

La luz como factor ambiental para las plantas

POR

F. SABATER *

*Departamento de Biología
Facultad de Ciencias
Universidad. Murcia*

INTRODUCCION

Lo que llamamos seres vivos son el resultado de una serie de acontecimientos que han tenido lugar a lo largo de la historia de nuestro planeta. En ellos la materia y la energía, obedeciendo a las leyes físicas han ido sufriendo transformaciones que nosotros tratamos de expresar en términos de reacciones químicas y procesos físicos, y que han llevado desde unas condiciones prebióticas hasta la situación actual. Sólo una fracción muy pequeña de estas transformaciones eran potencialmente útiles para la aparición de la vida sobre la Tierra o para modificar a los seres vivos ya existentes y a su descendencia. Cuáles de ellas habían de tener influencia decisiva en la configuración de nuestro mundo actual, es algo que nosotros, en visión retrospectiva, sólo podemos asignarlo al azar, en vista del ingente número de posibles combinaciones de factores físicos y químicos ambientales. En cualquier caso la energía jugó un papel necesario porque la aparición de materia viva implicó y sigue implicando un consumo energético y, al mismo tiempo, una transición de desorden a orden en la materia.

FOTOSINTESIS

En alguna fase del proceso de la evolución algún ser vivo, presumiblemente unicelular, desarrolló un sistema capaz de captar la energía solar y utilizarla para, a partir del CO₂ y el agua producir oxígeno y sus-

(*) Discurso leído en la solemne apertura del curso académico 1977-1978.

tancias orgánicas que le sirvieran de alimento. Desde ese momento y debido a este hecho aparentemente tan simple, tanto la superficie terrestre como su atmósfera iban a sufrir profundas modificaciones.

Este nuevo ser vivo, la planta, quedaba en condiciones de superioridad con respecto a los demás porque se había emancipado de la necesidad de buscar alimentos, por lo cual, en términos darwinianos, estaba mejor dotado para la supervivencia. En efecto, proliferó rápidamente; siendo inicialmente marino fue capaz de adaptarse a la vida en la tierra y la invadió. Al mismo tiempo se vieron también beneficiados otros seres vivos que desarrollaron capacidad para utilizar en beneficio propio los alimentos producidos por las plantas y quedó establecida definitivamente, hasta ahora, la clasificación en seres vivos capaces de producir su propio alimento; las plantas verdes, y seres vivos capaces de alimentarse, directa o indirectamente de las plantas: todos los demás, incluido, por supuesto, el hombre.

La atmósfera primitiva era mucho más rica en CO_2 y más pobre en oxígeno que la actual. Pero, puesto que las plantas en la fotosíntesis consumen CO_2 y producen oxígeno, la relación cuantitativa entre los dos gases se fue invirtiendo hasta llegar a una situación de equilibrio aproximado en que la cantidad de CO_2 ha quedado reducida a la exigua concentración de 0,03% mientras que la del oxígeno ha subido al 21%. El descenso del CO_2 hubo de repercutir en la climatología porque, al disminuir su concentración, la atmósfera perdió capacidad para retener el calor que la Tierra pierde por radiación y descendió la temperatura. Al mismo tiempo el incremento del oxígeno aumentó la capacidad para producir y mantener ozono en las capas superiores de la atmósfera, con lo cual las radiaciones ultravioleta de menor longitud de onda dejaron de llegar a la Tierra. Teniendo en cuenta la capacidad de estas radiaciones para afectar a los ácidos nucleicos y producir mutaciones el hecho repercutió de forma decisiva en el transcurso posterior de la evolución.

Todos estos acontecimientos han condicionado las formas de vida actuales, la mayoría de las cuales son bastantes posteriores a las transformaciones referidas y están adaptadas a la nueva situación. Un animal de nuestra era es incapaz de respirar y, por tanto, de sobrevivir en una atmósfera como la primitiva, con mucho CO_2 y poco oxígeno; en cambio sí pueden hacerlo algunas células procarióticas que, aún existiendo hoy, corresponden a las formas vivas más primitivas conocidas hasta ahora. No parece haber riesgo de que el equilibrio a que ha llegado en la atmósfera se altere seriamente por procesos naturales. Si la concentración de CO_2 aumenta, aumentará la fotosíntesis y, con ella, la vegetación, la cual consumirá más CO_2 hasta restablecer el equilibrio. Si disminuye el CO_2 , dis-

minuye la fotosíntesis y, al mismo tiempo parte del CO_2 disuelto en el agua del mar pasaría a la atmósfera, con lo cual se restablece el equilibrio. La actividad humana sí puede alterar localmente la situación, debido a la gran cantidad de combustibles orgánicos usados, como lo prueba el hecho de que hace algunos años la concentración de CO_2 en las calles de Londres era más del doble que en el campo; pero de nuevo las plantas y el mar actúan como reguladores.

En resumen las situaciones biológicas y ecológicas actuales fueron configuradas, y lo siguen siendo, por las plantas gracias, en última instancia, a su capacidad para utilizar de forma adecuada la energía solar. El hombre, cuya inteligencia le ha llevado a plantearse una serie de necesidades, además del alimento, tiene establecida con las plantas una relación de dependencia, una de cuyas facetas más singulares es la obtención de sustancias químicas distintas de los alimentos. Unas 1.000 especies nuevas se descubren cada año y se incorporan a los muchos miles ya conocidos. De ellas un gran número son ya utilizadas directamente o como punto de partida para la industria química, pero un número mucho mayor está esperando al investigador que descubra sus aplicaciones.

Juzgada esta situación en los términos convencionales actuales una célula de una planta es una fábrica microscópica de productos químicos en la que se elaboran miles de sustancias diferentes. Materias primas, el aire y el suelo. Energía consumida la procedente del sol. La explotación de estos productos químicos experimentó un rápido crecimiento a raíz del desarrollo de la química moderna y, si bien es cierto que la explotación del petróleo y el desarrollo de la industria petroquímica frenaron algo este crecimiento, el encarecimiento progresivo y la perspectiva de agotamiento de los yacimientos a plazo más o menos largo, junto con la mejora en las técnicas agrícolas actuales están creando en el mundo un clima propicio hacia las materias primas vegetales. No cabe duda de que el mundo vegetal, además de fuente primaria de alimento, es la mejor garantía futura de una industria química de extracción y transformación por un período de tiempo ilimitado.

Vamos a ojear esta diminuta fábrica que es la cédula vegetal. Dejemos de lado los productos elaborados porque estamos interesados en conocer su instalación para el aprovechamiento de una energía tan barata como la solar. Puede ser interesante en esta época de crisis energética en que el hombre intenta también aprovecharla por diversos procedimientos.

El esquema de la instalación es sencillo, en principio: un sistema encargado de captar la energía contenida en la radiación electromagnética y un dispositivo para almacenar esta energía. El sistema captador de energía consiste en un conjunto de pigmentos (clorofilas a y b, carotenoides,

ficocianinas). La energía se almacena invirtiéndola en producir una reacción química, o sea, creando un enlace químico que en el momento adecuado se romperá y devolverá la energía almacenada.

En el proceso de captación parece, en principio, que las plantas no actúan con buen rendimiento. Efectivamente las placas solares que se fabrican a escala comercial usan un pigmento negro porque negro significa que absorbe todas las radiaciones visibles. La planta, en cambio, utiliza fundamentalmente clorofila a, que absorbe bien las luces azul y roja, pero no las demás. Esto supondría que para la fotosíntesis sólo se utiliza una parte de la luz solar visible y que las radiaciones distintas del azul y el rojo no serán muy útiles. En la práctica este "defecto de la Naturaleza" queda, en parte, amortiguado por la presencia de los pigmentos auxiliares, clorofila b y carotenoides, pero no cabe duda de que el sistema captador de energía no es el ideal. Gracias a este defecto los campos son verdes y no negros.

Los dos dispositivos, el captador y el almacenador de energía trabajan en serie y se cumple la ley de los factores limitantes, que Blackman estableció, precisamente para la fotosíntesis, pero que se aplica a todo sistema complejo, tanto en biología como en física y en química y que, de forma racional o intuitiva se utiliza continuamente en la vida ordinaria. Estableció que "cuando un proceso está condicionado en cuanto a su velocidad por un número de factores separados, la velocidad del proceso viene limitada por el factor más escaso".

Hagamos algunas consideraciones cuantitativas basadas en hechos experimentales:

En un día de verano a medio día, o sea, en condiciones de máxima iluminación (unos 100.000 lux), por cada molécula de CO_2 usada como materia prima por la planta se consume unos 2.000 fotones o unidades elementales de luz. Una tarde nublada (4.000 lux), para usar la misma molécula de CO_2 se consume sólo 8 fotones. Esto significa que cuando la iluminación es muy grande la planta malgasta una gran cantidad de energía solar, o dicho de otra forma, la planta no parece estar preparada para aprovechar la luz de mucha intensidad. Esto cuestiona, como es lógico, la supuesta superioridad agrícola de regiones soleadas, si por el hecho de haber más luz no hay más fotosíntesis y si se tiene en cuenta que fotosíntesis equivale a productividad. Sin embargo la cuestión no es tan simple. En primer lugar no todas las plantas tienen la misma capacidad para aprovechar la luz de mayor intensidad luminosa y es una ventaja de los países soleados poder cultivar determinadas especies más aptas para el sol. Por otra parte, en un cultivo frondoso sólo las hojas exteriores están expuestas a una alta luminosidad; las interiores se desarrollan y trabajan

más en las zonas soleadas porque la luz que reciben indirectamente es mayor. La mayor temperatura se traduce también en una mayor velocidad de fotosíntesis, aunque la ventaja se vea restringida porque también la intensidad respiratoria, o sea, el consumo de alimentos es mayor. Finalmente la saturación con baja intensidad luminosa se debe a que hay un factor limitante, la concentración de CO_2 en la atmósfera, de forma que la planta responde poco al crecimiento de cualquier otro factor. La época histórica de mayor plenitud de vida vegetal correspondió al período carbonífero porque en él la atmósfera era más rica en CO_2 . Actualmente hay dos posibilidades de hacer agricultura en esas condiciones. Los cultivos en invernadero enriquecido con CO_2 y los cultivos de algas en medio acuoso porque el agua disuelve una cantidad del gas, superior a la que existe en la atmósfera. El segundo método no supondrá una verdadera ventaja para los países más soleados hasta que se aislen mutantes de algas más resistentes a la luz intensa. En cambio el uso de invernaderos fertilizados con CO_2 ha demostrado ya en algunos casos rendimientos de hasta 200 y 300 % con respecto a los no fertilizados.

Pero volvamos a nuestra diminuta fábrica e imaginemos una situación de iluminación débil (4.000 lux), bajo la cual cada molécula de clorofila recibe un fotón cada 2'5 segundos (captación). El proceso de ese fotón para realizar una reacción química (almacenaje) dura 0'01 segundos. O sea, que el sistema de almacenaje funciona unas 250 veces más rápido que el de captación. La célula ha corregido este desfase creando agrupaciones tales que por cada 250 moléculas de clorofila captando energía solar hay un solo centro de almacenaje donde se realiza la reacción química. El conjunto es observable al microscopio electrónico y ha recibido la denominación de unidad fotosintética o cuantosoma.

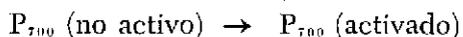
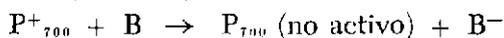
El funcionamiento de esta unidad de trabajo plantea un problema físico de transporte de energía en su interior. ¿Cómo las 250 moléculas de clorofila que han captado su fotón pasan la energía al único lugar donde se produce la reacción química?

Cuando una molécula de un pigmento absorbe una unidad de luz, o sea, un fotón, el destino de la energía contenida en el fotón puede ser muy variable, según el tiempo de que disponga y las oportunidades que se le ofrezcan. Una de ellas consiste en lo que se llama transferencia por resonancia, mediante la cual la energía absorbida es remitida en forma de radiación y una molécula próxima a ella la absorbe. A su vez esta segunda molécula puede emitir radiación que es absorbida por una tercera molécula y así sucesivamente. Este procedimiento, que es el utilizado por la célula permite que el conjunto de moléculas de clorofilas y carotenoi-

des de la unidad fotosintética se vayan pasando unas a otras la energía hasta llegar al centro de almacenaje.

Para que tenga lugar el proceso de transferencia por resonancia son precisas tres condiciones: a) que la molécula que recibe la radiación esté próxima a la emisora (menos de 10 nm); b) que la molécula que recibe absorba radiaciones un poco más largas (con menos energía) que las absorbidas por la molécula emisora; c) que emisora y receptora estén orientadas entre sí de una forma determinada. La unidad fotosintética resuelve la primera condición disponiendo las moléculas de pigmentos entre sí a una distancia media de 25 nm. En cuanto a las segunda y tercera condiciones el recurso es de tipo químico-físico y altamente ingenioso: se sabe que la radiación que mejor absorbe un pigmento, o sea, su longitud de onda de máxima absorción varía, según que el medio sea más o menos polar. Pues bien. Dentro de la unidad fotosintética la polaridad varía gradualmente desde la zona de captación a la de almacenaje, lo cual permite que la molécula de clorofila, que posee una cola de fitol, larga y no polar, se sienta más o menos anclada y contribuya así a una ordenación de las moléculas dentro de la unidad. El conjunto queda distribuido como un embudo en cuya abertura grande se hayan la mayor parte de los pigmentos actuando como antenas de captación de radiación solar; en el cuerpo del embudo hay varias moléculas ordenadas entre sí a fin de transportar la energía y en la salida hay una molécula especial de clorofila, que se conoce como P_{700} , encargada de convertir la energía radiante en energía química.

La forma de almacenar la energía, o sea, la reacción fotoquímica correspondiente responde en líneas generales al siguiente esquema: el P_{700} al recibir la energía pierde un electrón que pasa a una molécula A, la cual queda ahora con un electrón más de la cuenta, o sea, que en términos químicos se ha convertido en un reductor. A su vez el P_{700} que perdió su electrón lo recupera a costa de otra molécula B, la cual queda así con un electrón menos de la cuenta, o sea que, en términos químicos, se ha convertido en un oxidante.



En resumidas cuentas, todo lo que ha ocurrido es que, a costa de la energía solar se han generado un oxidante y un reductor. Para un químico esto ya es suficiente porque sabe que un oxidante y un reductor pueden raccionar entre sí y devolver la energía. Sólo la salvedad de que

nuestra pequeña fábrica se las ingenia para que el oxidante y el reductor queden separados en el espacio a fin de que no racionen entre sí y devuelvan la energía hasta el momento y forma en que interese a la célula.

Este es, en líneas generales, el dispositivo que utiliza la célula vegetal para aprovechar la energía solar e invertirla en su fábrica de productos químicos. La técnica actual intenta hacer lo mismo con las placas solares que ya se expenden en el comercio, por medio de las cuales se intenta almacenar la energía, bien en forma calorífica o eléctrica. En el primer caso se consiguen rendimientos bajos y en el segundo aún menores. Frente a ellos la célula realiza todo el proceso descrito hasta la formación del oxidante y el reductor con un rendimiento mayor del 90 %. De las pequeñas pérdidas de energía, la mayor parte se debe al proceso de transferencia por resonancia porque en cada transferencia, una pequeña parte de la energía absorbida no se reexpide, sino que se transforma en calor, no utilizable en la fotosíntesis. Esta pequeña pérdida es la que condiciona el que en la transferencia por resonancia el receptor absorba radiaciones de longitud de onda algo más largas que las que absorbió el emisor.

Por supuesto en la agricultura ordinaria no se obtienen rendimientos tan altos, en términos de materia vegetal producida o de CO_2 consumido por las plantas. De hecho en el campo el rendimiento medio es del 1 % y rara vez excede del 2. El máximo obtenido, en plantaciones de maíz y de caña de azúcar ha sido del 7 % y en el laboratorio, con algas unicelulares y luz roja débil, o sea, en las óptimas condiciones, se ha llegado al 34 %.

Son varias las causas que justifican estos bajos rendimientos en agricultura y es curioso que la mayor parte de ellas podrían ser teóricamente obviadas en una instalación artificial para el aprovechamiento de la energía solar. Veamos las más importantes:

1.º El rendimiento baja en la célula al aumentar la intensidad de la luz, tal como hemos citado anteriormente. La causa está en que la utilización de la energía almacenada es lenta. Esa energía va a ser utilizada en la síntesis de productos químicos a partir del CO_2 y el agua y, debido a la escasez del CO_2 , o sea, de la principal materia prima, el proceso de fabricación está frenado, lo cual hace que se acumule energía almacenada y se frene el proceso de captación. En una instalación artificial el problema de una rápida utilización de la energía no sería técnicamente imposible.

2.º De la luz solar que llega a la superficie terrestre sólo la mitad corresponde a la zona del espectro visible, que es la única que la célula

sabe utilizar para la fotosíntesis. En una instalación artificial podrían ser también captadas y utilizadas las radiaciones ultravioletas e infrarroja.

3.º Aún la radiación visible no es muy bien aprovechada porque los pigmentos de la planta no la absorben bien en algunas zonas del espectro. Por otra parte el rendimiento varía mucho en función de la longitud de onda utilizada. En una instalación artificial no hay limitación de pigmentos, en principio, y el hecho de usar un receptor negro es ya una ventaja inicial.

4.º Al reaccionar en la célula el oxidante y el reductor para recuperar la energía almacenada se pierde más de la mitad de ésta porque, por razones biológicas, la recuperación se hace en muchas etapas y, por razones termodinámicas, en cada etapa se pierde algo de energía útil. En una instalación artificial no existen estas zonas biológicas.

5.º Una parte de la energía que llega a la hoja es reflejada (6-12 %) y otra parte transmitida (10-20 % en una hoja mesomórfica). En una instalación artificial hay recursos técnicos para disminuir estas pérdidas, sobre todo la segunda.

FOTOMORFOGENESIS

Es lógico que al hablar de la luz como factor ambiental para las plantas surja de forma espontánea la idea del aspecto puramente energético de la fotosíntesis y en la medida en que todos los seres vivos obtienen su energía directa o indirectamente a partir de ella es lícito considerar a la fotosíntesis como el proceso biológico más importante sobre la Tierra. Pero la visión humana y de los demás animales, el que las plantas se inclinan hacia la luz, o sea, el fototropismo, el que plantas y animales se muevan hacia o desde la luz (fototaxis) son muestras significativas de que el papel de la luz entre los seres vivos va más allá de la fotosíntesis.

Deseo hacer hincapié en un fenómeno, el de la fotomorfogénesis, por su trascendencia actual y futura. Consiste en el hecho de que la luz controla el crecimiento y, en general, el desarrollo de las plantas, independientemente de la fotosíntesis. Para situar este hecho en su verdadera dimensión me permito recordar que el desarrollo específico de cada ser vivo depende de los genes que heredó y de su medio ambiente, de forma que los factores ambientales interaccionan con los genes. Puesto que, para una planta superior el factor ambiental más importante es la luz, vamos a considerar la luz como algo que influye en cómo y cuándo van a ser utilizados ciertos genes.

Aun con el riesgo que supone entrar en detalles experimentales en una

lectura como ésta, ruego se me disculpe hacerlo con algunos experimentos sencillos que son la base de nuestros conocimientos actuales sobre fotomorfogénesis, y que pueden tener una influencia decisiva sobre la ciencia y la tecnología de las plantas.

En 1920 Garner y Allard, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos encontraron que, de una mezcla de variedades de tabaco en estudio en su campo experimental, una de ellas (la variedad Mamouth) no florecía cuando lo hacían las demás: en primavera. Puesto que la variedad era interesante comercialmente (tenía las hojas muy grandes) la llevaron al invernadero, donde, a mitad del invierno produjo flores con toda normalidad. Esta es la forma más elemental de presentarse un problema de investigación: un hecho observado, para el cual hay, a priori, varias causas como posibles. Los experimentos se planifican sistemáticamente a fin de descartar o confirmar, hasta llegar a la verdadera causa. Se encontró que esta variedad de tabaco sólo florecía cuando el día es corto y la noche larga.

Y surgió la interrogante lógica: el que la mayor parte de las plantas conocidas producen flores sólo en una época determinada del año ¿es debido a una causa de este tipo? Los experimentos con diversas plantas eran obligados y los resultados fueron muy claros: unas plantas florecían cuando el día es corto y la noche larga y se las llamó plantas de día corto. Otras florecían sólo cuando el día es largo y la noche corta y se las llamó plantas de día largo. Finalmente algunas especies no parecían responder a la longitud del día y de la noche y se las llamó indiferentes. A esta respuesta de las plantas a la longitud del día se la llamó fotoperiodismo y al régimen de luz y oscuridad a que se somete una planta, fotoperíodo.

Desde 1936 a 1968 funcionó en Beltsville (Estado de Maryland), un laboratorio de Fisiología Vegetal adscrito al Departamento de Agricultura. En él y por consejo de Allard un grupo de investigadores encabezados por un botánico, H. A. Borthwick y un químico-físico, S. Hendricks, comenzó a estudiar el siguiente fenómeno: si una planta de día corto se somete a un fotoperíodo adecuado, o sea, día corto y noche larga, produce flores, pero si esa noche larga se interrumpe con un breve período de iluminación, la planta no florece.

Para sus estudios utilizaron plantas de soja porque entre otras ventajas ofrecía la de que responde a este experimento con sólo un minuto de iluminación. El que un minuto de iluminación a media noche impida producir flores no parece que tenga relación con la fotosíntesis porque en tan corto período de tiempo poco acopio de reservas nutricionales se puede hacer.

Entre los recursos de que dispone un investigador para estudiar un fe-

nómeno biológico producido por la luz, un buen procedimiento consiste en realizar un espectro de acción cuyo punto de partida es sencillo:

Si se tiene en cuenta que lo que llamamos luz es una mezcla de radiaciones de distinta longitud de onda y distinto color, el fenómeno observado, producido por la luz ¿se debe a todas las radiaciones de la luz blanca o a alguna de ellas en particular? y el detalle experimental es inmediato: por medio de un prisma apropiado la luz se descompone en sus distintas radiaciones y el conjunto se dispone de forma que sobre distintas plantas de soja incidan diferentes radiaciones luminosas; se anota el efecto biológico producido por cada radiación (en este caso el número de flores producidas) y se representa en un diagrama la relación entre longitud de onda y actividad biológica.

Por este procedimiento resultó que, a efectos de impedir la floración de la soja por iluminación nocturna la luz más eficaz es la roja. Por medidas posteriores más afinadas se precisó su longitud de onda en 660 nm. Da la impresión de que la luz roja ha interrumpido un proceso que se venía gestando durante la noche y que tenía como misión inducir la floración. Pero si es durante la noche cuando se elabora el proceso que acaba produciendo flores ¿qué debemos pensar de las plantas de día largo, en las cuales no se producen flores si la noche es larga? El experimento era inmediato: plantas de día largo (y noche corta), concretamente cebada y beleño, se sometieron a un ciclo con noches largas, en cuyo caso no florecían, como era de esperar. Pero si en esas condiciones se interrumpía la noche con una breve iluminación las plantas florecían. En este caso da la impresión de que durante la noche se está elaborando un proceso que tiene como misión impedir que se produzcan flores y la luz interrumpe ese proceso. El espectro de acción de este nuevo fenómeno resultó ser idéntico al de las plantas de día corto, o sea, que también aquí la luz roja de 660 nm es la responsable. La misma radiación y, presumiblemente, el mismo mecanismo interno son los que impiden la floración de la soja y provocan la floración de la cebada.

A la vista de estos hallazgos se replantearon algunos aspectos del funcionamiento de las plantas, que, desde tiempo inmemorial, se sabía estaban influidos por la luz. El primero de ellos fue el de las plantas etioladas o ahiladas. Es un hecho familiar que una planta cultivada en la oscuridad no tiene color verde sino blanco amarillo. Su tallo es anormalmente largo y sus hojas anormalmente pequeñas. Por comparación con una planta normal se deduce que la luz solar frena el crecimiento del tallo y estimula el crecimiento de las hojas. El espectro de acción realizado con cebada albina cultivada en la oscuridad, o bien en presencia de distintas radiaciones del espectro visible demostró que lo que frena el crecimiento

del tallo es la luz roja de 660 y la misma radiación es la que en experimentos similares con pequeñas plantas de guisantes demostró ser responsable del crecimiento de las hojas.

El siguiente fenómeno fotobiológico a estudiar fue el de las semillas fotoblásticas, o sea, aquellas que germinan mal en la oscuridad, como es el caso de la de lechuga. Al iluminar aumenta hasta, prácticamente el 100 % el número de semillas germinadas. El detalle experimental fue sencillo porque, una vez que las semillas han absorbido agua, basta con exponerlas 1 minuto a la luz, para que germinen bien aún en la oscuridad. De nuevo la luz roja de 660 demostró ser la responsable, pero los experimentos mostraron algo que forzaría a revisar todo lo descubierto anteriormente: que la luz de 730 nm que corresponde ya, prácticamente, al infrarrojo, inhibe la germinación, hasta el punto de que semillas que ya han recibido su dosis de luz roja, y que, presumiblemente, germinarán el 100%, si reciben a continuación su tratamiento con luz infrarroja, su porcentaje de germinación baja al 10 ó menos.

Intepretar resultados y extraer conclusiones con rigor científico son el aspecto más intelectual y difícil de la investigación. Pero estos resultados significaban, por lo menos, que hay que tener en cuenta dos radiaciones, la roja y la infrarroja, puesto que las dos influyen en el fenómeno biológico y, además, que el efecto de ambas es opuesto.

Germinación, floración y crecimiento de tallos y hojas están controlados por la luz roja. Si la germinación se afecta por la luz infrarroja, debe comprobarse inmediatamente si esta radiación afecta también a la floración y al crecimiento.

Los experimentos fueron definitivos desde el principio. Los más significativos se realizaron con floración de plantas de día corto. Si no se interrumpe la noche florecen. Si se interrumpe con luz infrarroja de 730 nm florecen. Si se interrumpe con luz roja de 660 nm no florecen. Si se interrumpen con luz roja y, a continuación infrarroja florecen y, en general, después de muchos tratamientos alternativos (se llegaron a dar más de 70), el resultado depende sólo de la última radiación utilizada. Esto induce a pensar que dentro de la planta hay algún mecanismo que responde a los estímulos de la luz roja y de la infrarroja y que, además, es reversible: con luz roja se orienta en un sentido y con luz infrarroja en el otro sentido.

Todos los experimentos descritos son relativamente sencillos y sirvieron para conocer una serie de hechos, algunos de los cuales son ya de aplicación agrícola inmediata, especialmente en floricultura, por la posibilidad de frenar o provocar la floración buscando fechas óptimas de recolección. Pero científicamente quedaba mucho camino por recorrer. Si

desde hace más de un siglo los procesos vitales están planteados en términos de reacciones químicas y fenómenos físicos, el desarrollo actual de la Bioquímica y la Biofísica permiten y obligan a que todo fenómeno biológico sea estudiado a nivel molecular. Es un conocimiento más difícil, con un interés práctico muy a largo plazo, pero que responde con más profundidad al espíritu inquisitivo del investigador.

Al citar la fotosíntesis se ha puesto de manifiesto un principio aplicable en fotobiología y, en general, en todos los fotoprocesos: cuando la luz produce un efecto, el fenómeno comienza por una captación de esa luz por una sustancia química. Luego el objetivo de investigación queda ya establecido:

- 1.º ¿cuál es la sustancia química encargada de captar la luz de 660 nm?
- 2.º ¿qué ocurre después de esa absorción para que la energía se traduzca en el fenómeno estudiado?

El espectro de acción es el primer auxiliar. Así, del hecho de que la luz de 660 nm sea la más eficaz se deduce que en la planta hay un pigmento que absorbe mejor la luz de 660 nm que las de otras longitudes de onda y, por la forma del espectro es fácil deducir que debe ser azul. Mucho antes de conocerlo ya se le bautizó con el nombre de fitocromo, que pronto se aceptó y hoy se utiliza de forma universal.

Es curiosa la tendencia de los investigadores sobre Biología Vegetal a dar nombre a sustancias de cuya existencia se sospecha, mucho antes de aislarlas e identificarlas y asegurarse de su existencia. Aún se manejan en la bibliografía los nombres de florígeno, rizocalina, vernalina, ácido traumático, como supuestas sustancias responsables, respectivamente, de la floración, la formación de raíces, la vernalización y la cicatrización de heridas, y que después de bautizadas no han sido identificadas y aún se duda de su existencia. En el caso del fitocromo hubo suerte: fue descubierto.

El del fitocromo ha sido, posiblemente, uno de los descubrimientos menos espectaculares y más laboriosos en la historia de la investigación. Al considerarlo me viene a la memoria lo que se escribió sobre el químico francés Courtois, recogido y expresado con gracejo por Ramón y Cajal en el sentido de que aún no está claro si fue Courtois el que descubrió el yodo o fue el yodo el que descubrió a Courtois. Desde que se dedujo la existencia del fitocromo hasta que se extrajo y se purificó sólo parcialmente transcurrieron 15 años, los últimos de los cuales fueron de intensos trabajos en laboratorios de varios países.

La primera gran dificultad surgía de la siguiente situación: cuando un científico trata de investigar una sustancia química elige un material

en el cual exista abundantemente. Por consideraciones previas se dedujo que el pigmento se halla en mayor proporción en algunas pequeñas plantas procedentes de germinar semillas en la oscuridad. Si se tiene en cuenta que se trata de plantas amarillas sin el menor síntoma de color azul y que el fitocromo es azul se deduce que está en diminutas cantidades y que habrá de utilizar métodos y aparatos especialmente sensibles.

La segunda gran dificultad radica en la siguiente: para estudiar una sustancia química natural es condición indispensable disponer de un método de análisis que permita detectarla y medirla. En el caso del fitocromo no se disponía de un método químico y había de recurrirse al espectrofotométrico que, por otra parte, es el método más usual para estudiar pigmentos. Ahora bien, los experimentos de iluminación con luz roja e infrarroja alternativamente sugieren la idea, confirmada posteriormente, de que el pigmento puede existir en dos formas interconvertibles, una de las cuales absorbe luz de 660 nm, pero al absorberlas se va convirtiendo en la otra forma, la cual absorbe luz de 730 nm, pero al absorberla se va convirtiendo en la forma primitiva. Había, por lo tanto, que imaginar y construir un espectrofotómetro que, además de tener una muy alta sensibilidad, permita estudiar simultáneamente la muestra a las dos longitudes de onda.

Es esta una situación típica en la marcha de la investigación en las ciencias experimentales. Con frecuencia se desea estudiar un fenómeno, pero no existe la técnica o el aparato adecuados. Las estructuras investigadoras que disponen de una infraestructura adecuada, especialmente en cuanto a talleres y personal auxiliar especializado o industrias auxiliares resuelven con frecuencia el problema técnico y la investigación sigue; en caso contrario la investigación muchas veces se detiene.

El espectrofotómetro fue diseñado y construido en Beltsville. Es un aparato de una sensibilidad excepcional que somete a la muestra en estudio de forma rápida y alternativa a las dos radiaciones y dispone de un sistema diferencial de lectura. A partir de su construcción y comprobación varios laboratorios de algunas naciones comenzaron a estudiar el fitocromo y el progreso se hizo mucho más rápido. El avance de las ciencias experimentales se produce en forma discontinua; el comienzo de cada etapa viene marcado por el hallazgo de nuevas técnicas, a lo cual sigue un desarrollo más o menos espectacular hasta que la técnica agota sus posibilidades y la marcha del progreso se va frenando en espera de otra técnica. Hasta qué punto la investigación se ve beneficiada por las nuevas técnicas se pone de manifiesto por el hecho de que durante siete años no se pudo aclarar nada en cuanto a la naturaleza del fitocromo y el mismo día que

se comprobó el buen funcionamiento del nuevo aparato, a las dos horas ya se había demostrado que el pigmento es una proteína.

Hoy el fitocromo es uno de esos tópicos sagrados que aparecen de vez en cuando en una rama de la ciencia, al que se atribuyen una intervención directa o indirecta en casi todas las funciones de las plantas.

Es una proteína con un cromóforo tetrapirrol abierto. Pero molecular 120.000. De las dos formas en que puede existir, la que absorbe luz de 660 nm es de color azul, tal como se predijo; la otra forma tiene color verde amarillento. La transición reversible entre las dos formas tiene lugar a través de algunas etapas intermedias y parece ser que una de las transformaciones implicadas es una isomerización cis-trans, lo cual recuerda otro de los grandes fotoprocesos de la biología, el de la visión humana, en el que también la luz da origen a una isomerización cis-trans en el retinal.

Es muy difícil en la actualidad citar un fenómeno biológico importante en las plantas que no se haya demostrado experimentalmente que está mediado por el fitocromo. Cuando en un escenario tan complejo como la biología una causa produce muchos efectos se tiende a pensar que los efectos conocidos son secundarios y que la causa debe dar origen a un efecto primario desconocido. En estos casos la especulación suele recaer en la permeabilidad de las membranas celulares, lo cual es lógico porque por variación en la permeabilidad de la membrana se puede afectar a toda manifestación viviente de plantas y animales. En este sentido se orienta más actualmente la investigación del mecanismo de acción del fitocromo.

Otro efecto primario típico en las especulaciones suele ser una actuación a nivel de genes y en el caso del fitocromo la especulación tiene fundamento experimental porque uno de los efectos típicos de la acción del fitocromo es la inducción de la síntesis de varios enzimas, de los cuales la fenil alanina amoníaco liasa ha sido un material favorito de investigación. Sin embargo la teoría, al menos en forma generalizada, está hoy descartada. La razón es que una respuesta mediada por la actuación del material genético debe tardar, al menos 0'5 a 2 horas, mientras que hay efectos del fitocromo que se manifiestan en sólo segundos o muy pocos minutos: la apertura y cierre de las hojas de mimosa responde a los 5 minutos del tratamiento y el crecimiento del coleoptilo de avena comienza 60 segundos después de tratar con luz de 730 nm.

¿POR QUE LA LUZ?

A lo largo de la evolución han sobrevivido y se han desarrollado lo más aptos para el ambiente en que se desenvolvían. Si en ese ambiente

está la luz, es lógico que los seres vivos actuales sean una consecuencia, entre otros factores, de la existencia de la luz. Pero ¿por qué la luz como factor ambiental de valor excepcional?

La velocidad de las reacciones químicas es tanto mayor cuanto más alto sea su contenido en energía. El químico en la industria y en el laboratorio acelera las reacciones principalmente mediante dos procedimientos: calentando o usando catalizadores. La Naturaleza en la inmensa mayoría de las reacciones químicas que constituyen los procesos vitales recurre a procedimientos similares: utiliza también catalizadores, los enzimas, que tienen una enorme actividad. No puede, en cambio, usar altas temperaturas porque la célula no los soporta. La luz hace el papel de una alta temperatura, en el sentido de que es utilizada para aumentar la energía de las moléculas. Veamos hasta qué punto la luz puede desempeñar ese papel.

Imaginemos que una molécula individual absorbe una unidad de luz, o sea, un fotón individual, tal como estableció Einstein. La energía de ese fotón es fácilmente calculable, suponiendo que conocemos su longitud de onda. Imaginemos que se trata de luz roja de 680 nm, que es muy efectiva en la fotosíntesis.

$$E = h \nu = \frac{6'6256 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{10}}{680 \cdot 10^{-7}} = 2'923 \cdot 10^{-12} \text{ ergios}$$

Esta es la energía que adquiere la molécula que ha absorbido el fotón.

¿Hasta qué temperatura habría que calentar para producir el mismo efecto, o sea, para suministrar a la molécula la misma energía?

En termodinámica no se suele trabajar con molécula individuales, sino con valores estadísticos. La ley de Boltzman expresa la fracción de moléculas que, a una temperatura dada tiene determinada energía. Por razones de simplificación del cálculo supondremos que esa fracción de mo-

lécúlas sea $\frac{1}{e}$ del total.

$$N = N_0 e^{-E/kt} ; \frac{N_0}{e} = N_0 e^{-E/kt} ; e^{-1} = e^{-E/kt} ; \frac{E}{kt} = 1$$

$$T = \frac{E}{K} = \frac{2'923 \cdot 10^{-12}}{1'381 \cdot 10^{-16}} = 2'116 \text{ }^\circ\text{K} = 1843 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Si pensamos que, de un conjunto de moléculas expuestas a la luz, bien pueden absorber un fotón una fracción $\frac{1}{e}$ de ellas la conclusión es que la luz roja suministra a las moléculas que la absorben una energía equivalente a la que se conseguiría calentando a 1843 °C. El dato es definitivo porque las moléculas orgánicas, en general, no soportarían ni mucho menos, esa temperatura y, en particular, el sistema proteínas-ácidos nucleicos, que es la base química de los procesos vitales, resulta especialmente sensible a una subida de temperatura.

CONCLUSION

En algún momento de la presente lectura me he considerado en el deber de excusarme por la exposición de lo que, en principio, son simples hechos experimentales. Creo que debo una explicación.

No considero adecuado presentar la Ciencia en forma de simple vulgarización de los descubrimientos y de sus aplicaciones porque veo en ello un afán sensacionalista que tiende a abaratar la Ciencia entre los profanos sensatos, de ahí mi temor de relatar experimentos.

Me ha guiado más el deseo, aun cuando no el acierto, de presentar la forma en que el científico aborda los problemas, juzga los resultados, deduce y plantea nuevos experimentos, teniendo siempre en cuenta el alcance y las limitaciones de las técnicas y los aparatos que utiliza. Y ello porque creo que nuestro principal defecto en la exposición de las ciencias, especialmente a los humanistas, ha sido hasta ahora la incapacidad de transmitir su aspecto más característico: su método. Los grandes descubrimientos científicos, las grandes aplicaciones tecnológicas, o sea, lo que más suele llamar la atención son sólo una consecuencia. El verdadero paso adelante de la humanidad fue la elaboración y extensión del método científico, que es el aspecto de la ciencia que menos llega al profano.

Creo que también hay problemas inversos, similares, o sea, con respecto a las humanidades, de forma que cuando los profanos juzgamos un poema o una pintura tendemos más a buscar la belleza y hemos aprendido menos a apreciar la información que se nos quiere transmitir.

¿No será que, a efectos de docencia la división entre ciencias y humanidades ha ido demasiado lejos? El hecho real es que la persona culta de hoy es relativamente más ignorante que la de cualquier otra época anterior, en el sentido de que sabe menos acerca de todo lo que se conoce.

Es justo reconocer que esta división nos ha venido dada desde antiguo. La distinción entre alma y cuerpo, espíritu y materia, conectan con la existencia de dos mundos, el del pensamiento puro, gobernado por la



lógica, y el material, del espacio y el tiempo, gobernado por leyes deterministas. Y el intento de Descartes de conectar a ambos a través de la glándula pineal del cerebro no podría tener mucho éxito. Especialmente en el campo de la biología la unión de esos dos mundos ha sido tradicionalmente difícil y, hasta que se formuló el siglo pasado la teoría de la evolución pocos filósofos notables llegaron a interesarse por la biología, con la excepción de Aristóteles y, algo, Bergson.

En la situación actual el gran cúmulo de conocimientos conseguidos tiende lógicamente a llevar al individuo hacia la especialización, pero ello no debe implicar el que aquellos que reciben una formación humanística encuentren difícil la comprensión adecuada del nuevo contenido de las ciencias físicas y biológicas.

En el terreno de la cultura la realización de la componente individual del hombre está en la especialización, pero la componente colectiva, que le lleva a sentirse parte de una comunidad, sólo puede verse satisfecha si se siente en condiciones de comprender a los demás y de situar su propia especialidad dentro del contexto de la cultura general.

Quizá esta separación entre ciencias y humanidades se vea también favorecida en la actualidad, al menos en parte, por el hecho de que, tanto unas como otras se han profesionalizado, lo cual nos lleva a aceptar con naturalidad el que un individuo cobra por entender y cultivar una parte de la cultura y, por lo tanto, el entenderla y cultivarla es una misión de él y no de los demás. Lo cierto es que conocer lo que la ciencia significa actualmente es cosa de todos y el ignorarlo es ignorar las bases en que se fundan los acontecimientos críticos de nuestro tiempo.

La ciencia se ha desarrollado de tal forma que ya no puede ser considerada simplemente como un complemento de una formación humanística general, sino que debe hallarse en el centro de cualquier programa educativo. Claro está que para que la ciencia ocupe su lugar en el sistema educativo ha de ser una ciencia relacionada con los aspectos materiales y sociales de la vida ordinaria, por lo menos más de lo que ha sido hasta ahora.

Es cosa de todos el conseguir una cultura científica más general y apoyar la unidad de las ciencias y las humanidades.

Es cosa de todos comprender que los cambios que ha experimentado la civilización últimamente están íntimamente ligados al progreso experimentado por la ciencia. Pero también que no han sido los hombres de ciencia directamente quienes han producido los cambios porque la aplicación de los hallazgos científicos ha obedecido a una combinación de intereses económicos, en los cuales el investigador ha tenido un papel muy limitado.

Es cosa de todos, en fin, comprender que si se aplicaran todas las fuerzas de la investigación científica a los problemas básicos de la humanidad sería posible aumentar enormemente los recursos naturales de energía, las fuentes de alimentos y las posibilidades de trabajo porque los verdaderos recursos de la humanidad son intelectuales, sociales y morales más que materiales.