

Luis Eduardo Mora Osejo *Fotosíntesis*
(*Divulgación Científica*)

En todo tiempo preocupación fundamental del hombre ha sido la de comprender los fenómenos naturales mediante la ciencia. Sin embargo, la ciencia es desde hace apenas unos 300 años actividad preponderante en la vida del hombre y apenas de unos 150 años acá fuente de tecnología e industrias. En los últimos años la ciencia ha multiplicado sorprendentemente su dinámica de desarrollo, goza del reconocimiento y aceptación universal. Con todo podemos convenir que apenas se ha iniciado su acción transformadora del mundo.

Tomando como ejemplo las investigaciones sobre el fenómeno de la fotosíntesis veamos de qué manera opera la progresiva consolidación del conocimiento sobre un fenómeno natural mediante la ciencia, o más concretamente, mediante la rigurosa aplicación del método científico. La fotosíntesis consiste en la fabricación de la materia viva en las plantas, a partir del gas carbónico de la atmósfera y del agua.

Para comprender mejor la importancia que el estudio de este fenómeno tiene hoy el mundo científico, bástenos recordar que la vida, desde el punto de vista químico, consiste en la síntesis y en la desintegración regulada de los compuestos del carbono. El carbono es el elemento químico más versátil que existe, como que a él pueden adherirse al mismo tiempo cuatro elementos monovalentes diferentes, o iguales; o también el propio carbono; y de esta suerte formar cadenas o anillos de gran complejidad y variedad. La enorme diversidad de organismos nos sugiere que las células han desarrollado una gran capacidad en la elaboración de tales compuestos y en los procesos que los sintetizan o los destruyen.

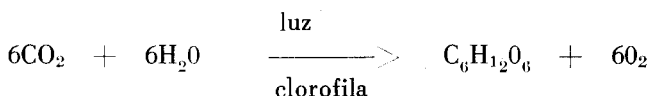
La planta recibe del medio ambiente los elementos químicos que integran los compuestos orgánicos, en forma de óxidos, tales como CO_2 , H_2O , NO_3 , SO_4 . Esto implica que antes que la planta pueda aprovechar tales elementos es necesario separarlos del oxígeno; separación que implica consumo de energía. Así la fuente de la energía requerida para separar el oxígeno de la molécula del agua y poner a disposición de las plantas los átomos de H, es la luz solar. Los átomos de H a la vez son indispensables para la síntesis de compuestos orgánicos (carbohidratos). La fabricación de las sustancias orgánicas que constituyen el cuerpo de la planta depende en consecuencia de la fotosíntesis, por consiguiente, sin la fotosíntesis no sería posible la vida vegetal y animal sobre la tierra, si se exceptúa un grupo relativamente reducido de bac-

terias que utiliza la energía contenida en ciertos compuestos químicos, para la síntesis de su propia sustancia orgánica; de donde se deduce también que todos los alimentos de que dispone el hombre derivan en últimas de la actividad fotosintetizadora de las plantas. No resulta por tanto exagerado afirmar que la fotosíntesis es el fenómeno bioquímico de mayor importancia que ocurre sobre la superficie de nuestro planeta. Por otra parte es asimismo el fenómeno en el cual interviene el mayor volumen de masas reaccionantes. Se ha calculado que un metro cuadrado de superficie foliar es capaz de fotosintetizar en una hora, 1 gramo de azúcar. De este dato se desprende que la vegetación de la tierra anualmente fabrica 10^{11} toneladas de carbono en las hojas. Cantidad que ni siquiera pudiéramos imaginar. Para ello quizás resulte significativo establecer un paralelo entre la producción anual del hierro, carbón y petróleo en todo el mundo y el rendimiento fotosintético de las plantas. La primera alcanza un total de 10^9 , es decir que el producto de la fotosíntesis es 100 veces mayor que la producción total de hierro, carbón y petróleo.

Consideramos ahora los procesos químicos, físicos y los exclusivamente biológicos que intervienen en este importante fenómeno natural.

Aristóteles opinaba que las plantas ingieren el suelo disuelto y digerido en el agua del propio suelo, y explicaba "en las plantas los alimentos no necesitan experimentar ninguna otra modificación una vez se hallan en el interior de la planta. Por lo cual el organismo vegetal puede simplificarse al extremo y ostentar el lujo de poseer hojas verdes, cuya única razón de existir es la de proteger los frutos de los rayos del sol". Este concepto prevaleció durante toda la edad media. Solamente en el siglo XVII se logró un avance en lo concerniente al esclarecimiento del problema de la nutrición de las plantas, cuando el investigador holandés Van Helmont plantó un vástago de álamo en una porción de suelo, cuyo peso se determinó previamente. Después de cultivar el vástago de álamo durante 5 años Van Helmont encontró que el peso del suelo había decrecido apenas en 3 onzas; en tanto que el vástago de álamo se había convertido en un árbol joven, cuyo peso en conjunto sobrepasaba las 163 libras con respecto al inicial. Van Helmont concluyó que el agua adherida al suelo y no solamente el suelo, es cuanto sirve de alimento a la planta. Cerca de 100 años más tarde Priestley descubrió que si se encierran en una cámara de

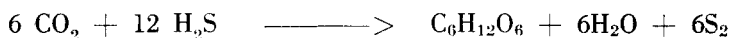
vidrio, un animal y una planta, tanto el animal como la planta sobreviven. Pero si se encierran separadamente, sucumben ambos. Priestley concluyó: "la planta purifica el aire exhalado por el animal, es decir que absorbe el CO_2 exhalado por el animal y a la vez toma el oxígeno exhalado por la planta". Años más tarde se descubrió que este efecto dependía de la presencia de la luz y del tejido verde de las plantas. Pero únicamente al finalizar el siglo XIX, con fundamento en los trabajos del botánico alemán Julius Sachs se pudo establecer la expresión química que describe estos fenómenos. El aporte de Sachs consistió en establecer que los gránulos de almidón encerrados en los cloroplastos son los primeros productos visibles de la asimilación. La expresión química es la siguiente:



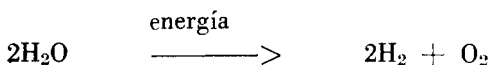
Mediante polimerización de moléculas del azúcar glucosa se obtiene almidón el cual se condensa en gránulos, tal cual lo observado por Sachs.

Pero los investigadores no se contentaron con este resultado, necesitaba saber cuáles son los productos intermediarios entre el CO_2 y el azúcar glucosa, y cuáles son los biocatalizadores, o sea, las enzimas que regulan la cadena de reacciones. Por su parte a los biofísicos les interesaba determinar los mecanismos que permiten a la célula vegetal capturar la energía radiante, contenida en los Cuantos de la luz solar para luego transformarlos en energía química. La expresión química anterior representa apenas una aproximación o descripción global del fenómeno fotosintético, que dice muy poco sobre la conversión del CO_2 del aire en carbohidrato.

El descubrimiento de Van Niel de la Universidad de Stanford contribuyó poderosamente a esclarecer los problemas pendientes para entender los detalles de dicha conversión. Van Niel descubrió que ciertas bacterias producen compuestos orgánicos mediante la fotosíntesis, pero con la circunstancia de que estas bacterias utilizan el ácido sulfúrico y no el agua como la fuente de hidrógeno, así:



La extraordinaria similitud de los dos procesos hizo pensar de inmediato que el oxígeno emergente en la fotosíntesis de las plantas verdes, provendría del agua y no del CO_2 como hasta la fecha se había supuesto. Este experimento posibilitó la descripción de la fotosíntesis en términos de una oxidorreducción, es decir, oxidación de la molécula de H_2O y reducción de los átomos de carbono. Es decir:



El oxígeno escapa en forma de gas y el hidrógeno queda disponible para realizar procesos de reducción química. Mediante la adición de átomos de hidrógeno, el CO_2 se reduce a un compuesto orgánico (carbohidrato). A modo de resumen podemos decir que en la primera fase de la fotosíntesis la molécula de agua se fracciona en dos partes, mediante la intervención de la energía lumínica. Esta primera fase de la fotosíntesis recibe el nombre de fotólisis.

Hasta hace poco tiempo nada se conocía sobre el intrincado proceso de reacciones por las cuales pasa el carbono de las moléculas del CO_2 del aire hasta llegar a formar parte de una molécula del azúcar glucosa, mediante la adición de átomos de hidrógeno. Conocemos ahora en gran parte este intrincado proceso, gracias a los trabajos de Melvin Calvin y el grupo de sus colaboradores en el Laboratorio de Biodinámica de la Universidad de California, Berkeley. Pero los descubrimientos de Calvin no hubieran sido posibles si anteriormente no se hubiese perfeccionado el método de identificar sustancias orgánicas mediante trazadores radioactivos. Método que se debe a un descubrimiento anterior efectuado por los Profesores Samuel Ruben y Martin Kammen, de la Universidad de California. Estos investigadores lograron identificar un isótopo radioactivo del carbono, el carbono 14. Este isótopo tiene un período de vida media de más de 5.000 años, lo cual significa que mientras dura un experimento el carbono 14 presenta radiactividad sensiblemente constante. Ruben y Kammen se dieron perfecta cuenta de la importancia de este descubrimiento para la identificación de compuestos químicos y la reconstrucción de las

reacciones que tienen lugar en los procesos biológicos y ellos mismos procedieron a realizar, en tal sentido, algunos experimentos. Comenzaron por suministrar CO_2 con carbono 14 a ciertas plantas para luego identificar los distintos compuestos orgánicos en los cuales aparecía el carbono 14, mediante la utilización de detectores de radiactividad, como el contador Geiger-Müller o el método de la autorradiografía en película sensible a los rayos X y cromatografía.

Calvin y sus discípulos continuaron los trabajos de Ruben y Kamen pero prefirieron utilizar en sus experimentos en lugar de plantas superiores suspensiones de algas unicelulares fáciles de cultivar en cantidad suficiente, tales como *Chlorella* y *Scenedesmus*, a las cuales se suministra el CO_2 radiactivo, en vez de CO_2 común y corriente.

Calvin descubrió que la cadena de reacciones en las cuales interviene el carbono CO_2 antes de convertirse en el azúcar glucosa, es decir, un carbohidrato, corresponde a un ciclo en el cual se deben distinguir tres componentes estables y numerosos compuestos inestables. Los compuestos estables son: el difosfato de ribulosa, encargado de aceptar al CO_2 , el ácido fosfoglicérico, que se abrevia PGA y el aldehído fosfoglicérico, que se abrevia PGAL. El ciclo de reacciones se denominó desde entonces Ciclo de Calvin, en honor a su descubridor, quien fue galardonado en el año de 1961 con el Premio Nobel, gracias a estos trabajos.

Naturalmente que aún restan en este campo muchos interrogantes por resolver, particularmente en lo relacionado con la identificación de las sustancias intermediarias inestables de brevísima duración, que aparecen dentro del Ciclo de Calvin.

En lo concerniente a los intercambios de energía que tienen lugar en el proceso fotosintético se han logrado considerables progresos en los últimos años. Uno de los problemas sobre el cual ya se dispone de conocimientos adecuados se refiere a la determinación de la fuente de energía necesaria para reducir el ácido fosfoglicérico al nivel de un carbohidrato tricarbonado, por ejemplo, el fosfato de triosa. Los últimos descubrimientos demuestran que gran parte de la energía necesaria proviene del compuesto ATP (trifosfato de adenosina), el cual es sintetizado en los cloroplastos. Puesto que este compuesto se sintetiza por lo general en los mitocondrios, se llegó a pensar en una cooperación entre los mitocondrios y los cloroplastos en el proceso

fotosintético. Pero recientemente se pudo establecer que cuando se iluminan adecuadamente los cloroplastos pueden sintetizar por sí solos ATP. Este compuesto posee un alto contenido de energía, la cual hace posible, con ayuda de otro compuesto, el nucleótido de trifosfo-piridina (TPN), la reducción del ácido fosfoglicérico PGA. De ello se deduce que el papel de la luz solar en el proceso fotosintético consiste en primer lugar en la transmisión del hidrógeno del agua al nucleótido de trifosfo-piridina y en la síntesis de ATP en los cloroplastos. Sin embargo quedan también muchos interrogantes aún por resolver. Tales interrogantes derivan de las dificultades para explicar adecuadamente las razones por las cuales no se realiza el fenómeno fotosintético en el siguiente experimento: en un tubo de ensayo se mezclan soluciones de clorofila molecular, trifosfato de adenosina y nucleótido de trifosfo-piridina, en presencia de la luz. Se puede entonces observar que no se produce emanación del gas oxígeno, es decir, que en estas condiciones no es posible se lleve a cabo la fotólisis del agua, y menos aún la síntesis de carbohidratos. Los físicos se preguntan inmediatamente: ¿cuál es la causa del fracaso de este experimento?

Este interrogante requiere especial significación si se tiene en cuenta que si se modifica el experimento anterior en el sentido de utilizar en lugar de solución de clorofila molecular una suspensión de cloroplastos, si se logra producir "in vitro" emanación de gas oxígeno y por consiguiente fotólisis del agua (reacción de Hill).

De acuerdo con la teoría de los Cuantos sabemos que no es posible fraccionar la energía lumínica de cualquier manera, comoquiera que la energía lumínica se presenta siempre en fracciones o partículas mínimas denominadas fotones, a las cuales corresponde una determinada cantidad de energía de acuerdo con la frecuencia y la longitud de onda de la radiación luminosa.

Se sabe que $6,0^2 \times 10^{23}$ Cuantos equivalen a 1 mol Cuantos, y además se ha podido establecer que 1 mol Cuantos de luz roja equivale a 40 kilo-calorías, lo cual no es suficiente para romper una molécula de agua y producir átomos o iones de hidrógeno y oxígeno, pues para ello son necesarias 640 kilocalorías. Esto nos lleva a considerar otro interrogante que todavía no ha podido ser esclarecido por los físicos. ¿Es posible recolectar cuantos, almacenarlos y completar una determinada cantidad de energía, por ejemplo, lo suficientemente grande

como para romper una molécula de agua y producir átomos libres de hidrógeno y oxígeno?

Veamos lo que ocurre cuando una molécula de clorofila absorbe un Cuanto de energía: la molécula se excita, los electrones de cada átomo se desplazan a órbitas más alejadas del núcleo atómico, el estado de excitación dura muy poco tiempo, más o menos 1 centésimo de microsegundo; de modo que, si en este reducido intervalo no cae sobre la molécula de clorofila otro fotón, es evidente que la molécula no estará en capacidad de adicionar este nuevo fotón al primero. Se ha calculado que para que pueda verificarse la adición de fotones sería necesario que la molécula de clorofila permaneciera excitada durante varios segundos. Pero como esto precisamente no ocurre, las moléculas de clorofila presentes en una solución molecular de clorofila (cual es el caso en el experimento que se discute) no pueden adicionar fotones.

Por otra parte sabemos que si las moléculas de ciertas sustancias se disponen en una estructura cristalina, es posible la emisión de luz aun después de haber cesado la iluminación; en ello consiste el fenómeno de la fosforescencia. Se ha pensado si no podría ocurrir algo semejante en los cloroplastos de las plantas. En efecto, se ha podido observar que si se fraccionan los cloroplastos por medio de ondas ultrasónicas, de tal manera que en cada fragmento queden incluidos algunos cientos de moléculas de clorofila, se suspende la producción de oxígeno. De este experimento se ha deducido que en los cloroplastos existen unidades fisiológicas de asimilación, denominadas Unidades Clorofílicas. La morfología por otra parte nos enseña que la clorofila no se reparte dentro de los cloroplastos en forma de masa continua, sino en corpúsculos, denominados grana. Con ayuda del microscopio electrónico se ha podido comprobar que cada grana, a la vez no es una masa compacta sino que está constituida por laminillas submicroscópicas ordenadas de acuerdo con un patrón estructural. A pesar de que con el microscopio electrónico no es posible observar las distintas moléculas, se tienen suficientes argumentos para pensar que tales laminillas están conformadas alternativamente por moléculas de lipoides y de proteínas, en medio de las cuales se incrustan las moléculas de clorofila. Hace pocos años se pudo demostrar que los grana están a su vez configurados por estructuras mor-

fológicas aún más simples, para los cuales se ha propuesto el nombre de cuantasomas.

Estas estructuras tendrían un diámetro equivalente a una veintimillonésima de un milímetro y dentro de ellas estarían contenidos alrededor de 100 moléculas de clorofila. De tal manera que en estas unidades, los cuantasomas, tendríamos las estructuras morfológicas correspondientes a la Unidad Clorofílica fisiológica.

El descubrimiento de los Cuantasomas pone una vez más de manifiesto un viejo principio de la biología que podría resumirse en la expresión estructura $\begin{array}{c} \leftarrow \\ \hline \rightarrow \end{array}$ función. Es decir, que a cada estructura corresponde una función o conjunto de funciones y viceversa. En este principio radica en gran parte la dificultad para repetir en tubo de ensayo los fenómenos biológicos, como es el caso, de la fotosíntesis.

¿Podrá el hombre algún día construir esas unidades estructurales, los cuantasomas, que por ser tan diminutos no dejan de presentar tremenda complejidad y alta organización? Nada podemos decir al respecto. Este interrogante podrá ser solamente resuelto a base de nuevos descubrimientos. Lo cierto es que, cuando el hombre logre fabricar estas estructuras sintéticamente podrá verificar probablemente también, en un tubo de ensayo el maravilloso fenómeno natural de la fotosíntesis. Con ello el hombre daría el gran paso en su esfuerzo por entender los fenómenos naturales, que lo llevaría a independizarse, en lo que respecta a su alimentación, de las plantas y de los animales.

La realización masiva de la fotosíntesis "in vitro" en las grandes fábricas, que se construirán para el efecto en el futuro, reemplazarían paulatinamente a la agricultura y a la ganadería y es muy posible que el problema de la superpoblación humana del planeta habría encontrado una solución definitiva. El genio creador del hombre habría alcanzado una nueva victoria en su esfuerzo por comprender la naturaleza y someterla, en beneficio de toda la humanidad.

BIBLIOGRAFIA QUE SE RECOMIENDA CONSULTAR SOBRE ESTE TEMA

- BASSHAM, J. A., The path of carbon in Photosynthesis. Scientific American, june 1962.
- BASSHAM, J. A., y MELVIN CALVIN 1960. The path of Carbon in Photosynthesis. Handbook of Plant Physiology. Vol. 5, parte 1. Berlin.
- CARLES, JULES, 1953. L'energie Chlorophyllienne. Collection "Que Sais-je?" Presses Universitaires de France. Paris.
- FRANCK, JAMES y WALTER E. LOOMIS, 1950. Photosynthesis in Plants. A. Monograph of the American Society of Plant Physiologists. The Iowa State College Press. Ames. Iowa.
- PARK, R. B., K. P. LOUWRIER, N. G. PON y MELVIN CALVIN, 1959. The Biochemistry of Photosynthesis Following the Photochemical Act. Recent Advances in Botany. Vol. 2, 1133-1143. Toronto.
- ROBINOWITCH, E. I., y GOVINDJEE, 1965. The Role of Chlorophyll in Photosynthesis. Scientific American, July 1965.
- TROLL, W., 1959. Lehrbuch der Allgemeinen Botanik. 2ª Edición. Stuttgart.
- WEISZ, PAUL., 1967. The Science of Biology. Tercera edición. McGraw-Hill Book Company. Nueva York.

RECEIVED
 BOTANICAL CENTRAL
 HERBARIUM CENTRAL