

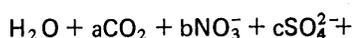
BIOCONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA QUÍMICA.

Por Manuel Losada Villasante

Dada la trascendencia de un descubrimiento de esta índole, sobre todo cuando nos hallamos inmersos en una situación caótica de carestía de recursos energéticos, publicamos una síntesis del interesante trabajo realizado por el equipo del Profesor Losada, del Departamento de Bioquímica de la Universidad de Sevilla, el cual, durante quince años, ha realizado una continua y decisiva labor en el esclarecimiento de la naturaleza lineal en la "ruta de reducción del nitrógeno" en el proceso de la fotosíntesis.

Introducción

La vida en la Tierra depende de un proceso único que sólo las algas y las plantas verdes son capaces de realizar: la conversión de la luz solar en energía electrónica y, subsiguientemente, en energía química fisiológica, para su utilización en la síntesis endergónica de compuestos inestables—materia orgánica y oxígeno molecular— a partir de otros más estables—agua, anhídrido carbónico, nitrato, sulfato y fosfato. Es decir, las plantas clorofílicas toman del medio, como nutrientes, los elementos biogénicos en su estado de máxima oxidación, o sea, desprovistos de potencial químico útil, y, gracias a la energía de la luz, los reducen con el hidrógeno del agua e incorporan en material celular, desprendiendo, a la par, como producto de desecho, resultante de la fotooxidación del agua, oxígeno molecular en cantidades estequiométricas, de acuerdo con la ecuación general:



Los productos que de esta manera fabrican para sí las plantas (hidratos de carbono, hidrocarburos, lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc.) y el propio oxígeno que simultáneamente eliminan sirven, a su vez, directa o indirectamente, de alimentos plásticos y energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta. La luz solar es, por tanto, en último término, la fuente primaria de energía que, a través del proceso fotosintético, sustenta e impulsa a todo el mundo vivo desde sus más remotos orígenes.

Por otro lado, la energía solar almacenada en los combustibles fósiles—que han tenido igualmente su origen en la actividad fotosintética de las plantas durante los últimos tres mil millones de años— es también la más importante fuente de energía que hoy día utiliza la humanidad, si bien insuficiente a plazo no muy lejano para sus necesidades exponencialmente crecientes. Al ritmo actual de consumo, se prevé que las reservas existentes de gas y petróleo se agotarán en las próximas décadas, y las de carbón, en un siglo. A esta crisis energética se une otra igualmente grave, motivada por la carencia de alimentos, y más concretamente de proteínas, para la nutrición suficiente y sana del género humano.

Aunque el hombre dispone ya de otras prometedoras fuentes de energía, hoy por hoy depende casi exclusivamente de la energía solar, fósil o actual, para satisfacer sus acuciantes necesidades energéticas y alimentarias. Si a esto añadimos que la energía solar es la más abundante, continua y lim-

pia que poseemos, no cabe duda que es importante, y quizás indispensable, aprender a utilizarla prontamente de la manera más efectiva y rentable, imitando en lo posible el proceso fotosintético que con extraordinaria eficacia realiza la maquinaria clorofílica, especialmente adaptada para la fotoconversión. Se calcula que el reino vegetal en su conjunto fija la energía que gratuitamente nos envía el sol (10^{17} vatios) con una eficiencia del 0,1 por 100, lo que equivale a 100 billones de vatios, es decir, a 200 veces lo que en la actualidad produce la agricultura de todo el globo y consumo la humanidad como alimentos, y a 10 veces lo que el mundo moderno gasta como energía.

Aunque, hasta la fecha, la explotación por el hombre de una fuente de energía tan poderosa como la solar ha sido muy limitada, las graves crisis de energía y alimentos a que acabamos de hacer referencia han provocado en la mayoría de los países avanzados una reacción muy positiva, en el sentido de estimular al máximo las investigaciones destinadas a un más amplio y profundo conocimiento de la fotosíntesis y a un mejor aprovechamiento de la energía solar. El bioenergista conoce ya, de hecho, mucho sobre el mecanismo de la fotosíntesis como proceso de conversión de energía, y sabe qué hace la bacteria, el alga o la planta para transformar eficientemente la energía solar en energía química o eléctrica. Sus conocimientos son, por ello, en cierto modo previo para que el ingeniero pueda ensayar las posibilidades tecnológicas que ofrece este maravilloso proceso. Si consiguiésemos aprovechar la energía solar con un ren-

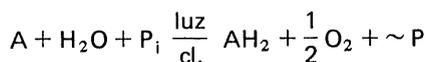
dimiento del 10 por 100 —valor que pueden alcanzar las plantas en períodos cortos y condiciones óptimas de campo—, a España le bastaría con el 1 por 100 de su superficie, es decir, con media provincia, para hacer frente a todas y cada una de sus necesidades energéticas.

Aparentemente, la única alternativa a la energía solar, que podría representar también la solución definitiva al problema energético, y que equivaldría a tener un sol en la Tierra, es la energía nuclear de fusión, ciertamente no exenta de dificultades y riesgos.

La fotosíntesis de poder reductor y energía de enlace

Acaba de cumplirse el segundo centenario del descubrimiento de la fotosíntesis por Priestley. A lo largo de estos dos siglos, el concepto de fotosíntesis ha experimentado una continua evolución, con énfasis cada vez más acusado en su carácter de proceso de conversión de energía, consistente, en esencia, en reacciones de óxido-reducción promovidas por la luz y destinadas a la fabricación de energía química, a saber, poder reductor y enlaces de fosfato ricos en energía. En efecto, hoy sabemos, gracias fundamentalmente a los trabajos de Arnon y su grupo, que las reacciones más características de la función clorofílica o fotosíntesis —con las que prácticamente termina la fotoquímica del proceso— incluyen no sólo la fotólisis del agua en poder reductor (H_2) y oxígeno molecular, sino la fotofosforilación del fosfato inorgánico (P_i) en fosfato orgánico ($\sim P$). En esencia, estas reacciones consisten en un flujo de electrones —sensibilizado por la clorofila y dirigido por la luz— que se acopla con la formación de energía química de enlace. Si el flujo de electrones es cíclico y transcurre por un circuito cerrado el proceso resulta únicamente en la formación de enlaces de fosfato ricos en energía, y se denomina *fotofosforilación cíclica*. En cambio, si el circuito es abierto, el proceso resulta, además, en la oxidación del agua —que actúa de dador de electrones al comienzo de la cadena de transporte— y en la reducción de un aceptor, A, —que actúa de aceptor al final de la cadena—, por lo que se denomina *fotofosforilación no-cíclica*. Ambos procesos pueden resumirse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$P_i \frac{\text{luz}}{\text{cl.}} \sim P$$



Arnon y sus colaboradores han aislado y caracterizado el aceptor terminal de electrones, A, de la cadena de transporte. Se trata de una sulfoferroproteína de bajo peso molecular y potencial similar al del electrodo de hidrógeno, que, de acuerdo con su función, se ha denominado ferredoxina.

La figura 1 muestra esquemáticamente el mecanismo de las dos reacciones básicas que en conjunto integran la fase luminosa de la fotosíntesis. El proceso se inicia con la absorción de los fotones por los pigmentos principales (clorofila *a*) y accesorios (clorofila *b* de las células verdes, ficoeritrobilina de las algas rojas, ficocianobilina de las algas verde-azuladas, fucoxantol de las algas pardas, etc.) de los fotosistemas I y II del aparato fotosintético. Las moléculas de los pigmentos, funcionando a modo de antenas, captan la energía luminosa, se

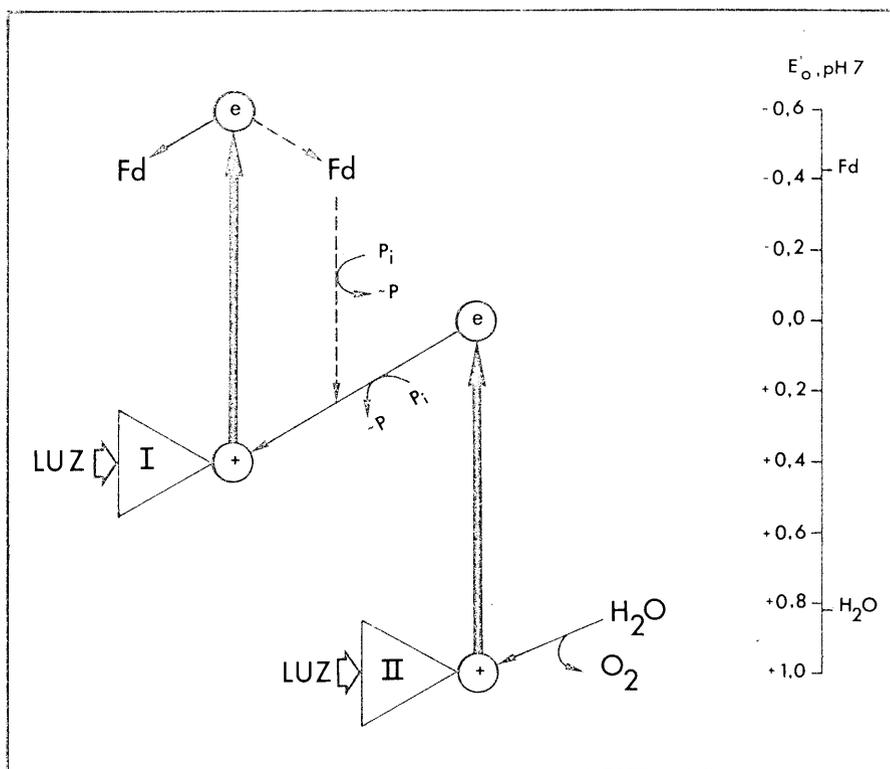


Fig. 1. Representación esquemática del flujo cíclico y no-cíclico de electrones de las reacciones luminosas de la fotosíntesis. En el flujo no-cíclico de electrones, el donador inicial es el agua, que se oxida durante el proceso a oxígeno molecular (E'_{O_2} , pH 7, 0,82 V), y el aceptor terminal, la ferredoxina (E'_{Fd} , pH 7, -0,42 V). Se trata, pues, de un flujo de electrones contra gradiente, impulsado por la energía de la luz y sensibilizado por la clorofila y pigmentos auxiliares de los fotosistemas. El transporte de un electrón desde el agua a la ferredoxina requiere dos cuantos de luz y la participación de los fotosistemas II y I, asociados en serie. Cuando los centros de reacción —o moléculas especiales de clorofila *a*— de estos fotosistemas se activan por la absorción de un cuanto de luz, ceden un electrón a un elevado nivel de reducción (-0,6 V, el del fotosistema I, y 0,0 V, el del fotosistema II) y quedan ellos mismos oxidados (0,4 V, el del fotosistema I, y 1,0 V, el del fotosistema II) y, por tanto, en condiciones de aceptar otro electrón. El centro de reacción fotoactivado del sistema I cede un electrón a la ferredoxina y lo recibe a su vez, a través de una cadena de transporte, del aceptor reducido del centro de reacción del fotosistema II, que, finalmente, actúa de fotooxidante terminal y lo quita al agua. En el flujo cíclico de electrones, el centro de reacción fotoactivado del sistema de pigmentos I cede su electrón a la ferredoxina y, a continuación, lo acepta nuevamente de ella misma, a través de una cadena de transporte. La energía liberada al "caer" un par de electrones de la ferredoxina reducida (flujo cíclico) o del aceptor reducido del fotosistema II (flujo no-cíclico) a la clorofila a oxidada del fotosistema I se emplea en la síntesis química de enlaces de fosfatos ricos en energía.

excitan a un estado inestable, expeliendo un electrón a una órbita más externa, y transfieren por resonancia la energía absorbida a las moléculas vecinas de clorofila *a*. Los cuantos absorbidos continúan emigrando, como excitones, más o menos en zig-zag, a través de las moléculas de clorofila *a*, hasta que son finalmente atrapados por los centros colectores (verdaderos sumideros energéticos) de los fotosistemas, en los que tienen lugar las reacciones fotoquímicas primarias de la fotosíntesis.

Estos centros de reacción, en los que la energía luminosa se convierte en energía química, están constituidos por moléculas especiales de clorofila *a*, calculándose que existe uno diferente en cada fotosistema. Puesto que estas moléculas de clorofila *a* especiales están íntimamente asociadas con los aceptores y donadores primarios de las reacciones fotoquímicas, pueden, en su estado excitado, ionizarse, cediendo un electrón a su correspondiente aceptor y quedando, en consecuencia, ellas mismas oxidadas, en condiciones de recibir un electrón de su donador respectivo. Teniendo en cuenta la energía de un einstein de luz roja (42 kcal), se puede calcular que una molécula de clorofila *a* excitada por un cuanto de esa longitud de onda equivale, en principio, a una especie de batería eléctrica de casi 2 voltios de potencial. Como puede apreciarse en la figura, el pigmento fotoexcitado del fotosistema I genera un reductor fuerte (-0,6 V) y un oxidante débil (+ 0,4 V), y el del fotosistema II, un reductor débil (0,0 V) y un oxidante fuerte (1,0 V). Conviene indicar que las reacciones fotoquímicas que acabamos de considerar no son exclusivas de la clorofila *a*. Con anterioridad se había encontrado que, al iluminar una sustancia colorante que a la temperatura del aire líquido, se producía el mismo compuesto que al oxidarla químicamente a la temperatura ambiente, demostrándose que uno de los procesos fotoquímicos más generales es la pérdida de un electrón por una molécula excitada, que, como resultado, se oxida.

Cuando el electrón, expulsado de su orbital en la molécula de clorofila *a* del centro de reacción del fotosistema I, es captado por la ferredoxina —que actúa de aceptor primario de electrones de dicho fotosistema—, la propia clorofila queda cargada positivamente y en condiciones de aceptar nuevamente un electrón. En consecuencia, si el electrón excitado vuelve a su origen

dando un rodeo y pasando por una serie de estaciones transformadoras —a través de una cadena de transporte que incluye citocromos como mediadores— se produce la conversión de la energía redox acumulada en los sistemas ferredoxina_{red}/ferredoxina_{ox} — clorofila/clorofila_{ox} en energía química, que la célula almacena, finalmente, bajo la forma de enlaces de pirofosfato, como adenosíntrifosfato, o ATP.

En cambio, si la molécula de clorofila oxidada del fotosistema I neutraliza su carga positiva con electrones procedentes, en último término, del agua, tiene lugar un flujo no-cíclico, y, por tanto, abierto, de electrones, que permite, por un lado, la oxidación del agua, con desprendimiento de oxígeno molecular, y, por otro, la síntesis de poder reductor, como ferredoxina reducida.

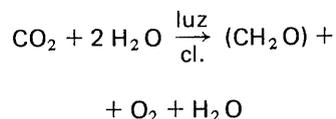
El pobre poder reductor del agua (E'_0 , pH 7, 0,82 V) exige, sin embargo, para que sus electrones puedan ser transferidos a la clorofila oxidada del fotosistema I, que sean previamente activados en una segunda reacción fotoquímica, catalizada igualmente por una forma especial de clorofila *a*, asociada con el conjunto de pigmentos que constituye el fotosistema II.

En el transporte fotosintético de electrones que resulta en la fotólisis del agua, la misión primordial del fotosistema I es, pues, suministrar electrones a la ferredoxina, y la del fotosistema II, sustraerlos del agua para que puedan ser transferidos al fotosistema I. La interconexión entre ambos fotosistemas se efectúa a través de una serie de transportadores (plastoquinona, citocromos, plastocianina), que permiten la caída de los electrones desde el nivel más reducido del fotosistema II al más oxidado del fotosistema I. La energía que se libera durante este transporte no-cíclico de electrones es también captada por los sistemas fosforilantes fotosintéticos y almacenada, bajo la forma de enlaces de pirofosfato, como ATP.

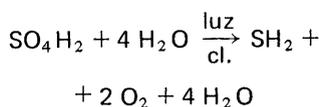
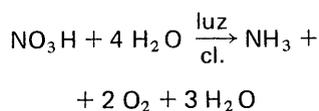
Los distintos tipos de fotosíntesis

Poder reductor, (H_2) y enlaces de fosfato ricos en energía, $\sim P$, constituyen, en cierto modo, los productos finales de la fase luminosa de la fotosíntesis. Arnon los ha denominado, en conjunto, poder asimilatorio, ya que permiten la reducción y posterior asimilación de los elementos biogénicos primordiales: carbono, nitrógeno y azufre.

Por razones históricas y cuantitativas, la fotosíntesis se ha identificado comúnmente, desde casi su descubrimiento, con la reducción del anhídrido carbónico a carbohidrato que realizan las plantas a expensas de la energía de la luz, de acuerdo con la ecuación:



Se ha ignorado así el hecho fundamental de que las células verdes fabrican sus biomoléculas más representativas (proteínas y ácidos nucleicos), no sólo a partir de dióxido de carbono, sino también a partir de otros nutrientes inorgánicos igualmente oxidados al límite, concretamente nitrato y sulfato, que, de una manera más o menos directa, han de fotorreducirse por el agua, a expensas de la energía de la luz, a amoníaco y sulfuro, respectivamente, de acuerdo con las ecuaciones:

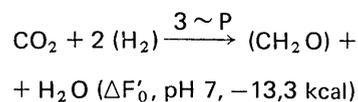


Por lo que se refiere al nitrato, baste considerar que la reducción del nitrógeno nítrico a amoniacal y su incorporación como grupo α -amino en aminoácidos, requiere $8 + 2 = 10$ electrones, frente a los 4 de la reducción del carbono del anhídrido carbónico a carbohidrato. En consecuencia, si partimos del dato experimental de que las algas en crecimiento exponencial contienen 8 por 100 de N y 50 por 100 de C, podemos fácilmente calcular que en estos microorganismos, una parte del poder reductor originado en la fotosíntesis se emplea en reducir al nitrógeno y tres en reducir al carbono.

No obstante, quizá la razón principal por la que, hasta ahora, se ha relegado a un plano muy secundario la posible relación entre la asimilación del nitrato y la fotosíntesis, ha provenido de la idea preconcebida —y defendida tenazmente por muchos seguidores del gran bioquímico Warburg— de que, en contraste con la reducción del carbono, la reducción del nitrógeno debía estar muy alejada de las reacciones

fotosintéticas propiamente dichas. De manera que generalmente se aceptaba, sin pruebas convincentes ni suficiente rigor científico, que los carbohidratos constituían los primeros productos de la fotosíntesis, y que ellos, a su vez, servían de fuente inmediata de poder reductor para la reducción posterior del nitrato *in vivo*. La realidad ha demostrado, sin embargo, que esta interpretación no era correcta, y que, de hecho, la reducción fotosintética del nitrato es mucho más directa que la del anhídrido carbónico, pudiendo considerarse como uno de los ejemplos más simples y relevantes de fotosíntesis.

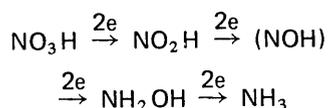
La ruta de reducción del carbono en fotosíntesis es de naturaleza cíclica y fue descubierta esencialmente en los años 50 por Calvin y su grupo. El poder reductor lo suministra la ferredoxina reducida en la luz, pero no directamente, sino a través del nucleótido de nicotinamida NADPH. Por ser el potencial del par NADPH/NADP⁺ (E'_0 , pH 7, $-0,32$ V) más alto que el del par (CH₂O)/CO₂ (E'_0 , pH 7, $-0,42$ V), la reacción es endergónica, y requiere, para hacerse exergónica, 3 enlaces de fosfato ricos en energía, de acuerdo con la ecuación:



De hecho, como hemos indicado y muestra la figura 2, el proceso es en realidad de carácter cíclico, y en él participan hacia una docena de enzimas, de modo que no se trata simplemente de la desoxigenación e hidrogenación del CO₂ a formaldehído libre. El CO₂ se incorpora primero a una pentosa, que se escinde en dos fragmentos ácidos de 3 carbonos. Después, las dos moléculas de ácido se reducen a 2 moléculas de triosa, y, finalmente, éstas regeneran la pentosa y ceden el fragmento (CH₂O) a un esqueleto carbonado. En el reajuste de los grupos (CH₂O), participan derivados azucarados de 3, 4, 5, 6 y 7 carbonos, que intercambian fragmentos de 2 y 3, apareciendo, normalmente, al final, el carbono reducido como glucosa o almidón.

La ruta de reducción del nitrógeno en fotosíntesis es de naturaleza lineal y ha sido esencialmente esclarecida durante los últimos 15 años, habiendo sido decisivas las aportaciones del grupo de Sevilla. Basándose, principalmente, en consideraciones químicas, los

bioquímicos habían aceptado tradicionalmente, desde finales del siglo pasado, que la reducción biológica del nitrato debería tener lugar en 4 pasos sucesivos de 2 electrones cada uno, formándose, como intermediarios, nitrito, hiponitrito e hidroxilamina, de acuerdo con el siguiente esquema:



Ultimamente ha quedado ya definitivamente establecido, después de largas y enconadas controversias, que la reducción asimilatoria del nitrato, tanto en plantas verdes como en algas, hongos y bacterias, ocurre en sólo dos estadios: primero, el nitrato se reduce a nitrito, en una reacción catalizada por la molibdo proteína nitrato reductasa, y, a continuación, el nitrito se reduce a amoníaco, en una reacción catalizada por la sulfo-ferro-sirohemo proteína nitrito reductasa, según el esquema:

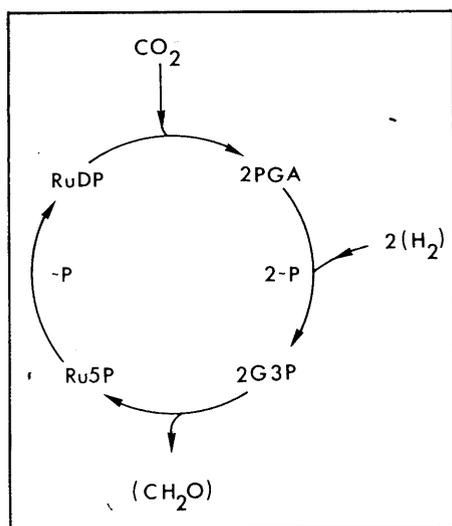
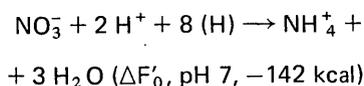


Fig. 2. Representación esquemática del ciclo de la asimilación fotosintética del anhídrido carbónico. El anhídrido carbónico se fija, primero, a una molécula de pentosa previamente activada, la ribulosa-difosfato, que se escinde entonces en dos moléculas de ácido 3-fosfoglicérico. Después, las dos moléculas de ácido fosfoglicérico se reducen, previa activación por fosforilación de sus grupos carboxilos, a dos moléculas de la triosa gliceraldehido-3-fosfato. Finalmente, éstas se reajustan y ceden un fragmento monocarbonado reducido (CH_2O), a la par que regeneran la pentosa, ribulosa-5-fosfato.

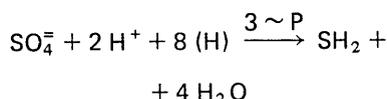
En las algas verde-azuladas, los dos enzimas que integran el sistema reductor de nitrato están íntimamente ligados a las partículas fotosintéticas y son dependientes de ferredoxina. En consecuencia, por ser el potencial del par ferredoxina_{red}/ferredoxina_{ox} (E'_0 , pH 7, -0,42) mucho más bajo que el de los pares $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ (E'_0 , pH 7, 0,42 V) y $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-$ (E'_0 , pH 7, 0,33 V), la reacción en su conjunto es fuertemente exérgica, y no requiere ATP:



La ruta de reducción del azufre en fotosíntesis no ha sido aún definitivamente establecida, aunque parece ocurrir en dos pasos de 2 y 6 electrones, respectivamente, de acuerdo con la siguiente secuencia, lineal o cíclica, de reacciones, que incluye sulfito y sulfuro, en forma combinada o libre:



El poder reductor lo suministra, en principio, la ferredoxina reducida en la luz, directamente o a través de NADPH. Aunque el potencial del par S^-/SO_4^- es más alto (E'_0 , pH 7, -0,21 V) que el de la ferredoxina o el nicotinamida-nucleótido, la reacción conjunta requiere al menos 2 ~ P, tal vez 3, puesto que ha de salvar el primer paso "cuesta-arriba" de reducción del sulfato a sulfito (E'_0 , pH 7, -0,46 V), merced a una activación previa del sulfato por adenilación, seguida quizás de una posterior fosforilación:

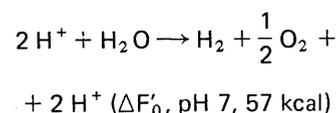


Sistemas químicos de bioconversión

Por las razones apuntadas en la introducción de este artículo, durante los últimos años se ha despertado un gran interés en la investigación de los sistemas fotosintéticos que pueden utilizar la fotólisis del agua para la producción de combustibles. A este respecto, merece la pena que dediquemos unas líneas a comparar el sistema fotosintético de reducción del nitrato a amoníaco, especialmente estudiado en nuestro laboratorio, con otros sistemas fotosintéticos redox reales o posibles (Fig. 3).

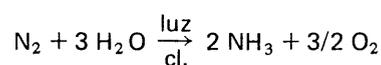
Puesto que todos los sistemas redox que vamos a considerar utilizan ferredoxina —el primer aceptor de electrones del fotosistema I— como donador primario de electrones, bien directamente o a través de los nicotinamida-nucleótidos, podemos fácilmente calcular, teniendo en cuenta los respectivos potenciales redox y el requerimiento de 2 cuantos de luz por electrón, la energía que requiere, en cada caso, la transferencia de electrones, y el rendimiento de la reacción global.

El sistema más sencillo sería el que utilizase la *fotorreducción de protones a hidrógeno molecular*, lo que supone la transferencia de 2 electrones (4 cuantos) del par $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (E'_0 , pH 7, 0,82 V) al par H_2/H^+ (E'_0 , pH 7, -0,42 V), según la ecuación:



La reacción requiere, pues, 4 einstein de luz roja (168 kcal) por mol de hidrógeno producido, y ocurre con un rendimiento teórico del 34 por 100, que, si se tiene en cuenta la fosforilación acoplada con el transporte de electrones, 1 ~ P/2e, asciende al 38 por 100. El inconveniente de este atractivo sistema, que ya ha sido ensayado *in vitro*, es que requiere la adición de enzimas auxiliares y la eliminación absoluta de oxígeno molecular, precisamente uno de los productos de la reacción.

Otro sistema de enormes posibilidades sería el que realizase la *fotorreducción de N_2 a NH_3* , pero, como el de fotoproducción de hidrógeno, sólo opera en estricta anaerobiosis, presentando, además, enormes requerimientos de ATP (15 ATP/ N_2). Aunque las algas verde azuladas fijan fotosintéticamente N_2 , parece que el proceso es complicado y requiere la cooperación de dos tipos de células: las vegetativas, que realizan una fotosíntesis normal, y los heterocistos, que reciben de ellas los fotosintatos y los utilizan como fuente de poder reductor para, con el concurso del ATP que ellas mismas sintetizan, llevar a cabo la fijación del N_2 . El acoplamiento directo de la fotólisis del agua con la reducción del N_2 ofrece, pues, un interés fascinante, pero quizás dificultades insalvables:



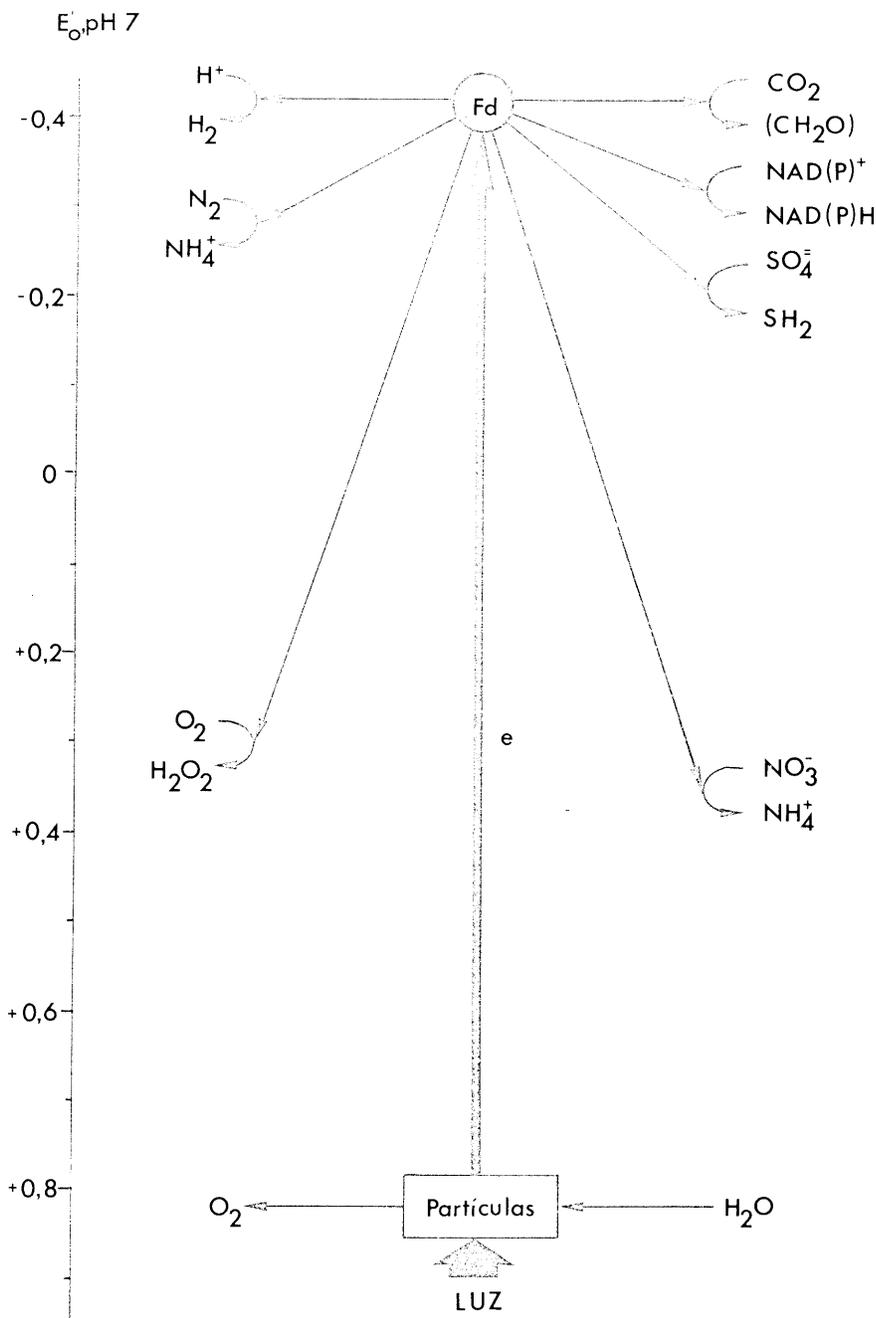
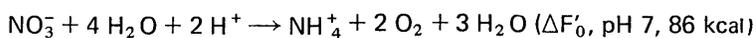


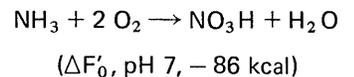
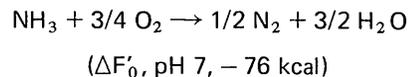
Fig. 3. Representación esquemática de diversos sistemas fotosintéticos redox de bioconversión. La operación de cualquier sistema requiere, primero, la fotooxidación del agua por las partículas fotosintéticas y la fotoreducción concomitante de la ferredoxina. La ferredoxina reduce entonces, en la oscuridad, a favor de gradiente —sin el concurso de ATP— o en contra de gradiente —con el concurso de ATP— una variedad de aceptores terminales de electrones, tales como H^+ , O_2 , N_2 , $NAD(P)^+$, CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} , etc.

En cuanto hoy sabemos, el único sistema biológico de fotoconversión que opera en condiciones aeróbicas y sin ninguna clase de aditamentos es el constituido por partículas de las algas verde-azuladas *Anacystis nidulans* o *Nostoc*, que permite la fotoreducción del nitrato a amoníaco con agua como reductor, de acuerdo con la ecuación global:

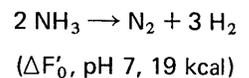


Teniendo en cuenta que la transferencia de 8 electrones desde el agua al nitrato para la reducción completa de éste a amoníaco requiere 16 cuantos (672 kcal), el rendimiento del proceso global resulta ser de hacia el 13 por 100, si no se considera la fosforilación acoplada, y del 18 por 100 si se toma en consideración la síntesis concomitante de 4 ~ P.

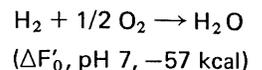
El amoníaco, aparte de su extraordinario interés químico y bioquímico, es un excelente y poderoso combustible, y como tal se emplea en la propulsión de cohetes. Por el oxígeno se oxida bien a nitrógeno molecular o a nitrato, de acuerdo con las siguientes reacciones simplificadas, muy exergónicas:



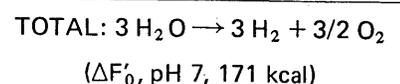
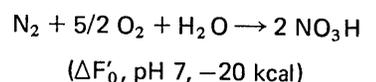
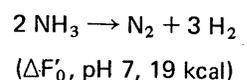
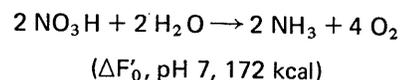
Por otro lado, el amoníaco puede considerarse como una fuente transportable de hidrógeno, ya que en forma líquida proporciona más hidrógeno del que pudiera comprimirse en el mismo volumen, según indica la reacción de descomposición, débilmente endérgica:



Por ello, puede utilizarse en sopletes oxhídricos para la soldadura de metales, acoplando su descomposición, según la reacción anterior, con la combustión del hidrógeno, fuertemente exérgica:



Al menos desde un punto de vista teórico, puede tener gran interés la constitución de un sistema fotorreductor de nitrato a amoníaco, como base, para integrarlo en otro más complejo, capaz de producir, como resultado neto, la fotólisis de 3 moléculas de agua a expensas de 32 cuantos, según la siguiente secuencia de reacciones simplificadas:



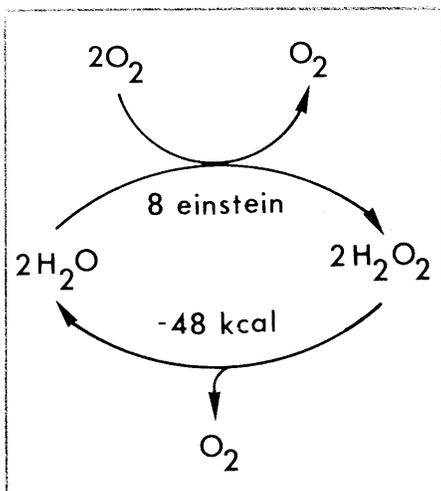
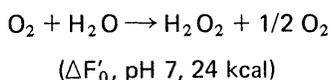
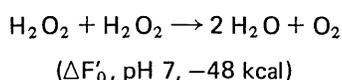


Fig. 4. Representación esquemática de un sistema de bioconversión de la energía luminosa en energía química por reducción fotosintética del oxígeno a peróxido de hidrógeno y posterior utilización de la energía en éste almacenada, por autodescomposición del mismo. Con el concurso de 8 einsteins de luz, las partículas fotosintéticas catalizan la transferencia de 4 moles de electrones de 2 moles de agua a 2 moles de oxígeno molecular. Los dos moles de peróxido de hidrógeno así originados se oxidan-reducen, liberando las 48 kilocalorías almacenadas y cerrando el ciclo.

Para terminar, vamos a referirnos a un sistema que puede ser el más idóneo por su simplicidad y requerimientos, a saber, el de *fotorreducción del oxígeno molecular a peróxido de hidrógeno*. Como es bien sabido, el aparato fotosintético de algas y plantas cataliza, de hecho, esta reacción, acoplándola con la fotólisis del agua:



Teniendo en cuenta que la transferencia de 2 electrones desde el agua al oxígeno para reducirlo a peróxido de hidrógeno, requiere 4 cuantos (168 kcal), el rendimiento de la reacción global es del 14 por 100, si no se considera la fosforilación acoplada, y del 18 por 100 si se tiene ésta en cuenta. El peróxido de hidrógeno, como el amoníaco, es un combustible de calidad. Al actuar simultáneamente como reductor y oxidante, reacciona consigo mismo, descomponiéndose en agua y oxígeno, según la siguiente reacción exergónica:



De acuerdo con lo que antecede, cabe imaginar un sistema fotosintético que realizase la conversión de la energía solar en agua oxigenada, y permitiese, a continuación, disponer de la energía que libera este combustible al descomponerse. El ciclo completo sería tan sencillo y limpio como el que esquemáticamente representa la figura 4.

Agradecimiento

Las investigaciones que se realizan en nuestro Departamento sobre las líneas que recoge el presente artículo, han sido subvencionadas por los Philips Research Laboratories (Holanda) y la National Science Foundation (USA).



Don **Manuel Losada Villasante** es actualmente catedrático y director del Departamento de Bioquímica, de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Sevilla, y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y, anteriormente, ha trabajado como Investigador en Fisiología Celular, Genética y Bioquímica en la Universidad de Münster i.W., Alemania (1954-55); Laboratorio Carlsberg, Copenhague, Dinamarca (1955-56); y Universidad de California, en Berkeley, USA (1958-61). A su regreso de Estados Unidos, fue nombrado director del recién creado Instituto de Biología Celular, del CSIC en Madrid, puesto que desempeñó hasta su traslado a Sevilla.

Sus campos de investigación son, principalmente, la fotosíntesis y el metabolismo intermediario y su regulación, en particular en relación con la asimilación del nitrato, habiendo publicado alrededor de un centenar de trabajos científicos y revisiones sobre estos temas y pronunciado numerosas conferencias en Universidades y Centros de Investigación de Europa y América. El profesor Losada es académico numerario de la Real Academia de Ciencias, Madrid; consejero del CSIC, y miembro de varias sociedades científicas nacionales e internacionales.

Bibliografía

- ARNON, D.I.: "Proc. Natn. Acad. Sci. USA", 68, 2883 (1971).
 CANDAU, P., MANZANO, C. y LOSADA, M.: "Nature", 262, 715 (1976).
 LOSADA, M.: "La fotosíntesis del nitrógeno nítrico", discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias, Madrid, 1972.
 LOSADA, M.: "J. Molec. Catal.", 1, 245 (1976)
 ORTEGA, T., CASTILLO, F. y CARDENAS, J.: "Biochem. Biophys. Res. Commun.", 71, 885 (1976).
 RELIMPIO, A. M^a, VEGA, J.M^a, GARCIA-GUERRERO, M. y LOSADA, M.: "Potenciometría y Bioenergética", Universidad de Sevilla (en prensa).
 WARBURG, O.: "A. Rev. Biochem.", 33, 1 (1964).