

# LA DIFERENCIACIÓN DEL PERFIL DEL SUELO

Ing. Agr. M.Sc. Agustín Sanzano

## 1. INTRODUCCIÓN

La descomposición de la roca madre para conformar la regolita en un sitio dado, o el transporte de materiales geológicos no consolidados por acción de viento, agua, hielo, etc. para depositarlos en otro sitio, puede anteceder u ocurrir simultáneamente con el desarrollo de los distintos horizontes de un perfil de suelo. Durante la formación de un suelo a partir de un material originario cualquiera, la regolita sufre varios cambios profundos provocados por las variaciones en los cuatro procesos principales de formación del suelo. Esos cuatro procesos básicos o pedogenéticos, ayudan a definir lo que distingue al suelo de las capas de sedimentos depositados por los procesos geológicos. Los procesos pedogenéticos son los responsables de la diferenciación de horizontes del suelo en todo tipo de ambientes y actúan todo el tiempo reforzándose o neutralizándose entre sí.

Existen dos tendencias contrapuestas en el desarrollo del perfil de suelo: la **horizonización** y la **haploidización**. La primera incluye los procesos y condiciones anisotrópicas mediante las cuales los materiales iniciales se diferencian en perfiles de suelo con muchos horizontes (Ejemplo: suelos del orden Espodosoles que se observan en la Figura 1). Estos procesos ocurren por gradientes perpendiculares a la superficie del suelo de ganancias, pérdidas, transformación y transporte de materia. Como resultado de esa perpendicularidad, los horizontes (que son el resultado de esos procesos) son paralelos a la superficie. Hay casos en los que la horizonización puede no ser visible para el observador, como sucede en la mayoría de los suelos rojos tropicales, fuertemente alterados químicamente. En cambio, la haploidización



**Figura 1:** Perfil de suelo con varios horizontes bien diferenciados (horizonización en un Espodosol). Fuente: Stan Buol, SoilScience.info. CC BY 2.0)

incluye procesos isotrópicos y condiciones mediante las cuales se inhibe o desacelera la horizonización o mediante la cual los horizontes se mezclan o se alteran por alguno de las siguientes turbaciones: **criotur-bación**, **bioturbación** o **edafoturbación**. La criotur-bación ocurre porque una capa de hielo permanente (permafrost) inhibe los procesos pedogenéticos de

formación de horizontes. En la bioturbación los organismos que habitan en el suelo, suelen ser agentes que desplazan materiales edáficos en sentido vertical, dando como resultado un solum totalmente homogéneo (sin horizontes). La edafoturbación intrínseca (debido a la composición de los minerales del suelo) ocurre cuando el material original es rico en arcillas expandibles (por ejemplo montmorillonita) en donde la edafogénesis genera suelos del orden de los Vertisoles (Figura 2).

Los cuatro procesos básicos o primarios son los siguientes: adiciones; sustracciones o remociones; transferencias o redistribuciones y transformaciones.



**Figura 2:** Perfil con edafoturbación (haploidización en un vertisol). Fuente: USDA

## 2. PROCESOS BÁSICOS O PRIMARIOS

### 2.1. ADICIONES

Las entradas de materiales al perfil de suelo en desarrollo desde fuentes externas se consideran adiciones. Los materiales pueden ser minerales u orgánicos en forma sólida, líquida o gaseosa. Un ejemplo común es la entrada de materia orgánica proveniente de los residuos vegetales tales como hojarasca, flores, frutos, ramas y raíces. Otra adición importante consiste en partículas de polvo que llegan a la superficie del suelo (el viento puede haber llevado estas partículas desde una fuente a pocos metros de distancia, o desde cientos o miles de kilómetros). La incorporación de ácidos provenientes de la atmósfera pueden ser importantes adiciones al suelo en algunas regiones industriales. Otro ejemplo, común en las regiones áridas, es la adición de sales o sílice disueltas en la capa freática y depositadas en o cerca de la superficie del suelo cuando el agua se evapora. El suelo depositado por erosión en los sectores bajos o los materiales aluviales o eólicos (**cumulización**) pueden ser considerados adiciones en la medida que se agreguen en cantidades pequeñas que puedan ser inmediatamente incorporadas al horizonte superficial y asimiladas al suelo que se está diferenciando. Si en cambio, se agregan en grandes cantidades, no son consideradas adiciones ya que sepultan al suelo en formación, y un nuevo proceso de diferenciación debe comenzar.

Los residuos vegetales constituyen las adiciones normales de mayor importancia. Los numerosos productos orgánicos que resultan de la descomposición de los residuos vegetales se agregan a la superficie de las rocas en descomposición y gradualmente se incorporan a los productos minerales principalmente mediante la actividad de los organismos del suelo. Al principio, las adiciones de materia orgánica forman una capa visible encima y en la parte superior del perfil de suelo, pero conforme tiene lugar la descomposición y la incorporación, la materia orgánica penetra lentamente en el material de partida. Algunos de los productos orgánicos de

la descomposición penetran a mayor profundidad que otros, dando así lugar a la diferenciación de los horizontes. Cuando hay un fuerte proceso de oscurecimiento del material mineral inicial por la adición e incorporación de materia orgánica se habla de **melanización**, mientras que si se produce enriquecimiento de materia orgánica y humus en la superficie del suelo mineral hasta una cierta profundidad se habla de **acumulación orgánica** (suelos del orden Histosoles)

Las distintas formas de adición dan lugar a la formación de los **horizontes O, A** y a los **epipedones**.

La mezcla íntima de materia orgánica y minerales que tiene lugar en la capa superior del suelo, da como resultado la formación de distintos compuestos órgano-minerales. Entre las combinaciones posibles merecen especial mención aquellas que incluyen ciertos compuestos orgánicos y minerales de arcilla que confieren cualidades físicas importantes al suelo, tales como la formación de agregados. La arcilla y el humus pueden combinarse por la acción de iones Ca, Fe, Al o Mn, los que actúan como agentes de enlace.

## 2.2. SUSTRACCIONES O REMOCIONES

Consiste en la eliminación completa de materiales del perfil del suelo. Estos materiales se pierden del perfil del suelo de diversas formas: erosión de los materiales de la superficie del suelo, evaporación y evapotranspiración que causan pérdidas de agua, lavado y drenaje que causan pérdida de agua, de sustancias solubles tales como sales o sílice meteorizada del material original, o ácidos orgánicos producidos por los microorganismos o por las raíces de las plantas. La erosión constituye el mayor agente de pérdida, a menudo remueve las partículas finas (humus, arcilla y limo), dejando la superficie del suelo relativamente más arenosa y menos rica en materia orgánica. La materia orgánica se pierde también por descomposición. El pastoreo animal o la cosecha de los cultivos pueden remover grandes cantidades de materia orgánica y de nutrientes.

Cuando se pierden por percolación profunda,

sustancias solubles en agua (sales) u otras sustancias que se encuentran en estado de dispersión coloidal o suspensión fina, el proceso se llama **lixiviación** o **lavado**. La remoción completa sólo ocurre cuando la precipitación es mayor que la evapotranspiración potencial y cuando la cantidad de agua que penetra en el perfil es mayor que la que se necesita para saturar por completo la porosidad de retención del suelo, es decir cuando el régimen hídrico del suelo es percolativo o endopercolativo.

Las sales solubles que se remueven por lixiviación incluyen carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos y nitritos principalmente de los metales alcalinos y alcalinos térreos. La remoción progresiva de ellos sigue el orden indicado en la **serie de Polinov**, que presenta las siguientes fases:

- **Fase I:** cloruros y sulfatos.
- **Fase II:** elementos básicos: Ca, Na, Mg y K, que son removidos mientras la sílice aún queda.
- **Fase III:** la sílice móvil ( $\text{SiO}_2$ ) es eliminada lentamente.
- **Fase IV:** fase residual, que consiste de materiales inertes, especialmente óxidos y oxihidratos de hierro y aluminio.

La remoción de la sílice marca la fase final de la lixiviación e indica que se ha alcanzado la senectud en la evolución del suelo.

## 2.3. TRANSFERENCIAS O REDISTRIBUCIONES

Involucran el movimiento de materiales orgánicos e inorgánicos lateralmente dentro de un horizonte o verticalmente de un horizonte superior hacia otro más profundo, es decir de un punto hacia otro pero dentro del perfil, por lo que se trataría de una lixiviación restringida. Al igual que en el caso de las remociones, el agua es el agente principal, aunque en este proceso es probable que la precipitación no sea superior a la evapotranspiración (regímenes sub o epipercolativos) o que existan impedimentos para el libre drenaje (regímenes anfi o no percolativos).



Las transferencias dentro del perfil del suelo son la causa principal de su diferenciación en horizontes. Estos procesos involucran a varias sustancias.

A continuación se detallan los materiales susceptibles de ser transportados y los horizontes a los que pueden dar lugar:

- **Sales solubles:** genera procesos de desalinización de un horizonte y de salinización de otro (horizonte Bz o sálico);
- **Carbonatos de Ca y de Mg:** proceso de decalcificación y calcificación (horizontes Bk, cálcico y petrocálcico);
- **Sulfato de Ca:** genera horizontes Bi o gípsico y petrogípsico.
- **Arcilla coloidal:** se transfiere mecánicamente desde un horizonte eluvial hacia otro iluvial mediante un mecanismo que específicamente se denomina *lessivage* (horizonte Bt o argílico; Btn o nátrico); puede generarse un horizonte eluvial E.
- **Hierro, aluminio y humus:** por queluviación (mecanismo de formación y migración de quelatos) de los ácidos orgánicos con cationes metálicos polivalentes (horizonte Bh, Bhs, Bs o espódico), en el proceso de podzolización. Se genera un horizonte eluvial E o álbico.

Igualmente los fenómenos de pedoturbación o haploidización (mezcla de horizontes), ya sean de naturaleza biológica (fauna cavícola, lombrices, termitas, raíces, etc.) como física (crioturbación, expansiones y contracciones por humedecimiento y secado, etc.), pueden considerarse dentro del proceso de transferencia.

El reciclaje de elementos nutritivos por las raíces de las plantas, que los toman en profundidad para luego liberarlos en la superficie cuando son mineralizados sus restos orgánicos, es un proceso de transferencia que se opone a la lixiviación. Las raíces que se profundizan en el suelo absorben sustancias nutritivas solubles y las trasladan hacia la parte superior mediante la corriente de transpiración, en donde son utilizadas por las hojas y puntos de crecimiento de las plantas. Las hojas y los tallos vuelven al suelo en forma de hojarasca y sus nutrientes son liberados por mine-

ralización. Por consiguiente ocurre una acumulación de nutrientes en la capa superficial, acompañada del correspondiente agotamiento de sustancias nutritivas del material madre y de la roca en descomposición. Este proceso compite con la lixiviación vertical. Estos dos procesos con el tiempo resultan en la formación de una capa muerta inerte en la parte media del perfil. Luego, esta capa aumenta su espesor, generándose un perfil que consiste de un horizonte superficial rico en materia orgánica y nutrientes, que descansa sobre una capa de gran espesor, muy ácida y desprovista de bases. Esta capa a su vez, se encuentra sobre material madre parcialmente meteorizado cuyo pH se vuelve más alcalino a medida que se acerca a la roca madre.

### 2.3. TRANSFORMACIONES

Ocurren cuando los constituyentes del suelo son modificados química o físicamente, o son destruidos y otros son sintetizados a partir del material original. Muchas transformaciones involucran la meteorización, desintegración y alteración de algunos minerales primarios para formar varios tipos de **arcillas silicatadas** y **óxidos hidratados de hierro y aluminio**. Las transformaciones son alteraciones físicas, químicas o biológicas que afectan tanto a la fracción mineral como orgánica del suelo y en las que, al igual que en los casos anteriores, el agua es el principal agente.

Las alteraciones físicas pueden consistir en la destrucción de la estructura original de la roca y la posterior generación de una estructura pedológica por procesos alternados de humedecimiento y secado (diferenciación del horizonte **Bw estructura**)

Las transformaciones o alteraciones químicas pueden resultar de la hidrólisis de algunos minerales primarios para formar minerales de arcillas provocando el enriquecimiento *in situ*, no iluvial, de esta fracción, para diferenciar el horizonte **Bw consistencia**. La alteración de los minerales primarios puede también llevar a la liberación *in situ* de sesquióxidos que ya sea que impregnen el material edáfico para diferenciar el horizonte **Bw color**, o que enriquezcan residualmente el horizonte por migración selectiva



de la sílice, para constituir el horizonte **Bo (horizonte óxido)**. Una vez que los minerales secundarios han sido generados vía transformación química, quedan sujetos a otros procesos (transferencias, remociones), para diferenciar otros horizontes.

Las alteraciones resultantes de los procesos de óxido-reducción llevan a la diferenciación de horizontes **gley** y **pseudogley** (horizontes con subíndice **g**).

Entre las transformaciones biológicas se destacan la **humificación** (procesos bioquímicos que llevan a la formación del humus) y la **paludización** (acumulación de masas espesas de materiales orgánicos en sitios pobremente drenados) que lleva a la individualización del epipedon **hístico**.

### 3. ACCIÓN DE LOS PROCESOS DE FORMACIÓN DEL SUELO

Consideremos, a modo de ejemplo, los cambios que podrían producirse a medida que se desarrolla un suelo a partir de una capa de material originario loésico relativamente uniforme en un clima propicio para la vegetación de pastos. A pesar de que algunas meteorizaciones físicas y el lavado de carbonatos y sales pueden ser necesarios para permitir el crecimiento de las plantas en determinados ambientes, la formación del suelo realmente comienza cuando las plantas empiezan a establecerse y hay adición de hojarasca y raíces sobre la superficie y en las primeras capas del material originario. Los residuos de las plantas son transformados por los organismos del suelo en humus y en otras sustancias orgánicas nuevas. La acumulación de humus mejora la capacidad del suelo para contener agua y nutrientes, proporcionando una retroalimentación positiva para el crecimiento acelerado de las plantas y una mayor acumulación de humus. Las lombrices, hormigas, termitas y una gran cantidad de animales más pequeños comienzan a vivir en el suelo y se alimentan de los nuevos residuos orgánicos que se acumulan. Al hacerlo, ellos aceleran las transformaciones orgánicas, y también causan la translocación de los residuos de plantas, liberando el material mineral mientras se introducen en el suelo.

#### 3.1. DESARROLLO DEL HORIZONTE A

La mezcla mineral-orgánica resultante cerca de la superficie del suelo, que se forma con bastante rapidez, es comúnmente el primer horizonte de suelo desarrollado, el horizonte A. Su color está oscurecido y sus propiedades químicas y físicas difieren de las del material original. Las partículas individuales del suelo en este horizonte comúnmente se agrupan bajo la influencia de sustancias orgánicas para formar gránulos, diferenciando esta capa de las capas más profundas y del material original. En las tierras con pendiente, la erosión puede remover algunos materiales desde el horizonte superior recién formado, retardando algo el progreso de desarrollo del horizonte.

#### 3.2. FORMACIÓN DE LOS HORIZONTES B Y C

El ácido carbónico y otros ácidos orgánicos se transportan con el agua de percolación por el interior del suelo, estimulando las reacciones de meteorización. El agua cargada con ácidos disuelve varios minerales (transformación) y lixivia los productos solubles (translocación) desde los horizontes superiores a los inferiores, donde pueden precipitar. Esta combinación de transformación y translocación crea zonas de **eluvación** o pérdida en las capas superiores y zonas de **iluvación** o acumulación en las capas inferiores. Las sustancias disueltas incluyen iones cargados positivamente (cationes como  $\text{Ca}^{2+}$ ) y también iones cargados negativamente (aniones como  $\text{CO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) liberados por meteorización de minerales o mineralización de la materia orgánica. En las regiones áridas y semiáridas, la precipitación de esos iones produce horizontes enriquecidos en calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) o yeso ( $\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Con el tiempo, la capa de superficial lixiviada se hace más espesa y la zona de acumulación de Ca se desplaza hacia abajo hasta la profundidad máxima de penetración del agua. Donde la lluvia es lo suficientemente grande como para causar un drenaje significativo hacia aguas subterráneas, algunos de los

materiales disueltos pueden eliminarse completamente del perfil del suelo en desarrollo (remoción), y la zona de acumulación puede moverse por debajo del alcance de las raíces de las plantas, o disiparse por completo. Por otro lado, las plantas con raíces profundas pueden interceptar algunos de estos productos solubles y devolverlos a la superficie, a través de los residuos (hojarasca, tallos, etc.) retardando de alguna manera los procesos de meteorización ácida y diferenciación del horizonte.

La meteorización de minerales primarios y la formación de minerales de arcilla se hace evidente solo mucho después que la disolución y el movimiento del Ca han ocurrido. Los nuevos minerales de arcilla formados pueden acumularse *in situ*, o pueden moverse hacia abajo y acumularse en la profundidad del perfil. A medida que la arcilla se retira de una capa y se acumula en otra, las capas adyacentes comienzan a distinguirse unas de otras, y se forma un horizonte Bt (enriquecido en arcilla silicatada). Cuando la arcilla acumulada en el horizonte Bt periódicamente se seca y se agrieta, unidades de bloques o prismas de estructura de suelo se comienzan a desarrollar. A medida que el suelo madura, los horizontes dentro del perfil generalmente se vuelven más numerosos y más distintos entre sí.

Los procesos de génesis del suelo operan bajo

la influencia de los factores ambientales discutidos en el capítulo correspondiente, y nos proporcionan un marco lógico para comprender las relaciones entre los suelos y los paisajes y ecosistemas en los que funcionan. Al analizar estas relaciones para un sitio determinado, debiéramos preguntarnos: ¿Qué materiales están siendo adicionados a este suelo?; ¿Qué transformaciones y translocaciones están ocurriendo en este perfil?; ¿Qué materiales están siendo removidos? y ¿Cómo han afectado el clima, los organismos, la topografía y el material originario en este sitio a lo largo del tiempo?

Los cuatro procesos de diferenciación de horizontes en un perfil de suelo se sintetizan en la Figura 3.

#### 4. BIBLIOGRAFÍA

1. BUOL, S. W., F. D. HOLE and R. J. McCRACKEN. 1973. Soil Genesis and classification. The Iowa State University Press. Ames.
2. BRADY, N. and R. WEIL. 2002. The Nature and Properties of Soils. 13th Edition. Prentice Hall, Inc. New Jersey. USA.
3. FADDA, G. S. 1999. El Suelo y el Ambiente. Guía de Estudio. Cátedra de Edafología. FAZ-UNT.
4. HARDY, F. 1970. Suelos Tropicales. Herrero Hnos., Sucesores S. A. México.



**Figura 3:** Modelo hipotético de los procesos de diferenciación del perfil del suelo.