

COPIANDO LA NATURALEZA PARA COMBATIR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Por Max G. Levy

Un antiguo proceso químico permitió que la Tierra se convirtiera en un lugar exuberante lleno de vida. Ahora los investigadores están replicando este proceso en un intento de frenar el calentamiento global.

Cada planta, animal y persona debe su vida a una secuencia de reacciones químicas: la fotosíntesis. El proceso, que convierte el agua y el dióxido de carbono en alimentos utilizando la luz solar, evolucionó por primera vez en cianobacterias hace más de 2 mil millones de años. Eso es correcto. Las plantas no fueron los primeros organismos en desarrollar la fotosíntesis, aunque son más conocidas por ello. Las cianobacterias son las que originalmente llenaron la atmósfera con el subproducto gaseoso de la fotosíntesis, el oxígeno (O_2), que preparó el escenario para una vida más diversa en la Tierra.

Como beneficiarios de la fotosíntesis, los humanos dependen de las plantas en una especie de balancín de carbono. Las plantas absorben CO_2 y liberan O_2 . Almacenan ese carbono como azúcar. Las enredaderas colgantes, la hierba y los árboles crecen al extraer átomos de carbono del aire. Nosotros hacemos lo contrario, absorbiendo O_2 y liberando CO_2 . Finalmente, todo lo que comemos completa el traspaso: el ser humano come la planta (o el animal que ya lo hizo), el ser humano exhala, la planta almacena carbono y el ciclo continúa.

Este balancín es parte del ciclo del carbono mucho más amplio que ha afectado el balance de radiación de nuestro planeta. La tala de grandes extensiones de bosques y la quema de combustibles fósiles a base de carbono hacen que aumenten los niveles de CO_2 , uno de los principales gases de efecto invernadero. Y las plantas de la Tierra, junto con otras partes naturales del ciclo del carbono, no pueden restablecer el equilibrio por sí mismas.

Pero ¿qué pasaría si pudiéramos copiar lo que hacen las plantas para tomar parte de ese exceso de CO_2 para producir combustibles de manera sostenible, en lugar de depender tanto del carbono fosilizado?

“La fotosíntesis artificial es un enfoque realmente atractivo”, dice Jillian Dempsey, química de la Universidad de Carolina del Norte, Chapel Hill. “Puedes almacenar la energía del sol en los enlaces de [moléculas]”.

A una escala lo suficientemente grande, tales procesos alimentados por el sol podrían darnos suficientes moléculas de almacenamiento de energía para producir combustibles a partir del aire y el agua, como lo hacen las plantas y las cianobacterias.

LAS PLANTAS HACEN QUE SE VEA FÁCIL

Si bien es tentador escribir la fotosíntesis como una simple reacción—entra CO_2 y

CICLO DEL CARBONO



Los átomos de carbono van y vienen entre la atmósfera y las rocas, suelo, plantas y el océano a través de procesos químicos; algunos procesos son muy lentos, y otros suceden rápidamente. Este intercambio constante se llama ciclo del carbono. Las actividades humanas han interrumpido el equilibrio natural de este ciclo utilizando combustibles fósiles una vez enterrados, que de lo contrario habría mantenido una gran cantidad de carbono debajo de las capas de la Tierra.

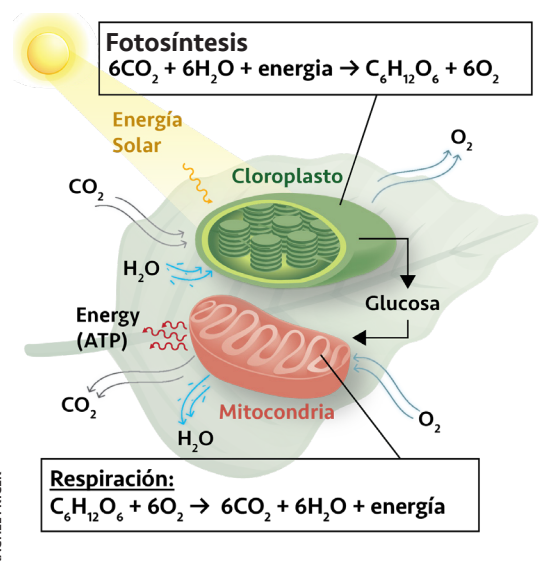
agua, una hoja produce su alimento y sale O_2 —la química que se produce es sorprendentemente compleja. Es una danza de protones, electrones y maquinaria biológica que tuvo millones de años para evolucionar.

Esa maquinaria corta los enlaces fuertes en H_2O y CO_2 para construir moléculas más complejas, como la glucosa ($C_6H_{12}O_6$).

Lo que no muestran las ecuaciones de reacción es lo que estimula las reacciones: los **catalizadores**, que son sustancias que aceleran reacciones químicas específicas. Con los catalizadores adecuados, los investigadores han logrado construir pequeños dispositivos que no solo imitan la fotosíntesis natural, sino que también la superan.

FOTOSÍNTESIS 2.0

Echemos un vistazo al papel que juega la catálisis en la fotosíntesis. Primero, las plantas absorben la luz solar en sus cloroplastos, que son organelos que se encuentran en las células de las



plantas y las algas. Dentro de los cloroplastos hay pigmentos de clorofila que absorben principalmente el rojo y el azul, pero no las longitudes de onda de la luz verde (de ahí su color). Esta energía absorbida impulsa las reacciones químicas de la planta.

La fotosíntesis artificial necesita su propia versión de clorofila. Para encontrar sustancias que actúen como clorofila en una hoja artificial, los científicos están probando pigmentos naturales, tintes sintéticos u otros materiales que absorben la luz visible.

En las plantas, una vez

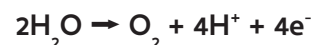
que se absorbe la luz, una complicada cadena de catalizadores biológicos llamados enzimas llevan a cabo reacciones en un orden preciso para crear combustibles como la glucosa. En una hoja artificial, debe suceder algo similar—excepto que, en lugar de glucosa, la hoja debe producir un combustible, como el etanol, que nuestras tecnologías impulsadas por la energía pueden utilizar. Alternativamente, algunas tecnologías de hojas artificiales no requieren CO_2 , sino que absorben agua para producir combustible de hidrógeno (H_2).

EL COMBUSTIBLE MÁS SENCILLO

El hidrógeno, cuando se consume en una celda de combustible, no produce emisiones de carbono—su única emisión es el agua. Hoy en día, la mayor parte del H_2 se produce a partir del metano (CH_4) en un proceso que emite CO_2 .

Si los científicos pudieran descubrir cómo hacer H_2 utilizando la luz solar de una manera asequible, los combustibles de hidrógeno serían más sostenibles.

Para hacer esto con una hoja artificial, tendría que llevar a cabo las reacciones de **oxidación** y **reducción** necesarias para producir H_2 a partir de H_2O , o "separación del agua". Al igual que la fotosíntesis, las reacciones parecen sencillas en el papel.



Pero en la práctica, la separación del agua es un proceso electroquímico que depende de la electricidad para alimentar las reacciones de oxidación y reducción.

“Si coloco una taza de agua al sol, no se convertirá espontáneamente en hidrógeno y oxígeno”, dice Dempsey, quien diseña catalizadores para la producción de combustible solar.

El H₂O no se separa fácilmente de sus electrones y protones, o iones de hidrógeno (H⁺). La electrólisis necesita un flujo constante de energía eléctrica externa, que puede ser suministrada por una hoja artificial alimentada por energía solar. Una corriente ayuda a separar el átomo de oxígeno de los iones de hidrógeno al alejar los electrones de la molécula de agua (oxidación). Esos electrones fluyen de una parte de la celda electroquímica, conocida como **ánodo**, a otra, conocida como **cátodo**. Allí, los iones H⁺ se emparejan con los electrones (reducción) para formar gas H₂, que forma burbujas que luego pueden capturarse para su uso.

Los catalizadores, como el óxido de hierro y el platino, aceleran la formación y ruptura de enlaces químicos.

“La catálisis nos da acceso a transformaciones químicas aparentemente imposibles”, dice Dempsey.

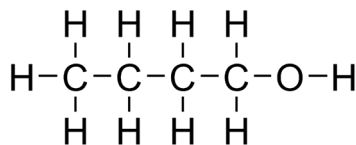
FABRICACIÓN DE COMBUSTIBLES DE CARBONO

El etanol, (C₂H₅OH), generalmente constituye el 10% de la gasolina que se bombea a la mayoría de los automóviles. Algunos automóviles de combustible flexible pueden manejar hasta un 85% de C₂H₅OH.

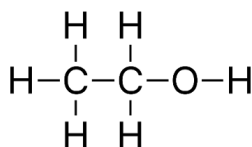
Hoy en día, la mayor parte del etanol en los Estados Unidos proviene de la fermentación de cultivos, que dependen de una gran cantidad de tierra, agua y energía de combustibles fósiles para crecer. Aquí es donde entran los investigadores de hojas artificiales. Son catalizadores de ingeniería para producir etanol y butanol (C₄H₉OH) de una manera más sostenible. El butanol tiene usos similares al etanol.

“Para construir carbohidratos o etanol o butanol”, dice Dempsey, “necesitamos coreografiar cuidadosamente cómo se están reensamblando los protones y los electrones”.

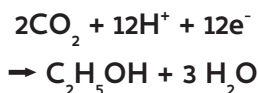
Convertir un par de moléculas de CO₂ en C₂H₅OH requiere mezclar alrededor de 12 protones y 12 electrones.



BUTANOL



ETANOL



Los científicos diseñan nuevos catalizadores para la fotosíntesis artificial para que el proceso sea lo más eficiente y sostenible posible.

“Hemos llegado al punto en que los científicos han realizado suficientes estudios preliminares para saber que lo que estamos proponiendo se puede lograr”, dice Dempsey.

INSPIRACIÓN NATURAL

Lo extraordinario es que estas coreografías químicas funcionan. Entran luz, CO₂ y agua; sale combustible. Y de alguna manera, los químicos han diseñado catalizadores para producir estos combustibles de manera más eficiente que las plantas que producen azúcares.

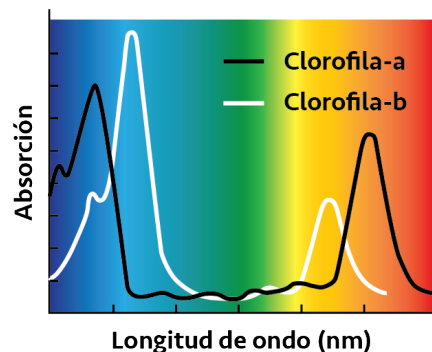
AMERICAN CHEMICAL SOCIETY



Un tipo primitivo de hoja artificial, desarrollada por Daniel Nocera, se hizo con una oblea recubierta de silicio catalizador que, en la luz del sol, separa el agua en moléculas de H₂ y O₂.

¡PODER DEL PIGMENTO!

Para hacer su propia comida, las plantas verdes contienen pigmentos de clorofila que absorben energía para conducir reacciones químicas. Los pigmentos absorben luz con niveles de energía adecuados para excitar sus electrones. El tipo y la cantidad de los enlaces de una molécula influyen en lo que esas longitudes de onda de absorción realmente son. La clorofila-a y la clorofila-b son importantes pigmentos que permiten la fotosíntesis en plantas verdes. Absorben la luz en las partes azul-violeta y rojo-anaranjado del espectro electromagnético.



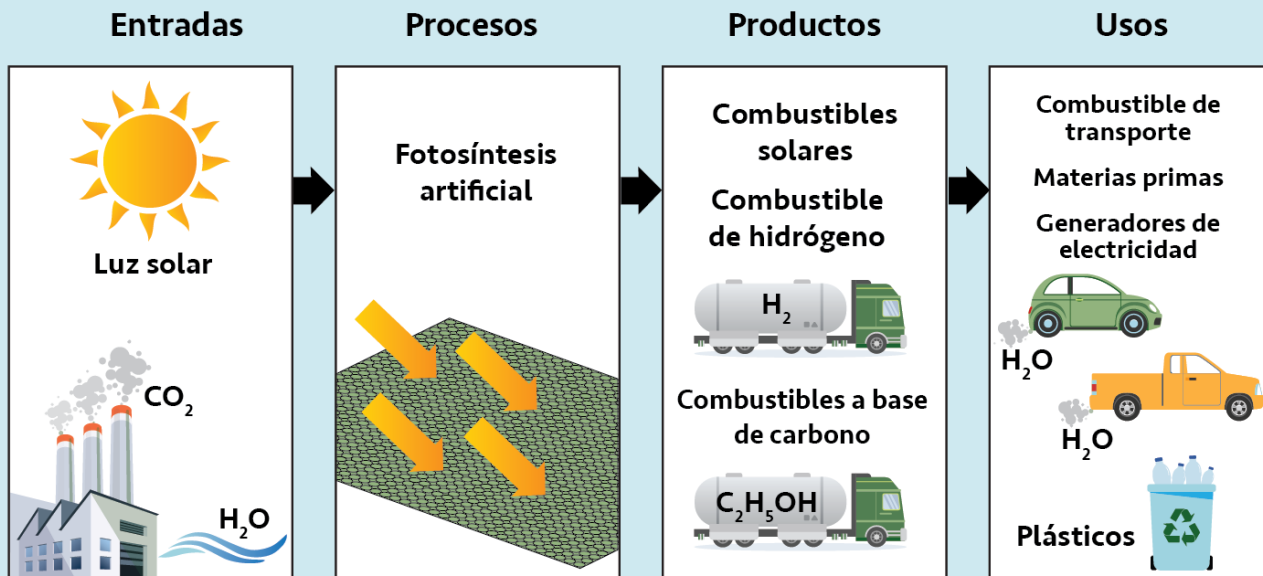
RS GRAPHX, INC.

“Resulta que la fotosíntesis natural no es un proceso tan eficiente”, dice Dempsey. Solo alrededor del 1% de la energía solar que llega a una planta se convierte en energía combustible. La eficiencia de las tecnologías de hojas artificiales puede superar el 20%.

Sin embargo, esto no significa que la fotosíntesis artificial copie la fotosíntesis natural en todos los aspectos. Las plantas son menos eficientes, pero producen combustibles más complejos con mayor precisión que los dispositivos artificiales. “Algunos de estos sistemas que se muestran prometedores producen una gran cantidad de cosas—12 productos diferentes mezclados”, dice Dempsey.

Un importante desafío actual en la investigación de catalizadores consiste en diseñar materiales que aceleren reacciones específicas y produzcan solo los productos que queremos.

APROVECHANDO LA LUZ SOLAR PARA ENERGÍA Y PRODUCTOS



HACIENDO UNA HOJA ARTIFICIAL

Entonces, ¿cómo se vería realmente un dispositivo de hoja artificial?

“Básicamente se parece a esta estructura de emparedado—las capas de catalizador están intercalando al fotoabsorbente”, dice Peter Agbo, científico del personal del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley que trabaja con el Centro Conjunto para la Fotosíntesis Artificial.

Los dispositivos existentes también son pequeños. Un dispositivo de hidrógeno con una eficiencia del 12.6% que Agbo construyó recientemente tenía menos de una pulgada de ancho. Para que la fotosíntesis artificial sea práctica, necesita producir combustibles a gran escala para competir con el suministro de energía existente en el mundo de los combustibles fósiles relativamente baratos y abundantes.

La ampliación de la fotosíntesis artificial aún está lejos, pero está avanzando. “Hemos identificado los desafíos científicos fundamentales”, dice Dempsey. “Estamos aprendiendo a unir las diferentes piezas”.

Lo que en última instancia podría llevar a la tecnología a cruzar la línea de meta es otro regreso a la naturaleza—pero esta vez, en lugar de simplemente copiarla, los científicos quieren usarla. Los ingenieros de la Universidad de California en Berkeley, por ejemplo, combinaron recientemente nanopartículas con bacterias vivas no fotosintéticas.

Su microbio preferido, *Moorella thermoacetica*, reduce naturalmente el CO_2 para producir una pequeña cantidad de ácido acético (CH_3COOH). Cuando los investigadores alimentaron a las bacterias con pequeños grupos de átomos de oro y los expusieron a la luz solar, los grupos de oro pudieron extraer electrones del aminoácido cisteína y enviarlos a las enzimas del microbio. Los electrones interactuaron con las enzimas del insecto, lo que impulsó a las bacterias a producir mucho más ácido acético a partir de CO_2 de lo que normalmente tendrían. El ácido acético se puede utilizar para fabricar combustibles y otros productos químicos valiosos.

Se necesitará mucho tiempo y dinero antes de que la fotosíntesis artificial pueda competir con los combustibles fósiles. Pero la inversión necesaria no se acercará al costo social del cambio climático. Una encuesta

reciente de más de 2,000 economistas proyectó que los daños económicos del cambio climático alcanzarán los \$1.7 trillones por año para el 2025 y aproximadamente \$30 trillones por año para el 2075.

La fotosíntesis artificial podría retroceder lentamente hacia un mejor equilibrio en el balancín de carbono del planeta.

Max G. Levy es un escritor científico independiente que vive en Los Ángeles, California.

REFERENCIAS

- Hisatomi, T.; Kubota, J.; Domen, K. Avances recientes en Semiconductores para la Separación de agua fotocatalítica y fotoelectroquímica. *Chemical Society Reviews*, 43 (22), págs. 7520–7535; 13 de enero de 2014: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/cs/c3cs60378d> [consultado en agosto de 2021].
- Kistler, T. A.; Danilovic, N.; Agbo, P. A. Dispositivo fotoelectroquímico monolítico evolucionando el hidrógeno en agua pura. *Journal of the Electrochemical Society*, 166 (13), H656; 9 de junio de 2019: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.1151913jes> [consultado en agosto de 2021].
- Yang, P. Luz solar líquida: la Evolución de los biohíbridos fotosintéticos. *NanoLetters*, Sociedad Americana de Química, 21 (13), págs. 5453–5456; 2 de julio de 2021: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.nanolett.1c02172> [consultado en agosto de 2021].