



Fotosíntesis

Apellidos, nombre	Pachés Giner Maria AV (mapacgi@upvnet.upv.es)
Departamento	Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Centro	Universitat Politècnica de València

Resumen de las ideas clave

La fotosíntesis es un proceso biológico fundamental para la biosfera porque convierte la energía de la radiación solar en energía química que puede ser aprovechada por todas las formas de vida. El proceso consta de dos fases que se llevan a cabo en los cloroplastos de las células y que elimina dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y libera oxígeno, ejerciendo un profundo impacto sobre el clima terrestre. Los organismos que llevan a cabo este proceso son principalmente las plantas, las algas y las bacterias fotosintéticas.

El conocimiento básico de este proceso es esencial para entender las relaciones entre los seres vivos y la atmósfera, así como el balance de la vida sobre la Tierra.

Objetivos

Una vez que el estudiante lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Describir el proceso de la fotosíntesis.
- Identificar dónde sucede cada una de las principales etapas de la fotosíntesis.
- Analizar la importancia del agua a lo largo de todo el proceso fotosintético.

Introducción

Los organismos autótrofos son aquellos capaces de fabricar los compuestos necesarios para su estructura y actividad a partir de las sustancias inorgánicas procedentes de la naturaleza inerte. Dentro de este grupo podemos encontrar los fotoautótrofos y los quimioautótrofos. La diferencia básica entre ellos radica en la fuente de energía que utilizan para sintetizar moléculas orgánicas complejas a partir de CO_2 . En el caso de los fotoautótrofos, esta energía procede de la radiación solar, mientras que en los quimioautótrofos se obtiene de la oxidación de compuestos inorgánicos como amoníaco, sulfuro de hidrógeno o nitritos.

Los organismos fotoautótrofos, entre los que se encuentran las plantas, cianobacterias y algas, son los principales responsables de incorporar energía y materia a la Biosfera a través de la fotosíntesis. Por su parte, los quimioautótrofos que son procariotas, realizan una contribución relativamente pequeña a la formación de biomasa en la Tierra.

La fotosíntesis (del griego, *photo*, luz; *syn*, con unión; y *thésis*, disposición) es un proceso biológico que puede ocurrir en presencia o en ausencia de oxígeno (oxigénica o anoxigénica) y mediante el cual se sintetizan moléculas orgánicas a partir de moléculas inorgánicas utilizando la energía luminosa.

Pigmentos fotosintéticos

En todos los organismos fotoautótrofos, el pigmento más importante que interviene en la fotosíntesis es la clorofila. La molécula de la clorofila está formada por un núcleo porfirínico de cuatro anillos de pirrol (Figura 1, representados en color rosa), en cuyo centro se sitúa un átomo

de magnesio. Además, poseen una cadena lateral denominada grupo fitol, rica en grupos metilo ($-\text{CH}_3$). El núcleo porfirínico con el magnesio es hidrófilo, mientras que el fitol, rico en grupos metilo, es hidrófobo y lipófilo.

Existen diversos tipos de clorofilas: clorofila *a*, *b* y *c*. La clorofila *a* y *b* se diferencian únicamente en un radical: la clorofila *a* posee un grupo metilo, mientras que la clorofila *b* presenta un grupo aldehído. Por último, la clorofila *c* tiene una estructura similar a las anteriores, pero carece del grupo fitol. La clorofila *a* desempeña el papel principal en todos los organismos que producen oxígeno mediante la fotosíntesis, mientras que en las plantas superiores la clorofila *b* también está presente de forma constante. Estas moléculas de pigmento se localizan en los tilacoides de los cloroplastos y cada una de ellas absorbe luz a diferentes longitudes de onda del espectro visible.

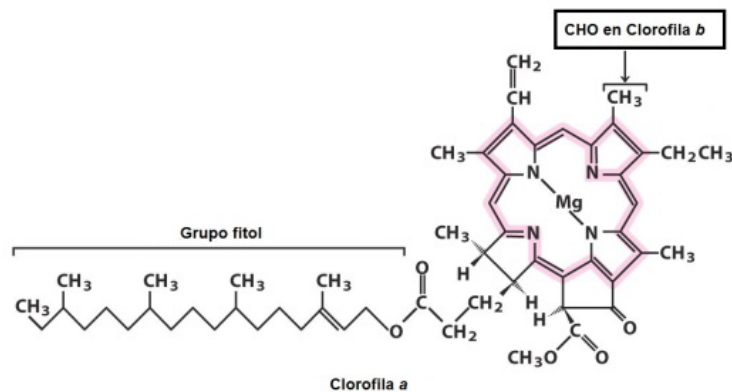


Imagen 1. Estructura de la molécula de clorofila (Elaboración propia)

A primera vista, la clorofila como pigmento no parece ideal puesto que tiene un mínimo de absorción justo en la región del espectro donde la intensidad de la luz solar es mayor (verde y verde azulado ($\approx 480\text{--}570\text{ nm}$)). Sin embargo, ha supuesto un éxito en la evolución debido a algunas de sus propiedades.

En primer lugar, la clorofila posee un gran número de dobles enlaces conjugados, lo que genera que existan numerosos electrones especialmente móviles. Esto hace que se necesite relativamente poca energía para elevar estos electrones a un nivel energético superior. A esta necesidad de escasa energía para la excitación corresponde la absorción de radiación de onda relativamente larga. Además, la estructura en anillo de la clorofila (sistema porfirínico) permite que los electrones no solo oscilen, sino que también puedan circular por el sistema anular, lo que confiere una gran estabilidad a la molécula.

En segundo lugar, la molécula de clorofila puede transferir la energía radiante absorbida a otras moléculas, así como captar la energía de excitación que otras moléculas cercanas hayan recibido. Esta capacidad de transporte de energía es utilizada por las plantas para compensar el “hueco del verde”, es decir, la baja absorción de la clorofila en esta región del espectro.

Por último, la clorofila posee la capacidad de modificar su espectro de absorción según el ambiente, lo que permite optimizar la captación de la radiación.

⇒ Recuerda que...

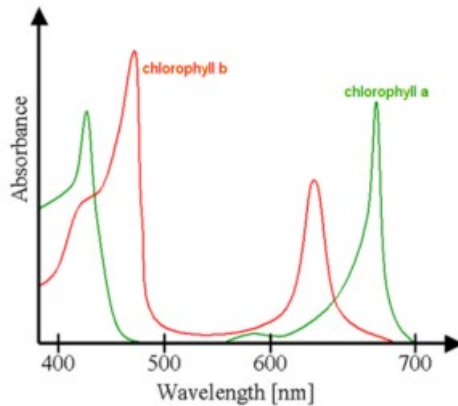


Imagen 2: Espectros de absorción de la clorofila (Pugliesi, 2026)

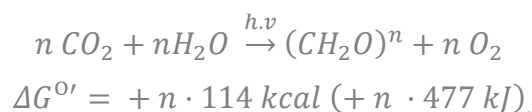
- ♦ Las porfirinas figuran entre las combinaciones químicas más estables. Aparecen en el petróleo y en el carbón antiguo de hasta 400 millones de años.
- ♦ En las bacterias fotoautótrofas, los pigmentos centrales son las bacterioclorofilas, que se distinguen fundamentalmente por su estructura relativamente simple y por su espectro de absorción.
- ♦ La clorofila y la hemoglobina de la sangre de los animales son muy similares. La diferencia esencial radica en el átomo central: en la clorofila es magnesio, mientras que en la hemoglobina es hierro

Existe otro tipo de pigmentos secundarios entre los que destacan los carotenoides (carotenos y xantófilas). Estos son pigmentos lipófilos, con un gran número de dobles enlaces, que presentan colores que van del amarillo anaranjado al rojo. Los carotenoides absorben luz en la región azul del espectro, justo el sector donde la absorción por parte de la clorofila es más débil.

La mayoría de estos pigmentos tienen una doble función. Por una parte, actúan como pigmentos antena, captando luz y transfiriéndola posteriormente a la clorofila. Por otro lado, desempeñan un papel protector, ya que ayudan a evitar daños en la clorofila, por ejemplo, frente al ataque del oxígeno molecular.

1. Fotosíntesis

El proceso de la fotosíntesis se lleva a cabo en los cloroplastos de las células y puede formularse de modo genérico así:



En estas fórmulas, n por lo común es 6, con lo que la glucosa resulta un producto final común en la fotosíntesis.

La fotosíntesis comprende dos fases globales diferenciadas: la primera se denomina fase lumínica (en ella se produce la transducción de energía), y la segunda fase oscura (se produce la reducción y fijación del carbono).

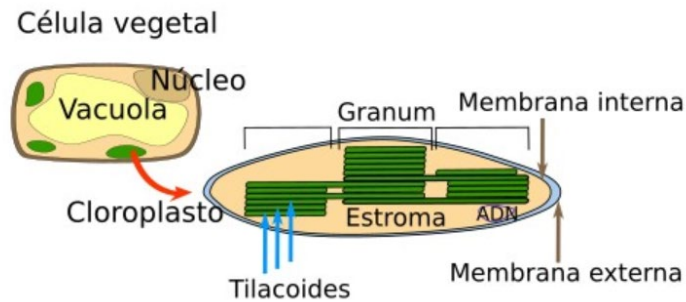


Imagen 3: Estructura de los cloroplastos (Pacheco et al., 2026)

1.1 Fase lumínica de la fotosíntesis

La fase lumínica de la fotosíntesis se realiza en los tilacoides de los cloroplastos y, como su nombre indica, depende de la luz. Durante esta fase, se absorbe la energía luminosa (fotones) por parte de la clorofila y se transforma en energía química en forma de ATP y poder reductor (NADPH).

Esta fase está estrechamente relacionada con la estructura de la membrana tilacoidal, puesto que en ella se ubican los grandes complejos de proteínas y pigmentos que captan la energía de la luz: los fotosistemas. Hay dos tipos de fotosistemas: el fotosistema I (PSI o P700) y el fotosistema II (PSII o P680). Tanto en el PSI como en el PSII en su estructura se distinguen dos subunidades:

- Complejo antena: formado por pigmentos fotosintéticos que captan la energía y la transfieren a otros pigmentos hasta que alcanzan el centro de reacción fotoquímico.
- Centro de reacción fotoquímico: contiene los pigmentos diana (clorofila) que captan la energía y ceden el primer electrón al aceptor primario de electrones, que queda reducido, iniciando así una cadena de reacciones químicas.

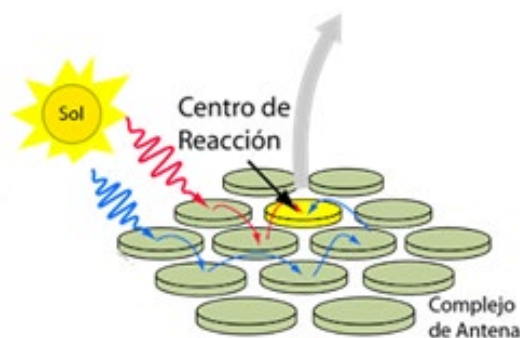


Imagen 4. Transferencia de energía hacia el Centro de reacción (Adaptado de Karp et al., 2008 propia)

- ♦ Cuando una molécula de pigmento absorbe un fotón, la energía se libera y pasa a un pigmento sintonizado a un nivel de energía ligeramente inferior (longitud de onda más larga), y de ahí a un pigmento de menor energía, y así sucesivamente hasta que alcanza el centro de reacción. De esta manera, se obtiene energía en una amplia gama de longitudes de onda.

Las clorofilas de los centros de reacción son las únicas capaces de iniciar el proceso fotosintético al enviar electrones excitados a la cadena de transporte de electrones. El resto de las clorofilas y de los pigmentos accesorios solo actúan para transferir la energía al centro de reacción. El electrón energizado se transfiere a una molécula aceptora y es reemplazado por otro electrón.

¿Cómo se reemplaza el electrón que ha sido donado a la cadena de transporte?

La clorofila va perdiendo electrones energizados (al transferirlos a moléculas aceptoras), que recupera mediante la ruptura de moléculas de agua, en un proceso denominado fotólisis del agua. Este proceso implica la ruptura del agua en sus componentes: dos protones, dos electrones y un átomo de oxígeno. Este proceso ocurre porque el PSII (P680) es un agente oxidante tan fuerte que es capaz de arrancar los electrones del átomo de oxígeno al agua y liberar los protones a la luz del tilacoide. El oxígeno que se libera en la descomposición del agua (en el lado interno de la membrana de los tilacoides) es un producto de desecho de la fotosíntesis.

Aunque se denomina fotólisis, no es la luz la que rompe la molécula de agua, sino que se trata de un proceso indirecto.

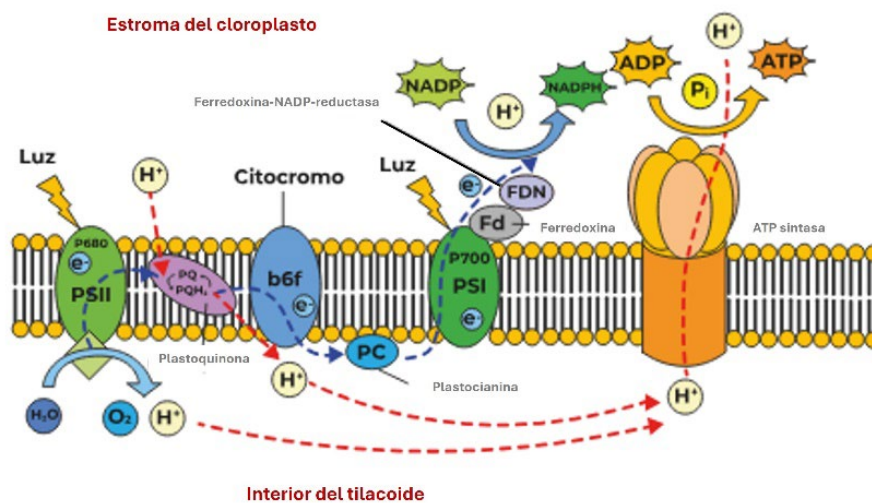


Imagen 5. Esquema resumido de las moléculas que participan en la fase luminosa de la fotosíntesis (Adaptado de Megias et al., 2026)

El flujo de electrones en ambos fotosistemas (PSII y PSI) está acoplado a una serie de reacciones de transferencia de electrones a través de plastoquinonas, el complejo citocromo b6/f y de la plastocianina. Todas estas reacciones de transferencia implican el consumo y liberación de protones en ambos lados de la membrana de tilacoide, lo que genera una diferencia de potencial electroquímico. Esta diferencia de potencial es la que se utiliza en la fotofosforilación.

La fotofosforilación es un proceso por el cual el ADP se fosforila a ATP, empleando la energía de transferencia de los electrones, activada por la luz. Durante este proceso, también se reduce el NADP^+ a NADPH. Es decir, el NADP^+ actúa como aceptor final natural de los electrones que la luz separa del agua.

Por otra parte, el NADPH es un transportador de H con capacidad de proporcionar electrones de alta energía necesarios para impulsar ciertas reacciones en rutas anabólicas posteriores.

Es importante tener en cuenta que la transferencia de electrones se produce por la absorción de la energía luminosa y, en realidad, es posible debido a ella. La transferencia de electrones del PSII al PSI y de este al NADPH solo se produce "cuesta abajo" desde el punto de vista energético (libera energía y, por lo tanto, es espontánea), porque la absorción de energía luminosa lleva a los electrones de los fotosistemas a niveles energéticos muy altos.

En esta reacción lumínica, un sistema redox con potencial muy negativo ($\text{NADPH}_2/\text{NADP}^+$: $E_0' = -0.32 \text{ V}$) es reducido por otro sistema redox con potencial extremadamente positivo ($\text{H}_2\text{O} / 1/2 \text{ O}_2$: $E_0' = +0.82 \text{ V}$), es decir, el proceso es fuertemente endergónico.

El ATP y el NADPH generados de este modo por el cloroplasto son utilizados casi exclusivamente por el propio cloroplasto (y no distribuidos al resto de la célula) para alimentar las reacciones oscuras, que son energéticamente caras.

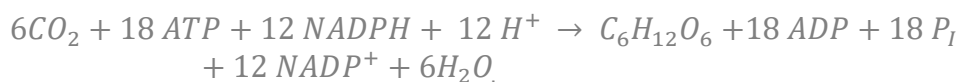
Pero...no siempre se emplea el agua como donador de electrones para la reducción de CO_2 . Por ejemplo, las sulfobacterias púrpuras (*Chromatium*) utilizan combinaciones reducidas de azufre, sobre todo el H_2S , como medio reductor y depositan el azufre resultante inicialmente en forma intracelular. Las sulfobacterias verdes emplean igualmente H_2S como donador de electrones, pero no acumulan el azufre en el interior de las células (*Chlorobium*).

En estas bacterias la ecuación de la fotosíntesis queda de la siguiente manera:



1.2 Fase oscura de la fotosíntesis

En la fase oscura (independiente de la luz) se utiliza este ATP y poder reductor, formados anteriormente, para fijar el carbono del CO_2 a en moléculas orgánicas. Este proceso puede formularse así:



Estas reacciones complejas comprenden un gran número de pasos parciales que se dan en el estroma de los cloroplastos y son catalizados por enzimas, de las que solo algunas son específicas del aparato fotosintético. Esta secuencia de reacciones es conocida como el Ciclo de Calvin y se puede dividir en tres fases:

- Fase de carboxilación: El CO_2 se une a una molécula de 5C (ribulosa-1,5-bisfosfato, RuBP) mediante una enzima denominada Rubisco (Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa). El producto de esta reacción es un compuesto intermediario de 6 carbonos, inestable, que inmediatamente se rompe en 2 moléculas de 3 carbonos (PGA, fosfoglicerato). También se conoce como ruta C3 porque el producto de la reacción de fijación del carbono es un compuesto de 3 carbonos.
- Reducción del carbono: Mediante la energía y el potencial de reducción del ATP y del NADPH, las moléculas de 3-fosfoglicerato (PGA) se convierten en gliceraldehído-3-fosfato (G3P). Cada molécula de 3 C de G3P es la mitad de una molécula de hexosa. La reacción de 2 moléculas de G3P es exergónica y conduce a la formación de glucosa y fructosa.
- Regeneración de RuBP: Como la fijación del CO_2 y su reducción se producen de forma continua, el aceptador de CO_2 (el RuBP), también tiene que regenerarse continuamente. En esta fase se reacomodan los carbonos y los átomos asociados que sobran en moléculas de ribulosa fosfato, cada una de las cuales queda fosforilada por el ATP para regenerar RuBP (el compuesto de 5 carbonos que inicia el ciclo).



Imagen 6. Esquema de las etapas del Ciclo de Calvin (Pérez-Urca E. 2009)

El balance del Ciclo de Calvin determina que:

1. Por cada molécula de CO_2 fijada en una molécula de ribulosa-1,5-bisfosfato se forman 2 moléculas de 3-fosfoglicerato (una triosa fosfato, 3C). Cada una de ellas requiere 1 molécula de ATP para convertirse en 1,3-difosfoglicerato, y este, a su vez, requiere 1 molécula de NADPH para reducirse a gliceraldehído-3-fosfato.

2. En condiciones estacionarias, la fijación de 3 moles de CO_2 en 3 reacciones de carboxilación produce 6 moléculas de gliceraldehído-3-fosfato, de las cuales 5 se utilizan para regenerar 3 moléculas de ribulosa-1,5-bisfosfato. La sexta molécula de gliceraldehído-3-fosfato representa la ganancia neta del ciclo.

2. Importancia del agua en el proceso de la fotosíntesis

El agua desempeña un papel fundamental en el proceso fotosintético y afecta de forma directa a la capacidad de los organismos fotosintéticos para realizarlo. Condiciones de poca disponibilidad de agua pueden limitar el proceso de fotólisis del agua en el PSII y reducir, por tanto, la cantidad de electrones disponibles para la cadena de transporte de electrones. Esta limitación lleva asociada una disminución en la producción de ATP y NADPH, lo que impacta negativamente la cantidad total de energía disponible para la fase oscura.

El agua es esencial regular los estomas, que son los poros por donde las plantas absorben el dióxido de carbono, requisito esencial para la fotosíntesis. El agua permite mantener la turgencia celular necesaria para abrir los estomas.

Las plantas han desarrollado mecanismos adaptativos para hacer frente al estrés hídrico; por ejemplo, en situaciones de escasez de agua pueden cerrar parcialmente sus estomas, reduciendo así la pérdida de agua por transpiración y conservando el agua disponible. Sin embargo, este cierre estomático puede limitar la entrada de CO_2 (necesario para la fase oscura), lo que disminuye temporalmente la tasa fotosintética para preservar la hidratación celular.

El estrés hídrico conlleva cambios fisiológicos relacionados con la disminución de las tasas de crecimiento, la degradación de la clorofila y, por tanto, la reducción de la producción de biomasa. Además, la menor disponibilidad de agua también puede provocar la acumulación de productos tóxicos en la planta debido a la interrupción de los procesos metabólicos.

Conclusiones

La fotosíntesis es un proceso biológico que comprende dos etapas que funciona de manera coordinada para transformar energía lumínica en energía química utilizable. La luz impulsa la transferencia de electrones a través de los fotosistemas, permitiendo la síntesis de ATP y poder reductor. Posteriormente esta energía se utiliza para la fijación del CO_2 y su transformación en moléculas orgánicas.

Este mecanismo, preciso y eficiente, constituye la base de la producción de materia orgánica y sostiene la mayor parte de la vida en la Tierra.

Bibliografía

Herráez Sánchez, Á. (s.f.). El Proyecto Biológico. Biomodel, Universidad de Alcalá. Consultado: 22 abril 2026. Disponible en: <https://biomodel.uah.es/epb/inicio.htm>

Karp, G (2008). Cell and Molecular Biology, (5.^a ed.) Wiley.

Megías, M., Molist, P., Pombal, M.A. Atlas de histología vegetal y animal. <http://mmegias.webs.uvigo.es/inicio.html>. Consultado: abril 2026.

Pérez-Urca, E. (2009). Serie Fisiología Vegetal. 2 (3): 1-47, 2009. ISSN: 1989-3620.

Pugliesi, D. (s.f.). Recuperada de <https://www.pyroistech.com/es/luz-plantas/>.

Strasburger, E., Noll, F., Schenck, H., & Schimper, A. F. W. (1923). Tratado de botánica. (7.^a ed.) Manuel Marín.