Dasman. R.F.: *Environmental Conservation*. John Wiley & Son. New York, 1984.
- Dixon, J. B. y Schulze (ed.): *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. Soil Sci. Soc. Am. Book Series N. 7, 866 pp. Madison, WI, 2002.
- Dumanski, J., Gameda, S. y Pieri, C. 1998. *Indicators of land quality and sustainable land management*. The World Bank, Washington DC, USA.
- Espinosa-Mesa, M, Arbelo, C.D. y Hernández-Moreno, J.M.: *Predicting value of diagnostic soil properties on actual and potencial cation exchange capacity (CEC) in Andisols and Andic soils*. *Común. Soil Sci. Plant Anal.*, 24: 2569 – 2584.
- Eswaran, H., Rice, T., Ahrens, R. y Stewart, B.A.: *Soil Classification: a Global Desk Reference*. CRC Press, 281 pp. Boca Raton, 2003.
- Folch, R. y Paris, A.: *L'estructura del paisatge circummediterrani*. Barcelona, 1999. <http://www.crf.es/cas/fserveis/p212.html>

- Grunwald, S. (ed.): *Environmental Soil – Landscape Modeling*. CRC Press. Taylor & Francis, 488 pp. Boca Raton, 2006.
- Han, F.X., Kingery, W.L. y Selim, H.M.: *Accumulation, redistribution, transport and bioavailability of heavy metals in waste – amended soils*. En Trace Elements in Soils: Bioavailability, Flux and Transfer. I.K. Iskandar and M.B. Kirkham (ed.). Lewis Publishers, 287 pp. Boca Raton. 2001.
- Hansen, V.E., Israelsen, O.W. y Stringham, G.E.: *Irrigation Principles and Practices*. 4ª edición. Wiley. New York, 1980.
- Hseu, Z-Y.: *Concentration and distribution of chromium and nickel fractions along a serpentinitic toposequence*. Soil Science, 171, 4: 341-353, 2006.
- Hünemeyer, J.A., De Camino, R. y Müller, S. 1997. *Análisis del desarrollo sostenible en centroamérica: Indicadores para la agricultura y los recursos naturales*. IICA/GTZ. San José, Costa Rica.
- Iskandar, I.K. and Kirkham, M.B. (ed.): *Trace Elements in Soils: Bioavailability, Flux and Transfer*. Lewis Publishers, 287 pp. Boca Raton. 2001.
- Kanata-Pendias, A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd ed. CRC Press LLC, Boca Raton, 2001.
- Margesin, R. y Schinner (ed.): *Manual of Soil Analysis. Monitoring and Assessing Soil Bioremediation*. Springer-Verlag, 366 pp. Berlin, 2005.
- Oakley, B., Felfer, R.M., Brent, R. y Elhajj, I.: *Turning Student Groups into Effective Teams*. Journal of Student Centered Learning, Vol. 2, N. 1, 2004.
- Oakley, B., Felfer, R.M., Brent, R. y Elhajj, I.: *Coping with Hitchhikers and Couch Potatoes on Teams*. Journal of Student Centered Learning, Vol. 2, N. 1, 2004.
- Pachepsky, Y.A. Rawls, W.J. y Timlin, D.J.: *The current status of pedotransfer functions: Their accuracy, reliability, and utility in field- and regional-scale modeling*. Geophysical monograph, 1999.
- Peverill, K.I., Sparrow, L.A. y Reuter, D.J.: *Soil Analysis: An Interpretation Manual*. CSIRO: 147-157. Collingwood, Australia, 1999.
- Renard, K.G., Foster, D.C., Yoder, D.C. y McCool, D.K.: *RUSLE revisited: Status, questions, answers and future*. Journal of Soil and Water Conservation: 213 - 220, May-June, 1994.
- Rengasamy, P. y Churchman, G.J.: *Cation Exchange Capacity, Exchangeable Cations and Sodicity*. En. K.I. Peverill, L.A. Sparrow y D.J. Reuter: *Soil Analysis: An Interpretation Manual*. CSIRO: 147-157. Collingwood, Australia, 1999.
- Sánchez, et al. *Soil Science*, 170, 9: 726.
- Stevenson, F.J.: *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorous, Sulfur, Micronutrients*. John Wiley & Sons. 2ª edición, 448 pp. New York, 1999.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: *National Soil Survey Handbook*, N. 430-VI, 2007. [En la red] Disponible: <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>.
- Warrick A.W. (Ed) *Soil Physics Companion*. CRC Press, 2002.
- Woesten, J.H.M., Pachepsky, Y.A. y Rawls, W.J.: *Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics*. Journal of Hydrology(Amsterdam), Elsevier 2001
- Yang, S-Y. y Chang W-L.: *Use of finite mixture distribution theory to determine the criteria of cadmium concentrations in Taiwan farmland soils*. Soil Science, 170,1: 55-62, 2005.

A

- abrasión, 69, **375**
 absorción, **207**
 acidez
 de una roca, **38**
 del suelo, **230**
 agentes tampón, **231**
 fuentes, **231**
 tipos, **230**
 activa, **230**
 intercambiable, **230**
 teoría del aluminio, **234, 235**
 total, **230, 398**
 valorable, **398**
 intensidad, **398**
 acidificación, **379**
 acidolisis, 70
 ácidos
 fúlvicos, **185, 340, 341**
 húmicos, **185**
Acidothiobacillus, **280**
 actinomicetos, **273, 278**
 actividad
 antrópica, 86
 biológica, 41, 48, 138, **272**
 fauna, **273, 277, 339**
 acumulaciones, 26
 adhesividad, **153**
 adiciones, **75, 83**
 adsorbato, 208
 adsorción, **207, 221**
 de aniones, **221**
 factores de control, **225**
 mecanismos de adsorción, **223**
 secuencias de adsorción, **224**
 de cationes (ver capacidad de intercambio catiónico)
 de compuestos orgánicos, **210**
 de pesticidas, 210
 fuerzas de, **207**
 tipos, **207**
 agentes quelantes, 277
 agregado, **137**
 formación, **142, 182**
 macroagregado, **144**
 microagregado, **143, 203, 277**
 formación, **203**
 agricultura
 ecológica, **381**
 itinerante, 195
 sustentable/sostenible, **381**
Agropyron repens, 276, 278, 279
 agua del suelo, 118, **285, 286**
 contenido másico, **287**
 contenido volumétrico, **287**
 estado energético, **292**
 medida, **289**
 movimiento, **298**
 en régimen saturado, **298**
 en régimen no saturado, **299**
 potencial de, **292**
 aireación, 118, 134
 albedo, **132, 182**
 albita, 58, 59, 70, 164
 alcalinólisis, 70
 alfalfa, 272
 Alfisol, 42, 135, 215, 315
 algas, **273**
 alófana, 160, **172**
 aluminio, **405**
 efectos, 232, 405
 formas, **405**
 movilidad, **78**
 alveolos, 69
 aminización, **280**
 aminoácidos, 275
 amonificación, **280**
 amonización, **280**
 análisis
 mineralógicos, **406**
 difracción de rayos X, **406**
 espectroscopía de infrarrojos, **406**
 térmicos, **406**
 microscopio electrónico, **410**
 microanálisis, **410**
 micromorfológico, **408**
 químicos, **395, 397**
 andesita, 63, **64**
 Andisol, 214, 222, 315
 Andosol, 214, 222
 Anélidos, **273**
 anfíboles, 59, **162**
 anhidrita, 59
 anortita, 164
 anoxia, 45, 303
 antagonismos, 165
 Anthrosol, 21, 35
 apatito, 59
 aptitud del suelo, **365**
 arcilla, **123, 161, 163**
 dioctaédrica, 169
 expansible, 39
 2:1, 163, 168, **170**
 2:1:1, 163, 168, **171**
 1:1, 163, 168, **169**
 importancia, **127**
 interestratificadas, **171**
 sódica, 338
 arcillita, **65**
 área miscelánea, **354**
 argiloturbación, **80**
 argiluviación
 ver translocación de arcilla
 arena, **123**
 fina, 161
 importancia, **127**
 gruesa, 161
 importancia, **127**
 media, 161
 muy fina, 161
 arenisca, 62, **65**
 arenita, 65
 Argid, 337
 Aridisol, 42
 arqueología, 29
 arrozal, 273
 arsénico, 265
 asociación de suelos, **353**
 aspersor, **138**
 atributos del suelo, **108, 109**
 augita, 59, **163**
 avellano, 20
Azotobacter, **280**
 azúcares, 275

B

- babosas, 273
 bacterias, 48, 178, 234, **273, 275, 277**
 ferrooxidantes, **280**
 simbióticas, **278**
 bancal, 50
 basalto, **39, 63, 64, 67, 171**
 base de datos georreferenciada, **349**
 beidellita, **171**
 berilo, 162
 bioacumulación, 276
 biodisponibilidad, **194, 195, 398**
 biodiversidad, 272, 274, 276

- biofertilización, **281**
 biofunción, **37**
 bioindicadores, **276, 281**
 bioingeniería, **389**
 biología de suelos, **30**
 biomasa, **179, 273**
 biorremediación, **281**
 biota, **59**
 edáfica, **71, 165**
 biotita, **163, 170**
 bioturbación, **49, 80, 142**
 boratos, **59**
 borax, **59**
 boro
 comportamiento, **226**
 bosque, **24, 48**
 Bowen, serie de, **63, 160**
 brecha, **65**
 brillo, **132**
 brucita, **59**
- C**
- cadmio, **265**
 caducifolios, **272**
 caja negra, **37**
 Calcisol, **165**
 calcita, **28, 81, 165, 274**
 biogénica, **274**
 calentamiento del suelo, **128**
 calicata, **26, 105**
 calidad
 del agua de riego, **245**
 del suelo, **30, 276, 363**
 dinámica, **365**
 heredada, **365**
 caliza
 activa, **401**
 aloquímicas, **62**
 ortoquímica, **62**
 cambiadores de cationes, **213**
 candidas, **169**
 caolinita, **42, 169, 170**
 capa
 brucítica, **168**
 compactada, **151**
 dioctaédrica, **168**
 freática, **43, 45, 133, 182, 237, 303**
 colgada, **134**
 gibbsítica, **168**
 octaédricas, **163, 168**
 tetraédricas, **163, 168**
 trioctaédrica, **168**
 capaceo, **387**
 capacidad
 de amortiguación, **236**
 de campo, **295**
 de intercambio aniónico, **222, 404**
 determinación, **224**
 de intercambio catiónico, **163, 169, 211, 212, 213, 404**
 efectiva, **CICE, 214, 404**
 máxima, **CIC, 214, 404**
 de neutralización de ácido, **CNA, 236**
 de neutralización de base, **CNB, 236**
 hidratación de las arcillas, **169**
 tampón del suelo, **236**
 caracoles, **273**
 carácter
 heredado, **41**
 relictos, **41, 133**
 características del suelo, **108, 109**
 caras de deslizamiento, **79, 80**
 carbonatación, **70**
 carbonatos, **58, 59, 165**
 cálcico biogénico, **72**
 cálcico equivalente, **401**
 carbones, **62**
 cárcava, **371, 373**
 carga
 crítica contaminante, **266**
 eléctrica, **180, 197, 277**
 superficial, **169**
 permanente, **169, 404**
 positiva, **222**
 origen, **222**
 negativa de las arcillas, **169**
 variable, **169, 404**
 cartografía de suelos, **30, 346**
 cartografía digital de suelos, **359**
 catena, **45**
 categoría taxonómica, **314**
 cationes intercambiables, **214**
 acidificantes, **404**
 básificantes, **214, 233, 404**
 determinación, **214**
 índice, **214**
 cebolla, **155**
 celestita, **59**
 cesio, **265**
 cianobacterias, **278**
 ciclo
 biogeoquímico, **279**
 de las rocas, **60**
 de los nutrientes, **273**
 del azufre, **280**
 del carbono, **279**
 del hierro, **280**
 del nitrógeno, **280**
 ciclosilicatos, **162**
 Ciencia del suelo, **30**
 circón, **59, 162**
 clases
 mineralógicas, **59, 60**
 de suelos, **314**
 clasificación de suelos, **30, 308**
 Soil Taxonomy, **309, 312, 313**
 Base de referencia mundial de recursos de suelos (WRB), **310**
 ver *Soil Taxonomy*
 ver *WRB*
 clasto, **62**
 clima, **20, 34, 37, 41**
 cálido, **38**
 cambio, **41**
 del sitio, **41**
 húmedo, **50**
 templado frío, **24**
 climofunción, **37**
 clorita, **171**
 clorosis férrica, **401**
 cloruros, **166**
 cluster, **203**
 cobre, **266**
 colonizadores primarios, **178**
 color del suelo, **112, 131**
 código Munsell, **110, 131**
 elementos cromógenos, **128, 135**
 gléico, **259**
 litogénico, **131**
 moteado, **111, 133**
 Tabla Munsell, **131**
 columnata basáltica, **39**
 coluvio, **45**
 compacidad, **128, 153**
 evaluación, **153**
 compactación del suelo, **151, 152, 382**
 efectos, **153**
 competencia, entre organismos, **275**
 complejo, **208**
 arcillo-húmico, **79**
 coluvial-aluvial, **38**
 de superficie de esfera
 externa, **208, 223**
 interna, **170, 208, 223**
 de intercambio iónico
 aniónico, **404**
 catiónico, **404**
 de suelos, **353**
 organo-mineral, **182, 340**
 componentes
 del medio, **34**
 del suelo
 ferromagnesianos, **134**
 inorgánicos, **118, 159**
 minerales, **160**
 orgánicos, **118, 177**
 comportamiento del suelo, **121, 127, 128, 134**
 concentración parcelaria, **389**
 condiciones ácuicas, **45, 280**
 conductividad hidráulica, **155, 298**
 conglomerados, **62, 65**
 coníferas, **48**
 consistencia, **151, 153**
 dominios, de, **155**
 índice de plasticidad, **155**
 límite líquido, **155**
 límite plástico, **155**
 límites de Atterberg, **155**
 consociación, **353**
 consumidores primarios, **273**
 consumo de lujo, **22**
 contacto petroférico, **42, 316**
 contaminación, **23, 276, 380**

aguas freáticas, 22
 de suelos, **263, 264**
 origen, **265**
 niveles, **266**
 contaminantes
 inorgánicos, **265**
 orgánicos, **265**
 corneanas, 64
 correlación de suelos, **313**
 corteza terrestre, 162
 costra superficial, **138, 153**
 CRAD, **119, 128, 295**
 crioturbación, **80**
 criptopodzolización, **340**
 croma, **132**
 cromo, **266**
 cronofunción, **37**
 crucíferas, 275
 cualidades del suelo, **109**
 cualidades de las tierras, **109**
 cuarcita, 62, **64**
 cuarzo, 39, 59, 164
 cuenca
 de drenaje, **26**
 hidrológica, **26**
 cultivo de rafiña, **377**
 curva
 de neutralización, **230, 236, 399**
 característica de humedad, **294, 295**

D

deflacción, **375**
 degradación de suelos, **368**
 componentes, **369**
 efecto del sodio, 142
 neta, **369**
 por acidificación, **379**
 por compactación, **382**
 por contaminación, **380**
 por degradación de la estructura, **382**
 por disminución de la fertilidad, **377**
 por empobrecimiento de materia orgánica, **381**
 por encostramiento, **383**
 por erosión, **371, 375**
 por inundaciones, **380**
 por salinización, **378**
 por sellado, **383**
 por sellado por ocupación permanente, **383**
 por sodificación, **378**
 procesos, **363, 369, 370**
 delineación, 104, **350**
 delta, 38
 densidad
 aparente, **119, 145, 287**
 húmeda, 287
 determinación, **146**
 de observaciones, **104**
 real, **119, 145**
 depredación, **275**

depresión endorréica, 45
 descomposición de la MOS, **184**
 descontaminación de suelos, **267**
 descripción de suelos, 26, **110**
 criterios, **110**
 información general, **110**
 perfil, **110**
 desequilibrios nutricionales, 23
 desertificación, **384**
 desierto, 42
 desnitrificación, 77, **280**
 Desulfobrio, **280**
 diaclasa, 69
 difracción de rayos X, 26
 diorita, 63, **64**
 Directiva Europea para la protección
 de suelos, 49
 disolución, **70**
 dispersión, **202, 203**
 de las arcillas, 142
 distal, 45
 distancia basal, **169, 170**
 diversidad funcional
 divisoria de aguas, 43, **44**
 en cresta, **44**
 en silla de montar, **44**
 plataforma, **44**
 tabular, **44**
 doble capa difusa, **200, 240**
 geometría, **201**
 origen, **200**
 teoría de Gouy-Chapman, **201**
 Dokuchaev, **30**
 dolomía, 165
 dolomita, 59, **165**
 dominio de arcilla, **143, 203, 204**
 drenaje, **45, 47**
 clase, **303, 304**
 condiciones de, 183
 clases, 46, 134
 Duchaufour, 43
 duna, 38
 duración ecológica, **50, 179**
 dureza, 154
Dust Bowl, **376**

E

ecología de suelos, 30, **271, 272**
 gestión, **281**
 ecotoxicidad
 test de, 266
 ecuación
 de Gapon, **216**
 general de la edafogénesis, **36**
 edad del suelo, **50**
 edafodiversidad, **34**
 edafogénesis, 37, 41, 48, **67, 72, 75, 151**
 desarrollo regresivo, **75**
 procesos básicos, **75, 83**
 adiciones, **75**
 biológicos, **75**
 físicos, **75**
 pérdidas, **75, 77**
 químicos, **75**
 transformaciones, **75, 79**
 edaforrasgo, 274, **277**
 teoría general, 35
 Edafología, **30**
 edafopaisaje, 25, **26, 46, 53, 103**
 edafodiversidad, **344**
 educación ambiental, 29
 efecto solana-umbría, 44, 47
 eflorescencias salinas, 241
 elementos
 biodisponibles, 77
 contaminantes, 209, **265**
 cromógenos, **131, 135, 172, 173**
 esenciales, **194**
 gruesos, 26, 161, **123**
 importancia, **127**
 movilidad, **233, 257**
 nativos, 59
 solubles, **72, 73, 242**
 encamado, 22, 23
 encostramiento, **155**
 endopedión
 argílico, 151, **338**
 cálcico, **81, 165**
 espódico, **340**
 gypico, 165
 petrogypico, 165
 endorreico, 45
 enfoque holístico, 375
 ensayos
 de campo, 26, **111, 241**
 físicos, 119
 Entisol, 151, 315
 enzimas, 278
 epidota, 59, 162
 epipedión, 165
 móllico, 96, 215
 erosión, **371**
 control, **372**
 eólica, 77, **375**
 hídrica, 77, **78, 371**
 erosionabilidad, 128
 erupción volcánica, 50
 escala
 de estudio, 26
 de observación, **26, 27, 161, 272**
 de tiempo, **49**
 escombreras de minería del carbón, 237
 escorrentía, **41**
 esmectita, **171, 204, 407**
 ESP, **217, 248, 378**
 espacio
 de ocio, 119
 poroso, 144, **146**
 esparita, 165
 Espodosol, 42, 135, 405
 esquema conceptual, 31
 esquisto, 62, 64, 134
 estabilidad de los minerales, 63, 126
 estepa, 42

estercolado, 50
 estructura del suelo, **137, 141, 182**
 descripción, **138**
 columnar, **139**
 en bloques, **138, 139**
 estabilidad, **382**
 forma, **138**
 grado, **138**
 granular compuesta, **138, 139**
 granular simple, **138**
 laminar, **138**
 maciza, **138**
 migajosa, **139**
 pedialidad, **138**
 prismática, **138, 139**
 resiliencia, **382**
 tamaño, **139, 140**
 tipo, **138, 139**
 vulnerabilidad, **382**
 dinámica, **143**
 estabilidad, **137, 139**
 formación, **142**
 factores abióticos, **142**
 factores bióticos, **142**
 inestabilidad, **139**
 macroestructura, **137, 146**
 microestructura, **137, 146**
 eutrofización, **222**
 evaluación de suelos, **30**
 expansión–retracción, **80, 142, 163, 170, 171**
 extensión agraria, **29**
 extracto de pasta saturada, **242**
 extragrado, **319**
 exudados, **275**

F

Factores
 abióticos, **142, 276**
 antrópicos, **35, 48**
 bióticos, **48, 142, 276**
 ecológicos de formación, **20, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 43, 48**
 clima, **41**
 material originario, **37**
 relieve, **43**
 tiempo, **49, 50**
 FAO, **25**
 fases del suelo
 gaseosa, **118, 194**
 líquida, **118, 193**
 elementos, **196**
 sólida, **118, 142, 146, 193**
 elementos intercambiables, **197**
 elementos solubles, **195**
 fauna, **273**
 excavadora, **49**
 feldespatos, **39**
 alcalinos, **164**
 ferrhidrita, **172, 173**
 ferrolisis, **262**
 fertilidad de suelos, **30**

 física, **377**
 química, **377**
 Fielde – Perrot
 test de, **156, 172**
 fijación de nitrógeno, **278, 280**
 no simbiótica, **280**
 simbiótica, **280**
 filita, **64**
 filosilicatos, **59, 168**
 principios estructurales, **168**
 física de suelos, **30**
 fisiografía, **43**
 floculación de las arcillas, **142, 143**
 concentración crítica de, **203**
 floculación–dispersión, **202, 336**
 Folch, **43**
 fondo, **43, 45**
 en cuna, **43**
 en uve, **43**
 geoquímico, **86**
 llano, **43**
 formación de un suelo
 tasa, **50**
 formas del terreno, **43**
 forsterita, **70**
 fósforo, **59**
 absorción de, **278**
 adsorción, **221**
 comportamiento, **225**
 fotointerpretación, **26, 103**
 fracción de lavado, **245**
 fracciones granulométricas, **160, 161**
 frente de humectación, **42**
 friabilidad, **154**
 fuerzas
 campos electrostáticos, **208**
 intercambio iónico, **208**
 London–Van del Waals, **204, 208**
 puentes de hidrógeno, **208**
 funciones de edafotransferencia, **109**
 funciones del suelo, **20, 21, 22, 23, 24, 25, 46, 121, 141, 218, 233**
 depurador, **182**

G

gabro, **63, 64**
 Gelisol, **42**
 génesis de suelos, **30, 34, 37**
 geografía de suelos, **30**
 geomorfología, **21, 34**
 geotextiles, **389**
 Gerasimov, **42**
 gestión de residuos urbanos, **29**
 gibbsita, **59, 172, 236**
 glaciario, **50**
 glaciario, **44, 46**
 Gley, **45, 260**
 gneiss, **62, 64**
 goetita, **59, 172, 173**
 gotas de lluvia
 impacto, **41, 49, 137, 138, 155**
 GPS, **103**

grado de desarrollo del suelo, **50, 160**
 granate, **162**
 granito, **61, 63, 64, 164**
 granitoide, **64**
 granja de cerdos, **22**
 granulometría, **119, 123**
 análisis, **124**
 criterios de calidad, **125**
 composición, **124**
 diagrama semilogarítmico, **125**
 ley de Stokes, **124, 125**
 grupos
 carboxílicos, **340**
 fenólicos, **340**
 de suelos, **353**
 indiferenciado, **353**
 Grupos de suelos de referencia, WRB,
 328
 ver WRB
 Gypsid, **165**
 Gypsisol, **165**

H

halita, **62, 70**
 halófitas, **167**
 halogenuros, **59**
 haloisita, **170**
 hematita, **59, 172, 173**
 hidratación, **70**
 hidrólisis, **42, 70**
 hidrología de suelos, **30**
 hidromorfismo, **134**
 hidróxidos, **172**
 hielo–deshielo, **41, 42, 69, 142**
 hinchamiento, **204**
 hierro
 deficiencia, **173**
 compuestos de, **172**
 toxicidad, **173**
 histéresis, **296**
 Histosol, **45, 160, 214**
 hongos, **48, 144, 178, 273, 275, 340**
 horizonación, **36, 72, 106**
 horizonte, **26, 36, 106**
 del suelo, **91**
 de diagnóstico, **95**
 endopediones, **95**
 árgico, **151**
 argílico, **151**
 hipergypsico, **151**
 gypsico, **151**
 sálico, **242**
 epipediones, **95, 96**
 antrópico, **96**
 folístico, **96**
 hístico, **96**
 melánico, **96**
 móllico, **96, 215**
 plaggen, **96**
 úmbrico, **96**
 equivalencias, **96**
 identificación, **36, 110**

genético, **83, 92**
denominación, **92**
reglas de nomenclatura, **92**
A, 48, 50, 92, **106**, 135, 272
Ab, 93, 135
Ap, 83
B, **106**
Bg, 84
Bh, 83, 272, **339**
Bk, 84
Bkm, 84
Bt, 84, 151, **338**
By, 84, 151
Bw, 83
C, 92, **106**
E, 92, 134, 339
H, 83, 92
O, 48, 83, 92, **106**, 272, 339
R, 92, **106**
subíndices, 93
hormigón, 402
hormonas, 275
hornblenda, 59, **163**
hortensia, 232
huecos de empaquetamiento, **146**
Huguet del Villar, 30
humificación, **185**
humina, **185**
humus, 179, **180**, 272, 277

I

ilita, 42, **170**
iluvación de arcilla, **80**, 135
imogolita, **172**
impactos
por transformación en riego, 89
Inceptisol, 42
indicadores, 50, **281**
bioindicadores, **276**
de calidad del suelo, **366, 367**
conjunto mínimo, **367**
selección, **367**
tipos, **367**
de la formación del suelo, 172
uso, **386**
color, **134**
índice salino de un fertilizante, **245**
inestabilidad estructural, **139**
infiltración, **41, 119, 301**
velocidad, de, 153, 155
información
de suelos, **359, 360**
taxonómica de suelos, **311**
inosilicatos, 59, **162**
intemperismo, **38, 68**
ver meteorización
intensidad
geográfica, **104**
tipológica, **104**
intercambio
aniónico, **221**
catiónico, **211**

reacciones, **216**
iónico, 182, 197
interfase, 20, **207**
intergrado
ST, **319**
WRB, **330**
inventario de suelos, **345**
isopedión, **26**
isoterma de adsorción, **209, 224**
de BET, 209
de Langmuir, **209**
de Freundlich, **209**

J

jarosita, 58, **172, 237**
Jenny, 36, 37, 39
Juglans nigra, 276

K

karstificación, 165
komatita, 63
krotovina, **80**, 272

L

laboreo, 152
dificultad, 128
ladera, 43, **44, 45**
cóncava, **44**
convexa, **44**
en glacis, **44, 46**
parte basal, 45
parte central, 45
parte distal, 45
parte proximal, 45
parte somital, 45
rectilínea, **44**
lámina
delgada, 71, 81, 82, 152, 155, 336,
338
octaédrica, **163**
tetraédrica, **163**
lapiaz, 70, **74**
leguminosas, 278
lenar, 70, **74**
lepidocrocita, 59, **172, 173**
levantamiento de suelos, **345**
Ley
de Arrhenius, 41
de Bragg, 407
de Darcy, **299**
Liebig, **192, 381**
ligando, 208
lignina, 183
límite
inferior del suelo, 20
límite líquido, **155**
límite plástico, **155**
limo, **123**
importancia, 127
limolita, **65**
liquen, **72, 178**

litificación, 62
litofunción, **37**
litosfera, 38
loess, 38
Lombricus terrestris, **276**
lupa binocular, 26
lutita, 39, 62, **65**
luz polarizada, **410**

LI

llanura aluvial, 38

M

macroclima, 41, 43
macrofauna, **273**
macronutrientes, 182, 195
maghemita, **173**
magnesita, 59
manganeso
toxicidad, 235
magnetita, **172, 173**
maíz, 155, 237
Malthus, **192**
mantillo, 272
mapa de suelos, 343, **344, 345**
consistencia, **104**
criterios de calidad, **104, 356**
de isolíneas, 104
delineación, **350**
detallado, 104, **346, 347**
escala, **352**
grande, 346
pequeña, 346
esquemático, 346
generalizado, 346, **347**
grado de abstracción **347**
grado de actuación, **347**
impurezas, **350, 351**
inclusión, **351**
levantamiento, 345, 358
leyenda, **353**
límites, **352**
polígonos, **350**
precisión temática, **104**
semidetallado, **347**
tipos, **347**
uso, **355**
Mason,
diagrama, **73, 164**
materia orgánica, 30, 48, 49, 50, 142,
258
aportes, 179
material
aluvial, **38, 45, 55**
alóctono, **38**
autóctono, **38, 55**
coluvial, **38, 40, 45, 55**
de partida, 38
eólico, 38, 55
granoclasificado, 38
heterométrico, 38

homométrico, 38
no consolidado, 38
originario, 20, **34**, **37**, **38**, 55, **60**
parental, 20, **34**, **37**, 161
piroclástico, 134
precursor del suelo, **68**, 72
predefinido, **38**, 55
volcánico, 38, 55
materia orgánica, **179**, **399**
 acificante, **184**
 color, **186**
 componentes de, **184**
 heredados, **185**
 síntesis, **185**
 contenido, **182**
 determinación, **399**
 factores de control, **182**, **182**
 evolución, **184**, 185
 descomposición, **184**
 humificación, **185**
 mineralización, **184**
 fracción coloidal, **179**, **180**
 fresca, **179**
 funciones, **182**
 fuentes de, **187**
 macroscópica, **179**
 materia orgánica particulada, **179**
 mejorante, **183**
matiz, **131**
medio
 ácido, 49
 básico, 49
megafauna, **273**
melocotoneros, 119
mesoclima, 26
mesofauna, **273**
metabase de datos, **349**, **350**
metaconglomerados, 64
metahalosita, 170
metales pesados, **265**
meteorización, **38**, **67**, **68**, 72, 126,
 341
 acción biológica, **71**
 biogeoquímica, **70**
 física, 42, **69**
 frente, de, **68**
 por disolución, **70**
 por formación de quelatos, **70**
 por hidratación,
 por hidrólisis, **70**
 por oxidación, **71**
 productos, **72**
 resistencia a, **63**, 164
 química, 160
 tasa, 38
mica, 59, 171
micelios, 277
micorrizas, **275**, **281**
 ectomicorrizas, **275**
 endomicorrizas, **275**, **278**
micrita, 81, 165
microagregados, 26, 277

microambiente, 69
microclima, 41
microesparita, 165
microfauna, **273**
microflora, **273**
micromorfología, **408**
micronutrientes, 182, 195, 265
 reciclado, 277
microorganismos, **273**
microporosidad, 382
microscopio
 electrónico, 143, 170, **410**
 de barrido, **410**
 de transmisión, **410**
 óptico, **410**
 petrográfico, 28, 161, 164, 166
micrositio, **25**, 26, 69, 274
minerales, **57**, **58**
 denominación, **58**
 de arcilla, **167**, 340
 de la fracción arcilla, 163, **167**
 de la fracción arena, **160**
 de la fracción limo, **160**
 fibrosos, **171**
 heredados **72**, **73**, 160, 163
 idiomorfos, 64
 neoformados, 70, **72**, **73**, 160
 origen, **160**
 transformados **72**, **73**
mineralización de la MOS, **184**
mineralogía
 de arcillas, **167**, 183
 de suelos, 30
minería
 a cielo abierto, **388**
 de carbón, 29
 del suelo, **377**
mirabilia, 70
modelo
 de distribución de suelos, 26
 de relieve, 43
 DPSIR, **367**
 digital del terreno, 103
 matemáticos, 37
 PSR, **367**
modificación genética de organismos,
 282
molibdeno,
 comportamiento, **226**
Mollisol, 42
monitorización, 246
montmorillonita, 42, 58, **171**
morfología de suelos, 30, **101**, **106**
morrena, 38
moscobita, 59, 163, **170**
moteado, **111**, **133** 134, 135, 303
 estimación del porcentaje, **111**
movilidad
 aluminio, **78**
 de los elementos, **233**
 sílice, **78**
movimientos en masa, **376**
mucílagos, **275**

N

necromasa, 179
nemátodos, 273
nesosilicatos, **162**
nitratina, 59
nitratos, 59
nitrificación, **280**
Nitrobacter, **273**, **280**
Nitrosomonas, 236, **273**, **280**
nitrógeno
 aportes, 23
 N-NO₃⁻, 22, 23
nódulos
 calizos, 62, **401**
 en las raíces, **275**
nontronita, **171**
nutrientes
 absorción de, **278**
 flujo de, **272**

O

observaciones
 intensidad, 104, **354**
 geográfica, **354**
 tipología, **354**
obsidiana, **64**
octaedro de alúmina, **161**
olivino, 59, 64, **162**
oolitos, 62
ópalo, 59
Orden de suelos, **316**
organismos
 aerobios estrictos, **273**
 aerobios facultativos, **273**
 autótrofos, **272**, **273**
 del suelo
 funciones, **276**
 fotoautótrofos, **273**
 heterótrofos, **273**
 quimioautótrofos, **273**
 vivos, 21, **34**, **37**, 183, **272**
organizaciones edáficas, 25, 26, 27, **146**
ortofotomapa, **345**
ortosa, 59, 164
óxidos, **58**, **59**, **172**, 213
 de hierro, colores, **173**
Oxisol, 42, 214, 222, 316

P

paisaje, **43**
paleosuelos, **51**
paligorskita, **171**
pámulas, **339**
parasitismo, **275**
parque natural, 29
pedión, 26, **103**
 estudio, **105**
Pedology, 30
pelets, 62
penetrómetro, **154**
Penicillium, 277

- pérdida
de suelo, 29
tolerable, 50
- perfil, 26, **102**
descripción, **110**
diferenciación textural, **339**
interpretación, **107**
morfología, 46, 259
salino, **243**
- pH, 172, **229**
de suelos sódicos, **249**
del suelo
efectos, **234**
intervalo de existencia, **231**
- peridotita, 63
permeabilidad, **45**, **119**, 128
petróleo, 279
pirita, 59, 71, **172**, 237
pirolusita, 59, 172
piroxenos, 59, **162**
Pisum sativum, 128
plagioclasas, 59, **71**, 164
Planosol, 135
plasticidad, 128, **153**
plataforma, **44**, 46
población microbiana, 234
poder
clorosante, **401**
índice, **401**
tampón, 236, 405
- podzolización, **340**
polipediación, **26**, 103
polisacáridos, 277
populicultura, 119
porcentaje de saturación de catones
basificantes, **215**
- poros, **148**
clasificación, **149**
cámaras, **149**
canales, **149**
cavidades, **149**
de empaquetamiento, **149**
planos, **149**
diámetro equivalente, **148**
macroporos, **148**
microporos, **148**
modelos de distribución, **149**
morfología, **148**
- porosidad, **119**, **146**, **147**, 287
descripción, **148**
efectiva, **147**
macroporosidad
microporosidad, 382
ratio de poros, **147**
residual, **147**
volumen específico, **147**
- posición del suelo en el relieve, **34**, **37**,
183
- potencial
del agua en el suelo, **292**
de presión, **293**
de presión hidrostática, **293**
- gravitacional, **293**
hídrico, **292**
matricial, **293**
osmótico, **293**
- iónico, **73**, 78
redox, 172, **252**, **253**, **255**
diagrama Eh – pH, **256**, **257**
ecuaciones redox, **254**
medida, **256**
secuencia de reducción, **255**
- pradera, 48
precipitación
efectiva, **41**
- primeros colonizadores, **21**, **275**
- principio
causal, 35
de zonalidad, 43
- procesos
edafogénicos, 134, **334**
formadores, **34**, **333**, **334**
redox, 79, 133, 134, 135, 280
- producto de solubilidad, 175, 197
- propiedades del suelo, **108**
biológicas, 182
físicas, **117**, **119**, **182**, 233
inferidas, **109**, **127**, **134**
químicas, 119, 182, **191**, 233
observadas, **108**
- prospección de suelos, 26, **363**
protección de suelos, 30, **363**
- protozoos, **273**
Pseudogley, 45, **260**
PSI, **217**, **248**
ver ESP
- puentes de hidrógeno, 208
punto de marchitez permanente, PMP,
295
- purín, 22, 23
- Q**
- quelato, 70, 208, 340
queluviación, **80**, **84**, **340**
quera, **274**
querógenos, 279
química de suelos, 30, **192**
ámbitos, **193**
quimisorción, 208
- R**
- raíces, 49
rasgo
hidromórfico, 45
redoximorfo, 303
- reacción
de coordinación, 208
de intercambio catiónico, **216**
factores externos, 75
factores internos, 75
mecanismos, 75
velocidad, 75
- reacción del suelo, **228**, **398**
- agentes tampón, **231**
capacidad de amortiguación, **236**
redundancia funcional, **274**
reflectometría de dominio del tiempo,
290
- regadío, 29
régimen de humedad del suelo, **42**
arídico, **42**
ascensional, 42
estagnante, 42
no percolante, 42, 214
percolante, 42,
útrico, 42
ústico, 42
xérico, 42
- Regosol, 151
rehabilitación
de suelos, **368**, **388**
del territorio, **369**
- relación
de sodio intercambiable, ESR, **217**
C/N, 48, 182, **183**
- relieve, **43**
formas, **43**
reconstrucción, **46**
- remolacha, 155
requerimientos de lavado, **245**
- resiliencia, 152, 274, **370**, **382**
- resistatos, 69, **72**, **73**, 160
retención de agua, **119**
- revestimientos
de arcilla, 26, **28**, **335**, **336**, **339**
de materia orgánica y hierro, **339**
- Rhizobium*, **280**, 281
- riego, **297**
localizado, 245, **297**
por gravedad, **297**
- riesgos
ambientales, 22
de sodificación, **216**
- riolita, 63, **64**
rizodeposición, **275**
rizosfera, 274, **275**, 277
- rocas, 20, 38, **57**, **60**, 74
ácida, 164
carbonatadas, **65**, 279
clásticas, 62
detríticas, 62
esquistosas, **64**
félsica, **63**
ferruginosas, 70
filonianas, 61
foliadas, **64**
fresca, 42
ígneas, **61**, **63**
in situ, 38
intrusivas, **61**, 64
madre, **34**, **37**
máfica, **63**
metamórficas, **62**, **64**, 340
no foliadas, **64**
no terrígenas, 62, **65**

- orgánicas, **65**, 279
 - pegmatitas, 61
 - piroclástica, 172
 - plutónicas, **61**, 69
 - sedimentarias, **62**, **65**
 - terrágenas, 62, **65**
 - ultrabásica, **63**
 - ultramáfica, **63**
 - rubefacción, 135
 - ruditas, **65**
 - RUSLE, **371**
 - rutilo, 59
- S**
- sabana, 42, 50
 - sales
 - más solubles que el yeso, **166**, **403**
 - Salicornia*, 167
 - Salid, 167, 241
 - salinidad, **239**
 - efectos, **243**
 - gestión, **244**
 - medida, **242**
 - requerimientos de lavado, **245**
 - salinización, 45, 50, **89**, **241**, **378**, 384
 - critérios de diagnóstico, **241**
 - salud del suelo, **365**
 - saponita, 171
 - saprófagos, 273
 - saprolita, , **67**, 164, 178
 - SAR, **217**, **248**
 - schwertmanita, 172, **173**
 - secuencia
 - de suelos, 26
 - de reducción, **255**
 - secuestro de carbono, 182
 - sellado, **155**, **383**
 - SEM, 28, **410**
 - sensor electromagnético, 243
 - selva tropical, 42
 - sepiolita, 171
 - serie
 - de Bowen, **63**, 160
 - de suelos, **313**
 - liotrófica, **218**
 - serpentinias, 64
 - siderita, **172**
 - sideróforos, 278
 - silicatos, **58**, **162**
 - amorfos, **172**
 - con bajo grado de ordenación, **172**
 - ciclosilicatos, **162**
 - filosilicatos, **163**
 - inosilicatos, **162**
 - nesosilicatos, **162**
 - sorosilicatos, **162**
 - tectosilicatos, **162**
 - sílice,
 - liberación, 341
 - movilidad, **78**
 - simbiosis, **275**
 - sistema
 - de Información Geográfica, 26, 358
 - de Información de Suelos, **358**
 - dinámico, 35
 - radicular, **151**, 154
 - crecimiento compensatorio, **153**
 - sitio, **25**, 26, 41, **102**
 - descripción, **110**
 - morfología, **43**
 - slickenside*, **79**, 80
 - sodificación, **246**, **378**
 - critérios de diagnóstico, **247**, **249**
 - Soil Taxonomy*, 95, **312**, **314**
 - Familia, **319**
 - Grupo, **318**
 - Orden, **316**, 324
 - Serie de suelos, **313**, 324
 - Subgrupo, **319**
 - Suborden, **317**, 324
 - solana, 44, 47
 - Solonchak, 167, 241
 - bufado, 167
 - Solonetz, 135, 246
 - somital, 45
 - sonda de neutrones, **289**
 - sorosilicatos, **162**
 - sostenibilidad, 367, **385**
 - Sphagnum*, 45, 233
 - Striga*, 377
 - Suborden de suelos, **317**
 - subsistencia, 165
 - suela de labor, 152, 382, **383**
 - suelo, **20**, **21**
 - ácido, **231**
 - gestión, **237**
 - afectado por salinidad, **240**
 - alcalinos, 214, 231, **240**, **246**
 - básico, 233
 - calizo, 215, **401**, **403**
 - climax climácico, 43
 - climax estacional, 43
 - contaminados, **281**
 - de pradera, 272
 - de sulfatos ácidos, 280
 - disímil, **351**
 - enterrado, **51**, 52
 - fosil, **51**
 - hidromorfo, 45
 - mineral, 55, **106**
 - monocíclico, **41**, **50**
 - monogénico, **50**
 - orgánico, 55, **107**
 - policíclico, 41, **50**
 - poligénico, **50**
 - salino, **240**, **241**, **403**
 - salino-sódico, **240**
 - símil, **351**
 - sistema de tres fases, **118**
 - sódico, 214, **240**, **246**
 - yesoso, **36**, **165**, **403**
 - análisis, 166
 - sulfatos, **58**, **166**
 - superficie específica, 69, 123, 186, 212
 - suspensión, **202**
 - sustancias húmicas, **185**
 - comportamiento, **185**
 - sustentabilidad, 367, **385**
 - sustitución isomórfica, **169**, 207, 213
 - sustrato, **275**

T

 - tactoide, 203
 - taffonis, 69
 - taiga, 42
 - taxadjunto, **354**
 - TDR, **290**
 - Technosol, 21, 35
 - tecnología de suelos, 30
 - tectosilicatos, 59, **163**
 - teledetección, 26
 - tenardita, 70
 - tensiómetro, **291**
 - teoría
 - general de la edafogénesis, 35
 - Gouy-Chapman, **201**
 - termitas, **277**
 - terrenos contaminados, **264**
 - territorio, 24
 - terrón, **141**
 - tetraedro de sílice, **162**
 - textura, **123**, **124**, 148, 183
 - clase textural, **124**
 - interpretación, **127**, **128**
 - triángulo de, **124**
 - ver granulometría
 - tiempo, 21, **34**, **37**
 - tierra
 - fina, **123**
 - natural, **123**
 - tierras, 25
 - till, 38
 - tillita, 38
 - tixotropía, **156**
 - topofunción, **37**
 - toposecuencia, 26, **45**, 46
 - toxicidad, **380**
 - por hierro, 173
 - transformaciones, **79**, **83**
 - translocaciones, 38, 41, **80**, **84**
 - de arcilla, **80**, **335**
 - de carbonato cálcico, **80**
 - de coloides orgánicos, **80**
 - de sales solubles, **80**
 - de yeso, **80**
 - trigo, 22, 276
 - Triticum aestivum*, 276
 - tundra, 42
 - turba, 62
 - turbaciones, 75
 - argiloturbación, **80**
 - bioturbación, **80**
 - crioturbación, **80**
 - turbera, 45, 92, **108**
 - turmalina, 58, 59

turrículas, **272, 276**
Typha latifolia, 119

U

ubicuista, **276**
Ultisol, 42, 214, 215, 222
umbría, 44, 47
unidad
 cartográfica, 103, **350, 351**
 tipos, **353**
 de suelos, 103
 mínima, 26
 taxonómica, **350**
 nivel jerárquico alto, **350**
 nivel jerárquico bajo, **350**
USLE, 371
uso del suelo, 27, 29, 183, 398
utilidad del suelo, **364**

V

variabilidad
 espacial, 22, **35**
 espacio-temporal, 21, **35, 243**
variación
 sistemática, **35**, 103

 ligada al uso, **36**, 103
vegetación, **48**, 182
 acidificante, **184**
 caducifilia, 48
 halófila, 241
 perenne, 48
velocidad
 de reacción, 75
 infiltración, 155
vermiculita, **171**, 407
vertedero, 23, 29
vertidos,
 contaminantes, 278
Vertisol, **79, 80, 81**, 171, 316
vidrios volcánicos, 172
vivianita, 59

W

Way, **192**
WRB, 95, **310**, 327, **328**
 arquitectura, **328**
 calificadores, **329**
 Grupos de Suelos de Referencia, **328**
 horizontes de diagnóstico, **328**

materiales de diagnóstico, **328**
 prefijos, **330**
 principios básicos, **328**
 propiedades de diagnóstico, **328**
 sufijos, **330**

X

xenobiótico, **278**

Y

yeso, 23, 59, 62, **65, 81, 165, 166**, 280
 equivalente, **402**

Z

zeolita, 59, **172**
zona
 árida, 41, 45, 75, 165, 166, 171, 214
 fría, 45
 hiperáridas, 166
 húmeda, 45, 214, 231
 semiárida, 45, 75, 165, 166, 171,
 214
 templada, 42
 tropical, 20, 77, 164, 169

Existe un proverbio chino que dice: Decídmelo y lo olvidaré / Enseñádmelo y lo recordaré / Implicadme y lo entenderé / Apartaos y actuaré. Podría decirse que este libro de Introducción a la Edafología lo toma de referencia, al combinar contenidos teóricos para enseñar, con numerosas piezas de actividad de tipología diversa para implicar y para dejar actuar. Plantea una docencia activa en la forma de trabajar los contenidos. Busca que a lo largo de todo el curso se consiga la complicidad del estudiantado en su propia formación. El planteamiento docente está enfocado a educar personas a aprender, a buscar información y saber analizarla críticamente, a redactar informes y saber exponerlos, a trabajar en equipo, a adquirir el hábito de aprender a lo largo de la actividad profesional futura. Por ello se proponen búsquedas en Internet y en la biblioteca, trabajos en equipo, juegos de rol, entre otros instrumentos. Aprender a hacer con un espíritu crítico, para ser capaces de tomar decisiones asumiendo responsabilidades profesionales éticas. Aprender a vivir juntos, aprender a ser.

No se trata de un libro de autoaprendizaje, sino de un libro con voluntad de servir de base a la actividad docente prevista por el profesorado, que tendrá su propio estilo, sus propias convicciones e interpretaciones de la Ciencia del suelo. Puede resultar útil en el marco del Espacio Europeo de Educación Superior, o en otros.

*En el libro se desarrollan catorce **Unidades** que se han considerado básicas: el suelo, sus funciones y organizaciones edáficas; factores ecológicos de formación; meteorización y procesos edafogénicos; estudio del suelo en el campo; propiedades físicas y comportamiento del suelo; componentes inorgánicos; materia orgánica; propiedades químicas y comportamiento del suelo; ecología del suelo y ciclo de los elementos; agua del suelo; clasificación de suelos según Soil Taxonomy y WRB; información de suelos, bases de datos georreferenciados, SIS, formas de acceso a la información y su utilización; calidad del suelo, procesos de degradación y bases para su control; y el estudio del suelo en el laboratorio. En cada Unidad se indican los objetivos, el esquema que se desarrolla y las lecturas recomendadas. Se inicia con un ejercicio dedicado a Conexiones de aprendizaje, para conectar con lo aprendido previamente, y acaba con Conocer y comprender, para trabajar los contenidos teóricos aprendidos. Completan el libro las Claves para orientar en la resolución de las actividades propuestas y un extenso Índice alfabético para facilitar la consulta.*

En la línea que nos tienen acostumbrados los profesores Jaume Porta y Marta López-Acevedo, el libro, que incorpora a la profesora Rosa M. Poch, está cuidadosamente ilustrado en color, resulta de lectura agradable y de gran actualidad, tanto en el enfoque, como en contenidos y planteamiento docente. No cabe duda que supone una iniciativa innovadora, que contribuirá a dar respuesta a las directrices del Sistema de Transferencia de Créditos Europeo (ECTS), en el momento en que se empiezan a dar los primeros pasos en su implantación.



ISBN: 978-84-8476-342-0

www.mundiprensa.com

