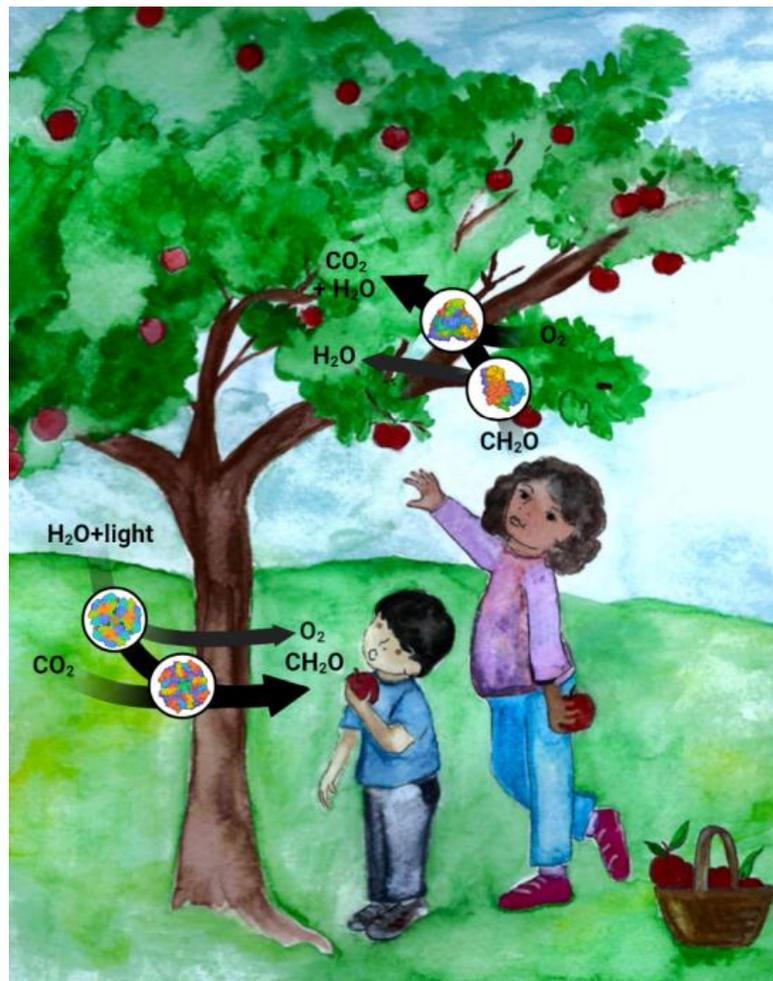


Nanomáquinas proteicas: ¿cómo ayudaron a crear nuestro planeta

¿Las plantas del parque respiran aire como yo?



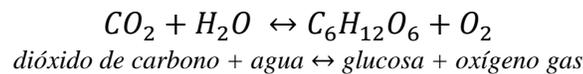
Corday R. Selden¹, Dearing Blankmann², Paul G. Falkowski¹

¹Departamento de Ciencias Marinas y Costeras, Rutgers University, NJ, ²Escuela de Educación, University of North Carolina Greensboro, NC, EE.UU.

Nanomáquinas proteicas

Trama

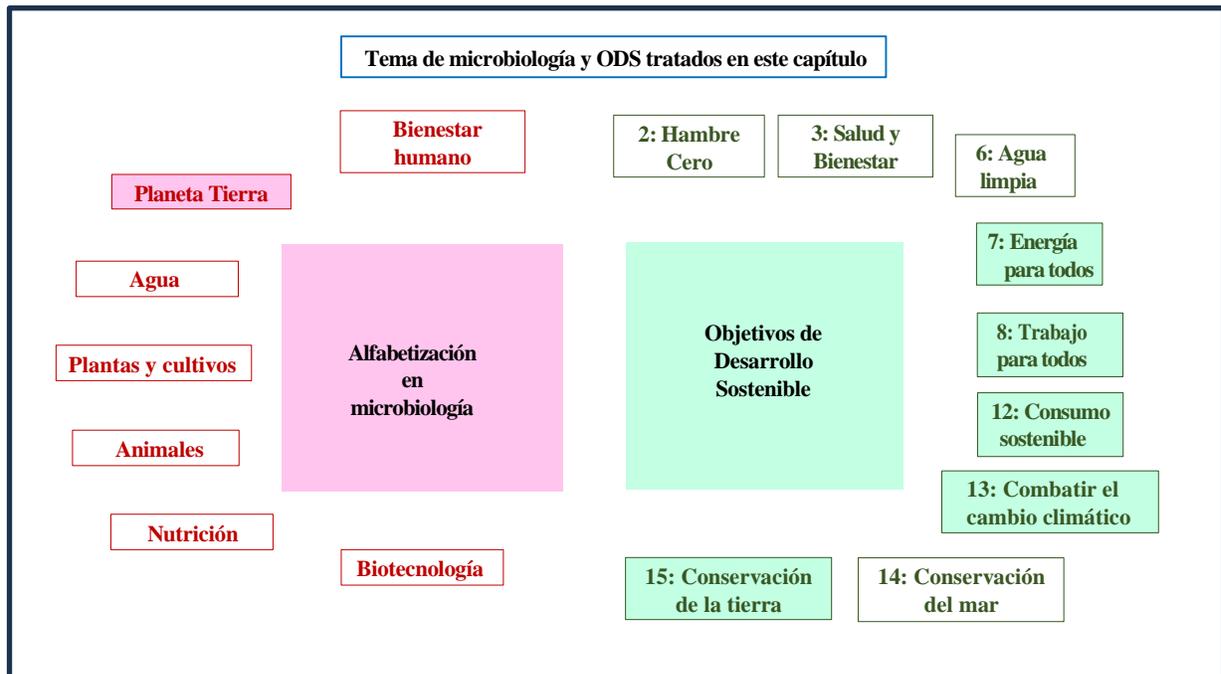
Todos los organismos intercambian gases con la atmósfera. Con cada respiración, nuestros pulmones se llenan de oxígeno y expulsan dióxido de carbono y agua. Este proceso produce energía a partir de los alimentos que ingerimos. ¿De dónde obtenemos los alimentos? De las plantas, pero las plantas no tienen pulmones como nosotros. En cambio, absorben dióxido de carbono y agua a través de sus hojas, y producen oxígeno y azúcares utilizando la energía de la luz solar. Estos azúcares se convierten en los compuestos que forman sus tallos, hojas, raíces y, sobre todo, sus semillas y frutos. Las plantas y las algas son fotosintéticas. Nosotros somos heterótrofos, es decir, organismos que utilizan productos fotosintéticos para vivir. Estos dos procesos fundamentales, la fotosíntesis (de izquierda a derecha) y la respiración (de derecha a izquierda):



se equilibran a escala planetaria junto con otros procesos que afectan a la composición de los gases atmosféricos a lo largo de millones de años.

Las condiciones que hacen que la Tierra sea hoy habitable para los seres humanos se mantienen gracias a una red de reacciones químicas (ciclos biogeoquímicos). Estas reacciones, incluidas la respiración y la fotosíntesis, son impulsadas por la vida mediante un pequeño conjunto de proteínas, que son máquinas biológicas a nanoescala. Muchas de estas proteínas se encuentran en todas las formas de vida visibles a simple vista. Sin embargo, evolucionaron a principios de la historia de la Tierra en los microbios. Los microbios son la biblioteca de la vida: registran la evolución de todos nosotros. Nosotros, los humanos, somos un híbrido de microbios. Pero hace mucho, mucho tiempo, no había plantas ni animales, sólo microbios; ellos hicieron habitable la Tierra.

La microbiología y el contexto social

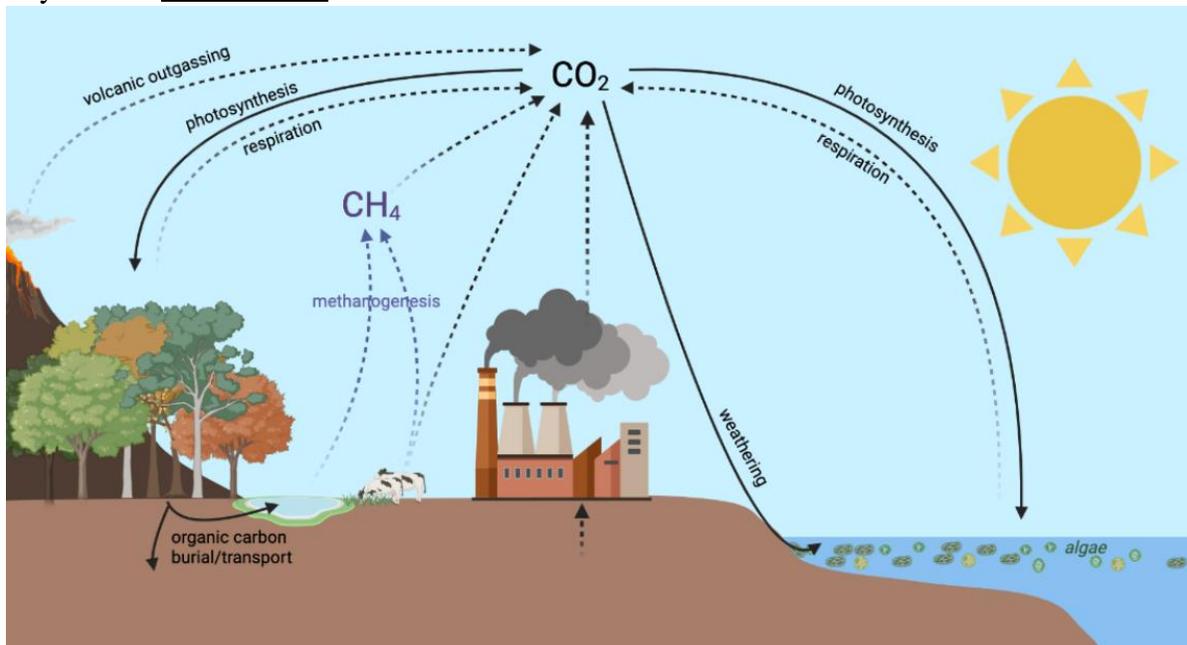


Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

Microbiología: metabolismo microbiano y diversidad metabólica; evolución de las proteínas.
Contexto: coevolución vida-geosfera; ciclos biogeoquímicos; pensamiento sistémico de la Tierra. Cuestiones de sostenibilidad: comprensión de las conexiones entre contaminación por nutrientes/carbono, cambios en la salud y función de los ecosistemas a escala local y mundial; uso del metabolismo microbiano y las proteínas e prácticas sostenibles y energías renovables.

Nanomáquinas proteicas: la Microbiología

1. **La habitabilidad actual de la Tierra para los humanos se mantiene gracias a una red de reacciones químicas impulsadas por la vida.** La Tierra es un sistema integrado compuesto por una biosfera, una geosfera, una hidrosfera y una atmósfera. Estas «esferas» interactúan a través del flujo de materia y energía. Los principales elementos constitutivos de la biosfera (la vida) son el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el azufre y el fósforo, que se reciclan continuamente a través de las cuatro esferas de la Tierra, adoptando diferentes formas químicas. Tanto los procesos biológicos como los geológicos y físicos median en las reacciones químicas que impulsan los ciclos biogeoquímicos de la Tierra, determinando la distribución y la forma química de los elementos primarios de la vida. La distribución y la forma de estos elementos influyen en la habitabilidad de la Tierra.



Ciclo simplificado del carbono. Las plantas y las algas convierten el dióxido de carbono (CO_2) en carbono orgánico mediante la fotosíntesis y en otras formas inorgánicas mediante la meteorización química (líneas continuas). El CO_2 se produce durante la respiración (de plantas, animales y microbios) y cuando los seres humanos queman materia orgánica antigua, es decir, combustibles fósiles (líneas discontinuas). Algunos microbios anaerobios (que pueden encontrarse en el interior de los estómagos de las vacas, entre otros lugares) producen metano (CH_4) en lugar de CO_2 (líneas moradas). Sin embargo, el CH_4 no es muy estable y se convierte en CO_2 en la atmósfera con relativa rapidez tras su producción (en cuestión de décadas). Los procesos que se muestran aquí representan sólo un subconjunto de las formas en que el carbono circula por el sistema terrestre.

Exploremos estos conceptos pensando en el ciclo del carbono. El carbono en la atmósfera

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

existe principalmente en dos formas: dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Ambas formas químicas son gases de efecto invernadero, lo que significa que aíslan la Tierra reduciendo el escape del calor terrestre al espacio. Cuando aumentan las concentraciones de gases de efecto invernadero, la Tierra se calienta. El metano es un gas de efecto invernadero mucho más potente; sin embargo, es relativamente inestable y se transforma en dióxido de carbono al cabo de una década. Así pues, tanto la cantidad de carbono en la atmósfera como su forma química desempeñan un papel importante en el establecimiento de una temperatura confortable para la vida.

El metano se añade continuamente a la atmósfera cuando ciertos microbios anaerobios respiran (metanogénesis). El dióxido de carbono se añade continuamente a la atmósfera por la respiración aeróbica, la desgasificación volcánica y otros procesos. Mientras que el metano se descompone en dióxido de carbono al cabo de una década, el dióxido de carbono es muy estable y puede permanecer en la atmósfera durante mucho más tiempo, muchos millones de años. El dióxido de carbono de la atmósfera puede transferirse a la biosfera, la geosfera y la hidrosfera a través de varios procesos. Las plantas y las algas convierten el carbono del dióxido de carbono en formas orgánicas mediante la fotosíntesis; a diferencia del dióxido de carbono, el carbono orgánico contiene hidrógeno que está unido directamente a un átomo de carbono. El carbono orgánico puede almacenarse en la biosfera en forma de biomasa viva (por ejemplo, árboles y hierbas) o en la geosfera en forma de suelos y sedimentos. Los procesos no biológicos también son muy importantes. Por ejemplo, el dióxido de carbono de la atmósfera se transfiere a la hidrosfera (por ejemplo, los océanos) debido a la mezcla y el equilibrio.

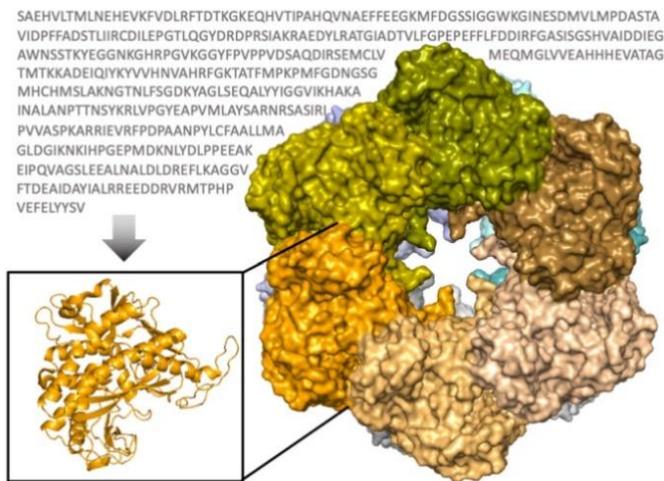
2. *El metabolismo de un microorganismo define su impacto biogeoquímico.* La vida necesita materiales para crecer (nuestros seis grandes elementos principales más algunos otros) y energía para alimentar ese crecimiento. Estos ingredientes proceden de nuestro entorno, y es a él a quien devolvemos nuestros residuos. Por ejemplo, tanto el metano como el dióxido de carbono son productos de desecho de distintos tipos de respiración, como ya hemos visto. Los seres humanos asimilamos los nutrientes de los alimentos, pero también «quemamos» (respiramos) parte de esta materia orgánica como combustible. En este proceso utilizamos el oxígeno que respiramos. El resultado es la liberación de energía almacenada en enlaces químicos orgánicos y dióxido de carbono como producto de desecho. Al impulsar el flujo de materia y energía, las reacciones metabólicas dan forma tanto a la vida como a su entorno.

El metabolismo (reacciones químicas que mantienen la vida dentro de un organismo) puede definirse por las fuentes de energía y carbono de un organismo.

Metabolismo	Fuente de energía	Fuente de carbono	Organismos ejemplo
<i>Autótrofos</i>			
Fotoautótrofo	Luz	CO ₂	Plantas, algas
Quimioautótrofo	Compuestos químicos (inorgánico)	CO ₂	Algunas procariotas
<i>Heterótrofos</i>			
Fotoheterótrofo	Luz	Compuestos orgánicos	Algunas procariotas
Quimioheterótrofo	Compuestos químicos (orgánico)	Compuestos orgánicos	Animales, hongos, muchas procariotas

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

3. **La vida moldea su entorno utilizando ciertas proteínas, que funcionan como diminutas máquinas.** La vida lleva a cabo las reacciones metabólicas utilizando un pequeño conjunto¹ de proteínas. Las proteínas son una de las macromoléculas más importantes de la biología (junto con los ácidos nucleicos, los lípidos y los hidratos de carbono). Fundamentalmente, las proteínas son cadenas de aminoácidos que se retuercen y enrollan formando estructuras complejas. Como cada aminoácido presenta propiedades químicas distintas, su secuencia determina cómo se plegará la cadena. Los enlaces entre determinados aminoácidos harán que la cadena se retuerza en hélices o forme estructuras similares a láminas. Muchas proteínas son estructuras muy complejas formadas por varias cadenas. A menudo, una proteína se compone de varias cadenas idénticas, creando estructuras moleculares de gran simetría.



La secuencia de aminoácidos dicta la estructura de las proteínas. Los aminoácidos (cada uno representado por una letra en gris) forman cadenas, que se pliegan y enrollan en pequeñas proteínas (estructura en cinta mostrada en dorado). Estas moléculas proteicas pueden ensamblarse, actuando cada una como subunidad de una proteína más compleja (estructura superficial multicolor). El complejo proteico que se muestra aquí es la glutamina sintetasa, una enzima clave en el metabolismo del nitrógeno. Encontrará más información sobre la estructura y la función de la glutamina

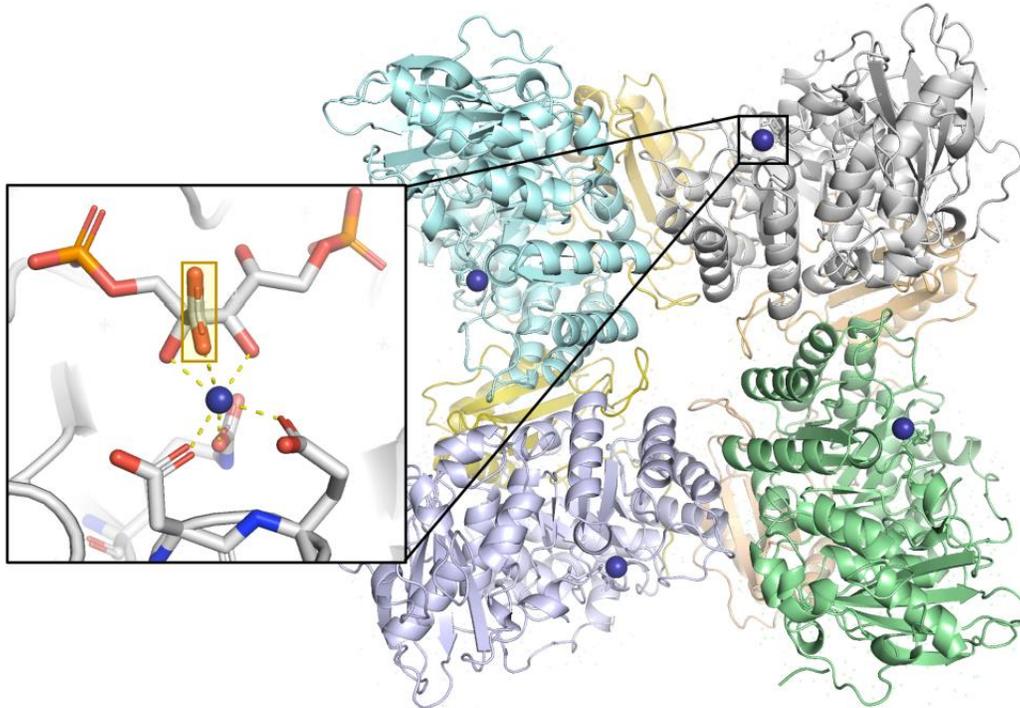
sintetasa en este artículo del Protein Data Bank: <https://pdb101.rcsb.org/motm/30>. La estructura representada se encuentra en el Protein Data Bank como entrada 1FPY.

La estructura de una proteína determina su función. Algunas proteínas se utilizan como materiales de construcción, mientras que otras, como las que impulsan el metabolismo, funcionan como máquinas a nanoescala. El colágeno, por ejemplo, es una proteína que se utiliza para construir huesos y tejidos conectivos; es rico en un aminoácido llamado prolina, que hace que sus cadenas se enrollen formando largas fibrillas (fibras a escala nanométrica). Estas fibrillas son excelentes materiales de construcción porque son fuertes y flexibles. Otras proteínas, denominadas enzimas, hacen su trabajo: Catalizan reacciones químicas que de otro modo no se producirían. Las enzimas tienen sitios activos a los que sólo pueden unirse compuestos específicos (sustratos) debido a su forma y propiedades químicas (como una llave que encaja en una cerradura). Cuando se une un sustrato, la forma de la enzima cambia. Este «cambio conformacional» coloca el sustrato cerca de otros reactivos con una orientación específica. En esta nueva posición, la energía de activación de la reacción disminuye y la reacción puede continuar. Veamos un ejemplo del ciclo del carbono.

¹ Aquí nos referimos principalmente a una clase de enzimas conocidas como oxidorreductasas. Las oxidorreductasas transfieren electrones de una molécula a otra. La transferencia de electrones impulsa las reacciones que sustentan la vida (metabolismo). Sin embargo, muchas otras enzimas que no transfieren electrones desempeñan funciones muy importantes en el flujo de energía y materia dentro de una célula y entre una célula y su entorno.

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

Utilizando la energía del sol, las plantas y las algas convierten el CO₂ gaseoso en carbono orgánico. Esta reacción es catalizada por la proteína Rubisco² en un proceso de varios pasos. En primer lugar, la Rubisco une el CO₂ y una pequeña molécula de azúcar -una cadena de cinco átomos de carbono llamada ribulosa bifosfato- en estrecha proximidad; esto hace que la ribulosa bifosfato sufra un pequeño cambio en su estructura química. Las dos moléculas se unen ahora fácilmente, formando una molécula compuesta ahora por seis átomos de carbono. En segundo lugar, esta cadena alargada se rompe por la mitad, creando dos cadenas con tres átomos de carbono cada una. Algunas de estas moléculas de tres carbonos acaban reciclándose, mientras que otras se convierten posteriormente en azúcares simples.



La estructura tridimensional de una proteína determina su función. La rubisco (representada a la derecha como una cinta con subunidades de distintos colores) utiliza iones de magnesio (púrpura oscuro) para coordinar el CO₂ y la ribulosa bifosfato. Esto se muestra en el recuadro: La ribulosa bifosfato está unida por encima del ion magnesio con la molécula de CO₂ (resaltada por el recuadro amarillo) ya unida. Los colores rojo, azul y naranja indican los átomos de oxígeno, nitrógeno y fósforo. Los enlaces se muestran como líneas amarillas discontinuas. Encontrará más información sobre la estructura y la función de Rubisco en este artículo del Protein Data Bank: <https://pdb101.rcsb.org/motm/11>. La estructura representada puede encontrarse en el Protein Data Bank como entrada 8RUC.

4. Los microbios mantienen un registro de nanomáquinas proteínicas a lo largo del tiempo. La mayoría de los organismos pluricelulares se basan en las estrategias metabólicas más eficientes de la Tierra en la actualidad. Entre ellos se encuentran los quimioheterótrofos, como nosotros, que respiramos oxígeno, y las plantas, que producen oxígeno por fotosíntesis. Las nanomáquinas que impulsan estas reacciones evolucionaron primero en los microbios y aún se

² RuBisCO es la abreviatura común del nombre completo de la proteína, Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa. Es una de las proteínas más abundantes del planeta y puede constituir hasta la mitad de las proteínas solubles de las hojas de algunas plantas. Aunque la mayoría de los organismos autótrofos recurren a la Rubisco para captar CO₂, un pequeño número utiliza enzimas alternativas.

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

encuentran en los genomas de muchos microorganismos. Pero estas estrategias metabólicas más eficientes son sólo algunas de las muchas opciones que se encuentran en la naturaleza. Por ejemplo, algunos microbios quimioheterótrofos utilizan diferentes nanomáquinas para respirar utilizando distintos compuestos inorgánicos en lugar de oxígeno (por ejemplo, nitrato, sulfato). Otros microbios realizan la fotosíntesis utilizando una supuesta predecesora de una de las nanomáquinas recolectoras de luz que se encuentran en las plantas modernas. Algunos de estos organismos (por ejemplo, las bacterias verdes del azufre) utilizan sulfuro de hidrógeno en lugar de agua. Hoy en día, este tipo de estrategias metabólicas suelen quedar relegadas a sedimentos anóxicos, aguas termales y otros entornos peculiares. Sin embargo, desempeñan papeles muy importantes en los ciclos biogeoquímicos de la Tierra. Además, representan un registro de las innovaciones pasadas de la evolución. Por tanto, podemos considerar a los microbios como las «bibliotecas de la vida»: almacenan las instrucciones para fabricar las nanomáquinas más importantes de la Tierra, incluidas muchas de las que usted y yo utilizamos.

5. La evolución de las nanomáquinas proteínicas cambió radicalmente la Tierra. La evolución describe una acumulación de cambios que dan lugar a nuevas funciones. Las pequeñas diferencias en los planos de las proteínas, los genes, se producen aleatoriamente durante la reproducción. Podemos pensar que esto es parecido a los errores que se cometen al transcribir un texto: Si intentáramos copiar una novela entera a mano, podríamos cometer algunos errores. Tal vez escribirías «aquí» en lugar de «allí», o tal vez perderías el sitio y repetirías una sección que ya habías copiado. Este tipo de errores puede hacer que el texto resulte ininteligible, o puede no importar en absoluto. Pero algunos de estos errores podrían cambiar el significado del texto de una forma lírica e innovadora. Cuando los cambios aleatorios en el código genético de un organismo dan lugar a una función que es útil en el contexto del entorno de ese organismo, entonces ese organismo tendrá más probabilidades de sobrevivir y crear descendencia que lleve la nueva función.

Las nanomáquinas que permiten a la vida subsistir y que impulsan los ciclos biogeoquímicos de la Tierra evolucionaron porque aumentaban la probabilidad de supervivencia de los microbios en las condiciones ambientales del momento. A medida que evolucionaban, las distintas nanomáquinas moldeaban la Tierra redistribuyendo los elementos clave o modificando las formas químicas más abundantes. Estos cambios en las condiciones ambientales dieron lugar a nuevas innovaciones evolutivas. Veamos algunos ejemplos.

Ejemplo 1: El nitrógeno es un ingrediente clave para la vida. Sin nitrógeno, las células no pueden replicar su código genético ni fabricar proteínas. Prácticamente todo el nitrógeno de la Tierra se encuentra en estado gaseoso (dinitrógeno gaseoso), relativamente poco reactivo. Esto significa que se necesita mucha energía para cambiar de forma y que la vida no puede utilizarlo fácilmente. Hace muchos, muchos años (>3.500 millones de años), cuando la Tierra era joven, la vida no disponía de herramientas para transformar el nitrógeno gaseoso en una forma utilizable como el amonio. En su lugar, los primeros microbios tuvieron que recurrir a procesos no biológicos muy ineficaces, como el rayo, para transformar el nitrógeno gaseoso en una forma utilizable. A medida que los microbios se hicieron más numerosos, las formas utilizables de nitrógeno se convirtieron en un factor limitante para el crecimiento de las comunidades microbianas nacies. Finalmente, se desarrolló una nueva nanomáquina capaz de convertir el nitrógeno gaseoso en amoníaco³. Esta nanomáquina, denominada nitrogenasa, permitió que las primera

³ El amoníaco (NH_3) y el amonio (NH_4^+) se diferencian por un protón, que es el núcleo de un átomo de hidrógeno. Las dos formas se interconvierten fácilmente. La presencia del protón depende del pH del medio ambiente. A un pH oceánico de aproximadamente 8,1, cerca del 93% se encuentra en forma de amonio. En el interior de una célula, a un pH de 7,2, cerca del 99% está en forma de amonio.

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

comunidades microbianas florecieran y se convirtieran en una fuerza dominante en el planeta.

Ejemplo 2: Algunos de los primeros microbios se ganaban la vida mediante la fotosíntesis, pero a diferencia de las plantas modernas, la nanomaquinaria utilizada por estos organismos para aprovechar la energía del sol no producía **oxígeno**. Como en el caso de la fijación del nitrógeno (arriba), cuando los fotoautótrofos empezaron a florecer, una nueva nanomáquina evolucionó y adquirió protagonismo ecológico. En el proceso de transformación de la energía luminosa en energía química, esta nueva nanomáquina (Fotosistema II) divide el agua. Un subproducto de esta reacción es el oxígeno. La evolución de esta nanomáquina hizo que el gas oxígeno se convirtiera en uno de los principales componentes de la atmósfera terrestre hace unos 2.400 millones de años.

Sin el gas oxígeno en la atmósfera, no existirían los ecosistemas complejos y biodiversos que conocemos. Esto se debe a que la respiración aeróbica suministra 18 veces más energía para el crecimiento que la respiración anaeróbica. En otras palabras, cuando una célula utiliza oxígeno para descomponer la materia orgánica (respirar) en lugar de un oxidante alternativo, se produce más energía y la célula puede llevar a cabo más reacciones químicas. El oxígeno permite «sobrealimentar» la respiración. En resumen, la invención del Fotosistema II permitió la evolución de organismos complejos heterótrofos y pluricelulares. De hecho, no había animales antes de que el oxígeno se convirtiera en un componente importante de la atmósfera terrestre.

6. Hoy en día, los seres humanos están alterando la atmósfera de la Tierra. Las actividades humanas están alterando el ciclo de los elementos en la Tierra. Una de las principales formas de alterar los ciclos biogeoquímicos es la combustión de combustibles fósiles. Al extraer el carbono almacenado a largo plazo en la geosfera y bombearlo a la atmósfera en forma de dióxido de carbono, estamos aumentando la tasa de “respiración” planetaria.

Este tipo de cambios biogeoquímicos provocados por el hombre alteran la disponibilidad de determinados hábitats a los que se han acostumbrado distintos organismos. Pero la historia no acaba ahí. Los cambios en el medio ambiente afectan a los organismos que prosperan. Esto, a su vez, afecta a los ciclos biogeoquímicos de la Tierra.

Un ejemplo de ello es la pérdida de oxígeno en muchos cursos de agua costeros debido a la eutrofización. A principios del siglo XX, los humanos descubrieron cómo hacer lo que la evolución sólo había dominado una vez: convertir el nitrógeno gaseoso en una forma utilizable (amoníaco)⁴. Al igual que los microbios al principio de la evolución de la Tierra, los seres humanos íbamos a morir de hambre a menos que pudiéramos producir amoníaco para las plantas que nos alimentan y nos sirven. En otras palabras, necesitábamos producir más amoníaco para seguir aumentando nuestra población. A principios del siglo XX, descubrimos cómo hacerlo; sin embargo, gran parte del nitrógeno que hemos estado vertiendo en las tierras de cultivo durante el siglo pasado ha sido arrastrado hasta los ríos y las aguas costeras. Ciertas algas son muy expertas en el uso de este nitrógeno y, en muchos lugares, su crecimiento también está limitado por el nitrógeno. En consecuencia, crecen rápidamente cuando se añaden al agua formas de nitrógeno fácilmente utilizables. Cuando el nuevo nitrógeno desaparece, las algas mueren. La materia orgánica que producen es consumida por microbios heterótrofos que respiran oxígeno. Este patrón conduce al agotamiento del oxígeno en los cursos de agua costeros, matando a los peces y a otros organismos multicelulares. Estas zonas deficientes en oxígeno, una vez desarrolladas, albergan numerosos microbios anaerobios similares a los que existían en la Tierra antigua.

⁴ La conversión industrial de hidrógeno y nitrógeno gaseosos en amoníaco se denomina proceso Haber-Bosch por el nombre de su inventor (Fritz Haber) y del ingeniero que lo hizo comercialmente viable (Carl Bosch). Ambos ganaron el Premio Nobel.

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus Grandes Desafíos

Las nanomáquinas microbianas y los ciclos biogeoquímicos de la Tierra se relacionan con varios objetivos de desarrollo sostenible (los aspectos específicos aparecen en cursiva), entre ellos:

- **Objetivo 7. Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos** (*desarrollo de estrategias energéticas sostenibles, fuentes de energía renovables*). Desarrollar y elegir las mejores fuentes de energía exige comprender cómo afectarán esas fuentes al sistema terrestre en su conjunto. Las buenas fuentes de energía son las que no alteran fundamentalmente el equilibrio biogeoquímico del planeta. Esto puede significar no alterar el ciclo de los elementos o garantizar que nuestras alteraciones sean equilibradas. Por ejemplo, si seguimos quemando combustibles fósiles y emitiendo dióxido de carbono, debemos asegurarnos de que también eliminamos dióxido de carbono de la atmósfera. Una opción es transferir dióxido de carbono de la atmósfera a la geosfera (por ejemplo, almacenarlo en rocas o materiales de construcción como el hormigón) o a la biosfera (por ejemplo, aumentar el crecimiento de plantas leñosas). Otra opción es quemar materia orgánica producida recientemente a partir del dióxido de carbono (por ejemplo, biomasa de algas) en lugar de materia orgánica antigua que ha quedado enterrada (combustibles fósiles). Sin embargo, llevamos más de un siglo bombeando dióxido de carbono a la atmósfera y, por consiguiente, tenemos que empezar a eliminar más del que añadimos para marcar una diferencia significativa en las próximas décadas.

Algunas nanomáquinas pueden ser especialmente importantes para desarrollar fuentes de energía renovables. Por ejemplo, los químicos e ingenieros estudian hoy las nanomáquinas de los microbios que producen hidrógeno gaseoso (hidrogenasas y nitrogenasas). Muchos esperan utilizar estas nanomáquinas, o diseñar versiones mejores de las mismas, para producir hidrógeno como combustible. La combustión de hidrógeno no produce dióxido de carbono, sólo agua.

- **Objetivo 11. Hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resistentes y sostenibles** (*urbanismo sostenible, gestión de residuos*). Podemos pensar en mantener un flujo equilibrado de energía y materia tanto a escala local como global. ¿Qué materiales importamos? ¿Qué exportamos? ¿Qué estrategias podemos diseñar para mejorar el reciclaje a escala local? Por ejemplo, las ciudades traen mucha comida para alimentar a todo el mundo y luego tienen que ocuparse de los residuos humanos. Estos residuos incluyen muchos nutrientes como nitrógeno y materia orgánica. Verter este material en las vías fluviales puede causar eutrofización (y propagar enfermedades). Para combatir este problema, muchas ciudades utilizan microbios aeróbicos y anaeróbicos para eliminar los nutrientes y la materia orgánica. Sin embargo, estos procesos no hacen desaparecer el carbono y el nitrógeno. Convierten estos elementos en formas gaseosas, que pueden afectar a la salud humana y contribuir al cambio climático⁵. Sin embargo, cada vez se estudia más cómo reciclar de forma segura los residuos humanos para nutrir los cultivos y proporcionar energía. Muchas de estas estrategias aprovechan los microbios con metabolismos diversos para controlar los productos finales del procesamiento.

- **Objetivo 12. Garantizar modelos de consumo y producción sostenibles** (*lograr prácticas de producción y consumo sostenibles, remediar la contaminación*). Desarrollar el

⁵ Además de la producción de dióxido de carbono y metano, la transformación incompleta del nitrógeno en forma de nitrato produce el gas de efecto invernadero óxido nitroso (gas hilarante).

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

Participación de los alumnos

consumo y producción sostenibles a pequeña y gran escala nos reta a pensar en nuestro entorno como un sistema del que sólo somos un aspecto. Como ya se dijo en el Objetivo 11, todos los compuestos que se producen deben consumirse y viceversa en un sistema equilibrado. Los microorganismos pueden ayudarnos. Por ejemplo, algunos microbios construyen nanomáquinas que descomponen ciertos tipos de plástico. En la actualidad, los científicos estudian estos organismos y sus nanomáquinas con el objetivo de diseñar nuevas herramientas para hacer frente a los residuos plásticos y desarrollar prácticas sostenibles de gestión del plástico. Otras nanomáquinas microbianas (enzimas lignolíticas) pueden utilizarse para descomponer residuos alimentarios industriales. Estas nanomáquinas pueden ser útiles para desarrollar estrategias que utilicen estos residuos como fuente de combustible y para fabricar nuevos materiales biodegradables que sustituyan a los plásticos convencionales (fabricados a partir del petróleo).

- **Objetivo 13. Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus repercusiones** (*reducir las emisiones de gases de efecto invernadero*). Ciertos microbios anaerobios representan una fuente importante de dos importantes gases de efecto invernadero, el metano y el óxido nitroso, que agravan el calentamiento global. Los microbios que producen estos gases se encuentran casi siempre en entornos sin oxígeno, incluso en las tripas de ciertos animales como las vacas. Las actividades humanas (eutrofización, ganadería, etc.) están ampliando el nicho de estos organismos.

- **Objetivo 15. Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de forma sostenible los bosques, luchar contra la desertificación y detener e invertir la degradación del suelo y frenar la pérdida de biodiversidad** (*descontaminación*). Algunos microbios liberan al medio ambiente nanomáquinas (enzimas extracelulares) que degradan compuestos químicos nocivos. Entre ellos se incluyen compuestos que no se degradan fácilmente, como los plásticos (analizados en el Objetivo 12), así como otros que son tóxicos y causan pérdida de biodiversidad (por ejemplo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados). Los microbios del medio ambiente ya están ayudando a remediar la contaminación humana, pero su labor es lenta. En la actualidad, los investigadores estudian cómo estos microbios, sus nanomáquinas o las versiones sintéticas de éstas podrían utilizarse para limpiar los lugares contaminados de forma más eficaz.

Posibles implicaciones para las decisiones

1. Individual

- a. ¿Cómo me veo a mí mismo como parte del sistema integrado de la Tierra?
 - i. ¿Qué consumo?
 - ii. ¿Qué produzco?
 - iii. ¿De dónde proceden mis alimentos?
 - iv. ¿De dónde viene mi oxígeno?
 - v. ¿Qué ocurre con mis residuos?
- b. La atmósfera es el conducto que conecta todos los ecosistemas de la Tierra. ¿Cómo afectan los gases que produzco a los ecosistemas y poblaciones de todo el mundo? ¿Qué opciones puedo tomar en mi propia vida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de mis actividades?

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

2. *Políticas comunitarias*

- a. ¿Qué materiales entran en mi comunidad? ¿Qué materiales exportamos? ¿Cómo podemos mejorar el reciclaje a nivel local?
- b. ¿Cómo gestionamos nuestros residuos? (¿Cómo utilizamos los microbios en este proceso?) ¿Podemos hacerlo mejor?
- c. ¿Hay mucho carbono secuestrado en mi comunidad o en sus alrededores (por ejemplo, en bosques o praderas marinas)? ¿Cómo podemos garantizar su almacenamiento? ¿Podemos tomar decisiones para mejorar el almacenamiento local de carbono?

3. *Políticas nacionales*

- a. Producción de gases de efecto invernadero y gestión del carbono.
- b. Prevención de la eutrofización.
- c. Aplicación de medidas de rehabilitación medioambiental.

Participación de los alumnos

1. *Discusión en clase:*

- a. ¿Cómo nuestra comunidad local impacta los ecosistemas y poblaciones de forma global?
- b. ¿Cómo interactúas químicamente con tu entorno? ¿Qué consumes y de dónde procede? ¿Qué residuos produces y adónde van a parar?

2. *Sensibilización de los alumnos*

- a. ¿Qué opciones de estilo de vida toman usted, su familia y sus vecinos que contribuyen a la producción de gases de efecto invernadero?
- b. ¿Qué está haciendo ya su comunidad para influir positivamente en la vida sostenible?
- c. ¿Cómo podéis tú y tus compañeros abordar el cambio climático en vuestra escuela?

3. *Ejercicios*

- a. Miles de millones de toneladas de residuos alimentarios acaban cada año en los vertederos de todo el mundo. Recopila datos de restaurantes locales sobre la cantidad de comida de la que se deshacen en una semana o un mes y qué hacen con ella. ¿Cuál crees que es el impacto del desperdicio de alimentos? ¿Qué ideas tienes para hacerle frente?
- b. Conoce tu vertedero local. Diseña una investigación para entender de qué manera tu vertedero local contribuye o combate el cambio climático.
- c. Elabore una encuesta y recopile datos de amigos, familiares y vecinos para conocer sus pautas de consumo y producción en su comunidad. ¿Cómo afectan estas pautas a las comunidades y ecosistemas circundantes? ¿Cómo afectan a la Tierra a escala global?
- d. Crear un modelo de la comunidad perfecta del futuro, diseñada para la sostenibilidad. Considera cómo y dónde se producen los alimentos y se gestionan los residuos. ¿Qué papel desempeñan los microbios (y sus nanomáquinas) en esta comunidad futura?

Base empírica, lecturas complementarias y material didáctico

Sobre la evolución de la vida y la historia biogeoquímica de la Tierra

Falkowski, Paul G. *Vida Ingeniosa: Cómo los microorganismos hacen a la tierra habitable*. Princeton University Press, 2015.

Falkowski, Paul G., Tom Fenchel, and Edward Delong. 2008. “El ingenio microbiano que

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

conduce los ciclos biogeoquímicos". *Science* 320(5879): 1034-1039.
<https://doi.org/10.1126/science.1153213>

Canfield, Donald E. *Oxígeno: Cuatro Billones de Años de Historia*. Vol. 20. Princeton University Press, 2014. Langmuir, Charles H., and Wally Broecker. *How to Build a Habitable Planet*. Princeton University Press, 2012.

Hazen, Robert M. *La Historia de la Tierra: Los primeros 4.5 Billones de Años, desde el polvo estelar hasta el planeta viviente*. Penguin, 2013.

Sobre microbios y tratamiento de aguas residuales

Kumar, Vinod, A.K. Chopra, and Ajendra Kumar. 2017. "Los lodos de depuradora (biosólidos), un recurso para la agricultura sostenible." *Archives of Agriculture and Environmental Science* 2.4: 340-347. <https://doi.org/10.26832/24566632.2017.020417>

Sobre microbios/nanomáquinas que degradan el plástico

Ball, Phillip. 2017. Plásticos en el menú. *Nature Materials* 16: 606.
<https://doi.org/10.1038/nmat4912>

Jiménez, Diego Javier, et al. "Fusión de plásticos, microbios y enzimas: lo más destacado de un taller internacional." *Applied and Environmental Microbiology* 88.14 (2022): e00721-22.
<https://journals.asm.org/doi/pdf/10.1128/aem.00721-22>

<https://www.youtube.com/watch?v=nWfBvRm4640> En este vídeo, un científico demuestra que una enzima degrada los plásticos en menos de un día.

<https://pdb101.rcsb.org/motm/277> Molécula del mes» sobre las enzimas devoradoras de plástico del Banco de Datos de Proteínas.

Investigación en curso sobre el origen de la vida, su evolución y la búsqueda de vida en otros planetas.

<https://www.youtube.com/watch?v=DGTPPy2fNyc> Este vídeo analiza la investigación en curso dirigida por el Dr. Paul Falkowski (Universidad de Rutgers) sobre el origen y la evolución de las nanomáquinas clave.

<https://astrobiology.nasa.gov/> La NASA destaca aquí las investigaciones en curso y los nuevos descubrimientos.

<http://prebioticchem.info/seminar-series/index.html> Este enlace contiene una lista de seminarios científicos de acceso público sobre química prebiótica y entornos terrestres primitivos.

<https://astrobiology.nasa.gov/ask-an-astrobiologist/episodes/> El programa Ask an Astrobiologist de la NASA explora la investigación sobre la búsqueda de vida en el universo.

Recursos para la enseñanza de la evolución.

<https://www.evolutionsociety.org/content/education/resources-for-teachers-and-students.html>
Recursos para la enseñanza de la evolución de la Sociedad para el Estudio de la Evolución, incluidos programas, cursos y talleres para profesores.

Recursos para explorar la estructura y función de las proteínas

<https://pdb101.rcsb.org/> El Banco de Datos de Proteínas (PDB) es el mayor repositorio de estructuras proteicas del mundo. Aquí, el PDB ofrece recursos para aprender sobre proteínas.

<https://pdb101.rcsb.org/learn/videos> Aquí, el PDB comparte vídeos que ilustran el funcionamiento de las proteínas, incluido uno sobre «Cómo funcionan las enzimas».

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

Recursos para la enseñanza de los ciclos biogeoquímicos y el cambio climático

<https://www.us-ocb.org/science-support/outreach-education/> Recursos del grupo de Carbono Oceánico y Biogeoquímica, incluidas lecciones en vídeo sobre el ciclo del carbono e infografías desarrolladas para uso educativo de los científicos.

<https://www.nsta.org/science-teacher/science-teacher-august-2019/carbon-cycle-and-climatechange> Planes didácticos sobre el ciclo del carbono de la National Science Teaching Association

<https://www.youtube.com/watch?v=kIAE-L8xTp0> Este vídeo muestra la expansión y contracción estacional de la fotosíntesis (verde), conocida como la “respiración” de la Tierra.

Libros infantiles relacionados

Encuentre la serie Sunlight (libros sobre nuestro planeta vivo escritos por la escritora e ilustradora Molly Bang y la ecologista Penny Chisholm) y recursos para su uso en el aula aquí: <https://thesunlightseries.com/>

Glosario

aeróbico: Que requiere oxígeno (O₂)

energía de activación: Cantidad mínima de energía necesaria para iniciar una reacción.

sitio activo: Lugar de una enzima donde se une un sustrato y se produce una reacción química.

aminoácidos: componentes básicos de las proteínas; moléculas orgánicas simples que contienen un grupo amino (-NH₂) en un extremo y un grupo carboxilo (-COOH) en el otro. Cada aminoácido tiene un grupo químico único (cadena lateral) que afecta a sus propiedades químicas.

amonio/amoníaco: Forma reducida e inorgánica del nitrógeno con la fórmula química NH₄⁺ (amonio) o NH₃ (amoníaco). El amonio y el amoníaco se interconvierten fácilmente y sólo se diferencian por un protón, que está en función del pH del medio.

anaerobio: Que requiere ausencia de oxígeno (O₂).

atmósfera: Masa de gases que envuelve un planeta; la gravedad del planeta impide que estos gases se pierdan en el espacio.

ciclos biogeoquímicos: El ciclo de los elementos químicos a través de la biosfera, la geosfera, la atmósfera y la hidrosfera de la Tierra.

biosfera: El componente biológico de un planeta; la suma de todos los ecosistemas y organismos.

catalizar: Provocar o acelerar una reacción química utilizando un agente que no se consume en el proceso (un catalizador).

clima: Estado medio de la atmósfera a largo plazo (>30 años).

enzima: proteína que provoca una reacción química determinada

electrón: Partícula subatómica estable de carga negativa que orbita alrededor de los núcleos atómicos (protones y neutrones).

eutrofización: El enriquecimiento de nutrientes (normalmente nitrógeno y fósforo) en una masa de agua por encima de los límites saludables para el ecosistema local. En condiciones eutróficas, el rápido crecimiento de las algas puede desbordar el ecosistema y provocar la aparición de zonas con deficiencia de oxígeno. La desoxigenación se produce porque las bacterias heterótrofas consumen la materia orgánica de las algas.

inorgánico: Compuestos que no contienen enlaces carbono-hidrógeno y/o carbono-carbono y que

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

no proceden de la vida.

fotosíntesis: El proceso por el cual la vida cosecha energía directamente del sol para producir materia orgánica

proteína: Biomoléculas compuestas por cadenas plegadas de aminoácidos.

protón: Partícula subatómica estable con carga positiva que, junto con los neutrones, constituye el núcleo de un átomo; el número de protones en el núcleo de un átomo determina sus propiedades químicas.

gen: Unidad básica de la herencia que se transmite de padres a hijos; secuencia de moléculas distintas (nucleótidos) que codifica las instrucciones para fabricar proteínas.

genoma: El conjunto completo de genes de un organismo.

geosfera: Componente sólido e inorgánico de un planeta; la suma de todas las rocas y minerales.

gas de efecto invernadero: Gas atmosférico que contribuye al calentamiento del planeta al impedir la salida de la energía radiada desde la Tierra (radiación de onda larga).

habitabilidad: Potencial de un entorno para albergar vida

hidrosfera: El agua de la superficie de un planeta, incluidos sus océanos, mares, lagos y ríos.

metabolismo: Conjunto de procesos químicos que mantienen la vida y que se llevan a cabo en un organismo; incluye los procesos por los que un organismo adquiere energía y crece.

metanogénesis: Respiración anaeróbica que produce metano.

orgánico: Se refiere a compuestos que contienen enlaces carbono-hidrógeno y/o carbono-carbono y se producen o derivan de la vida

oxidante: Sustancia que puede aceptar electrones en las reacciones de oxidación-reducción.

zonas deficientes en oxígeno: Región de una masa de agua que carece de oxígeno, normalmente porque la eliminación de oxígeno a través de la respiración supera la reposición de oxígeno a través de la mezcla.

proteína: Molécula biológica formada por una o varias cadenas de aminoácidos que se pliegan en una estructura determinada.

reactante: sustancia que experimenta una reacción química.

respiración: Producción de energía mediante la oxidación (eliminación de electrones) de sustancias orgánicas complejas. En la respiración aeróbica, el oxígeno se utiliza como oxidante (aceptor de electrones). En la oxidación anaeróbica, se utilizan otras sustancias químicas (por ejemplo, nitrato y sulfato).

sustrato: Molécula que se une a una enzima y sobre la que actúa.

Notas adicionales

La portada obra de D. Blankmann, muestra el equilibrio entre la fotosíntesis (del árbol) y la respiración aeróbica (de los niños y del árbol). Las proteínas que se muestran representan partes clave de las vías metabólicas que median en estos procesos. En el caso de la fotosíntesis, se muestran el fotosistema I (proteína recolectora de luz) y la Rubisco, que representan las reacciones dependientes de la luz (producción de energía) y de la luz (producción de carbono orgánico). (Nota: sólo el fotosistema II produce realmente O₂.) Para la respiración, se representan una hexoquinasa y un piruvato deshidrogenasa; estas proteínas desempeñan un papel importante en la ruptura y oxidación del carbono orgánico, que en última instancia libera energía, CO₂ y H₂O. Tenga en cuenta que estas rutas metabólicas son complejas e implican docenas de proteínas diferentes, además de las que se muestran. Los códigos de identificación PDB para las cuatro enzimas mostradas son: 1JB0, 1GK8, 1BDG y 3EXG.

Un marco educativo de microbiología centrado en los niños

Determinar la estructura de las proteínas en el laboratorio es un proceso arduo. Las estructuras proteínicas que se muestran aquí se resolvieron mediante:

- Andersson, I. Large structures at high resolution: the 1.6 Å crystal structure of spinach ribulose 1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase complexed with 2-carboxyarabinitol bisphosphate. *J. Mol. Biol.* 259, 160–174 (1996).
- Gill, H. S. & Eisenberg, D. The crystal structure of phosphinothricin in the active site of glutamine synthetase illuminates the mechanism of enzymatic inhibition. *Biochemistry* 40, 1903–1912 (2001).
- Jordan, P. et al. Three-dimensional structure of cyanobacterial photosystem I at 2.5 Å resolution. *Nature* 411, 909–917 (2001).
- Kato, M. et al. Structural basis for inactivation of the human pyruvate dehydrogenase complex by phosphorylation: role of disordered phosphorylation loops. *Structure* 16, 1849–1859 (2008).
- Mulichak, A. M., Wilson, J. E., Padmanabhan, K. & Garavito, R. M. The structure of mammalian hexokinase-1. *Nat. Struct. Biol.* 5, 555–560 (1998).
- Taylor, T. C., Backlund, A., Bjorhall, K., Spreitzer, R. J. & Andersson, I. First crystal structure of Rubisco from a green alga, *Chlamydomonas reinhardtii*. *J. Biol. Chem.* 276, 48159–48164 (2001).