

Figura 4-26 Modelo generalizado del ciclo de nutrientes en un ecosistema maduro. Los nutrientes se mueven desde el ambiente a través de los organismos, y regresan al ambiente en los ciclos biogeoquímicos. Algunos nutrientes se pierden en los ecosistemas maduros, pero la mayoría son reciclados. Los sistemas más jóvenes, en desarrollo, obtienen muchos de ellos en otros ecosistemas. (Utilizado con permiso de Cecie Starr, *Biology: Concepts and Applications*, Belmont, Calif.: Wadsworth, 1991.)

talados, los bajos niveles de nutrientes en el suelo puesto se agotan rápidamente por las lluvias fuertes y los cultivos desarrollados. Por tanto, los cultivos sólo pueden cultivarse por un tiempo corto y enormes y caras cantidades de fertilizantes comerciales. De modo que deberíamos proteger, y no destruir, estos bosques.

La Figura 4-25 muestra la productividad primaria neta total del mundo de productores por año, para los tipos principales de ecosistemas. Se estima que el 55% de la productividad primaria neta anual en el mundo tiene lugar en tierra, y el 41% restante en los océanos y otros sistemas acuáticos. Como su área total es pequeña, los estuarios están abajo en la lista. Por otra parte, debido a que un 71% de la superficie del mundo está cubierta por los mares y océanos, los sistemas de mar abierto del mundo encabezan la lista.

Esto puede ser engañoso. La productividad primaria neta del mundo es alta para los mares y océanos porque cubren gran parte del globo, no porque tienen una alta productividad media por metro cuadrado de productores por año. También, cosechar algas marinas ampliamente dispersas en el océano, requiere cantidades enormes de energía —más que la energía química disponible del alimento que sería cosechado.

Ya estamos consumiendo, desviando y malgastando cerca de 27% de la productividad primaria

neta potencial del mundo, y un 40% de la producida en tierra. ¿Qué pasará si duplicamos la población humana dentro de los siguientes 40 años?

4-4

Ciclamiento de la Materia en los Ecosistemas

CICLOS BIOGEOQUÍMICOS Los nutrientes, las sustancias químicas esenciales para la vida, son ciclados en la ecosfera (Fig. 4-4) y en los ecosistemas maduros en los ciclos biogeoquímicos (Fig. 4-26). En estos ciclos, los nutrientes se mueven desde el ambiente, a través de los organismos, y de regreso al medio. Todos son dirigidos, directa o indirectamente, por la energía del Sol y por la gravedad.

Hay tres tipos de ciclos biogeoquímicos interconectados. En los *ciclos gaseosos*, los nutrientes circulan principalmente entre la atmósfera (agua) y los organismos vivos. En la mayoría de estos ciclos, los elementos son reciclados rápidamente, con frecuencia en horas o días. Los principales ciclos gaseosos son los del carbono, oxígeno y nitrógeno.

En los *ciclos sedimentarios*, los nutrientes circulan principalmente entre la corteza terrestre (suelo, rocas y sedimentos sobre la tierra y sobre el fondo marino), la hidrosfera y los organismos vivos. Los elementos en estos ciclos, generalmente son reciclados mucho

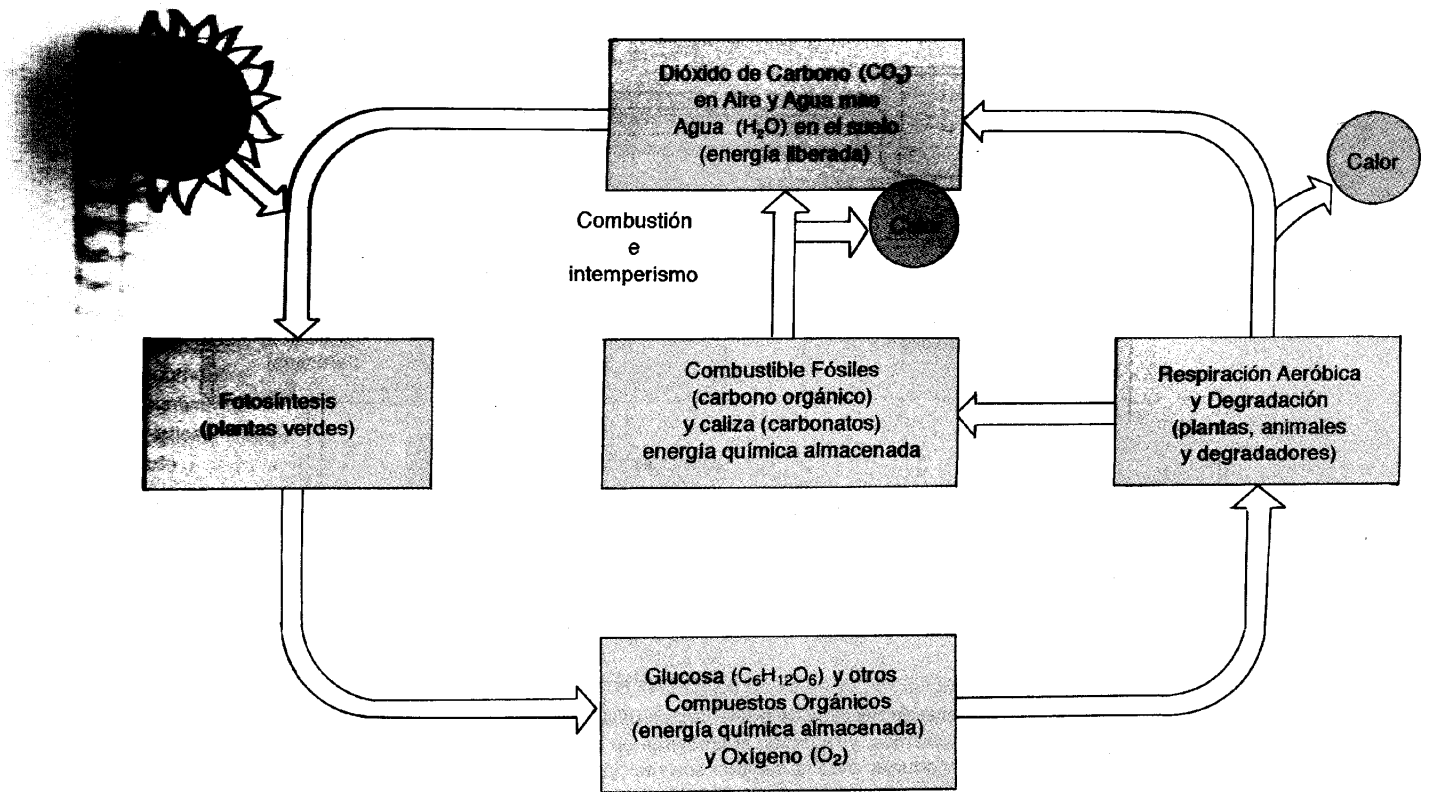


Figura 4-27 Diagrama simplificado de una porción gaseosa del ciclo del carbono, que muestra el ciclamiento de energía y el flujo energético en un sentido, a través del proceso de la fotosíntesis y la respiración aeróbica. La fotosíntesis absorbe dióxido de carbono y libera oxígeno, y la respiración aeróbica toma oxígeno y libera dióxido de carbono. Este movimiento cíclico de materia a través de los ecosistemas y la ecosfera es también una parte importante de los ciclos del oxígeno y el hidrógeno.

más lentamente que los de los ciclos atmosféricos, porque los elementos son retenidos en las rocas sedimentarias durante largo tiempo, con frecuencia de miles a millones de años, y no tienen una fase gaseosa. El fósforo y el azufre son dos de los 36 elementos reciclados de esta manera. En el *ciclo hidrológico*, el agua circula entre el océano, el aire, la tierra y los organismos vivos. Este ciclo también distribuye el calor solar sobre la superficie del planeta.

CICLO DEL CARBONO El carbono es el elemento básico de carbohidratos, grasas, proteínas, ácidos nucleicos (como el DNA y RNA) y otros compuestos orgánicos necesarios para la vida. El ciclo del carbono se basa en el gas dióxido de carbono, que constituye sólo el 0.03% en volumen de la troposfera, y también está disuelto en el agua.

Los productores absorben el dióxido de carbono de la atmósfera (productores terrestres) o del agua (productores acuáticos), y usan la *fotosíntesis* para convertir el carbono del CO_2 en carbono de compuestos orgánicos como la glucosa. Luego las células de los productores que consumen oxígeno y de los consumidores efectúan la *respiración aeróbica*, que descompone o degrada la glucosa y otros compues-

tos orgánicos complejos, y convierte el carbono de nuevo a dióxido de carbono en la atmósfera o agua, para reutilización por los productores. La fotosíntesis tiene lugar durante el día, cuando está disponible la luz solar. La respiración aeróbica se efectúa durante el día y la noche.

Este enlace entre la fotosíntesis en los productores y la respiración aeróbica en los productores y los consumidores, hace circular el carbono en la ecosfera y es una parte importante del ciclo mundial del carbono (Fig. 4-27). El oxígeno y el hidrógeno, los otros elementos de la glucosa y otros nutrientes orgánicos, se ciclan casi al ritmo del carbono. Cada año, cerca de la mitad del carbono que entra a la atmósfera (como CO_2) es tomado por los productores, los mares y océanos (como biomasa).

La Figura 4-28 muestra otras partes del ciclo mundial del carbono en los ecosistemas terrestres y los marinos. Revela que parte del carbono de la Tierra es retenido en sus profundidades durante periodos largos en los combustibles fósiles —principalmente carbón, petróleo y gas natural— hasta que es liberado a la atmósfera como dióxido de carbono cuando los combustibles fósiles son extraídos y quemados. El dióxido de carbono también es emitido a la atmósfe-

ra por la respiración aeróbica y las erupciones volcánicas, que liberan carbono de las rocas profundas de la corteza terrestre.

El gas dióxido de carbono es rápidamente soluble en agua. Algo de este CO_2 disuelto, permanece en el mar, y parte es removido por los productores fotosintetizantes. Cuanto más caliente esté el agua, mayor es la cantidad de los gases dióxido de carbono y oxígeno disueltos que regresan a la atmósfera.

En los ecosistemas marinos, algunos organismos toman moléculas disueltas de CO_2 o iones carbonato (CO_3^{2-}) del agua del océano y forman carbonato de calcio ligeramente soluble (CaCO_3) para elaborar conchas, rocas y el esqueleto de los organismos marinos, desde minúsculos protozoarios hasta corales. Cuando los organismos aconchados mueren, partículas finas de sus conchas y huesos caen lentamente a las profundidades del océano, y son enterradas durante eones (o tiempos muy largos) en los sedimentos del fondo (Fig. 4-28).

El carbono en estos sedimentos profundos del océano reingresa al ciclo muy lentamente, cuando parte de los sedimentos se disuelvan y formen el dióxido de carbono disuelto que puede entrar a la atmósfera. Los acontecimientos geológicos a largo plazo también pueden llevar los sedimentos del fondo a la superficie, exponiendo el carbonato de las rocas al ataque químico y a la conversión al CO_2 gaseoso.

Especialmente desde 1950, cuando la población del mundo y el uso de recursos ha aumentado rápidamente, hemos intervenido en el ciclo del carbono principalmente en dos maneras:

- Eliminación de bosques y otras vegetaciones sin replantación suficiente, lo que deja menos vegetación para absorber CO_2 .
- Utilización de combustibles fósiles que contienen carbono y combustión de madera más rápido de lo que puede volver a reproducirse (Fig. 4-28). Esto produce CO_2 que fluye a la atmósfera. Algunos científicos proyectan que este dióxido de carbono, junto con otras sustancias químicas que se están adicionando a la atmósfera, podrían intensificar el efecto de invernadero natural de la Tierra, alterar la producción mundial de alimentos y los hábitats de la vida silvestre.

CICLO DEL NITRÓGENO Los organismos requieren nitrógeno en varias formas químicas para sintetizar proteínas, ácidos nucleicos (como DNA y RNA) y otros compuestos orgánicos que contienen nitrógeno. El depósito (o reservorio) de nitrógeno más grande de la Tierra es la troposfera, ya que un 78% de su volumen es de este gas (N_2).

Sin embargo, esta forma abundante de nitrógeno, no puede ser utilizada directamente como nutriente por los vegetales o animales multicelulares. Por

fortuna, el gas nitrógeno es convertido en compuestos iónicos solubles en agua que contienen iones nitrato (NO_3^-) e iones amonio (NH_4^+), que son tomados por las raíces de las plantas como parte del ciclo del nitrógeno. Este ciclo se muestra en forma simplificada en la Figura 4-29.

La conversión del nitrógeno atmosférico en otras formas químicas útiles para las plantas, se llama **fijación del nitrógeno**. Es efectuada principalmente por ciertos tipos de bacterias (en especial, cianobacterias) en el suelo y agua, y por las bacterias rhizobium que viven en pequeños engrosamientos, llamados nódulos, sobre las raíces de la alfalfa, trébol, chícharo, frijol y otras plantas leguminosas (Fig. 4-30). La iluminación también tiene un papel en la fijación del nitrógeno, convirtiendo los gases nitrógeno y oxígeno de la atmósfera en óxido nítrico (NO). Parte de este gas se combina con el oxígeno de la atmósfera para formar dióxido de nitrógeno (NO_2). Estos gases reaccionan con el vapor de agua de la atmósfera y son convertidos en iones nitrato, que vuelven a la Tierra como ácido nítrico (HNO_3) disuelto en la precipitación, y como partículas sólidas de nitratos.

Los vegetales convierten los iones inorgánicos nitrato y amonio obtenidos del agua del suelo, en proteínas, DNA y otros compuestos orgánicos grandes, que contienen nitrógeno, y que las plantas necesitan. Los animales obtienen sus nutrientes que contienen nitrógeno comiendo vegetales u otros animales que comen plantas.

Después de que el nitrógeno ha realizado su función en los organismos vivos, ejércitos de bacterias degradadoras especializadas convierten los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, o que se encuentran en los desechos, partículas desprendidas y cuerpos de organismos muertos, en compuestos inorgánicos más simples, como el gas amoníaco (NH_3) y sales solubles en agua que contienen iones amonio (NH_4^+). Luego, otros grupos especializados de bacterias convierten estas formas inorgánicas de nitrógeno en iones nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) en el suelo y después en el gas nitrógeno, que es liberado a la atmósfera para empezar el ciclo otra vez.

A pesar de este ciclamiento del nitrógeno, suele escasear el del suelo, necesario para las plantas. El hecho de que los iones amonio, nitrato y nitrito son solubles en agua significa que pueden ser tomados por raíces de los vegetales, pero también significa que pueden infiltrarse profundamente en el suelo. También, parte de este nitrógeno del suelo es convertido en N_2 gaseoso por las bacterias. También algo se transfiere de un ecosistema a otro por la erosión causada por el viento o agua corriente. Además, los cultivos toman nitrógeno del suelo, que se pierde cuando se cosechan aquéllos.

El nitrógeno también es escaso cerca de las aguas superficiales del océano abierto y los lagos profun-

dos, porque la mayoría de él se halla en los sedimentos del fondo. Esto explica por qué la más alta productividad primaria neta por área de productores en los océanos está en los estuarios someros, donde el nitrógeno y otros nutrientes del fondo están disponibles fácilmente (Fig. 4-24) o donde las corrientes oceánicas arrastran los nutrientes desde el fondo.

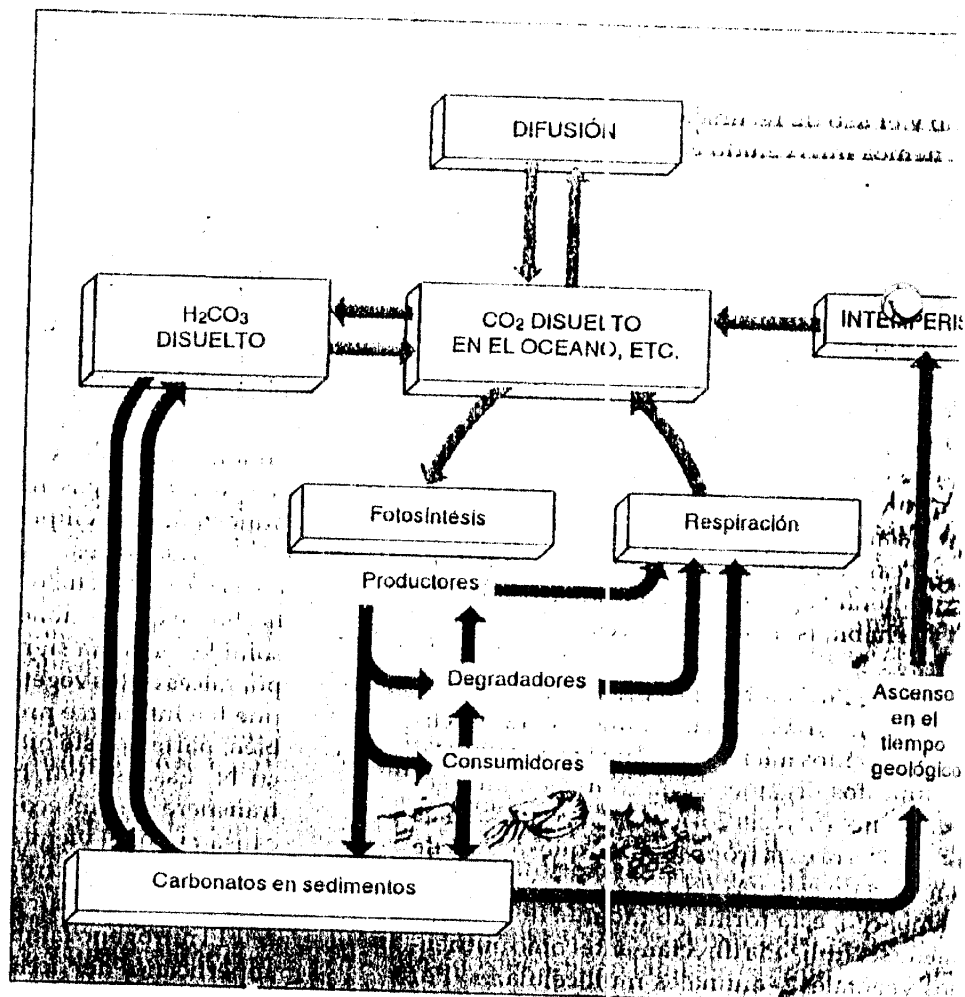
Los humanos intervenimos en el ciclo del nitrógeno en varias maneras:

- La emisión de grandes cantidades de óxido nítrico a la atmósfera cuando se quema madera o cualquier combustible. La mayoría de este (NO) se produce cuando moléculas de nitrógeno y oxígeno del aire se combinan a las altas temperaturas involucradas cuando los combustibles son quemados en el aire. Entonces, el óxido nítrico se combina con el gas oxígeno de la atmósfera para formar el gas dióxido de nitrógeno (NO_2), que puede reaccionar con el vapor de agua de la atmósfera para formar ácido nítrico (HNO_3). Este ácido es un componente de la lluvia ácida,

que está dañando árboles y matando partes del mundo.

- La emisión del gas óxido nítrico (NO) al calor de la atmósfera por la acción bacterias sobre los fertilizantes inorgánicos y desechos del ganado.
- La extracción minera de depósitos de fosfatos que contienen iones nitrato y iones amonio para su uso como fertilizantes inorgánicos.
- Agotamiento de los iones nitrato y amonio en el suelo por la cosecha de cultivos ricos en nutrientes.
- Adición de exceso de iones nitrato y amonio a los ecosistemas acuáticos en los desagües de los animales de sitios donde se alquila el ganado, escurrimientos de nitrato de los cultivos en tierras de cultivo, y de los orgánicos municipales tratadas y no tratadas. El suministro excesivo de nutrientes vegetales causa el crecimiento rápido de algas y otros organismos acuáticos. La degradación de las algas por degradadores aeróbicos agota el oxígeno disuelto, matando así grandes peces.

Figura 4-28 Diagrama simplificado del ciclo mundial del carbono gaseoso. La porción izquierda muestra el movimiento del carbono a través de los ecosistemas marinos, y la porción derecha su movimiento a través de los ecosistemas terrestres. (Utilizado con permiso de Cecie Starr, *Biology: Concepts and Applications*, Belmont, Calif.: Wadsworth, 1991.)



CICLO DEL FÓSFORO El fósforo, principalmente en forma de ciertos tipos de iones fosfato (PO_4^{3-} y HPO_4^{2-}), es un nutriente esencial para vegetales y animales. Es una parte de las moléculas de DNA, que llevan la información genética; moléculas de ATP y ADP, que almacenan energía química para el uso de los organismos en la respiración celular; ciertas grasas de las membranas que envuelven las células animales y vegetales, y los huesos y dientes de los animales.

Diversas formas de fósforo son cicladas principalmente a través del agua, la corteza de la Tierra y los organismos vivos por el ciclo del fósforo sedimentario, mostrado en forma simplificada en la Figura 4-31. En este ciclo, el fósforo se mueve lentamente desde los depósitos de fosfato en tierra y los sedimentos de los mares someros a los organismos vivos, y luego de regreso a tierra y al océano. Las bacterias son menos importantes en el ciclo del fósforo que en el del nitrógeno.

El fósforo liberado por la degradación lenta, o intemperismo, de los depósitos de fosfato en las rocas, es disuelto en el agua del suelo y tomado por las raíces vegetales. El viento también puede trans-

portar partículas a grandes distancias. La mayoría de los suelos contienen sólo cantidades pequeñas de fósforo porque los fosfatos son ligeramente solubles en agua y se encuentran en pocas clases de rocas. Por tanto, el fósforo es el factor limitante para el crecimiento de plantas en muchos suelos y ecosistemas acuáticos.

Los animales obtienen su fósforo comiendo productores o animales que han ingerido productores. Los desechos animales y los productos de descomposición de los animales y productores muertos, devuelven mucho de este fósforo al suelo, a corrientes fluviales y eventualmente al fondo del océano, como depósitos de roca con fosfatos ligeramente solubles.

Algo de fosfatos es devuelto a la tierra como guano —el abono— rico en fosfato producido por aves comedoras de peces, como los pelícanos, plangas y cormoranes. Aunque este retorno es pequeño, comparado con las cantidades mucho más grandes del fosfato transferido de la tierra a los mares cada año por los procesos naturales y las actividades humanas.

En el transcurso de millones de años, los procesos geológicos pueden levantar y exponer el fondo

