

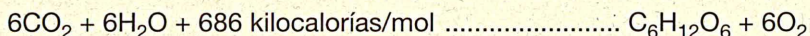
ALGUNOS ASPECTOS DE LA ESTRATEGIA VEGETAL ANTE LA RADIACIÓN SOLAR

Adolfo Marroquín Santoña
C.M.T. DE EXTREMADURA

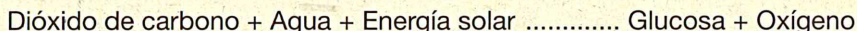
La vida en la Tierra depende de la fotosíntesis, con la que las algas y plantas verdes capturan la radiación solar que utilizan para la fabricación de glúcidos y otras moléculas orgánicas que forman la estructura vegetal, la cual sirve de alimento a los animales herbívoros, que a su vez alimentan a otros animales, dando lugar así a una cadena que llega hasta el hombre. De manera que puede afirmarse que la fotosíntesis es el proceso que alimenta, en el más estricto sentido de la palabra, toda la vida del planeta.

Para ser exactos deberíamos decir “de casi toda la vida” del planeta, puesto que en años recientes se han descubierto, en las profundidades marinas, ecosistemas enteros en los cuales los productores primarios son bacterias quimiosintetizadoras, que no dependen de la radiación solar para fijar el carbono, sino que recurren para ello a la energía geotérmica, procedente del interior de la propia Tierra. No obstante estos sistemas son tan absolutamente minoritarios, que no pasan de ser justamente la excepción que confirma la regla.

Así pues, la vida en la Tierra depende totalmente del Sol, y no sólo porque gracias a su radiación, junto con el efecto invernadero natural, nos proporciona una temperatura adecuada, en torno a los 15 °C como temperatura media planetaria, sino además porque es capaz de suministrarnos oxígeno, combustible y alimentos, a través de una ecuación tan simple como:



es decir:



que en resumen es la ecuación global de la fotosíntesis. A lo que hay que añadir que las plantas nos suministran todo lo anterior, consiguiendo de paso rebajar los crecientes niveles de CO₂ de origen antrópico, capturando y transformando energía solar, ayudando con todo ello por tanto a aliviar la tendencia al calentamiento global planetario, que como es sabido es una de las poco deseables consecuencias asociadas a un potencial cambio climático.

Las relaciones entre las plantas y la atmósfera en la que viven inmersas, resultan tan interesantes como variadas y complejas. Análogamente su distribución geográfica y su adaptación morfológica a las condiciones de contorno, de acuerdo con los elementos y factores climáticos, plantea también todo un amplio mundo de posibilidades para el estudio científico. Dentro de este contexto, conviene tener en cuenta que las plantas son en realidad colectores solares, y aún más “colectores solares inteligentes”, capaces por tanto de plantearse y adoptar estrategias de respuesta ante los problemas que puedan encontrar en su camino hacia la obtención de la radiación solar que necesitan para su desarrollo.

Captura de la radiación solar

En su papel como colectores solares, las plantas son selectivas, puesto que de todas las longitudes de onda que constituyen el espectro solar (prácticamente entre 0,3 y 4 μm), a las plantas sólo les interesan para sus actividades fotosintéticas las que están comprendidas entre los 0,4 y los 0,7 μm , que constituye la llamada PAR (Photosynthetically Active Radiation).

La "decisión" de las plantas al elegir como fuente de vida y energía para su desarrollo esa banda del espectro electromagnético, coincidiendo prácticamente con el espectro visible de la radiación solar, es una decisión acertada por varias razones. En primer lugar por razones de disponibilidad, ya que fuera de esa banda las radiaciones están sometidas dentro de la atmósfera a una fuerte absorción, bien por parte del oxígeno y del ozono para las de menor longitud de onda que la PAR, bien por parte del vapor de agua y del dióxido de carbono para las de mayor longitud de onda. Y en segundo lugar por razones de seguridad y logística; por seguridad, ya que las altas energías asociadas a la radiación ultravioleta, podrían poner en peligro los enlaces del hidrógeno, y otros igualmente débiles, que mantienen la configuración espacial y las relaciones entre las grandes y complejas moléculas orgánicas que forman el entramado de los seres vivos; y por logística, ya que la radiación infrarroja se absorbe por el agua que constituye la gran masa de la vegetación provocando un calentamiento, que si bien constituye una aportación energética inmediata, no le es útil a la planta para la conversión y almacenamiento que ésta pretende conseguir. Por el contrario, sólo dentro de la PAR, la radiación reúne las condiciones necesarias para provocar el salto de electrones a niveles superiores, provocando con ello cambios químicos y biológicos, que posibilitan un almacenamiento de energía susceptible de ser recuperada posteriormente.

Para remarcar la similitud entre el proceso fotosintético que tiene lugar en las plantas, con el comportamiento de los colectores solares fabricados por el hombre para el aprovechamiento de la energía solar, señalemos que existen básicamente dos tipos de colectores solares (sin concentración), los térmicos, que transforman la radiación solar en calor que es transferido al fluido de trabajo circulante, y que trabajan fundamentalmente con la radiación infrarroja y la parte más alta del espectro visible, y los fotovoltaicos, que transforman la radiación solar en electricidad, liberando electrones de las células de silicio (componentes básicas de los módulos fotovoltaicos), y que trabajan con una banda del espectro visible, prácticamente coincidente con la PAR. Pues bien, la fotosíntesis tiene lugar en dos etapas, en la primera de las cuales la radiación impacta en las moléculas de clorofila "a", cuyos electrones son lanzados a niveles energéticos superiores, dando lugar así a una pequeña corriente eléctrica, de manera totalmente similar a lo que ocurre en los módulos fotovoltaicos. (NOTA: La clorofila "a" es el pigmento implicado directamente en la captación y transformación de la radiación naranja-roja, mientras que la clorofila "b" lo hace para la violeta-azul).

En la segunda de las etapas de la fotosíntesis tienen lugar una secuencia de complejas reacciones, como consecuencia de las cuales la energía de los electrones es transformada en energía química, que es transferida a las moléculas diseñadas para el transporte y almacenaje en la propia planta. Podría aducirse aquí que el paralelismo entre las plantas como colectores solares y los propios colectores fruto de la tecnología

humana, se rompe al no estar presente en éstos la parte equivalente a la segunda etapa de la fotosíntesis. La respuesta está en que el hombre no sabe cómo conseguirlo, o al menos no a costes razonables, de manera que el almacenamiento estacional e interanual que la planta hace de la energía solar es una asignatura pendiente para los técnicos humanos, y si bien la investigación en este campo continúa abierta, siguiendo varias líneas, pero sobre todo la fotoquímica que imitaría en buena medida la segunda etapa de la fotosíntesis, lo cierto es que en la práctica la acumulación interestacional ni siquiera se intenta para los colectores fototérmicos, y que para los fotovoltaicos se recurre a los acumuladores eléctricos (baterías) convencionales, de gran peso y volumen, y con pérdidas importantes asociadas a la autodescarga.

De toda la energía solar que alcanza el suelo, la parte incluida en la PAR varía en cada momento en función de una serie de factores como pueden ser la época del año, la latitud del lugar, las condiciones atmosféricas (presencia de nubosidad, polvo, aerosoles, etc.) y otros, pero puede estimarse como valor medio orientativo que la PAR supone el 50% de la radiación solar global.

De acuerdo con lo anterior, puesto que la radiación solar que alcanza cada año la superficie de la Tierra se estima en $3 \cdot 10^{24}$ J, en teoría la energía potencialmente activa para la fotosíntesis por estar asociada a las longitudes de onda de la PAR, sería anualmente del orden de $1.5 \cdot 10^{24}$ J, en la práctica, sin embargo, la cantidad de energía solar atrapada cada año por ese enorme colector solar que es la vegetación, es "sólo" de $3 \cdot 10^{21}$ J, es decir un 0.1% del total. Esto convierte a la agricultura y la silvicultura en los principales usuarios de la energía solar para la humanidad, suministrando a ésta no solamente alimentos y materias primas, sino también energía en forma de biomasa, energía que resulta esencial para buena parte de la población, en particular en los países en vías de desarrollo, y que en los países desarrollados va adquiriendo cuotas más y más importantes de mercado como líder de las llamadas energías alternativas.

Hace años el aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos se limitaba a la combustión de los residuos resultantes de la utilización primaria, por lo que el rendimiento en la captación de la energía solar por parte de las plantas, así como el de su posterior transformación en biomasa energética, no era considerado como un aspecto a tener en cuenta, sin embargo, son cada vez más frecuentes en la actualidad los denominados "cultivos de energía", es decir plantaciones encaminadas a obtener como producto base la biomasa capaz de ser convertida posteriormente en energía bien mediante combustión directa, bien a través de su conversión, por fermentación, en combustibles líquidos o gaseosos, susceptibles de ser utilizados en motores de combustión interna, incluso en motores de ignición por compresión (tipo diesel). En el momento en que se plantean esos cultivos de energía a gran escala, es cuando puede presentarse el problema de la competencia entre la utilización del suelo para producción de alimentos o para producción de energía, sobre todo en aquellos países en los que la disponibilidad de suelo agrícola es limitado, y que se ven forzados a importar productos agrícolas, madera, o sus derivados, como ocurre en buena parte de los países de la Comunidad Europea. Y es entonces también cuando el tema del bajo rendimiento asociado al funcionamiento de la vegetación como colector solar adquiere su importancia, puesto que ambos aspectos, el rendimiento en la captación y la superficie necesaria están en relación inversa.

Cubierta vegetal y estructura de las plantas

Entre las diversas causas implicadas en el bajo rendimiento asociado al funcionamiento de las plantas como colectores solares, una de las primeras limitaciones radica en las propiedades de la superficie de las hojas, en concreto su albedo, lo que da lugar a pérdidas por reflectancia de la radiación. Frecuentemente se acepta que, dentro de un cultivo desarrollado, la cantidad de radiación absorbida es de alrededor del 80% de la PAR. Sin embargo, esto depende del cultivo de que se trate, así como de la distribución y geometría de sus hojas. En algunos cultivos densos, con hojas elevadas y orientadas adecuadamente, prácticamente toda la PAR es absorbida. Sin embargo entre las hojas superiores y las inferiores del mismo cultivo, o bien entre las hojas de dos o más cultivos situadas en planos horizontales diferentes y superpuestos, las cosas suceden de forma muy compleja. En primer lugar puede haber importantes cambios en la composición espectral de la radiación que alcanza las diferentes capas, con componentes directa, reflejada y difusa distintas, obligando a los distintos subconjuntos de hojas a adaptaciones a esas condiciones. En segundo lugar, el movimiento de la cubierta, por ejemplo como consecuencia del viento, dará lugar a que las hojas de los pisos inferiores estén sometidas a enormes variaciones respecto al nivel medio de su irradiación, tanto en cantidad como en su composición espectral, pudiendo pasarse de una incidencia directa total sobre las hojas a niveles de la misma nulos, o próximos a cero, en una secuencia temporal absolutamente aleatoria.

La contribución de la estructura de la cubierta del cultivo al rendimiento de la captación varía con el tipo de cultivo y con la etapa de desarrollo en que se encuentre. Para un cultivo anual desde semilla, durante toda la fase inicial del crecimiento, existe una relación directa entre la radiación interceptada y la superficie foliar, pero una vez que se cierra la cubierta vegetal, la superficie foliar pasa a segundo plano, siendo más importante, a los efectos tratados, la distribución que adopten las hojas bajo el dosel superior. En esta fase es más adecuado hablar de rendimiento de un cultivo por unidad de superficie de suelo que ocupa, y no por unidad de superficie foliar, puesto que una vez que la cubierta vegetal se ha cerrado, comienzan los efectos del sombreado, dando lugar a una relación no lineal. Naturalmente esto es también aplicable, si bien aquí permanentemente, a los cultivos de hoja perenne.

El índice de área foliar, conocido habitualmente por sus siglas inglesas LAI, mide para cada cultivo la superficie total de hojas por unidad de superficie de suelo sobre el que se extienden. Pues bien, como hemos indicado anteriormente, para cubiertas vegetales cerradas no existe una relación lineal entre este LAI y el rendimiento en la captación de radiación, habiéndose encontrado que para determinados cultivos existe un valor óptimo del LAI, disminuyendo el rendimiento a partir de ese valor, mientras que otros cultivos presentan una relación de crecimiento asintótico entre el LAI y la producción de materia seca. Esto es el reflejo de los distintos hábitos de crecimiento alcanzados por diferentes tipos de plantas, consecuencia a su vez de los diferentes grados de adaptación de sus órganos captadores, normalmente las hojas, a las condiciones de sombra que tienen lugar bajo el dosel de la cubierta vegetal.

La capacidad de adaptación a los diferentes niveles, y distribuciones espectrales, de la radiación con que pueden encontrarse las hojas, está asociada a cambios específicos en la morfología, fisiología, bioquímica y estructura, tanto de la hoja como de

sus cloroplastos. El resultado es que, en los organismos suficientemente especializados, es posible distinguir dos tipos de hojas, las hojas de sol y las hojas de sombra. Entre sus diferencias básicas, puede decirse que en general, las hojas de sol tienen menor superficie, mayor cantidad de materia seca, menor contenido en agua, mayor densidad de estomas, más alta relación de clorofila a/b y son más gruesas que las hojas de sombra.

Desde el punto de vista de su estrategia para la captura de la radiación solar, la planta tratará de situar sus órganos activos de captación, es decir sus hojas, en la forma más eficaz posible para conseguir sus objetivos, entre los que está la captura de radiación, pero también otros, lo que puede condicionar la estrategia a seguir. Así, la estructura de una hoja es una muestra de equilibrio entre la consecución de tres objetivos que frecuentemente entran en conflicto a lo largo del proceso evolutivo: la necesidad de una superficie fotosintética máxima y bien orientada respecto a la radiación incidente, la necesidad de conservar al máximo el agua de que dispone, y la necesidad de intercambiar gases con el exterior durante la fotosíntesis.

La planta resuelve este complejo problema alcanzando soluciones de compromiso mediante estructuras foliares tipo "sandwich" formado esquemáticamente por dos capas epidérmicas, el haz y el envés, y entre ellas las células del parénquima en empalizada y parénquima esponjoso. La fotosíntesis se produce en las células del parénquima, por tanto la epidermis del haz debe ser transparente a la PAR, mientras que en la epidermis del envés, más protegida de la radiación, sitúa preferentemente la planta los estomas, cuyo sistema de apertura/cierre controlado trata de optimizar su papel de intercambiadores.

A medida que las plantas crecen en altura se desencadena la competencia por la radiación solar, que en casos extremos, como el de las selvas tropicales húmedas, obliga a las plantas a crecer con enormes troncos, rectos como columnas, en la cima de los cuales concentran las ramas y hojas, en una estrategia que es consecuencia del fototropismo y de la competencia.

Fotoperiodicidad

La duración de los períodos alternantes de luz y oscuridad a que diariamente se ven sometidas las plantas, son una ayuda esencial para ellas a la hora de su "toma de decisiones" ante los cambios estacionales. Así, desde el punto de vista de la floración, existen tres tipos de plantas: neutras, de día corto y de día largo. Las plantas neutras florecen independientemente de la duración de la insolación, mientras que las de día corto o largo sólo florecen cuando la duración de la insolación es inferior o superior, respectivamente, a un umbral dado.

Se presenta aquí un aspecto de la relación entre radiación y floración verdaderamente curioso e interesante, y es el hecho de que la planta no sólo mide la luz, sino también la oscuridad, siendo incluso mucho más estricta con la medida de ésta. Por ejemplo, para una planta de día corto, supuesto que la duración de la insolación sea la adecuada para que tenga lugar la floración, ésta no se producirá si se interrumpe el período de oscuridad, aunque sea con la luz de una simple bombilla que se encienda durante unos minutos. Por el contrario, si se interrumpe el período de iluminación, cu-

briendo o encerrando a la planta durante algunos minutos, esto no producirá ningún efecto sobre la floración.

Otro hecho, comprobado experimentalmente, pero cuya explicación científica no es aún bien conocida, es el que para que actúen los mecanismos que rigen las relaciones entre insolación y floración, es suficiente con que la radiación incida sobre una sola hoja de la planta, e incluso sobre una pequeña parte de una hoja, aun cuando se mantenga todo el resto de la planta aislada en la oscuridad.

Finalmente, entre otras varias respuestas de la estrategia de las plantas ante la insolación, existen dos que resultan de gran interés, una es el fototropismo, como respuesta de crecimiento de las plantas orientado a la luz, y otra el seguimiento "alt-azimutal" diario que es capaz de desarrollar el girasol (*Helianthus annuus*, o flor del sol anual) a lo largo del fotoperiodo, manteniendo orientada su cabeza, compuesta de multitud de pequeñas flores, al disco solar, de orto a ocaso, consiguiendo con ello la máxima recepción posible de radiación solar directa. La explicación de estos dos fenómenos, absolutamente naturales, se fundamenta en una serie de procesos bioquímicos y biofísicos cuya comprensión resulta más o menos laboriosa, dependiendo de los conocimientos que se tengan, pero cuya reproducción a escala industrial operativa resulta enormemente compleja. En el caso particular del seguimiento por parte del colector del movimiento aparente del disco solar a través del cielo, parece que todo girasol conoce perfectamente la Ley de Lambert, tomando las medidas necesarias para maximizar la incidencia de energía. El conseguir ese mismo resultado para los heliostatos de una central solar de concentración, para un concentrador parabólico, o bien para un simple colector térmico o fotovoltaico, requiere la puesta en operación de complicados sistemas de programación, detección y seguimiento en base a servomecanismos, con tal cantidad de fallos en la práctica que la contemplación simultánea de un campo de heliostatos, programados para el seguimiento, y de un campo de girasoles nos hacen pensar en lo mucho que nos queda por aprender de la naturaleza.

A.M.S.
BADAJOZ