

$$\text{HCO}_3^-: \text{PM} = 61, n = 1, \text{PE} = 61$$

$$\text{H}^+: \text{PM} = 1, n = 1, \text{PE} = 1$$

$$\text{OH}^-: \text{PM} = 17, n = 1, \text{PE} = 17$$

y las concentraciones de H^+ y OH^- se calculan como sigue: $\text{pH} = 10$, y en consecuencia $[\text{H}^+] = 10^{-10}$. De acuerdo con la ecuación 2-71,

$$[\text{H}^+] = (10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})(1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1})(10^3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}) = 10^{-7} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

Al aplicar la ecuación 2-37 se advierte que

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{[\text{H}^+]} = \frac{10^{-14}}{10^{-10}} = 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

y

$$[\text{OH}^-] = (10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})(17 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1})(10^3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}) = 1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

Ahora bien, las concentraciones, en miligramos por litro como CaCO_3 , se calculan con la ecuación 2-87 y suponiendo que el peso equivalente del CaCO_3 es 50.

$$\text{CO}_3^{2-} = 100.0 \times \left(\frac{50}{30}\right) = 167 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ como } \text{CaCO}_3$$

$$\text{HCO}_3^- = 75.0 \times \left(\frac{50}{61}\right) = 61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ como } \text{CaCO}_3$$

$$\text{H}^+ = 10^{-7} \times \left(\frac{50}{1}\right) = 5 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ como } \text{CaCO}_3$$

$$\text{OH}^- = 1.7 \times \left(\frac{50}{17}\right) = 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ como } \text{CaCO}_3$$

La alcalinidad exacta, en miligramos por litro como CaCO_3 , es

$$\text{Alcalinidad} = 61 + 167 + 5.0 - (5 \times 10^{-6}) = 233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ como } \text{CaCO}_3$$

2-5 QUÍMICA DEL SUELO

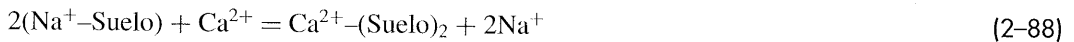
Aunque con frecuencia se toma como cosa segura y, según parece, no se considera tan valioso como el agua y el aire, sin el suelo no existiría la vida en este planeta. El suelo es importante en la producción de alimentos, el mantenimiento de los balances de carbono, nitrógeno y fósforo y en la obtención de materiales para construcción.

Desde el punto de vista químico el suelo es una mezcla de rocas y minerales erosionados, material vegetal y animal desintegrado (humus y detritos) y organismos vivos pequeños, que incluyen plantas, animales y bacterias. También el suelo contiene agua y aire. En forma típica, un suelo contiene un 95% de minerales y 5% de materia orgánica, si bien los límites de composición varían en forma considerable.

Las concentraciones de las sustancias en el suelo se expresan en unidades de masa: partes por millón, miligramos por kilogramo o microgramos por kilogramo. Las unidades varían un poco de acuerdo con la magnitud de la masa de sustancia presente por unidad de masa (normalmen-

te kilogramos) de suelo. Por ejemplo, al referirse al carbono la concentración se suele expresar en porcentaje, ya que muchas veces el carbono forma del 1 al 25% del material del suelo. Al contrario, cuando se trabaja con concentraciones de nutrientes (por ejemplo, nitrógeno, fósforo, etc.) se utilizan miligramos por kilogramo como unidades. Cuando se trabaja con muchos residuos peligrosos, cuyas concentraciones suelen ser muy bajas, se usan las unidades de partes por mil millones o microgramos por kilogramo.

El movimiento de nutrientes iónicos como nitrato, amoníaco y fosfato se rige por reacciones de intercambio iónico. Por ejemplo, los iones de sodio se pueden fijar a la superficie del suelo debido a interacciones electrostáticas. Si por el suelo se hace pasar agua con contenido de calcio, éste se intercambiará en forma preferente con el sodio, de acuerdo con la siguiente reacción:



Con esta reacción se liberan dos iones sodio por cada ion calcio que se intercambia y así se mantiene el balance de carga eléctrica. Por lo anterior, una característica importante de suelo es la de intercambio. La **capacidad de intercambio** es, en esencia, el grado hasta el cual una unidad de masa de suelo puede intercambiar una masa de determinado ion. La capacidad de intercambio, en equivalentes de ion por masa de suelo, es una característica importante del suelo en términos de su capacidad de lixiviar iones como magnesio, calcio, nitrato y fosfato.

Otro proceso importante que se efectúa en los suelos es la **sorción**, que en esencia es la fijación de una sustancia a las partes minerales u orgánicas de las partículas de suelo, y comprende tanto la adsorción como la absorción. Las fuerzas de Van der Waals, los puentes de hidrógeno o las interacciones electrostáticas pueden causar la fijación de las sustancias a la superficie del suelo. En algunos casos se puede producir en realidad un enlazamiento covalente, y la sustancia queda fija al suelo en forma irreversible.

Con bajas concentraciones de contaminantes, la sorción se describe matemáticamente mediante una ecuación lineal.

$$K_d = \frac{C_s \text{ (mol} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}}{C_w \text{ (mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}} \quad (2-89)$$

en la que C_w = la concentración de equilibrio de la sustancia en el agua (masa por volumen de agua)

K_d = un coeficiente de partición que describe el equilibrio de sorción de una tasa de distribución química = (masa por masa de suelo)(masa por volumen de agua)⁻¹.

C_s = concentración de equilibrio de la sustancia en el suelo (masa por masa de suelo).

Los coeficientes de partición de varios contaminantes orgánicos pueden variar entre cuando menos ocho órdenes de magnitud, y dependen principalmente de las características químicas del contaminante, aunque también de la naturaleza misma del suelo.

Con la mayor parte de las sustancias orgánicas neutras la sorción se efectúa principalmente en la fracción orgánica misma del suelo (siempre que la fracción del material orgánico en el suelo sea "apreciable"). En esos casos,

$$C_s \approx C_{mo} f_{mo} \quad (2-90)$$

donde C_{mo} = concentración de la sustancia orgánica en la materia orgánica del suelo
 f_{mo} = fracción de la materia orgánica en el suelo.

Si se combinan las ecuaciones 2-88 y 2-89 se obtiene una ecuación válida para las sustancias químicas orgánicas neutras:

$$K_d = \frac{C_{mo} f_{mo}}{C_w} \quad (2-91)$$

7

Recursos geológicos y del suelo

- 7-1** INTRODUCCIÓN 234
- 7-2** CICLO DE LAS ROCAS 234
- 7-3** CONCENTRACIÓN MINERAL 235
 - Actividad ígnea* 235
 - Erosión* 235
 - Procesos de sedimentación* 235
 - Precipitación* 235
- 7-4** ROCAS Y RECURSOS MINERALES 236
 - Reservas* 236
 - Impactos ambientales* 237
 - Conservación de recursos* 239
- 7-5** RECURSOS ENERGÉTICOS 242
 - Formación del carbón* 242
 - Formación del petróleo* 243
 - Reservas de combustible fósil* 244
 - Energía nuclear* 245
 - Impactos ambientales* 245
 - Efectos sobre el terreno* 249
 - Fuentes alternativas de energía* 249
 - Conservación de la energía* 252
- 7-6** FORMACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO 255
 - Erosión* 255
 - Componentes del suelo* 256
 - Propiedades del suelo* 260
- 7-7** RECURSOS DEL SUELO 265
 - Almacenamiento de energía* 265
 - Producción de plantas* 265
- 7-8** PARÁMETROS DE SUSTENTABILIDAD 266
 - Ciclos de nutrientes* 266
 - Acidez del suelo* 268
 - Salinidad del suelo* 268
 - Textura y estructura* 269
- 7-9** CONSERVACIÓN DEL SUELO 269
 - Administración del suelo* 269
 - Erosión del suelo* 270
- REPASO DEL CAPÍTULO 274
- PROBLEMAS 275

PREGUNTAS PARA DEBATE 278

LECTURAS ADICIONALES 278

REFERENCIAS 278

7-1 INTRODUCCIÓN

Este planeta es la tercera roca más cercana al Sol. Esta roca no sólo proporciona a la humanidad un lugar para habitar, también la provee de recursos minerales y suelos que conforman una parte del ecosistema terrestre, los cuales necesita para sobrevivir. Aunque para el objetivo de este análisis se separan los recursos geológicos de los del suelo, ambos están estrechamente vinculados con otros factores ambientales, como el aire, el agua y la vida. Desde una perspectiva ambiental, es preocupante la disminución de recursos naturales y los efectos sobre ellos de su uso y la eliminación de los desperdicios que generan las actividades humanas.

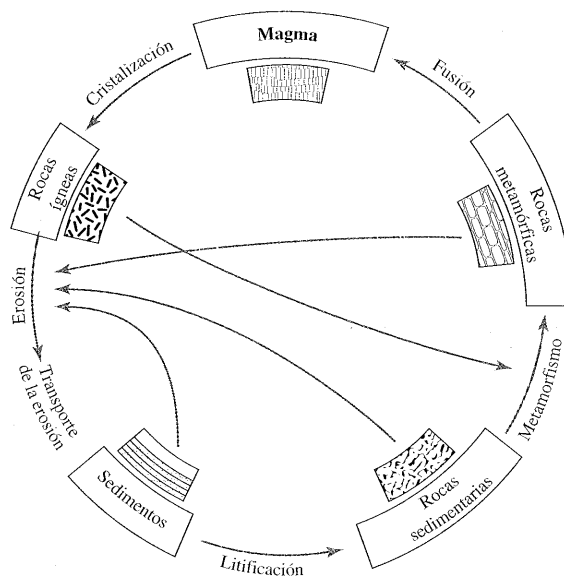
7-2 CICLO DE LAS ROCAS

El ciclo de formación de las rocas (figura 7-1) comienza en el núcleo fundido del planeta: el **magma**. Las **rocas ígneas**, antepasados de todas las demás, están “formadas a fuego”; es decir, alguna vez fueron parte de una hirviente y líquida masa de magma. La lava que fluye desde un volcán forma rocas ígneas **extrusivas**. A su vez, las **intrusivas** se enfrían muchos kilómetros por debajo de la superficie terrestre y quedan expuestas sólo después de una considerable erosión.

Las rocas **sedimentarias** se componen de restos reacumulados de otras rocas. Estos fragmentos pueden agruparse mecánicamente mediante la deposición que inducen el agua, viento o hielo. La pizarra y la arenisca son buenos ejemplos. Por otra parte, las rocas sedimentarias pueden formarse mediante la precipitación química. La piedra caliza y la sal de roca ejemplifican es-

FIGURA 7-1 Esquema del ciclo de las rocas.

Este ciclo continúa de manera permanente alrededor del margen exterior del diagrama, desde el magma, pasando por las rocas ígneas, los sedimentos, las rocas sedimentarias, las rocas metamórficas, y de nuevo otra vez al magma. No obstante, este ciclo puede interrumpirse en varios puntos a lo largo de su curso y seguir la ruta de alguna de las flechas que atraviesan la parte interna del diagrama.



te proceso. El proceso de **litificación** transforma los sedimentos en rocas duras por medio de la compactación y cementación. Las rocas sedimentarias se caracterizan porque se forman mediante capas, es decir, por medio de **estratificación**.

El tercer tipo de roca se denomina **metamórfica** porque ha cambiado de forma. La presión, el calor y los fluidos químicamente activos influyen en su transformación. Si este tipo de roca se ve sometida al calor y la presión suficientes como para perder su unidad y volver a derretirse, el ciclo se completa.

El ciclo de las rocas puede interrumpirse en varios puntos, como lo muestra la figura 7-1.

7-3 CONCENTRACIÓN MINERAL

Los numerosos materiales geológicos utilizados en la actualidad pueden clasificarse en dos grandes categorías: metales (por ejemplo, aluminio, cobre, hierro) y no metales (por ejemplo, diamantes, piedra caliza y roca fosfórica). Aunque algunas cantidades de estos materiales pueden encontrarse casi en cualquier parte, sólo se consideran depósitos minerales cuando su concentración permite aprovecharlos y generar utilidades.

Una manera muy conveniente de analizar los depósitos minerales consiste en clasificarlos con base en los procesos geológicos que los han concentrado. Entre ellos, la actividad ígnea, la erosión, la sedimentación y la precipitación. Por supuesto, muchas rocas son valiosas en sus condiciones originales. La piedra de construcción y la arena se ubican en esta categoría.

Actividad ígnea

Algunos depósitos minerales son resultado del tamaño de sus iones. No se combinan fácilmente con los minerales que suelen conformar las rocas. Estos elementos pueden cristalizarse al comenzar el enfriamiento del magma y sedimentarse o cristalizarse después e introducirse en las rocas circundantes. Por ejemplo, los diamantes se forman cuando el carbono queda atrapado en magma sometido a una presión muy elevada. Al enfriarse el magma se concentran los depósitos de cromo, níquel y platino, y como son más densos que los minerales que conforman las rocas se sedimentan durante la cristalización.

Erosión

Así se denomina la acción del agua, el aire y la materia viva que desgasta las rocas. Una de las acciones de la erosión consiste en alterar químicamente los compuestos geológicos hasta que adquieren una forma que permite extraer los elementos deseados de manera rentable. Por ejemplo, el aluminio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, pero se presenta en una forma (aluminosilicatos) en la que extraerlo no resulta provechoso. La erosión descompone los aluminosilicatos, que a su vez se convierten en hidróxidos de aluminio (bauxita) que pueden extraerse con mayor facilidad.

El hierro se ha concentrado mediante la eliminación de compuestos que no se desean. El percolado del agua subterránea elimina el sílice de la roca precursora y concentra el hierro en forma de Fe_2O_3 .

Una tercera forma de erosión es la solución y deposición de los elementos deseados. En este caso, el agua subterránea disuelve el mineral —cobre, por ejemplo— y lo transporta de un sitio con baja concentración a otro lugar en donde lo deposita.

Procesos de sedimentación

El agua corriente desplaza grandes cantidades de material mineral a lo largo de la corriente y el arroyo, lo que acumula los minerales más pesados al fondo del canal. Así se concentran sobre todo oro, estaño y hierro.

Precipitación

Cuando la concentración de compuestos en una solución rebasa su solubilidad ocurre la precipitación. La piedra caliza —compuesta sobre todo por carbonato de calcio— y la roca fosfórica (fluorofosfato de calcio) se forman inicialmente por medio de la precipitación.

TABLA 7-1 Reservas estadounidenses mundiales

Metal	EUA (Tg ^a)	Mundo (Tg)
Aluminio	38	21 000
Cobre	57	340
Hierro	3360	65 400

^aTg = teragramos = 10¹² g

Fuente: U.S. Bureau of Mines, *Mineral Facts and Problems*, Departamento del Interior de E.U., de 1985.

7-4 ROCAS Y RECURSOS MINERALES

Reservas

Los recursos que pueden sustituirse tras periodos cortos (años, décadas, o siglos cuando mucho) mediante cultivos, bosques y pastizales se denominan **renovables**. Los recursos **no renovables**, como los depósitos de cobre y hierro, se forman durante los periodos geológicos. En función de las necesidades humanas, una vez agotado el yacimiento su desaparición es permanente.

No se trata de preguntarse si el mundo se está quedando sin minerales, sino cuánto se está dispuesto a pagar y cuáles serán los efectos ambientales. Primero se abordará el aspecto del “agotamiento”. La porción de recursos minerales identificados susceptibles de extraerse de manera rentable al realizar el cálculo se denomina **reserva** mineral. Debido a los cambios tecnológicos y modificaciones en la disposición del consumidor para pagar, la reserva puede cambiar aunque no lo haga la masa de minerales. La tabla 7-1 muestra las reservas estadounidense y mundial de tres metales. ¿Cuánto durarán esas reservas? Es factible realizar diversos tipos de estimaciones. Por ejemplo, se puede estimar el tiempo, admitiendo las tasas de consumo (demanda) actuales, sin el descubrimiento de nuevos yacimientos ni cambios en la tecnología de extracción. Por otra parte, es viable considerar cierto crecimiento de la demanda sin el descubrimiento de nuevos yacimientos ni cambios en la tecnología extractiva. El tiempo que perdurarán las reservas actuales considerando una demanda constante se expresa como:

$$T_s = \frac{F}{A} \quad (7-1)$$

donde T_s = tiempo transcurrido hasta el agotamiento (años)

F = masa de reserva mineral (Tg)

A = demanda anual (Tg · año⁻¹)

La duración de las reservas actuales considerando un aumento en la demanda se expresa como:

$$F = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad (7-2)$$

donde i = incremento anual de la demanda como fracción

n = número de años para consumir la reserva

En el ejemplo 7-1 se muestra cómo realizar estos dos tipos de estimaciones.

EJEMPLO 7-1 En el 2001 la producción internacional de hierro fue de 1 060 Tg [1]. Suponiendo que la demanda del 2001 permanece constante, ¿cuánto tiempo durarán las reservas? La producción mundial aumentó 1.2% de 1996 a 1997. Si esa tasa de incremento permanece constante, ¿cuánto durarán las reservas mundiales?

Solución Si la demanda permanece constante (ecuación 7-1), la reserva mundial durará

FIGURA 7-3

Consumo de energía per cápita en Estados Unidos (MJ/cápita = megajoules por persona). (Fuente: U.S. Energy Information Administration.)

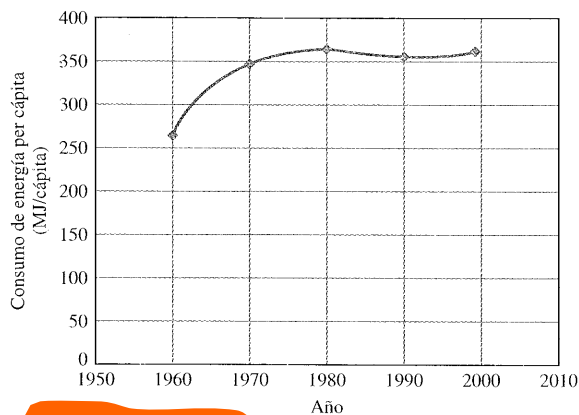
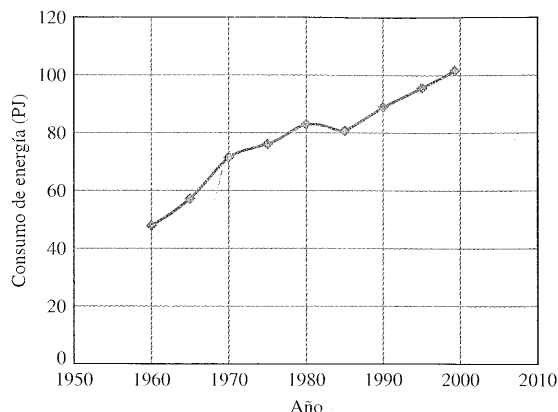


FIGURA 7-4

Consumo de energía en Estados Unidos (PJ = petajoules). (Fuente: U.S. Energy Information Administration.)



7-5 RECURSOS ENERGÉTICOS

La mayoría de las necesidades humanas de energía se resolvía, hasta hace cerca de 300 años, mediante el trabajo humano y animal, la fuerza del agua, el viento, la madera y otros materiales orgánicos combustibles como los desperdicios agrícolas y el estiércol (ahora englobados como **biomasa**). Con la advenimiento de la Revolución Industrial, a finales del siglo XVIII y principios del XIX, la fuerza del agua continuó siendo importante, pero comenzaron a emplearse a gran escala los combustibles sólidos (principalmente el carbón). En el transcurso del siglo XX los derivados del petróleo asumieron un papel preponderante en la satisfacción de las necesidades de energía.

Estados Unidos es el mayor productor y principal consumidor de energía primaria del mundo. Durante 1999 dicho país produjo 19% de la energía primaria mundial y consumió 25% de ella [5]. Cerca de 85% de su consumo de energía procede de combustibles fósiles; 37% de esa energía se destina al transporte. Aunque su consumo de energía per cápita se ha estabilizado durante los tres últimos decenios, su consumo total de energía ha crecido desmesuradamente en los últimos 40 años (figuras 7-3 y 7-4).

Formación del carbón

Las plantas absorben cerca de 2% de la energía que irradia el Sol y llega a la Tierra; mediante el proceso de fotosíntesis la utilizan para sintetizar biomasa. Por lo general, la energía solar almacenada en esta materia orgánica se disipa por medio de la oxidación y disminuye poco después de que la planta muere; sin embargo, si el material de ésta cae en un entorno como el de un pantano y queda enterrado bajo sedimentos, se inhibe el proceso de oxidación. A una gruesa capa de materia vegetal en putrefacción sepultada bajo otra capa del mismo material o sedimento se le conoce como **turba**. Ésta se utiliza como combustible, pero no es carbón.

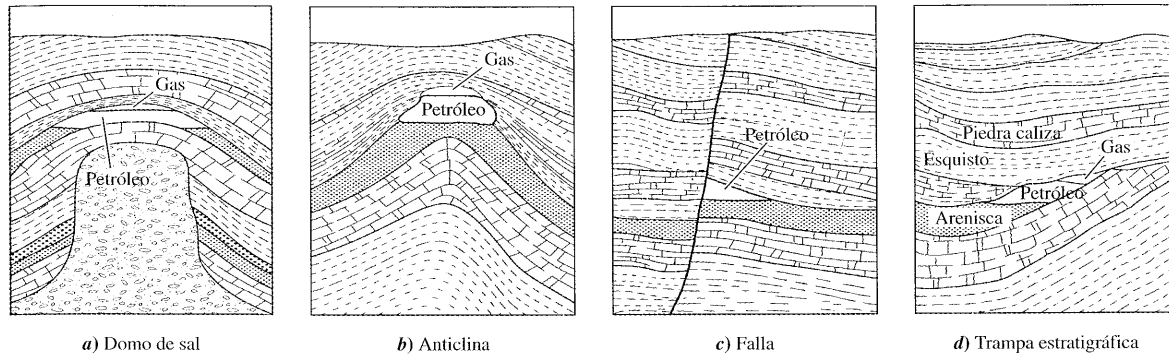
A medida que la turba va quedando sepultada bajo una capa cada vez más gruesa de materia vegetal en descomposición y sedimentos, se comprime y su temperatura aumenta. Además, se separan agua y algo de hidrógeno y oxígeno, por lo que la turba se vuelve más seca y rica en carbono. Con el tiempo se convierte en **lignito**, primer carbón, de baja calidad, que se forma.

El aumento en la presión y el calor ejercido durante un largo tiempo transforman el lignito en **bituminoso** (carbón suave) y luego en **antracita** (carbón fuerte). El carbón de antracita común lo forma 95% de carbono; por tanto, es el de mayor calidad.

Se estima que son necesarios cerca de 30 000 años de crecimiento vegetal continuo para formar una capa de carbón con 1 m de espesor. Aunque se ha formado carbón durante largos lapsos,

FIGURA 7-5

Trampas geológicas y estructurales para petróleo y gas. Las rocas porosas como la arenisca pueden funcionar como embalses si las piedras adyacentes actúan como sellos impermeables. **a)** Domo de sal. **b)** Anticlina. **c)** Falla. **d)** Trampa estratigráfica. (Fuente: Reimpreso con autorización de: Coates, D. R., *Environmental Geology*, John Wiley & Sons, Nueva York, pp. 152, 156, 215, 1981.)



las cantidades más importantes se formaron durante el periodo Carbonífero, hace cerca de 360 a 285 millones de años.

Formación del petróleo

Petróleo¹ es un término con el que se describe una amplia gama de hidrocarburos gaseosos, líquidos y sólidos que aparecen en la tierra de manera natural. La formación del petróleo sigue un proceso natural semejante al del carbón, excepto que las fuentes son, en su mayoría, organismos acuáticos que se sedimentaron en el fondo de los mares poco profundos y ricos en nutrientes de las plataformas continentales. Un depósito de petróleo es significativo en términos económicos si satisface cinco requisitos [4].

- Un ambiente original que favorezca la acumulación rápida de depósitos ricos en materia orgánica, por lo general una laguna marina que se hunda de manera gradual.
- Un lecho apropiado que retenga el aceite durante el proceso de sedimentación. Por lo general, son sedimentos finos que evitan la disipación o el desplazamiento del aceite.
- Un embalse de roca apropiado. Estos estratos están junto a la roca precursora y son lo suficientemente permeables como para liberar el petróleo cuando se le bombea. La mayor parte de las veces la roca del embalse es arenisca o caliza.
- Una estructura geológica que sirva como trampa y evite que el petróleo desaparezca de la roca de embalse. La figura 7-5 muestra algunas trampas comunes. Entre ellas se incluyen los domos de sal (costa del golfo en Estados Unidos), las anticlinas (Medio Oriente), las fallas (California) y las trampas estratigráficas (Pennsylvania y Nueva York).
- Estabilidad de corteza tras la formación del petróleo y su acumulación en la trampa. Mayor deformación de la tierra después de la formación del petróleo; los pliegues y rupturas pueden liberarlo hacia formaciones en las que está demasiado disperso para resultar rentable.

El petróleo puede existir en formas que no son fluidas. Las **arenas bituminosas** están cargadas de petróleo y son demasiado viscosas para fluir. Contienen una cantidad de petróleo tal que, si se encuentran en yacimientos superficiales pueden extraerse utilizando técnicas mineras. El Campo Athabasca, en Alberta, Canadá, tiene un depósito de arenas bituminosas con 60 metros de espesor que abarca un área superior a 77 000 km² [4]. Los **esquistos bituminosos** pueden contener hidrocarburos suficientes como para producir petróleo líquido al calentarlos. Desde mediados del siglo XIX se ha producido petróleo a partir de ellos en Escocia y Estonia.

¹Del latín *petra*, "piedra," y *oleum*, "aceite"; por lo tanto "aceite de piedra".

TABLA 7-3 Valores comunes del poder calorífico neto

Material	Poder calorífico neto (MJ · kg⁻¹)
Carbón	26.3
Antracita	25.8
Carbón bituminoso	28.5
Aceite combustible, núm. 2 (calefacción)	45.5
Aceite combustible, núm. 6 (carbonera C)	42.5
Gasolina (regular, 84 octanos)	48.1
Gas natural ^a	53.0
Turba	10.4
Madera de roble	13.3–19.3
Madera de pino	14.9–22.3

^aSe considera una densidad de 0.756 kg · m⁻³

Reservas de combustible fósil

¿Cómo se compara un kilogramo de carbón con un litro de petróleo? O, dado el caso, ¿un litro de petróleo con un litro de gas natural? La realización de cualquier comparación de utilidad de las reservas de combustibles fósiles requiere emplear como base la energía. Respecto a los combustibles fósiles, el **poder calorífico neto** (NHV, por sus siglas en inglés) se utiliza como denominador para tal comparación. La tabla 7-3 muestra los valores típicos de NHV de algunos combustibles comunes.

La porción de combustibles fósiles identificados susceptibles de extraerse de manera rentable al momento de realizar el cálculo se denomina **reserva de energía comercial probada**. Debido a los cambios tecnológicos y a las modificaciones en cuanto a la disposición del consumidor para pagar, la reserva puede cambiar aunque no lo haga la masa de combustible. La tabla 7-4 muestra las reservas estadounidense y mundial estimadas.

Es posible realizar los mismos cálculos que se hicieron con respecto a las reservas minerales con el fin de estimar cuánto tiempo durarán estos recursos. Considerando las tasas de consumo de 1991, las reservas mundiales de carbón durarán más de 200 años, mientras que las de petróleo y gas durarán entre 45 y 50 años [3].

TABLA 7-4 Reservas de energía comercial probadas de combustibles fósiles en Estados Unidos y el mundo^a

Combustible	Estado Unidos (EJ^b)	Mundial (EJ)
Carbón	6 500	25 700
Petróleo	137	6 100
Gas natural	199	6 100
Reservas totales	6 836	37 900

^aLos datos correspondientes a carbón son de 1998, los de petróleo y gas son de 1997. (Fuente: Datos de: Agencia de Información de Energía de E. U. 1999)

www.era.doe.gov

^bExajoules = 10¹⁸ J = 10¹² MJ

Energía nuclear

La fisión y la fusión son reacciones potenciales que pueden utilizarse para generar energía nuclear. Durante la fisión nuclear un neutrón penetra en el núcleo de un átomo fisionable (un isótopo radiactivo de uranio o plutonio) y lo divide en productos de la desintegración mientras libera energía. En la generación de energía por medio de la fusión se unen entre sí los átomos de un elemento ligero, como el hidrógeno, para conformar un elemento más pesado, como el helio. En este proceso se libera energía. Todos los reactores nucleares destinados a la operación comercial se basan en reacciones de fisión.

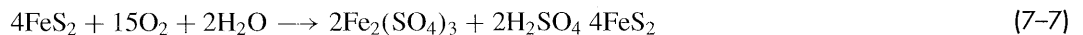
Los dos principales isótopos del uranio son ^{235}U y ^{238}U . De ellos, cerca de 99.3% del uranio natural es ^{238}U no fisionable. Para inducir una reacción de fisión sostenida, la probabilidad de que los neutrones sobrantes de una reacción de fisión provoquen que otros átomos fisionables se dividan se incrementa mediante el aumento de la concentración de material fisionable o desacelerando los neutrones, de manera que sea más probable que sean capturados por ^{235}U que por ^{238}U .

Aunque el ^{238}U no es fisionable, si uno de sus átomos captura un neutrón se transformará en plutonio fisionable (^{239}Pu). Ésta es la base de los "reactores de cría". La Academia Nacional de Ciencia estadounidense estima que la transformación de una gran cantidad de ^{238}U en ^{239}Pu puede satisfacer las necesidades de electricidad en Estados Unidos por más de 100 mil años [3]. Sin embargo, todavía no hay reactores de cría en funcionamiento en Estados Unidos. Tanto los aspectos ambientales como el potencial para la proliferación de armas nucleares han restringido el desarrollo de esta fuente de energía en dicho país.

Impactos ambientales

Desperdicios de la explotación de recursos. Casi 52% del carbón extraído en Estados Unidos procede de la minería superficial. El resto proviene de minas subterráneas. La extracción de carbón subterráneo genera cantidades relativamente pequeñas de roca de desperdicio. Por el contrario, la **minería a cielo abierto** genera grandes cantidades de desperdicio en forma de montera. Llegan a removerse hasta 30 metros de montera para tener acceso al carbón.

Las **escombreras** de montera removida o las **colas** de las minas subterráneas originan polvo, erosión excesiva, contaminación del aire por incendios y contaminación del agua por el drenaje ácido de las minas. La erosión excesiva de terrenos de alto relieve puede cambiar la baja sedimentación de $10 \text{ Mg} \cdot \text{km}^{-2}$ en sitios boscosos a una superior a $11\,000 \text{ Mg} \cdot \text{km}^{-2}$ en las zonas excavadas. El carbón residual de baja calidad que se encuentra en las minas profundas abandonadas y los montones de escombros se queman por combustión espontánea, incendio o actividades humanas. Estos fuegos son muy difíciles, si no es que imposibles, de controlar. Las malas condiciones de esa combustión producen grandes cantidades de partículas y óxidos de azufre. La contaminación del agua subterránea y superficial, denominada **drenaje ácido de minas** (AMD, por sus siglas en inglés), la genera el escurrimiento del agua de lluvia a través de las minas, escombros y colas. Aunque no se asocian exclusivamente con el carbón, en los yacimientos de éste con frecuencia aparecen minerales sulfurosos como la pirita férrica (FeS_2). Una vez expuesta a la atmósfera y a la acción de las bacterias, la pirita se oxida y forma ácido sulfúrico.



Esta solución se filtra en las corrientes y les confiere una coloración rojiza o amarillenta debido a las precipitaciones de hierro. El agua ácida es sumamente letal para la vida acuática.

La extracción de carbón, sobre todo en las áreas con poca agua como la zona oeste de Estados Unidos, puede tener efectos adversos sobre el suministro de agua subterránea. El agua de este tipo alrededor de Decker, Montana, Estados Unidos, se redujo 15 m debido a las operaciones de minería a cielo abierto [4]. Las operaciones de extracción también pueden "cercenar" la recarga de los mantos acuíferos.

En comparación con otras formas de extracción de recursos, las perforaciones para petróleo y gas natural han generado deterioros ambientales ínfimos. Por desgracia, a medida que se intensifica la búsqueda de petróleo y gas natural, para reemplazar las disminuidas provisiones, se es-

tán explorando áreas más sensibles desde el punto de vista ambiental. El daño causado por la construcción de caminos y otras actividades propias de la exploración suele superar al de la perforación.

Los derrames de petróleo y las fugas en los ductos son fuentes destacadas de la contaminación del agua. La evaporación hacia la atmósfera de grandes cantidades de gasolina y otros derivados del petróleo contribuye a la formación de ozono.

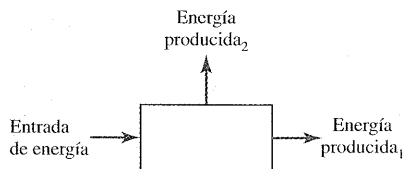
Como ocurre con la extracción de minerales, la extracción de uranio produce roca de desperdicio. Sin embargo, una diferencia importante radica en que las colas del uranio a menudo son radiactivas.

Desperdicio en la producción de energía. Quizá la generación de desperdicios en la producción de energía es aún más engañosa que la recuperación de combustibles fósiles y nucleares. La quema de combustibles fósiles produce contaminantes del aire, por ejemplo: óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas. La cantidad de azufre en el combustible influye directamente en la cantidad de dióxido de azufre que produce su combustión. El carbón, con la mayor concentración de azufre es el que más contribuye a la expulsión de SO_2 . El petróleo contiene menos azufre y con frecuencia se elige como sustituto del carbón, con el fin de reducir las emisiones de SO_2 . El gas natural ya no tiene azufre y, por tanto, no lo emite. Como el volumen de **ceniza** (la parte de la materia mineral que no se quema) del carbón es alto, también es una fuente importante de partículas suspendidas. El petróleo produce menos ceniza y emisiones. El gas natural no genera cenizas ni emisiones. Los tres elementos combustibles emiten óxidos de nitrógeno debido a que la reacción química no depende del contenido de nitrógeno en el combustible. Entre otros contaminantes procedentes de los combustibles fósiles destacan los metales tóxicos, como el mercurio, el cual aparece en pequeñas cantidades en el carbón.

Si bien la producción de energía nuclear no emite contaminantes del aire, el combustible utilizado es extremadamente radiactivo y representa un problema de eliminación de desperdicios sólidos todavía sin resolver. El volumen total de ceniza de carbón es otro importante problema de eliminación de desperdicios sólidos. Cerca de 30% de la ceniza se asienta como **ceniza de fondo** en la cámara de combustión de la planta de energía. El resto, la **ceniza volátil**, debe retenerla el equipo para controlar la contaminación del aire. El siguiente ejemplo ilustra el gran volumen que esta ceniza puede ocupar en una planta de energía que utiliza carbón como combustible.

EJEMPLO 7-5 Una planta que utiliza carbón como combustible convierte alrededor de 33% de la energía del carbón en energía eléctrica. Calcúlese el volumen de ceniza que genera en un año la producción eléctrica de 800 MW si la antracita tiene un NHV de $31.5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, un contenido de cenizas de 6.9%, y la densidad a granel de la ceniza es de aproximadamente $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Supóngase que 99.5% de la ceniza se retiene mediante una combinación de equipo para control de la contaminación del aire y precipitaciones en la cámara de combustión.

Solución La solución de este problema comienza con un balance de energía. Aquí se muestra el diagrama correspondiente. Puesto que la producción está en términos de la energía (trabajo por unidad de tiempo), la ecuación del balance de energía se escribe en forma de energía. En estado estacionario la ecuación del balance de energía es



$$\text{Entrada de energía} = \text{energía producida}_1 + \text{energía producida}_2$$

y la pérdida de calor es

$$\begin{aligned}\frac{dH}{dt} &= \frac{1}{12.72 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}} (1 \text{ m}^2)(20 - 0) \\ &= 1.57 \text{ W}\end{aligned}$$

Esto es, cerca de 56% de la pérdida de calor original.

Los motores eléctricos consumen casi la mitad de la electricidad utilizada en Estados Unidos [6]. Los motores sobredimensionados y los de velocidad constante contribuyen al uso ineficaz de la electricidad. Las bombas accionadas por motores eléctricos con frecuencia se regulan mediante válvulas de ajuste en vez de por la velocidad del motor. El exceso de energía eléctrica se desperdicia en forma de calor.

Las plantas de energía antiguas difícilmente alcanzan eficiencias superiores a 35%. Esto se debe, en parte, a que el calor de desperdicio se transfiere a un río o cuerpo de agua cercano en vez de utilizarse ahí mismo. Las plantas de energía de **cogeneración** utilizan el calor de desperdicio en la calefacción de edificios, lo que hace mucho más eficaz el uso del combustible.

El transporte consume 42% de la energía primaria utilizada en Estados Unidos [5]. Los automóviles y otros vehículos ligeros utilizan cerca de 80% de la energía consumida en el transporte. El aumento de la eficiencia ha elevado el rendimiento de los automóviles de 7.7 kilómetros por litro a mediados del decenio de 1970 hasta 11.8 kilómetros por litro en 1992. Sin embargo, este aumento de eficiencia lo superó ampliamente el crecimiento del número de kilómetros recorridos por vehículo. En el mundo existen más de 700 millones de vehículos en funcionamiento, y la tasa de crecimiento es de alrededor de 35 millones por año.

Algunas técnicas de conservación de energía pretenden aumentar el número de pasajeros ofreciendo carriles especiales para vehículos con compañeros de trabajo e incentivos de estacionamiento. Se estima que si cada automóvil de este tipo transportara en promedio una persona más, se ahorrarían diariamente 700 000 barriles de petróleo (casi 4.3 PJ de energía). La aplicación de esta medida a todo el tránsito brindaría mejores frutos. A escala global, estas técnicas sólo reducirían en forma marginal el agotamiento del petróleo. Sólo un cambio drástico en los métodos de transporte, por ejemplo el uso de bicicletas, representaría cierto beneficio, y podría llegar demasiado tarde.

La tragedia del agotamiento final de los recursos petroleros no radica en que se deberán encontrar otros modos de transporte ni en que no se tendrá energía suficiente, sino en que se habrá desperdiciado un recurso muy valioso que pudo ser mejor empleado en la elaboración de bienes durables que sólo pueden fabricarse a partir del petróleo.

7-6 FORMACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO

Erosión

La **erosión** es el proceso mediante el cual una roca se divide en fragmentos debido a la acción combinada de agua, gases y materia orgánica. En una clásica exhibición de la segunda ley de la termodinámica, la descomposición avanza de manera inexorable hacia una disminución de la energía libre y un aumento de la entropía. La descomposición del **material precursor**, ya sea ígneo, sedimentario o de roca metamórfica, no es suficiente para formar el suelo. El **suelo** se distingue del material desmenuzado, producto de la erosión, o **regolito**, por la presencia de vida vegetal o animal. La presencia de vida es crítica para la formación del suelo. Mediante la muerte y la descomposición las plantas y los animales aportan la materia orgánica que forma el **humus**. Los animales que viven en el suelo también desempeñan una importante función al mezclar las

partículas que lo componen y ventilándolo. Los microorganismos del suelo también descomponen la materia orgánica y liberan los nutrientes necesarios para la vida vegetal.

Componentes del suelo

La figura 7-6 muestra las proporciones relativas de un suelo de cultivo. La materia mineral proveniente de las rocas erosionadas y la materia orgánica de plantas y animales constituyen alrededor de 50% del volumen. El aire y el agua ocupan los poros (aberturas o cavidades entre las partículas del suelo) y forman la otra mitad del volumen del suelo. Las proporciones de aire y agua varían de acuerdo con las condiciones climáticas. A medida que la precipitación se infiltra por los poros disminuye el volumen del aire. Cuando el suelo se seca debido a la evaporación o al drenaje, la cantidad de aire en los poros aumenta.

Material mineral del suelo. Los minerales proceden del material precursor y llegan al suelo gracias a la erosión. Los **minerales primarios** son aquellos que permanecen sin que se altere el material original. Entre éstos se encuentran minerales como el cuarzo, muy resistente a la erosión. Los **minerales secundarios** son aquellos que se producen mediante reacciones erosivas con el aire y el agua y forman óxidos e hidróxidos de los minerales primarios. Una de las reacciones de hidrólisis importante es la de los minerales de silicato para formar arcillas. Las **arcillas**, partículas diminutas compuestas de silicio, aluminio, oxígeno e hidrógeno, tienen cuatro clasificaciones: **caolinitas**, **montmorilonitas**, **ilitas** y **arcillas amorfas**. Las primeras tres tienen estructuras cristalinas reconocibles. La estructura básica de una arcilla es una **micela** compuesta por capas de silicio y aluminio ordenadas alternadamente con átomos de oxígeno en una estructura similar a la de un sándwich.

FIGURA 7-6

Composición del volumen de una superficie de suelo cenagoso en buenas condiciones para el crecimiento de una planta. La cantidad de aire y agua en un suelo son extremadamente variables, y sus proporciones determinan en gran medida si es apropiado para el crecimiento de una planta.

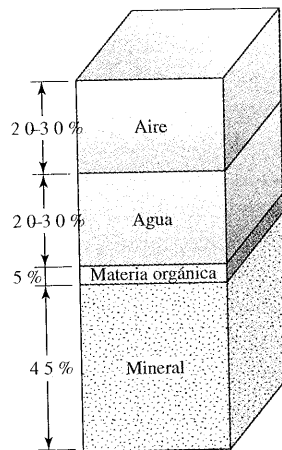


TABLA 7-6

Tasa anual de carbono orgánico recuperado por medio del humus

Uso de la tierra o tipo de vegetación	Carbono orgánico (Mg · ha ⁻¹)
Bosque alpino y ártico	0.1
Cultivo arable (cereales)	1-2
Tierra de pastoreo templada	2-4
Bosque de coníferas	1.5-3
Bosque decíduo	1.5-4
Bosque lluvioso tropical (Columbia)	4-5
Bosque lluvioso tropical (este de África)	10

Fuente: Datos utilizados de: White, R. E., *Introduction to the Principles and Practice of Soil Science*, John Wiley & Sons, Nueva York, pp. 24, 34, 152, 156 (1979).

FIGURA 7-7

Balance de masa del carbono en el suelo.

Entrada de carbono de humus



Acumulación -
(transformación del carbono)

Materia orgánica del suelo. El desecho de plantas, los residuos animales y el excremento contribuyen a la fracción orgánica del suelo. La tabla 7-6 muestra algunos de los valores promedio de la producción anual de humus en términos de carbono orgánico. Estos valores no incluyen las contribuciones por la muerte y descomposición de raíces, lo que puede aumentar la producción de humus entre un 33 y un 50%. La caída de maderaje puede igualar a la generación de humus en lo que respecta al carbono, pero no se descompone con la misma facilidad. Estos valores pueden compararse con la contribución de carbono del excremento diario, que contribuye con entre 3.5 y 4.5 $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ en los pastizales altamente productivos [7].

En la materia orgánica muerta se establece una variedad de microorganismos, los cuales extraen energía a partir de la oxidación de las moléculas complejas de las plantas y la materia animal. En este proceso **mineralizan** los elementos esenciales transformándolos de su forma orgánica en inorgánica, como es el caso de amonio, fosfato y sulfato. Gracias a este proceso las siguientes generaciones de plantas los aprovechan. Parte del carbono orgánico se libera como dióxido de carbono.

Las ganancias procedentes de la materia orgánica por medio de la descomposición del humus se compensan con las pérdidas que se presentan mediante la lixiviación y descomposición, proceso denominado **renovación**. Como lo muestra la figura 7-7, la medida de conversión a materia orgánica se puede expresar como un problema de balance de masa. La entrada de carbono es igual al carbono añadido por medio del humus menos la transformación de carbono en CO_2 , biomasa y grupos de materia orgánica estable química y físicamente. Obsérvese que no hay "salida" de carbono. Si se supone que la adición de humus es constante y que la transformación se puede expresar como una reacción de primer orden, entonces la expresión del balance de masa es:

$$\frac{dC}{dt} = L - kC \quad (7-16)$$

donde dC/dt = tasa de cambio del carbono orgánico contenido en el suelo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

L = la adición anual de humus ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$)

k = constante de velocidad, suponiendo que la descomposición es una reacción simple de primer orden (años^{-1})

C = contenido de carbono del suelo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Si se suponen condiciones de estado estacionario, entonces $dC/dt = 0$, y la ecuación 7-16 puede escribirse como

$$L = kC \quad (7-17)$$

y el tiempo de renovación se define como

$$\frac{C}{L} = \frac{1}{k}$$

Teóricamente, éste es el tiempo necesario para que todo el carbono orgánico del suelo sea reemplazado. En el ejemplo 7-9 se presenta la estimación de una renovación.

EJEMPLO 7-9 Se estima que la contribución anual de carbono al suelo (L) en Rothamsted, Inglaterra, es 5-6% de suelo orgánico (C). Calcúlese el tiempo de renovación para este suelo.

Solución Usando el valor de 5%, entonces

$$\frac{L}{C} = 0.05 \text{ año}^{-1}$$

y el tiempo de renovación es

$$\frac{1}{0.05 \text{ años}^{-1}} \approx 20 \text{ años}$$

Utilizando la estimación de fechas del carbono radiactivo, se estima que la vida media del carbono en el suelo oscila entre 1450 y 3700 años, lo que determina la profundidad del suelo [7]. Obviamente, los compuestos de carbono en el suelo tienen distintos periodos de descomposición, y no se toma en cuenta una sola constante para la transformación.

La descomposición del material de las plantas desemboca en la liberación de complejas moléculas orgánicas de alto peso molecular y carácter fenólico. Debido a su similitud con el humus del suelo, se les denomina sustancias húmicas o ácido húmico; son importantes para el tratamiento de agua potable, pues su presencia en la superficie de ésta da lugar a la formación de subproductos carcinogénicos (véase el capítulo 9). También son importantes en los suelos porque se combinan con los metales y, por lo tanto, reducen su tránsito. Éste es un importante mecanismo para contener el movimiento de metales en los acuíferos contaminados (véase el capítulo 13).

Agua en el suelo. La cantidad de agua en el suelo no es constante. La retención y el movimiento de agua en el suelo, su captación y traslación en las plantas, y su pérdida hacia la atmósfera, son fenómenos relacionados con la energía. La **energía libre** se emplea para caracterizar el estado energético del agua. Según la segunda ley de la termodinámica, el agua se moverá de las zonas con más energía libre hacia las que tienen menos. Un suelo saturado con agua tiene una energía libre elevada. El agua se desplazará desde un suelo saturado hacia un suelo seco que tiene poca energía libre. La diferencia de energía libre desde un sitio colindante a otro se denomina **potencial total de agua del suelo**, el cual se ilustra en la figura 7-8. El suelo reduce la energía libre del agua del suelo mediante una energía negativa que a menudo se conoce como succión o **tensión**. La tensión del agua del suelo se expresa en términos de la altura de una columna de agua, cuya masa iguala la tensión que se está considerando. A pesar de que se puede medir directamente, por ejemplo en centímetros de agua, es conveniente usar kilopascales (kPa) como unidad de medida.

La figura 7-9 ilustra las curvas de humedad-energía del suelo correspondientes a tres suelos típicos. La curva de humedad-energía del suelo tiene un significado práctico pues describe el movimiento del agua y cómo la captan las plantas.

FIGURA 7-8 Potencial de agua del suelo

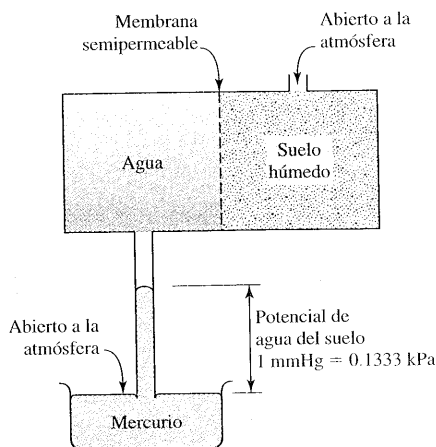


FIGURA 7-9

Curvas de tensión de la humedad del suelo para tres suelos minerales representativos. Las curvas muestran la relación que se obtiene del secado lento de suelos totalmente saturados.

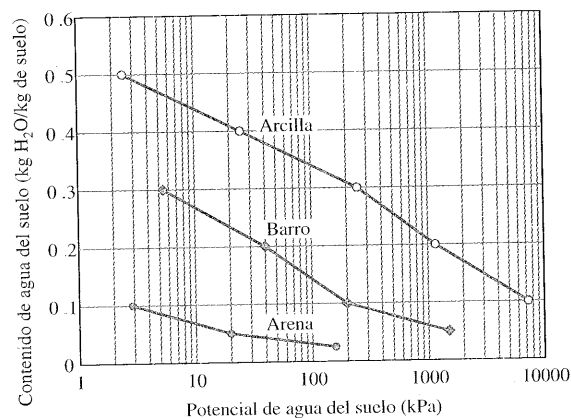
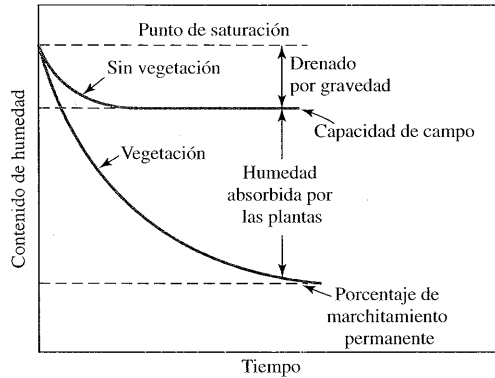


FIGURA 7-10

Relaciones de humedad en el suelo. (Fuente: Pfeffer, J. T., *Solid Waste Management Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1992. Reimpreso con autorización.)



El comportamiento dinámico de la humedad del suelo se ilustra describiendo los procesos que siguen a una fuerte lluvia o irrigación que eleva la humedad del suelo hasta la saturación. En este punto, la tensión es básicamente cero y el agua desciende gracias a la fuerza de gravedad (**drenaje**).

Después de la lluvia o irrigación, el agua tendrá un movimiento descendente continuo en respuesta al gradiente hidráulico. Unos cuantos días después, este rápido movimiento descendente será insignificante. Entonces se dice que el suelo ha alcanzado la **capacidad de campo**. En ese momento el agua se ha retirado de los poros más grandes y el aire ha tomado su lugar. Los capilares todavía están llenos de agua y proveerán de humedad a las plantas. La tensión del suelo será aproximadamente de 0.1 a 0.3 kPa.

Las plantas toman el agua y la pierden por medio de la evapotranspiración y evaporación desde el suelo. A medida que el suelo se seca, las plantas se marchitan durante el día. Al principio las plantas recuperan su vigor durante la noche, a medida que disminuye su tasa de demanda y se iguala la velocidad de suministro. Si no se repone el agua, la velocidad de suministro disminuirá hasta el punto en el que la planta se marchite de manera permanente. Las plantas no están muertas, pero morirán si no se les agrega agua. El contenido de humedad en el suelo durante esta etapa se denomina **porcentaje de marchitamiento permanente**. La tensión del suelo será de aproximadamente 15 kPa para la mayoría de los cultivos. La figura 7-10 ilustra estas relaciones.

Aire del suelo. Cuando los poros del suelo no los ocupa el agua lo hace el aire. El aire del suelo tiene una composición distinta al atmosférico.

La biota del suelo produce CO_2 mediante su respiración. De esta manera, en el aire del suelo se desarrolla CO_2 , el cual presenta concentraciones que pueden ser 300 veces superiores al que se encuentra en la atmósfera. La sustitución de oxígeno por dióxido de carbono en los poros del suelo se realiza mediante la difusión gaseosa, un movimiento aleatorio de moléculas desde zonas con mayor concentración hacia zonas con menor concentración. La transferencia a los poros del suelo ocurre con rapidez a la intemperie. Las zonas con estas características se conocen como suelos bien aireados. Por el contrario, los suelos con estructuras densas y poros pequeños serán escasamente aireados.

Debido a la actividad microbiana, los suelos con exceso de humedad, como un suelo saturado, pueden sufrir una total deficiencia de oxígeno. Esto sería desastroso para las plantas habituada a una buena ventilación.

Organismos del suelo. Las plantas superiores transforman la energía solar y la convierten en energía almacenada en forma de biomasa vegetal. Las plantas son las principales productoras de materia orgánica en el suelo; sus raíces crecen y mueren, y al hacerlo proveen de alimento y energía a otros organismos del suelo. Al mismo tiempo, las raíces modifican los aspectos físicos del suelo generando presión por medio de las grietas y creando nuevas aberturas para sí mismas. La cantidad de raíces residuales de un cultivo que quedan en la tierra después de la cosecha puede alcanzar entre 15 y 40% de la masa de las plantas por encima del suelo [8]. Los buenos

cultivos de avena, maíz y caña de azúcar dejarán, respectivamente, alrededor de 2 500, 4 500, y 8 500 kg · ha⁻¹ de raíces residuales.

Por lo general, las lombrices son más importantes para el consumo del humus de hojas que todos los demás invertebrados juntos. Se alimentan exclusivamente de materia orgánica muerta. Se mueven entre la capa de humus y el suelo mineral, y durante su alimentación ingieren cantidades inverosímiles de suelo. A través de su cuerpo pasa una masa de suelo que alcanza hasta 34 Mg · ha⁻¹ [8]. Los suelos mineral y orgánico que pasan a través de estos animales se someten a las enzimas digestivas y a un proceso de tamizado. Gracias a sus madrigueras, las lombrices también ayudan a aumentar la aireación y el drenaje. Además, mezclan y granulan el suelo arrastrando materia no descompuesta al interior de sus madrigueras.

Los microorganismos del suelo se componen principalmente de bacterias, hongos, actinomicetos, algas y protozoarios. A pesar de que las lombrices son muy importantes en la transformación del desperdicio en humus, estos organismos son los principales encargados de la descomposición. La mayor parte de las bacterias presentes en el suelo son **heterótrofas**, que requieren de moléculas orgánicas complejas para su crecimiento. Además, secretan enzimas que descomponen las macromoléculas en sustancias relativamente simples, como glucosa y aminoácidos, cuyos organismos pueden absorber. Los hongos son la causa primordial de la descomposición del duro tejido leñoso. Los actinomicetos, aunque menos tolerantes al suelo ácido, pueden descomponer la lignina y los compuestos orgánicos complejos de suelo mejor que los hongos o las bacterias. Las algas son fotosintéticas y por tanto se ven restringidas a la superficie del suelo mejor que los hongos o las bacterias. Las algas azulverdosas son importantes debido a que reducirán el nitrógeno atmosférico y lo incorporarán a los aminoácidos, lo que significa una importante contribución al estado de nitrógeno del suelo. Casi todos los protozoarios cazan a otros organismos más pequeños, como las bacterias y algas. Pueden resultar importantes para regular el número de bacterias, pero no son lo bastante abundantes como para resultar un factor determinante en la descomposición de la materia orgánica y la liberación de nutrientes.

Propiedades del suelo

Distribución del tamaño de las partículas. El suelo tiene un espectro continuo de tamaño de partículas que se demuestra por medio de la distribución de frecuencia que se observa en la figura 7-11. Se utilizan dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas. Si las partículas tienen más de 0.075 mm de diámetro, se coloca el suelo sobre una serie de

FIGURA 7-11

Curvas de distribución del tamaño de las partículas. (Fuente: De Das, B. M., *Principles of Geotechnical Engineering*, PWS Publishing Company, Boston, p. 44, 1994. Reimpreso con autorización.)

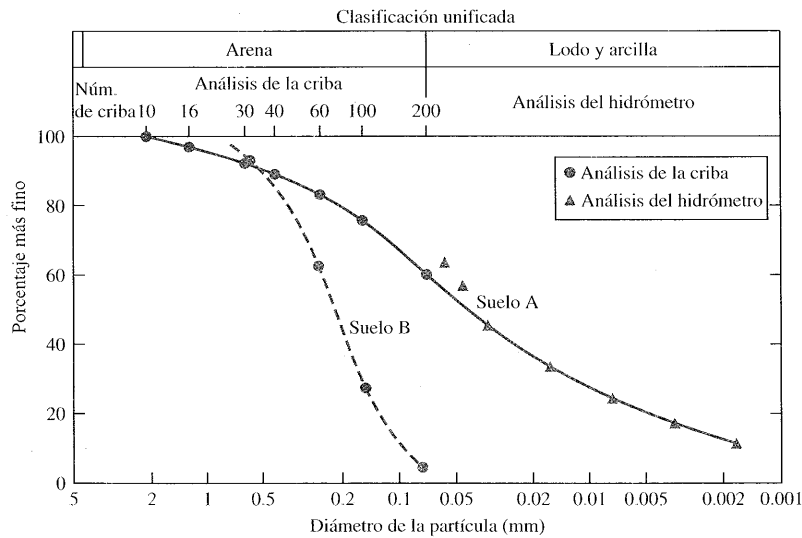


TABLA 7-7

Cribas estándar estadounidenses

Núm. de criba	Abertura (mm)	Núm. de criba	Abertura (mm)	Núm. de criba	Abertura (mm)
4	4.750	20	0.850	100	0.150
6	3.350	30	0.600	140	0.106
8	2.360	40	0.425	170	0.088
10	2.000	50	0.300	200	0.075
12	1.68	60	0.250	270	0.053
16	1.180	70	0.210		
18	1.00	80	0.180		

rejillas (**cribas**) con aberturas cada vez más pequeñas (tabla 7-7) y se separa agitándolo. Después se determina la cantidad de masa retenida en cada criba.

Cuando se trata de partículas menores de 0.075 mm de diámetro, se utiliza el análisis hidrométrico para determinar su tamaño. Este procedimiento se basa en el supuesto de que todas las partículas son esféricas y de que es posible expresar su velocidad mediante la ley de Stokes:

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \quad (7-18)$$

donde v_s = velocidad de sedimentación ($m \cdot s^{-1}$)

g = aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$)

ρ_s = densidad de la partícula ($kg \cdot m^{-3}$)

ρ = densidad del fluido ($kg \cdot m^{-3}$)

d = diámetro de la partícula (m)

μ = viscosidad dinámica ($Pa \cdot s$)

Cabe observar que la velocidad se puede escribir como h/t , donde h es la profundidad desde la superficie del líquido, y t , el tiempo que todas las partículas con un diámetro d habrán tardado en recorrer h ; puede darse otra expresión

$$d = K \left(\frac{h}{t} \right) \quad (7-19)$$

donde K es la colección de las constantes. Por lo tanto, se puede calcular el diámetro probando la masa por unidad de volumen para una profundidad determinada tras un tiempo dado. El hidrómetro mide la gravedad específica del fluido. Puesto que esta característica está en función de la cantidad de partículas sólidas por unidad de volumen, el hidrómetro puede calibrarse para leer la cantidad de sólidos que estén en suspensión. Conociendo este último dato, h y t , se puede calcular el porcentaje de suelo por masa más pequeña que un diámetro determinado.

Textura. Con base en el tamaño de las partículas, en la práctica resulta conveniente dividir esta distribución continua en varios tipos de intervalo. La figura 7-12 muestra ejemplos de cuatro sistemas. Debido a que los suelos reales combinan partículas de distintos tamaños, es útil contar con términos descriptivos para referirse a estas mezclas o **texturas**. La figura 7-13 muestra el esquema de clasificación de texturas del suelo que utiliza el Departamento de Agricultura de E. U.. En el ejemplo 7-10 se ilustra cómo se usa este diagrama.

