

## **BLOQUE IV (D): METABOLISMO**

### **TEMA 14: METABOLISMO CELULAR. ANABOLISMO**

#### **1.- INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES**

#### **2.- ANABOLISMO AUTÓTROFO**

##### **✚ 2.1.- FOTOSÍNTESIS**

- **2.1.1.- Importancia biológica de la fotosíntesis**
- **2.1.2.- Fases de la Fotosíntesis oxigénica**
  - **2.1.2.1.- Fase luminosa (FASE FOTOQUÍMICA)**
    - ✓ **2.1.2.1.1.- Captación de la luz por los fotosistemas.**
    - ✓ **2.1.2.1.2.- Transporte no cíclico de electrones desde el H<sub>2</sub>O hasta el NADP<sup>+</sup>. (Esquema en Z de la Fotosíntesis). Reducción del NADP<sup>+</sup> y fotólisis del H<sub>2</sub>O.**
    - ✓ **2.1.2.1.3.- Fotofosforilación no cíclica**
    - ✓ **2.1.2.1.4.- Transporte cíclico de electrones y Fotofosforilación cíclica**
  - **2.1.2.2.- Fase oscura (FASE BIOSINTÉTICA)**
    - ✓ **2.1.2.2.1.- Fijación del CO<sub>2</sub>**
    - ✓ **2.1.2.2.2.- Reducción del CO<sub>2</sub> fijado**
    - ✓ **2.1.2.2.3.- Regeneración de la ribulosa-1,5-difosfato**
- **2.1.3.- Balance energético general de la fotosíntesis oxigénica**
- **2.1.4.- Fotosíntesis anoxygenica o bacteriana**
- **2.1.5.- Factores que influyen en la fotosíntesis**
- **2.1.6.- Fotosíntesis y evolución**

##### **✚ 2.2.- QUIMIOSÍNTESIS**

##### **✚ 2.3.- FORRESPIRACIÓN Y LAS PLANTAS C<sub>3</sub> Y C<sub>4</sub>**

#### **3.- ANABOLISMO HETERÓTROFO**

- ✚ **3.1.- Anabolismo de los glúcidos**
- ✚ **3.2.- Anabolismo de los lípidos**
- ✚ **3.3.- Anabolismo de las proteínas**
- ✚ **3.4.- Anabolismo de los ácidos nucleicos**

## 1.- INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

Como hicimos en la unidad de catabolismo, para comprender el anabolismo celular, es necesario conocer y en este caso repasar, las formas de nutrición de los organismos según el tipo de materia que intercambian con su entorno y la fuente de energía primaria para generar su biomasa.

Los requisitos para la supervivencia de un organismo se reducen a 5 puntos básicos:

- Una **fente ambiental de carbono** para constituir el esqueleto carbonado de sus biomoléculas. Atendiendo a cuál es esa fuente de C, se clasifican en:
  - **Autótrofos**, asimilan el CO<sub>2</sub> ambiental
  - **Heterótrofos**, como materia prima utilizan otras moléculas orgánicas sencillas
- Una **fente ambiental de hidrógeno** (electrones) para reducir moléculas que, al aceptarlo, alcancen un elevado potencial de reducción, es decir, un potencial redox muy negativo. Según de donde venga el H, se clasifican en:
  - **Litótrofos**, si el H procede de sustancias sencillas como H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S
  - **Organótrofos**, si necesitan moléculas más complejas
- Una **fente primaria de energía** que haga posible esa reducción. Según el tipo de energía pueden ser:
  - **Fotótrofos**, si aprovechan la luz directamente
  - **Quimiótrofos**, si solo pueden servirse de energía química
- Un **aceptor último de hidrógenos** (electrones) que permita la oxidación del aceptor anterior de la cadena redox, con la consiguiente liberación de energía que hará posible la síntesis de biomoléculas. Bajo este criterio existen:
  - **Aerobios**, si el O<sub>2</sub> de la atmósfera es el aceptor último
  - **Anaerobios**, si es otra sustancia la que finalmente recibe los electrones
- Un **suministro ambiental de agua, sales minerales y nitrógeno** para construir otras biomoléculas como proteínas y demás compuestos nitrogenados.

CLASES DE ORGANISMOS SEGÚN SU NUTRICIÓN		
	Fotótrofos	Quimiótrofos
Litótrofos (Autótrofos)	<b>FOTOLITÓTROFOS</b> Bacterias fotosintéticas del azufre, todos los vegetales con clorofila	<b>QUIMIOLITÓTROFOS</b> Bacterias quimiosintéticas
Organótrofos (Heterótrofos)	<b>FOTOROGANÓTROFOS</b> Bacterias purpúreas no sulfurosas	<b>QUIMIORGANÓTROFOS</b> Muchas bacterias, todos los animales, todos los hongos

Esta clasificación se aplica tanto al organismo como a las células individuales. Pero en los organismos pluricelulares autótrofos cabe la posibilidad de que algunas células de sus tejidos sean heterótrofas y funcionen de modo quimioorganótrofo; este es el caso de los vegetales más evolucionados. Como organismos, son **autótrofos fotolitótrofos** gracias a sus células portadoras de cloroplastos, pero las células de sus raíces o de sus tejidos de reserva tienen carácter **heterótrofo quimioorganótrofo**.

El **anabolismo** es la vía constructiva del metabolismo, es decir, la ruta de síntesis de moléculas complejas a partir de moléculas sencillas. A diferencia del catabolismo, el anabolismo no es igual en todos los seres, diferenciándose dos tipos de anabolismo: autótrofo y heterótrofo.

Si las moléculas iniciales son inorgánicas, por ejemplo,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NO_3^-$ , etc., se denomina **anabolismo autótrofo**, mientras que, si son orgánicas, por ejemplo, glucosa, aminoácidos, nucleótidos, etc., se denomina **anabolismo heterótrofo**.

- El **anabolismo autótrofo** se puede realizar mediante:
  - La **fotosíntesis**, que es el anabolismo autótrofo que se produce gracias a la energía luminosa. La realizan las plantas, las algas, las cianobacterias y las bacterias fotosintéticas.
  - La **quimiosíntesis**, que es el anabolismo autótrofo que se produce gracias al aprovechamiento de la energía desprendida en la oxidación de ciertas moléculas. La quimiosíntesis sólo la pueden realizar algunas bacterias, las **quimioautótrofas**.

Todos estos organismos no dependen de otros para vivir, ya que pueden colonizar lugares sin vida (*auto* significa por sí mismo y *trofo* alimentación). Ellos son los que posibilitan la vida de los demás organismos (animales, hongos, protozoos y bacterias heterótrofas).

- El **anabolismo heterótrofo** se da en todos los organismos, y se realiza de forma muy similar en todos ellos. Su objetivo es la síntesis de reservas energéticas y crear estructuras para que el organismo pueda crecer o, simplemente, para que pueda renovar sus estructuras deterioradas.

**ANABOLISMO AUTÓTROFO**

Paso de moléculas inorgánicas, a moléculas orgánicas sencillas. Obtienen el carbono para sintetizar las moléculas del  $CO_2$  atmosférico. El hidrógeno lo consigue, generalmente, del agua. El oxígeno lo proporciona el  $CO_2$ . El nitrógeno se logra del suelo, excepto algunos organismos que son capaces de fijarlo...

**ANABOLISMO FOTOSINTÉTICO**  
Plantas, algas, cianobacterias y bacterias fotosintéticas

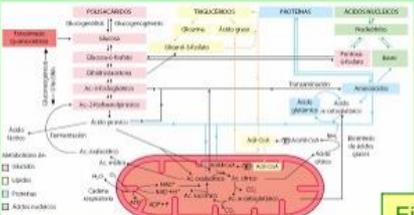


**ANABOLISMO QUIMIOSINTÉTICO**  
Bacterias quimiosintéticas (nitrobacterias o las bacterias metanógenas)



**ANABOLISMO HETERÓTROFO**

Transformación de moléculas orgánicas sencillas en otras de mayor complejidad (almidón, grasas, proteínas...). Común a los organismos autótrofos y heterótrofos



Ej: GLUCOGENOGÉNESIS

## 2.- ANABOLISMO AUTÓTROFO

Es el conjunto de reacciones metabólicas mediante las cuales a partir de **compuestos sencillos** (orgánicos o inorgánicos) se sintetizan **moléculas más complejas**. Los procesos anabólicos son **endergónicos** y **reductores**.

Lo realizan únicamente los seres autótrofos (vegetales, algas y algunas bacterias). Consiste en sintetizar a partir de **moléculas inorgánicas** ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , sales), **moléculas orgánicas sencillas** (monosacáridos, aminoácidos etc.).

### 2.1.- FOTOSÍNTESIS

La **fotosíntesis** es un proceso anabólico, en el que, **utilizando la energía luminosa**, se **sintetiza materia orgánica** (glucosa y otras moléculas orgánicas) **por reducción de materia inorgánica** ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), por consiguiente, podemos decir que en la **fotosíntesis se transforma la energía luminosa en energía química** que se almacena en los compuestos orgánicos.

La fotosíntesis tiene lugar en los **cloroplastos** de las células eucariotas (algas y plantas superiores), en los **tilacoides** de las cianobacterias y en la **membrana celular** y el **citoplasma** de las bacterias fotosintéticas.

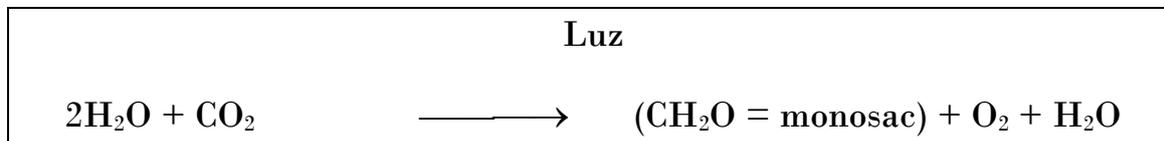
#### ▪ 2.1.1.- Importancia biológica de la fotosíntesis

La fotosíntesis es probablemente el **proceso bioquímico más importante de la Biosfera**, ya que la energía solar captada por los organismos fotosintéticos no sólo constituye su propia fuente de energía, sino que es además la fuente de energía de casi todos los organismos heterótrofos a los que les llega a través de las distintas cadenas alimentarias. Sólo algunas bacterias quimiosintéticas podrían seguir viviendo sin ella.

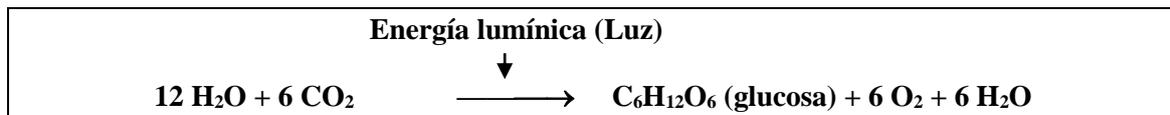
Además:

- La fotosíntesis fue la responsable del **cambio producido en la atmósfera terrestre primitiva**, que en principio era anaerobia y reductora, y luego se hizo aerobia y oxidante.
- Mediante la fotosíntesis se realiza la **síntesis de materia orgánica** (unos ciento veinte mil millones (12000000000) de toneladas de carbono son fijadas anualmente desde el  $\text{CO}_2$  a los compuestos orgánicos).
- A la fotosíntesis se debe también la **energía almacenada en los combustibles fósiles** como carbón, petróleo y gas natural.
- La **respiración aeróbica o aerobia** es posible gracias a la **liberación de oxígeno a la atmósfera como subproducto de la fotosíntesis (posibilita el desarrollo de la vida)**
- La fotosíntesis es responsable de la **retirada del  $\text{CO}_2$  atmosférico**, principal gas causante del efecto invernadero, por lo que ayuda a amortiguar y minimizar los efectos del problema anterior y del cambio climático.

- La fotosíntesis puede considerarse como un proceso de **oxido-reducción**, en el que un compuesto se oxida y cede electrones (generalmente el H<sub>2</sub>O) y otro compuesto los acepta y se reduce (normalmente el CO<sub>2</sub>). Además, es un proceso **anabólico** que no se produce de forma espontánea, sino que requiere el aporte de energía externa, en este caso, la **energía de la luz**.
- La oxidación del agua produce la rotura de la molécula (**fotólisis del agua**) y, como consecuencia, **se desprende oxígeno molecular O<sub>2</sub>**. A esta fotosíntesis por ello se la denomina **oxigénica**.
- Se ha comprobado experimentalmente que el oxígeno desprendido procede del agua, suministrando a la planta agua marcada con un isótopo del oxígeno (H<sub>2</sub><sup>18</sup>O) se observa que el vegetal libera <sup>18</sup>O. Como la molécula de agua sólo contiene un átomo de oxígeno y en la fotosíntesis se desprende oxígeno molecular (O<sub>2</sub>), la reacción global, debería escribirse:



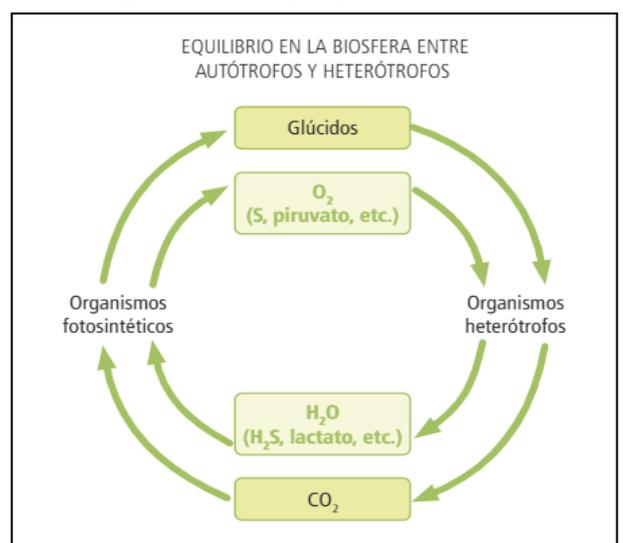
- Para la obtención de una molécula de glucosa, que se suele considerar el producto final de la fotosíntesis, la ecuación general debe modificarse del siguiente modo



- Aunque la molécula más utilizada como dadora de hidrógenos (reductora) es el agua, algunos organismos como algunas bacterias fotosintéticas emplean como dadores de hidrógenos otras moléculas como el **ácido sulfhídrico** o el **ácido láctico**. En este caso no se libera oxígeno, por ello a esta fotosíntesis se la denomina **anoxigénica**.
- El CO<sub>2</sub> es el compuesto que más se utiliza como aceptor de hidrógenos en la fotosíntesis, sin embargo, la mayor parte de las plantas superiores pueden utilizar también otros aceptores como el **nitrato** y el **sulfato**.
- Finalmente, comentaremos que la fotosíntesis permite que exista **un equilibrio en la biosfera entre seres autótrofos y heterótrofos como productores y fijadores de CO<sub>2</sub>**.

De este modo, las plantas, las algas y bacterias fotosintéticas elaboran glúcidos a partir de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, liberando O<sub>2</sub> a la atmósfera. En cambio, los organismos heterótrofos, como animales, hongos y algunos protoctistas, utilizarán ese O<sub>2</sub> para metabolizar los glúcidos, extrayendo de ellos la energía y degradándolos hasta CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, reciclándose de esta forma la materia.

Como conclusión, **podemos afirmar que la diversidad actual de la vida existente en la Tierra depende principalmente de la FOTOSÍNTESIS**.



Como hemos avanzado antes, existen **dos tipos de fotosíntesis**:

- ❖ **La fotosíntesis oxigénica**: es propia de las plantas superiores, las algas y las cianobacterias, en las que el dador de electrones es el agua y, por lo tanto, se desprende oxígeno.



- ❖ **La fotosíntesis anoxigénica o bacteriana** es propia de las bacterias purpúreas y verdes del azufre, en las que el dador de electrones no es el agua, sino, generalmente, el sulfuro de hidrógeno, por lo que no se desprende oxígeno, sino azufre, que puede acumularse en el interior de la bacteria o ser expulsado fuera.



The infographic is divided into two main sections: 'FOTOSÍNTESIS OXIGÉNICA' (top, light green background) and 'FOTOSÍNTESIS ANOXIGÉNICA o BACTERIANA' (bottom, bright green background). The top section includes a micrograph of cyanobacteria, the chemical equation  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + 1/2 \text{O}_2$ , and notes that electrons are obtained from water photolysis and oxygen is released. The bottom section includes the chemical equation  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + \text{S}$ , notes that hydrogen sulfide molecules are decomposed and sulfur is released, and mentions that purple and green sulfur bacteria perform this process in sulfurated waters.

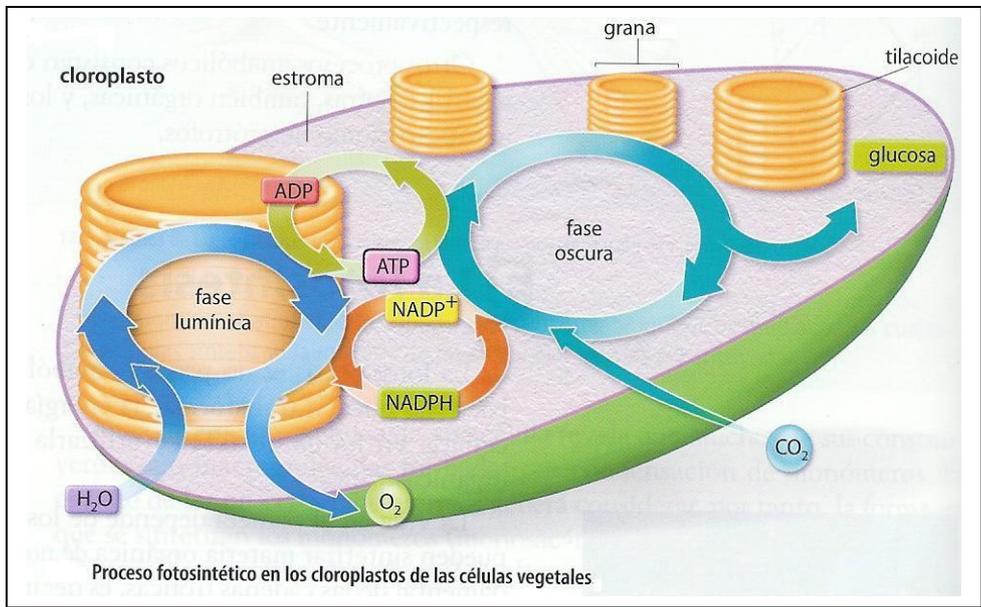
### ▪ 2.1.2.- Fases de la Fotosíntesis oxigénica

De forma general y a nivel de resumen esquemático, podemos decir que la fotosíntesis presenta dos fases bien diferenciadas:

- ✓ **Fase luminosa (FOTOQUÍMICA)**: Se produce sólo **en presencia de luz** y se realiza en la **membrana de los tilacoides**, donde se localizan, los pigmentos fotosintéticos, la cadena fotosintética transportadora de electrones y la ATPasa cloroplástica.

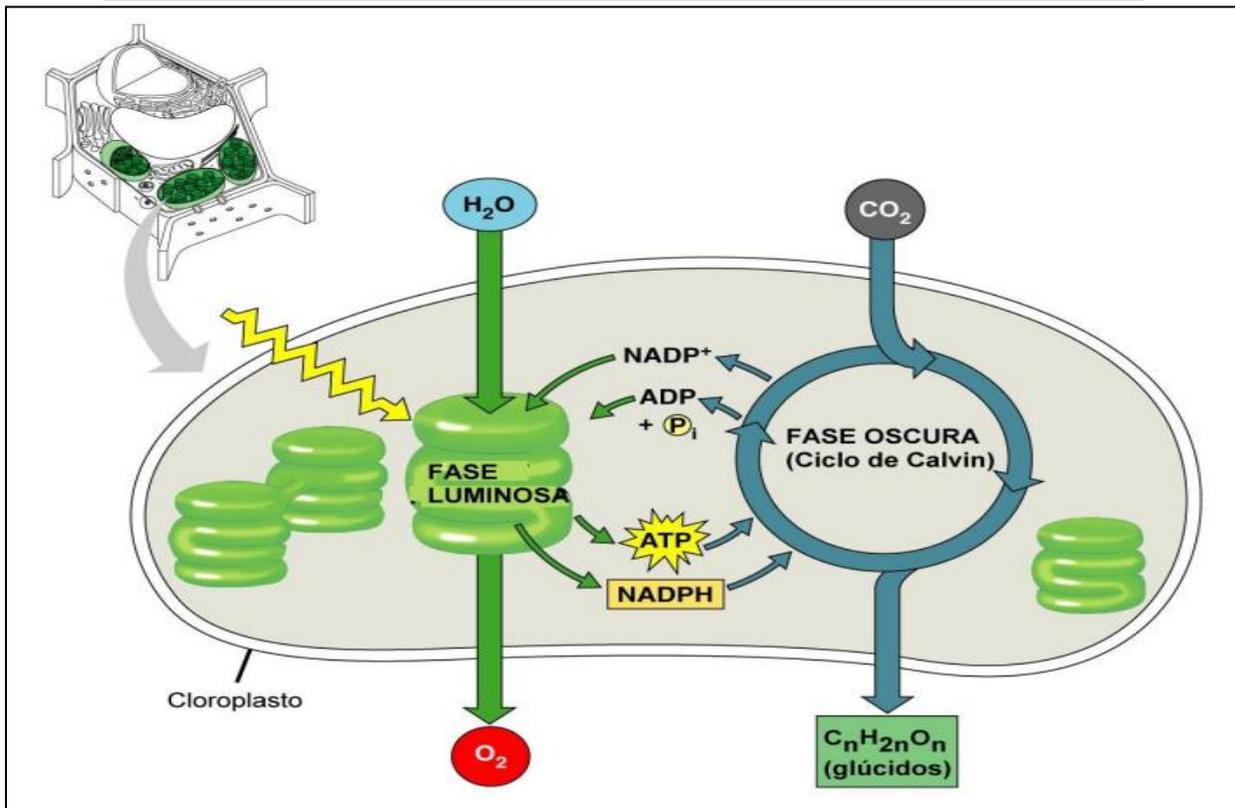
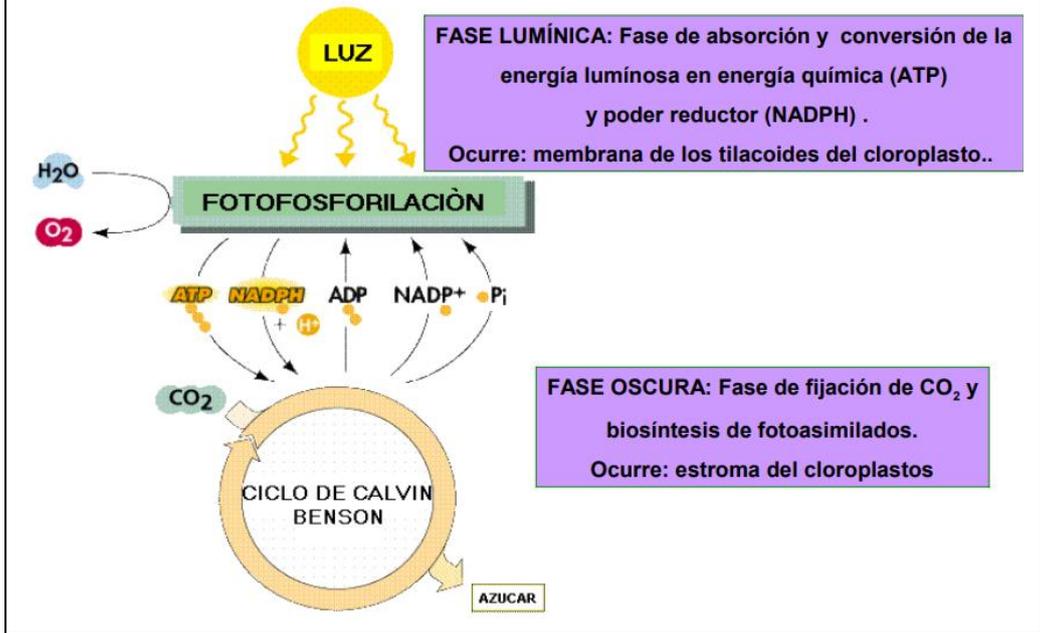
Durante esta fase, los pigmentos fotosintéticos captan **la energía de la luz y la transforman en energía química**: en forma de **poder reductor (NADPH)** y **energía libre (ATP, proceso conocido como fotofosforilación)**. En esta fase se **libera oxígeno** a la atmósfera procedente de la rotura de moléculas de agua (fotólisis del agua).

- ✓ **Fase oscura (BIOSINTÉTICA)**: Se produce en el **estroma** del cloroplasto y **no depende directamente de la luz**. Consiste en la **reducción de moléculas inorgánicas** normalmente  $\text{CO}_2$  para obtener glucosa y otras moléculas orgánicas, utilizando la **energía producida en la fase luminosa (NADPH y ATP)**.



Proceso fotosintético en los cloroplastos de las células vegetales

## Fases de la fotosíntesis



○ **2.1.2.1.- Fase luminosa (FASE FOTOQUÍMICA)**

Como dijimos en el apartado anterior, la fase luminosa de la fotosíntesis tiene lugar en las membranas de los tilacoides de los cloroplastos. En la fase luminosa ocurren los procesos siguientes:

- **Captación de la luz por los fotosistemas.**
- **Transporte de electrones desde el H<sub>2</sub>O hasta el NADP<sup>+</sup>.**
- **Fotofosforilación.**
- **Transporte cíclico de electrones**

✓ **2.1.2.1.1.- Captación de luz. Fotosistemas.**

▪ **Los pigmentos fotosintéticos**

Los pigmentos fotosintéticos son moléculas capaces de absorber la energía de los fotones de la luz de diferentes longitudes de onda.

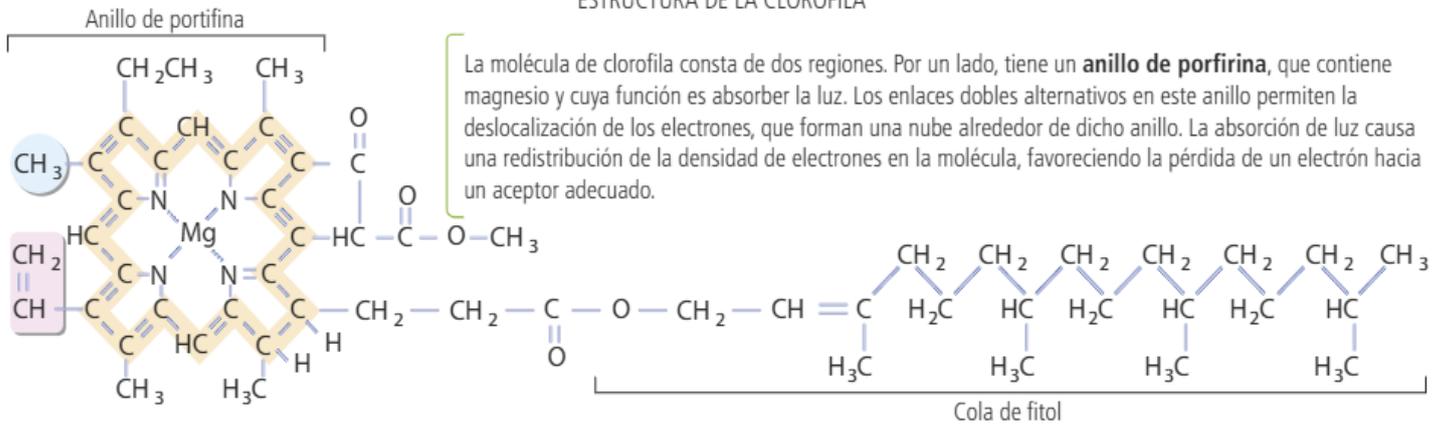
Estas sustancias son capaces de captar fotones de unas determinadas longitudes de onda gracias a que poseen dobles enlaces que están en resonancia, en donde existen pares de electrones deslocalizados. Esto hace que existan electrones libres que se excitan (y asciendan a niveles energéticos superiores) con la energía de un fotón.

Por otra parte, los pigmentos reflejan aquellas longitudes de onda no absorbidas por lo que confieren ese color a las estructuras que las poseen.

Los organismos fotosintéticos utilizan varios tipos de pigmentos entre los que destacan las clorofilas y los carotenoides.

- **Clorofilas.** Son moléculas que tienen una estructura química compleja, tienen estructura **porfirina**. Están formadas por un **anillo tetrapirrólico** que posee un átomo de magnesio en el centro, a este anillo se une un alcohol de 20 átomos de carbono, el **fitol**. En los vegetales superiores hay dos tipos de clorofilas: la **clorofila a** que es el pigmento directamente implicado en la transformación de la energía luminosa en energía química; y la **clorofila b**, que actúa como pigmento auxiliar.
- **Carotenoides.** Son pigmentos liposolubles que pertenecen al grupo de los **terpenos** o isoprenoides, están formadas por la unión de varias unidades de isopreno. Tienen colores rojos, anaranjados y amarillos. Entre ellos destacan el caroteno (rojo) y la xantofila (amarillo).
- **Ficobilinas:** pigmentos presentes en algas rojas (ficoeritrina) y en cianobacterias (ficocianina)

## ESTRUCTURA DE LA CLOROFILA



La molécula de clorofila consta de dos regiones. Por un lado, tiene un **anillo de porfirina**, que contiene magnesio y cuya función es absorber la luz. Los enlaces dobles alternativos en este anillo permiten la deslocalización de los electrones, que forman una nube alrededor de dicho anillo. La absorción de luz causa una redistribución de la densidad de electrones en la molécula, favoreciendo la pérdida de un electrón hacia un aceptor adecuado.

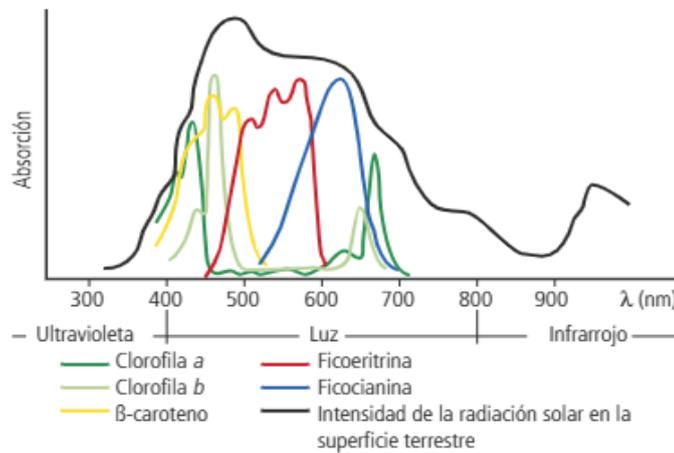
Presenta también una **cadena hidrófoba de fitol**, derivada de una cadena isoprenoide, cuya función es mantener la clorofila integrada en la bicapa lipídica del tilacoide.

La clorofila y los demás pigmentos, al captar los fotones, pasan a un **estado excitado**. Cuando vuelven a su estado primitivo, ceden una energía que es capaz de excitar a una molécula contigua. Como hay diversas moléculas de pigmentos, las longitudes de onda captadas son muchas, y así la excitación va pasando de una a otra molécula.

El concepto de **molécula excitada** no debe confundirse con el de molécula oxidada. La primera es aquella que ha sufrido un cambio en la distribución de sus electrones tras recibir energía. Si esta molécula vuelve a su estado primitivo, desprenderá una cantidad de energía menor que la que absorbió para excitarse.

La luz que incide sobre una hoja se compone de gran variedad de longitudes de onda, por lo que la presencia de pigmentos con diferentes propiedades de absorción garantiza que un mayor porcentaje de fotones pueda estimular la fotosíntesis.

### ESPECTRO DE ABSORCIÓN DE PIGMENTOS VEGETALES

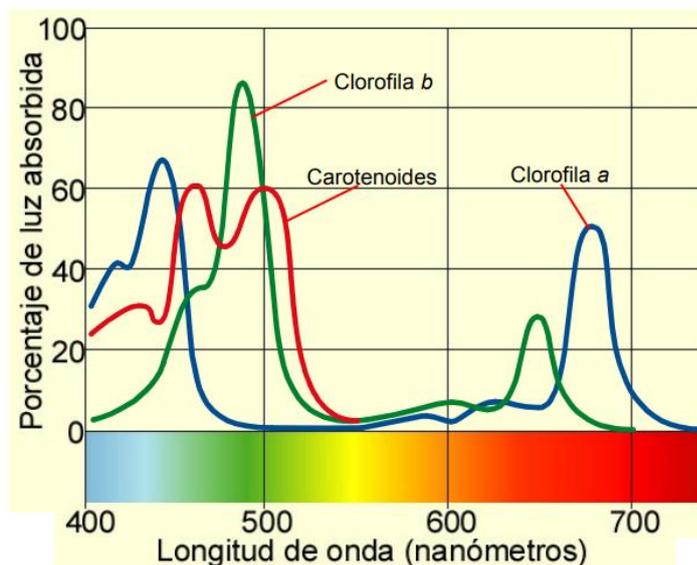


La clorofila *b* y los carotenoides pueden hacer pasar la energía a la clorofila *a*, con lo que se incrementa la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis.

Este hecho puede comprobarse al analizar un espectro de absorción como el de la imagen, que es una gráfica que muestra la eficacia total de la fotosíntesis ante distintas longitudes de onda.

Este espectro indica las longitudes de onda realmente eficaces para conseguir una respuesta fisiológica.

## Espectro de absorción de los pigmentos fotosintéticos



- **Los fotosistemas**

Los fotosistemas son unas unidades localizadas en la membrana de los tilacoides, que están formadas por la agrupación de **pigmentos fotosintéticos** y algunas **proteínas**, son los encargados de la captación de la energía de la luz y su transformación en energía química.

Los fotosistemas están constituidos por dos estructuras:

- El **complejo antena**. Está formado por un conjunto de entre 200 y 400 moléculas de pigmentos (carotenoides, clorofilas) que absorben la energía de la luz a diferentes longitudes de onda y la transmiten hacia la **clorofila a** del centro de reacción, denominada clorofila diana.
- El **centro de reacción**. Está formado por un par de moléculas de **clorofila a**, llamada clorofila diana, un aceptor de electrones y un dador de electrones. La clorofila del centro de reacción recibe la energía de la luz absorbida por los pigmentos del complejo antena y es la única molécula del fotosistema capaz de oxidarse y ceder un electrón.

En los vegetales superiores, en la membrana tilacoidal existen dos clases de fotosistemas:

- El **fotosistema I (PS I)**, llamado P<sub>700</sub> porque su centro de reacción presenta un máximo de absorción de luz de 700 nm., es decir, puede captar fotones de longitudes de onda iguales o inferiores a 700nm (**clorofila P<sub>700</sub>**). Se localiza en las membranas de los tilacoides no apilados y que están en contacto con el estroma (En su centro de reacción hay dos moléculas de clorofila a denominada **P<sub>700</sub>**, porque alcanza una excitación máxima con luz de 700 nm de longitud de onda).
- El **fotosistema II (PS II)**, llamado P<sub>680</sub> tiene su máximo de absorción de 680 nm. Es decir, el pigmento diana (clorofila a) de su centro de reacción presenta máximo de absorción de luz a 680 nm (**clorofila P<sub>680</sub>**). Se localiza en los granun, es decir, en los tilacoides apilados (En su centro de reacción hay dos moléculas de clorofila a denominada **P<sub>680</sub>** porque su máxima absorción se produce con luz de 680 nm).



▪ **Funcionamiento del fotosistema.**

Cuando un fotón ( $h\nu$ ) incide sobre un pigmento del fotosistema hace pasar a uno de sus electrones a un nivel energético superior. Se dice que la molécula está excitada.

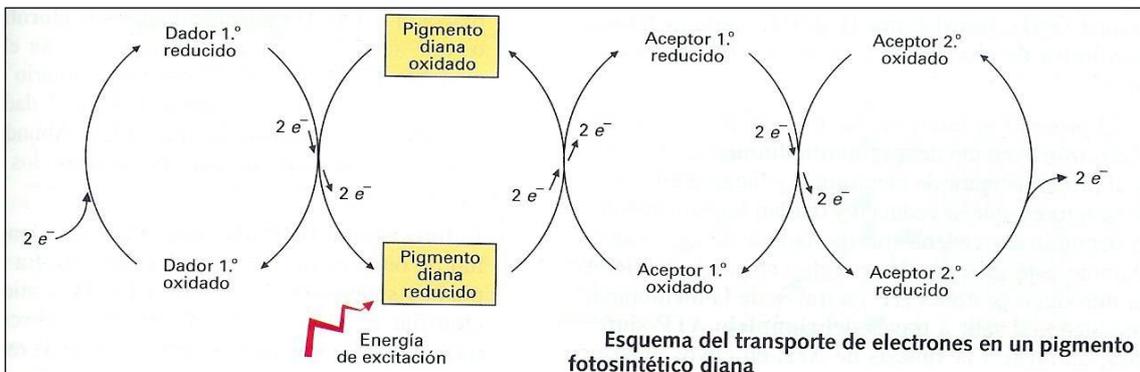
El pigmento puede volver a su estado normal por dos mecanismos

:

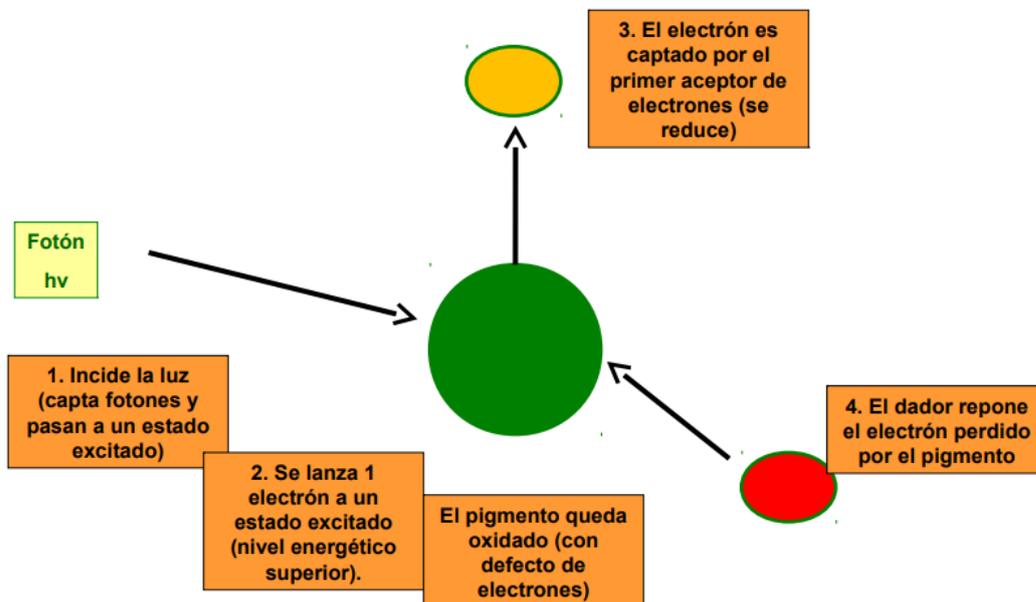
- Transfiriendo la energía a otra molécula vecina por resonancia.
- Oxidándose y cediendo un electrón a otra molécula.

Dentro del fotosistema la energía de excitación se transmite por **resonancia** desde el pigmento que absorbe la luz a menor longitud de onda (mayor energía) hasta el que la absorbe a mayor longitud (menor energía). Como el pigmento que absorbe a mayor longitud de onda es la **clorofila a** del centro de reacción, esta es la molécula que siempre recibe la energía de cualquier fotón captada por cualquiera de los pigmentos del fotosistema.

La **clorofila a** al recibir la energía se excita y vuelve a su estado inicial **cediendo un electrón** a un aceptor de la cadena fotosintética, es decir oxidándose. De esta forma la energía luminosa se transforma en energía química.



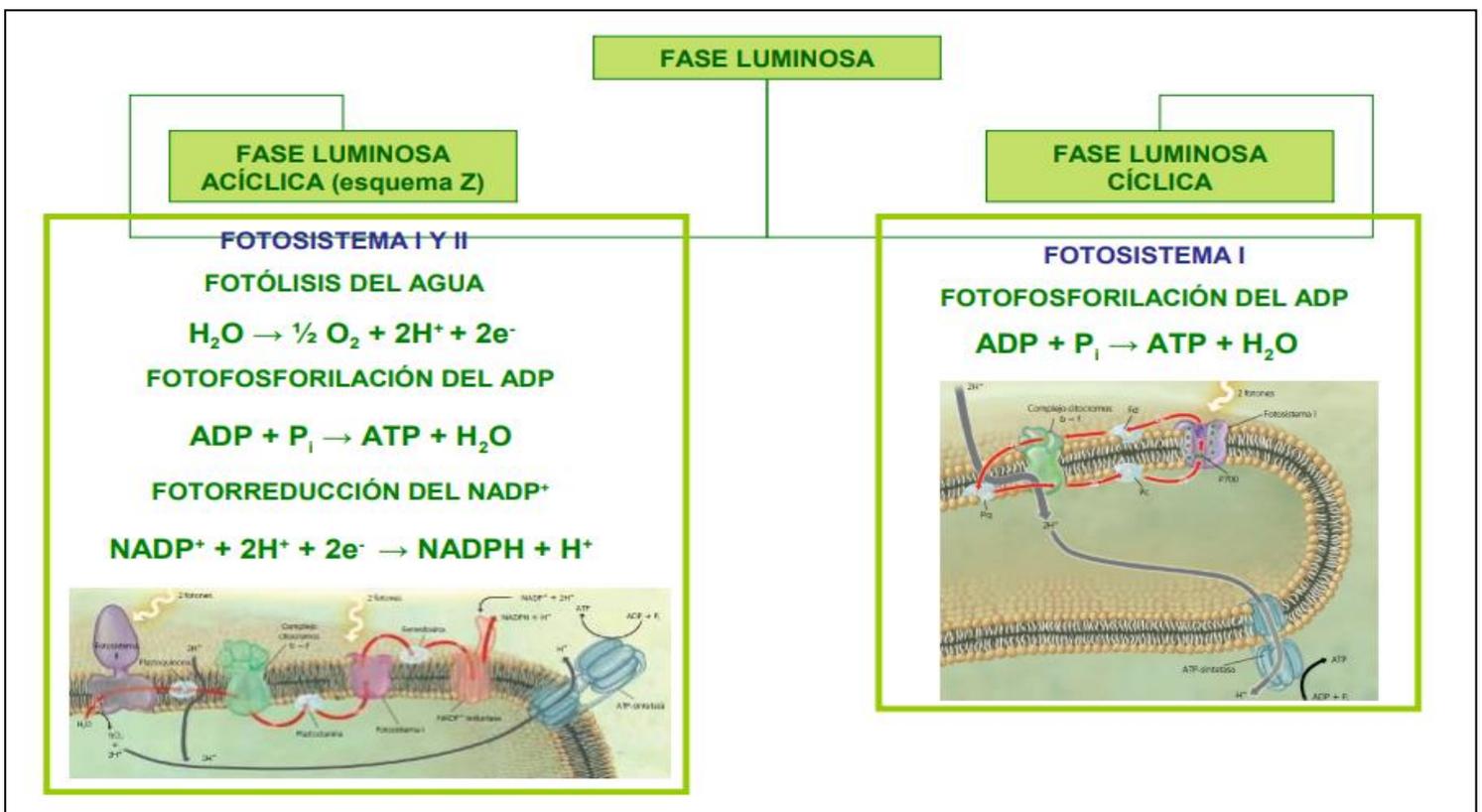
**¿Cómo actúan los pigmentos?**



Al incidir 2 fotones sobre cualquiera de los fotosistemas, las dos moléculas de clorofila del centro de reacción pierden cada una un electrón, quedando cargadas positivamente (oxidadas). Pero en este estado no pueden seguir funcionando, por lo que rápidamente tienen que recuperar el electrón perdido.

Veamos el origen de los electrones que llegan a la clorofila y el destino de los electrones cedidos por ella. Dependiendo de cuál sea el aceptor final de los electrones se distinguen dos procesos:

- **Flujo no cíclico o abierto de electrones:** si el aceptor final de electrones es el NADP<sup>+</sup>, obteniéndose NADPH. En este caso intervienen los dos fotosistemas.
- **Flujo cíclico de electrones:** el aceptor final de electrones es el propio centro de reacción (los electrones salen y vuelven a la misma molécula). Sólo interviene el fotosistema I.



- ✓ **2.1.2.1.2.- Transporte abierto o no cíclico (acíclico) de electrones desde el H<sub>2</sub>O hasta el NADP<sup>+</sup>. (Esquema en Z de la Fotosíntesis). Reducción del NADP<sup>+</sup> y fotólisis del H<sub>2</sub>O.**

Durante la fase luminosa de la fotosíntesis se produce **un transporte de electrones desde un dador que en las plantas es el H<sub>2</sub>O hasta el NADP<sup>+</sup>** que es el aceptor final, a través de la cadena fotosintética (cadena transportadora de electrones) localizada en la membrana tilacoidal. Este transporte es **unidireccional** (por eso se denomina no cíclico) y **no es espontáneo**, ya que los electrones son transportados en contra de gradiente de potencial redox, desde un dador débil (potencial redox alto) el agua, a un dador fuerte (potencial redox bajo). Para hacer posible el transporte de los electrones se utiliza la **energía luminosa** que es captada por los pigmentos de

los fotosistemas I y II acoplados a la cadena de transporte electrónico. La energía luminosa absorbida en los fotosistemas aumenta el estado energético de los electrones del H<sub>2</sub>O, haciendo posible su transporte hasta el NADP<sup>+</sup>, que al captarlos se reduce a NADPH+H<sup>+</sup>.

**El transporte de electrones desde el agua al NADP<sup>+</sup> se puede dividir en tres tramos: (Esquema en Z)**

 **1º tramo: Reducción del NADP<sup>+</sup>**

Cuando inciden dos fotones sobre el fotosistema I (PSI), la energía de estos fotones es transmitida hasta la clorofila a del centro de reacción, que se excita y cede tantos electrones como fotones absorbe. Estos dos electrones son transferidos a la ferredoxina que posteriormente los cederá junto con dos H<sup>+</sup> del estroma al NADP<sup>+</sup> que al captarlos se reduce a NADPH + H<sup>+</sup>. La clorofila a del fotosistema I queda oxidada y debe recuperar los electrones para volver a ser funcional.

 **2º tramo: Recuperación de los electrones cedidos por el PSI**

Al incidir dos fotones sobre el fotosistema II, la energía es transmitida hasta la clorofila a del centro de reacción de este fotosistema, que se excita y cede dos electrones que son conducidos por una cadena transportadora (plastoquinona, complejo de citocromos b-f, plastocianina) hasta la clorofila a del PSI, que al captarlos se reduce y recupera los electrones perdidos. Ahora es la clorofila a del PSII la que queda oxidada.

 **3º tramo: Recuperación de los electrones cedidos por el PSII. Fotólisis del H<sub>2</sub>O**

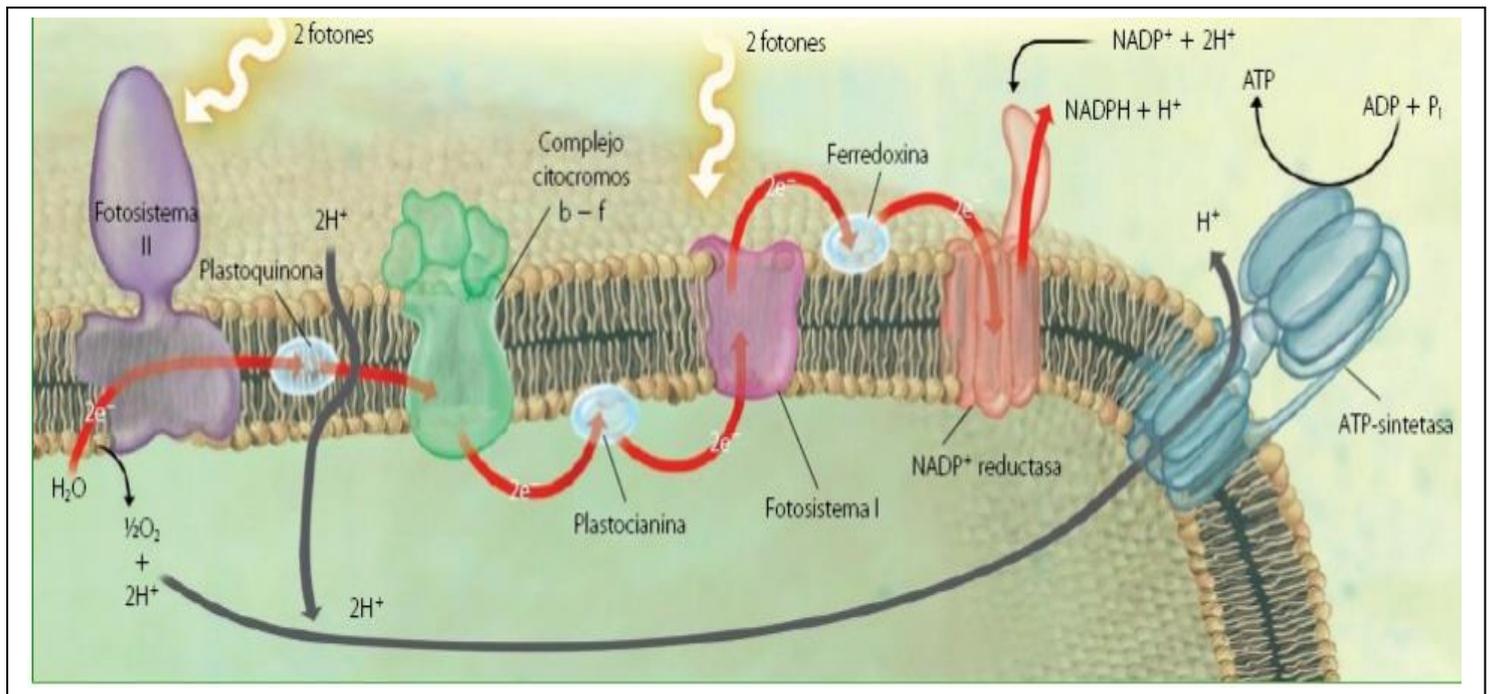
Los electrones perdidos por el PSII se recuperan gracias a la rotura de una molécula de agua por acción de la luz (**fotólisis del agua**). Esto ocurre en la cara interna de la membrana tilacoidal. Como consecuencia de esta rotura se liberan dos electrones que son cedidos a la clorofila a del centro de reacción del PSII, dos H<sup>+</sup> que se liberan al espacio intratilacoidal y ½ O<sub>2</sub> que se libera a la atmósfera.



El recorrido de dos electrones desde el H<sub>2</sub>O hasta el NADP<sup>+</sup> necesita la energía proporcionada por cuatro fotones de luz, que impactan dos sobre cada uno de los fotosistemas. Como la formación de una molécula O<sub>2</sub> requiere la rotura de dos moléculas de agua y, por tanto, el transporte de 4 electrones por la cadena fotosintética, serán necesarios 8 fotones.

Por consiguiente, la ecuación del transporte no cíclico de electrones será:



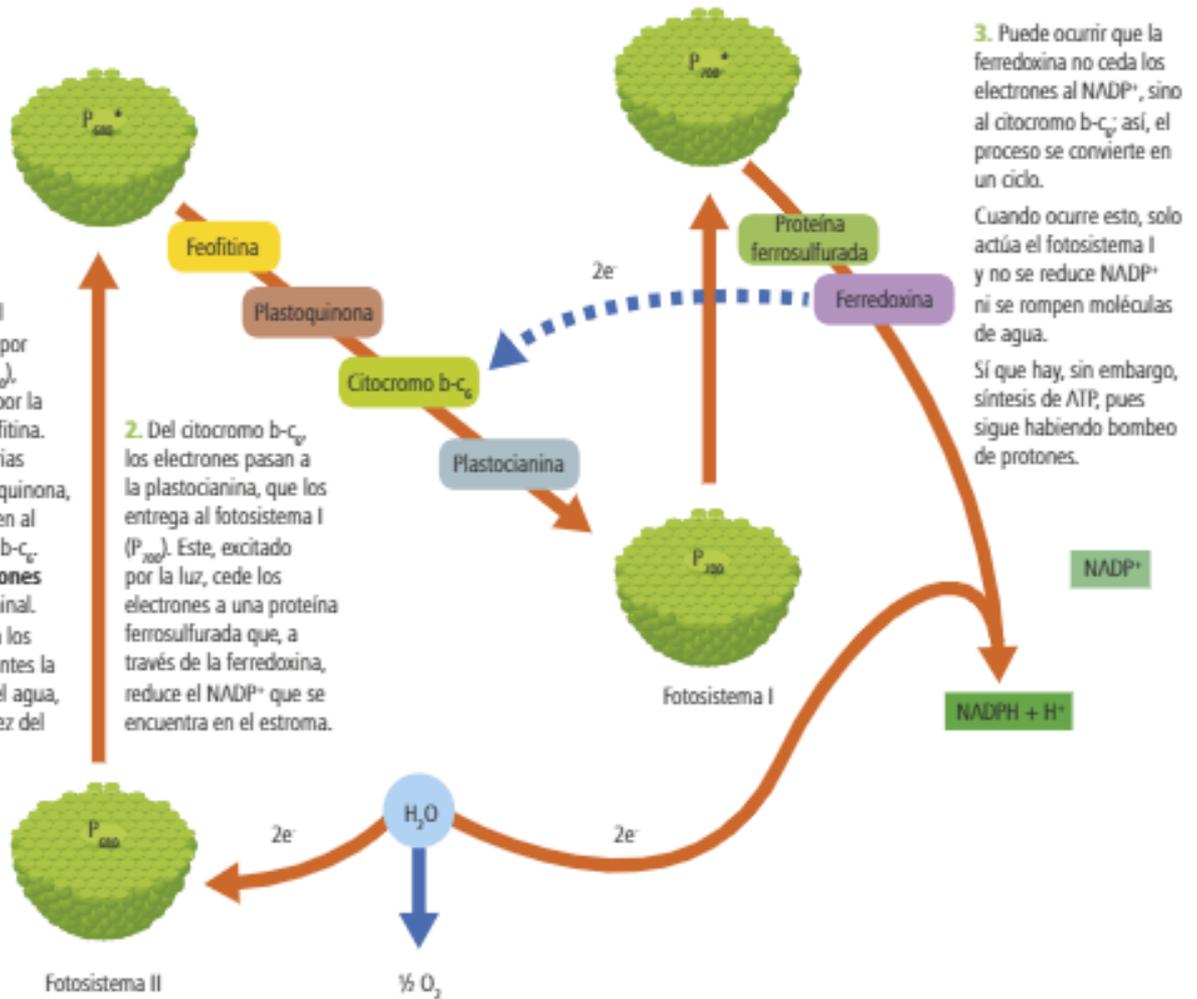


ESQUEMA EN Z DE LA FASE LUMÍNICA

1. Los electrones del agua son recogidos por el fotosistema II ( $P_{680}$ ), que al ser excitado por la luz los cede a la feofitina. De esta, pasan a varias moléculas de plastoquinona, y de ahí se transfieren al complejo citocromo  $b-c_1$ . Este **bombea protones** hacia el espacio luminal. Estos  $H^+$ , sumados a los que ha bombeado antes la enzima que rompe el agua, incrementan la acidez del lumen.

2. Del citocromo  $b-c_1$ , los electrones pasan a la plastocianina, que los entrega al fotosistema I ( $P_{700}$ ). Este, excitado por la luz, cede los electrones a una proteína ferrosulfurada que, a través de la ferredoxina, reduce el  $NADP^+$  que se encuentra en el estroma.

Así se genera el **gradiente electroquímico** que tendrá consecuencias para la fotofosforilación.



3. Puede ocurrir que la ferredoxina no ceda los electrones al  $NADP^+$ , sino al citocromo  $b-c_1$ ; así, el proceso se convierte en un ciclo.

Cuando ocurre esto, solo actúa el fotosistema I y no se reduce  $NADP^+$  ni se rompen moléculas de agua.

Sí que hay, sin embargo, síntesis de ATP, pues sigue habiendo bombeo de protones.



### ✓ 2.1.2.1.3.- Fotofosforilación no cíclica

Es el proceso mediante el cual se sintetiza ATP en la fase lumínica de la fotosíntesis también se llama **fosforilación fotosintética**.

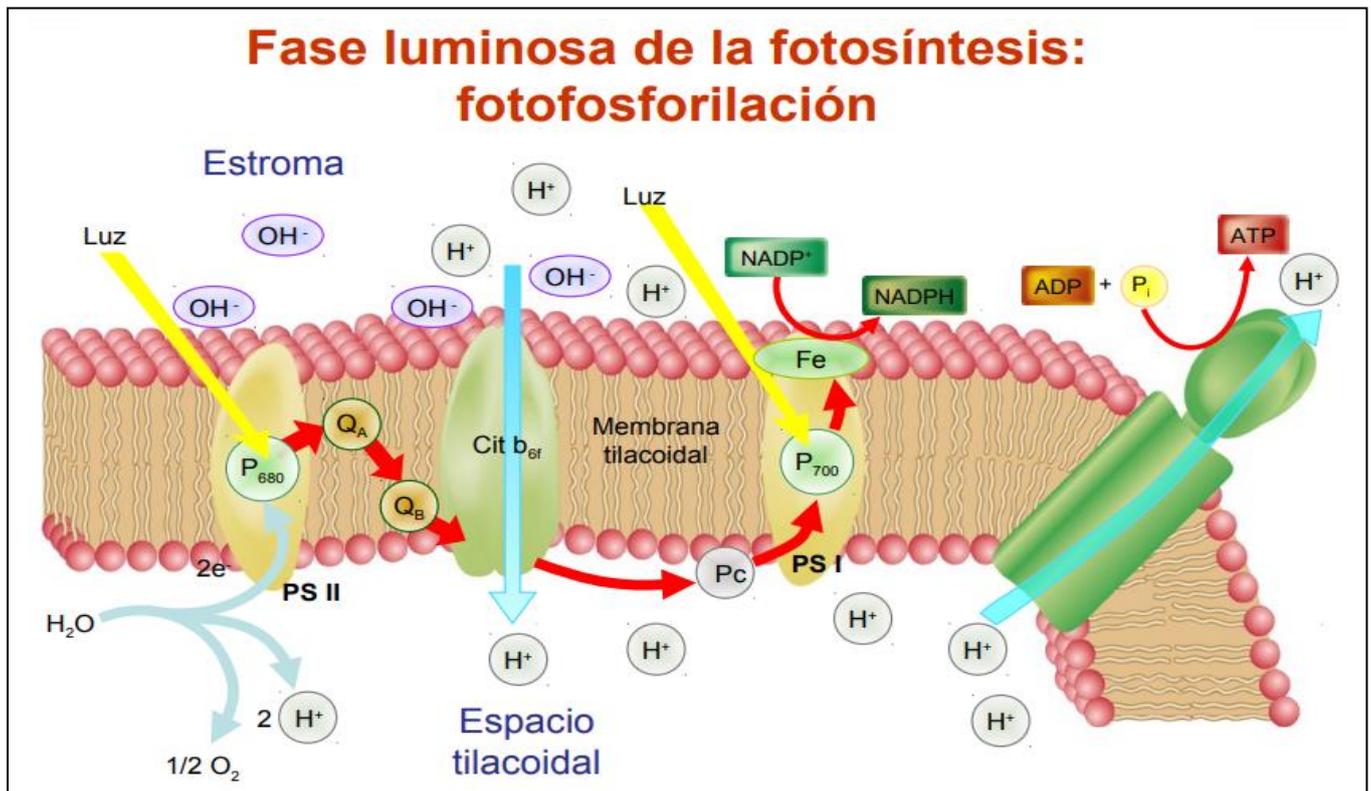
Este proceso ocurre porque **el transporte de electrones** desde el agua al  $\text{NADP}^+$  a través de la cadena fotosintética va acompañada de la **liberación de  $\text{H}^+$  en el espacio intratilacoidal**.

En el curso del transporte de un par de electrones son liberados **cuatro  $\text{H}^+$**  en el espacio intratilacoidal: **dos son bombeados** desde el estroma por el complejo cit b-f aprovechando la energía que liberan los electrones al ser transportados por la cadena fotosintética, y **dos proceden de la fotólisis** del agua.

Según la **hipótesis quimiosmótica** propuesta por Michell la acumulación de  $\text{H}^+$  en el espacio intratilacoidal genera un **gradiente electroquímico**, entre el espacio tilacoidal y el estroma, que actúa sobre los  $\text{H}^+$  y tiende a hacerles regresar hacia el estroma. Como la membrana del tilacoidal es prácticamente impermeable a los  $\text{H}^+$ , estos solo pueden regresar a través de la ATPasa. Este flujo de  $\text{H}^+$  a favor de gradiente libera energía suficiente para que la ATPasa sintetice ATP a partir de ADP y  $\text{P}_i$ .

Por cada tres protones que atraviesan la ATP-sintetasa se libera energía para sintetizar entre una y dos moléculas de ATP.

En resumen, en la transferencia no cíclica de electrones, a partir de una molécula de agua y 4 fotones de luz, se obtienen 1 molécula de  $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ,  $\frac{1}{2}$  de  $\text{O}_2$  y 1,33 moléculas de ATP. Esta cantidad de ATP no es suficiente para que se lleve a cabo la fase oscura, que como se verá más adelante requiere 3 moléculas de ATP por cada 2 de NADPH; este déficit se compensa con el flujo cíclico de electrones.



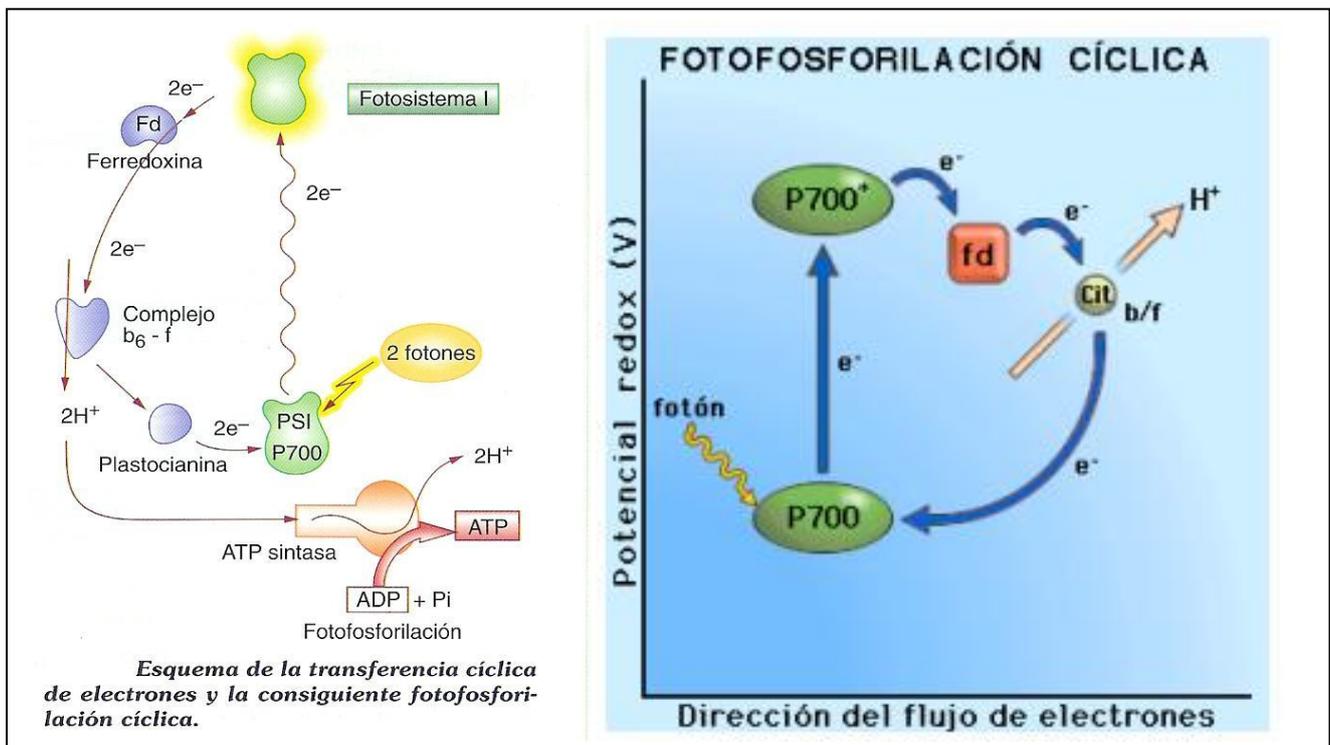
#### ✓ 2.1.2.1.4.- Transporte cíclico de electrones y Fotofosforilación cíclica

Es una vía alternativa de la fase luminosa de la fotosíntesis en la que los electrones perdidos por el fotosistema I cuando incide sobre él la luz, en lugar de ser cedidos al  $\text{NADP}^+$  vuelven nuevamente al PSI. En su recorrido de vuelta al fotosistema I pasan por el complejo cit b-f que aprovecha la energía liberada en su transporte para bombear  $\text{H}^+$  desde el estroma al espacio intratilacoidal. Esta traslocación de  $\text{H}^+$  permite que se produzca la síntesis de ATP (**fotofosforilación**) en el transporte cíclico.

El carácter cíclico o no cíclico de electrones depende de la necesidad de NADPH, glúcidos y ATP extra. Si se necesita ATP, no se utiliza el PSII y la energía se emplea en la síntesis de ATP, en lugar de invertirse en la producción de NADPH.

Se cree que los mecanismos fotosintéticos más primitivos funcionaban mediante fosforilación cíclica y transporte cíclico de electrones. Estos procesos son llevados a cabo por algunas bacterias, como las sulfobacterias y bacterias no sulfúreas (que realizan fotosíntesis anoxigénica).

En eucariotas, la fotofosforilación cíclica es una alternativa que permite sintetizar ATP cuando escasea el  $\text{NADP}^+$ .



El transporte cíclico se caracteriza por:

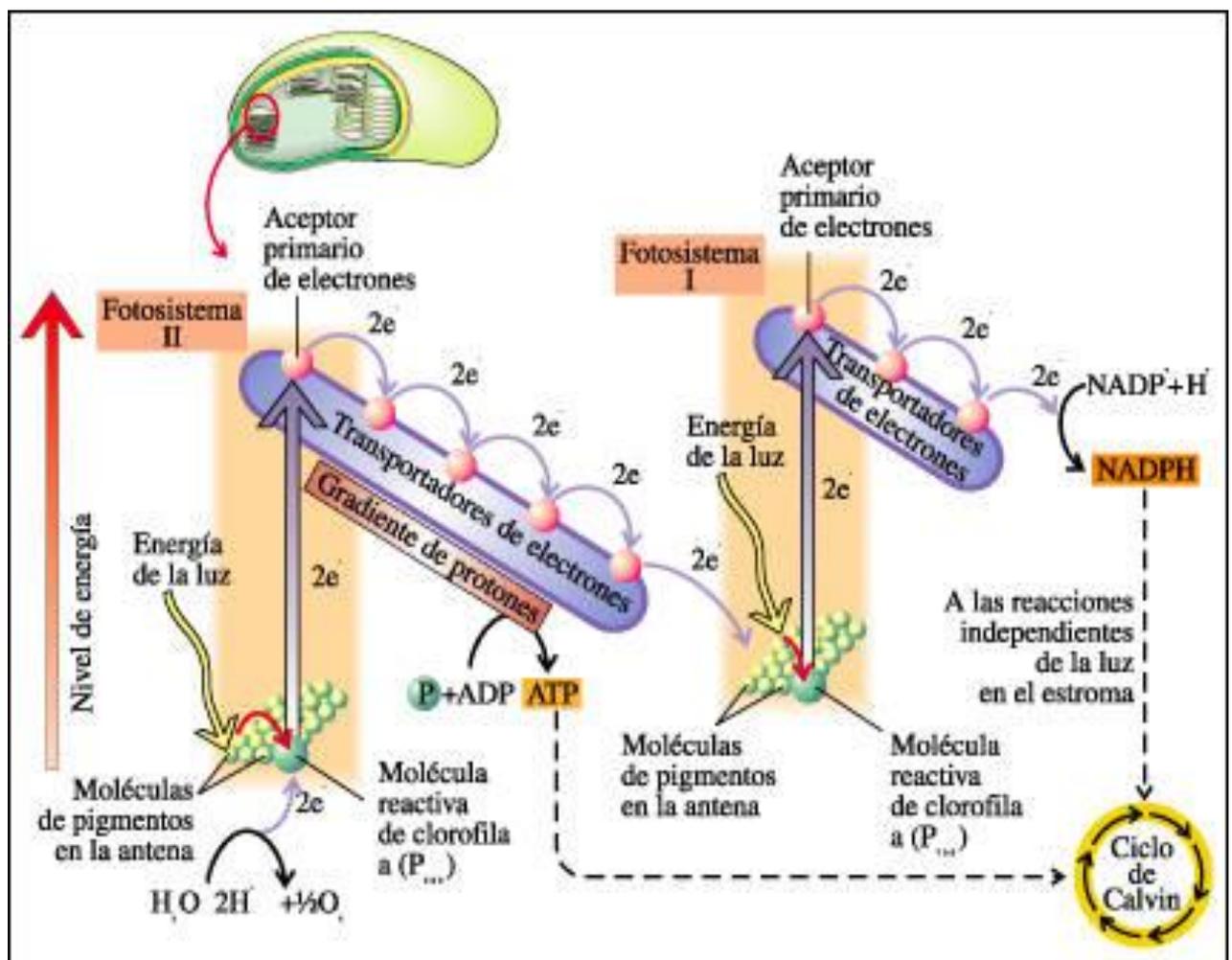
- Solo participa el fotosistema I
- No se produce reducción del  $\text{NADP}^+$ , ya que los electrones salen y regresan al PSI.
- No hay fotólisis del agua, ni desprendimiento de oxígeno a la atmósfera, debido a que no interviene el PSII.
- Se produce síntesis de ATP gracias a la traslocación de  $\text{H}^+$  por el complejo cit b-f.

Por lo tanto, el **transporte cíclico permite obtener ATP sin necesidad de obtener NADPH**, lo cual es importante puesto que en la fase oscura se necesita más ATP que NADPH.

### Diferencias entre el transporte no cíclico y el cíclico

Las diferencias fundamentales que existen entre el transporte no cíclico y el cíclico se resumen en el siguiente cuadro:

Transporte no cíclico	Transporte cíclico
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participan <b>dos fotosistemas</b>: el PS I y el PS II.</li> <li>• Se desprende <b>oxígeno</b> molecular resultado de la fotólisis del agua.</li> <li>• Los electrones cedidos por el PS I se utilizan para reducir una molécula de NADP<sup>+</sup> a <b>NADPH</b>.</li> <li>• Se produce <b>ATP</b>, en la ATPasa, debido al gradiente electroquímico generado por la acumulación de H<sup>+</sup> en el lumen del tilacoide, procedentes de la fotólisis del agua y de la translocación promovida por el complejo citocromo b-c<sub>6</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participa solo el fotosistema I.</li> <li>• No se desprende oxígeno.</li> <li>• No se produce poder reductor NADPH.</li> <li>• Se genera <b>ATP</b>, en la ATPasa, gracias a la acumulación de H<sup>+</sup> en el lumen del tilacoide, procedentes de la translocación promovida por el complejo citocromo b-c<sub>6</sub> al ser devueltos los electrones de forma cíclica.</li> </ul>



○ **2.1.2.2.- Fase oscura (FASE BIOSINTÉTICA)**

La fase oscura consiste en la **síntesis de moléculas orgánicas** sencillas a partir de (por **reducción de moléculas inorgánicas** utilizando la energía del NADPH y del ATP sintetizados en la fase luminosa. Ocurre en el **estroma del cloroplasto de las células eucariotas y en el citoplasma (citosol o hialoplasma) de las bacterias fotosintéticas**, y puede suceder tanto en ausencia como en presencia de luz.

El principal sustrato utilizado en la fase oscura es el CO<sub>2</sub>, que es reducido a monosacáridos sencillos (glucosa), precursores del resto de las moléculas orgánicas.

Sin embargo, los vegetales superiores son capaces de reducir otros sustratos inorgánicos, como los nitratos a amoníaco y los sulfatos a sulfuro de hidrógeno, que incorporan a sus aminoácidos.

Se producen una serie de procesos en esta fase:

- **Fijación del CO<sub>2</sub>**
- **Reducción del CO<sub>2</sub>**
- **Regeneración de la ribulosa-1,5-difosfato**

El conjunto de reacciones que hacen posible todos los procesos anteriormente comentados en esta fase (que se realizan sin necesidad de luz, de ahí el nombre de fase oscura) reciben el nombre de **Ciclo de Calvin**.

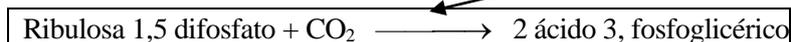
En este ciclo, las moléculas de CO<sub>2</sub> son reducidas a **gliceraldehído 3- fosfato (G3P)**, triosa que se considera el producto final del proceso, mediante un conjunto de reacciones, que necesitan los hidrógenos aportados por el NADPH y la energía del ATP procedentes de la fase luminosa.

En cada vuelta del ciclo se reduce una sola molécula de CO<sub>2</sub>, por lo que para obtener una molécula neta de G3P (molécula de tres carbonos) el ciclo tiene que producirse tres veces. Para la síntesis de una molécula neta de glucosa (6 carbonos) deben producirse seis veces.

El ciclo de Calvin se divide en tres fases:

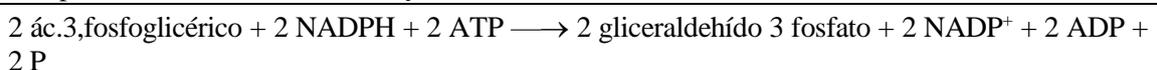
✓ **2.1.2.2.1.- Fijación del CO<sub>2</sub>**

El CO<sub>2</sub> (se une) es fijado por una molécula orgánica de cinco átomos de carbono, la **ribulosa 1,5 difosfato**, dando un compuesto de seis átomos de carbono, muy inestable, que se rompe en dos moléculas de tres átomos de carbono, el **ácido 3 fosfoglicérico** (APG o ácido 1,3 difosfoglicérico). Se trata de moléculas con tres átomos de carbono, por lo que las plantas que siguen esta vía metabólica se suelen denominar **plantas C3**. La reacción es catalizada por el enzima **ribulosa 1,5 difosfato carboxilasa (Rubisco)**, que es el enzima más abundante de la naturaleza.



✓ **2.1.2.2.2.- Reducción del CO<sub>2</sub> fijado**

El **ácido 3 fosfoglicérico** es fosforilado y posteriormente reducido a gliceraldehído 3- fosfato. En este proceso se consume **NADPH y ATP** (fabricados en la fase luminosa)



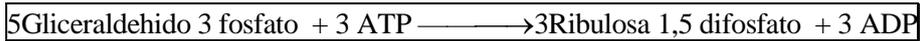
Éste puede seguir dos vías: la mayor parte se invierte en regenerar la ribulosa-1,5-difosfato y el resto en otras biosíntesis:

- El que se queda en el estroma del cloroplasto inicia la síntesis de almidón, ácidos grasos y aminoácidos.
- El que sale al citosol, por un proceso similar a la glucólisis en sentido inverso, da lugar a glucosa y fructosa. Juntas forman sacarosa, que es el azúcar propio de la savia, al igual que la glucosa lo es de la sangre.

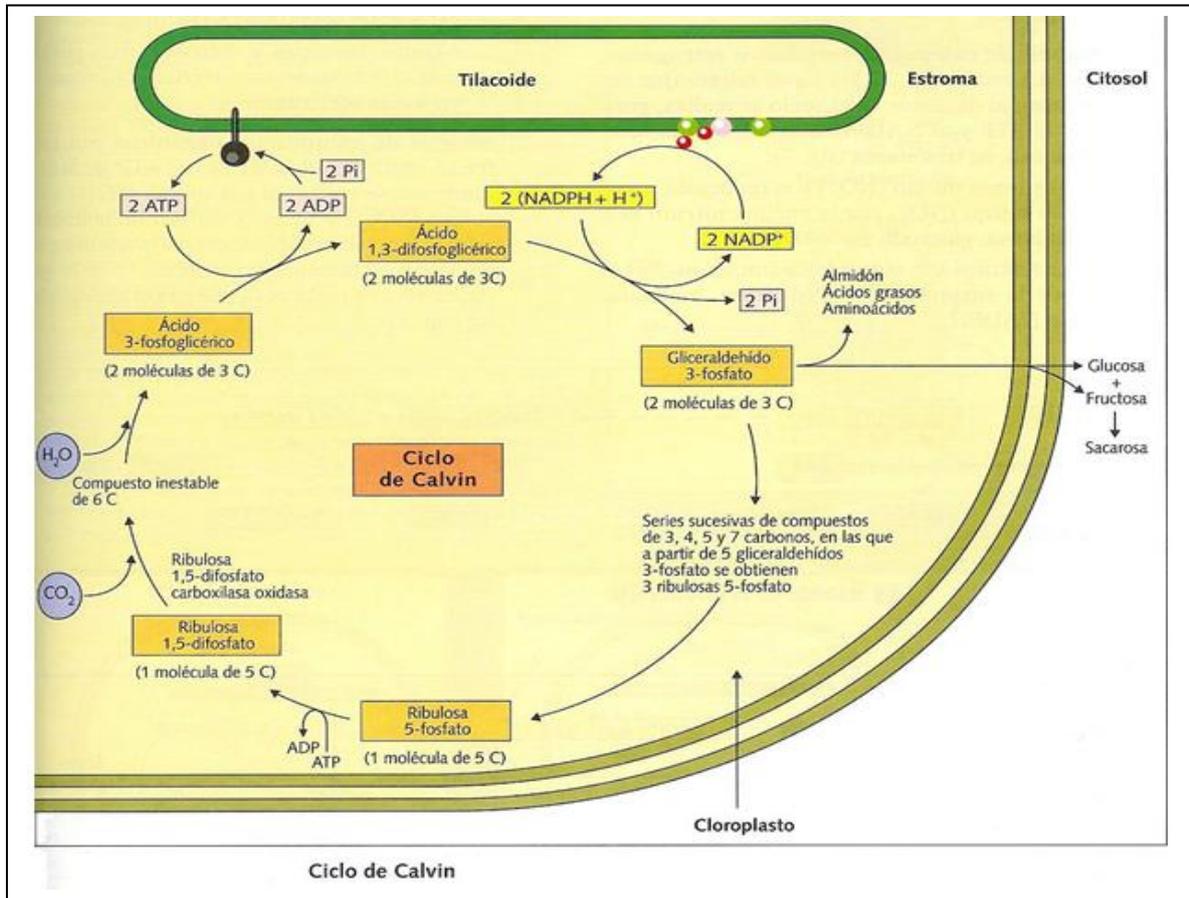
✓ 2..1.2.2.3.- Regeneración de la ribulosa-1,5-difosfato

Mediante la fijación de 3 moléculas de CO<sub>2</sub> se obtienen 6 moléculas de G3P, de ellas, **una constituye el rendimiento neto del ciclo**, sale de este y es utilizada para la síntesis de glucosa y otras moléculas orgánicas.

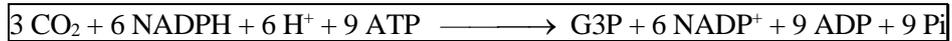
Las otras **cinco moléculas de G3P** se emplean en la **recuperación de las 3 moléculas de ribulosa 1,5 difosfato** utilizadas en la fijación de las tres moléculas de CO<sub>2</sub>; esto se realiza mediante una serie compleja de reacciones en las que se forman compuestos intermedios de 4, 5, 6 y 7 carbonos, en este proceso se gasta ATP procedente de la fase luminosa. De esta forma se cierra el ciclo.



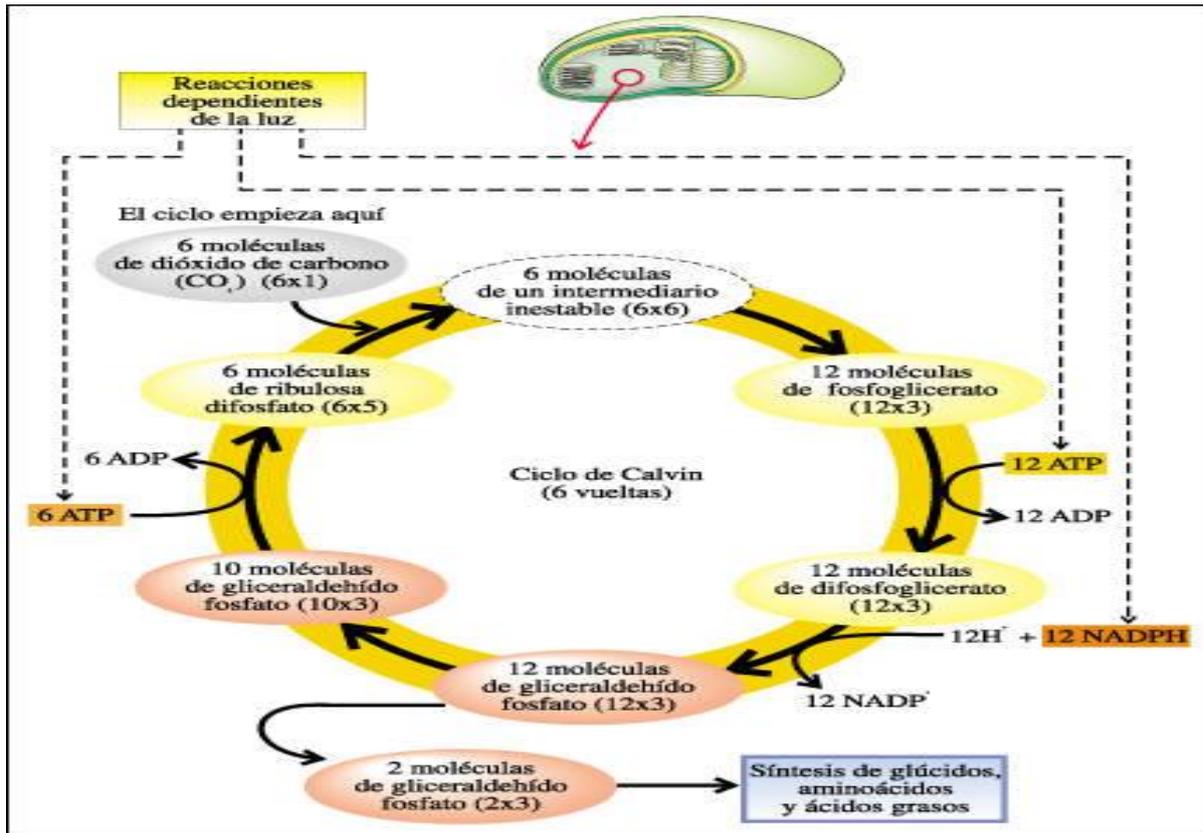
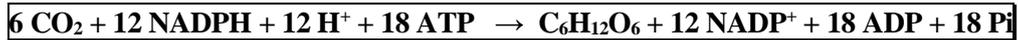
En el ciclo de Calvin, por cada CO<sub>2</sub> incorporado, se precisan 2 NADPH y 3 ATP. La fase oscura o biosintética es, pues, un proceso puramente bioquímico: no requiere la presencia de luz, ni siquiera de clorofila.



•En resumen, para la obtención de **una molécula neta de G3P** se producen tres vueltas del ciclo de Calvin en las que **se reducen tres moléculas de CO<sub>2</sub>** por los hidrógenos aportados por **6 moléculas de NADPH** y la energía de **9 moléculas de ATP**.



•Para la síntesis de una molécula de **glucosa**, que se suele considerar como el producto final de la fotosíntesis, se requiere la formación de **dos moléculas de G3P**. Por lo tanto, la ecuación general del ciclo de Calvin en este caso es la siguiente: (observar esquema hoja siguiente)



### •Destino del G3P del ciclo de Calvin

Las moléculas de G3P producidas en el ciclo de Calvin se incorporan a las distintas rutas del metabolismo celular donde, dependiendo de las necesidades de las células, originan el resto de las moléculas orgánicas:

- Frecuentemente se usan para fabricar **glucosa y fructosa**. Estas moléculas son utilizadas por las plantas para la síntesis de polisacáridos (almidón y celulosa), y sacarosa que es exportada al resto del vegetal.
- El G3P también se utiliza para la **síntesis de ácidos grasos y aminoácidos** a través de las rutas metabólicas adecuadas.
- Se utiliza como sustrato energético para la síntesis de ATP en el **catabolismo celular**.

A nivel informativo, por curiosidad:

➤ **Reducción de nitratos y sulfatos**

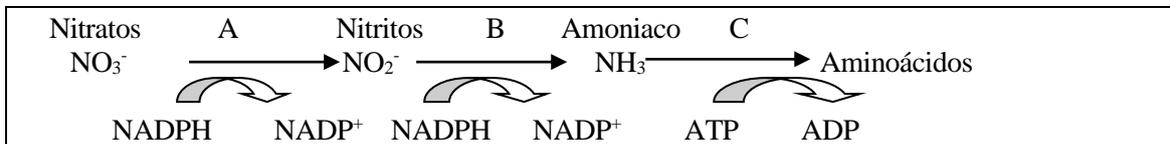
Como hemos visto, las triosas obtenidas de la reducción del CO<sub>2</sub> pueden originar cualquier tipo de molécula orgánica mediante rutas metabólicas adecuadas. Pero algunas de ellas, como los aminoácidos, necesitan incorporar amoníaco (NH<sub>3</sub>) o grupos tiol (-SH).

En condiciones naturales, el nitrógeno está a disposición de las plantas en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y el azufre se encuentra como sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Estas formas oxidadas tienen que ser reducidas para su incorporación a las moléculas orgánicas.

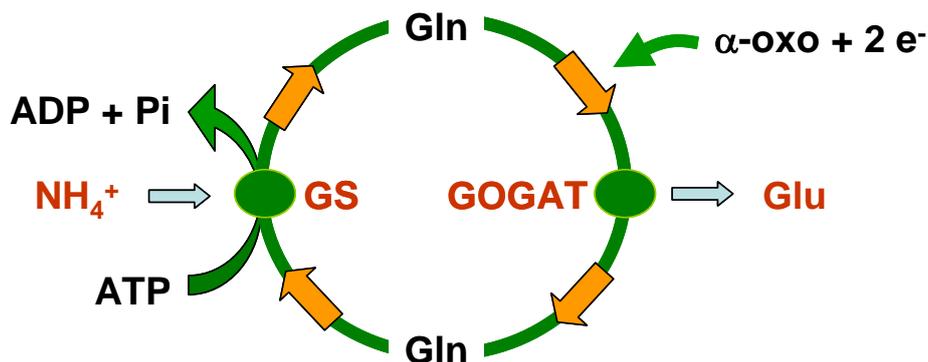
• **La reducción del nitrato en el cloroplasto** se realiza en dos etapas en las que se consumen NADPH y ATP procedentes de la fase luminosa.

- En la primera se produce la **reducción de nitratos a nitritos** con consumo de NADPH, gracias a la acción de la enzima nitrato reductasa (A en el esquema posterior)
- En la segunda los **nitritos son reducidos a NH<sub>3</sub>** (también a **amonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup>**) gracias a la acción de la enzima nitrito reductasa (B en el esquema posterior)

El amoníaco se incorpora a los esqueletos carbonados para formar los aminoácidos, en este proceso se gasta ATP. Se incorpora **a través del ciclo** de la glutamina sintetasa (GS) / glutamato sintasa (GOGAT), o ciclo **GS/GOGAT** (C en el esquema posterior):



El ciclo **GS/GOGAT** se puede esquematizar de la siguiente forma:

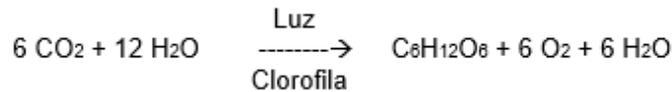


• En los cloroplastos se **reducen igualmente sulfatos** a grupos tiol (-SH) que son incorporados al esqueleto carbonado para formar el aminoácido cisteína. La reducción del sulfato requiere ATP y NADPH que son proporcionados por la fase luminosa.

▪ **2.1.3.- Balance energético general de la fotosíntesis oxigénica**

En la fase fotoquímica o luminosa se produce el ATP y el NADPH necesarios para, en la fase oscura o biosintética, reducir el CO<sub>2</sub> a materia orgánica. Si, por ejemplo, se considera la síntesis de una molécula de glucosa (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), se observa que son necesarios 6 CO<sub>2</sub> y 12 H<sub>2</sub>O. Esta agua libera sus 6 O<sub>2</sub> a la atmósfera, durante la fase luminosa, y aporta los 12 H de la glucosa y los 12 H necesarios para pasar los 6 O<sub>2</sub> sobrantes del CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. En el ciclo de Calvin de la fase biosintética se precisan, por cada CO<sub>2</sub> incorporado, 2 NADPH y 3 ATP; así pues, para una molécula de glucosa son necesarias 6 vueltas al ciclo, por lo tanto, hacen falta 12 moléculas de NADPH y 18 moléculas de ATP.

La ecuación química de la fotosíntesis de una molécula de glucosa es pues:



Para la fase oscura:

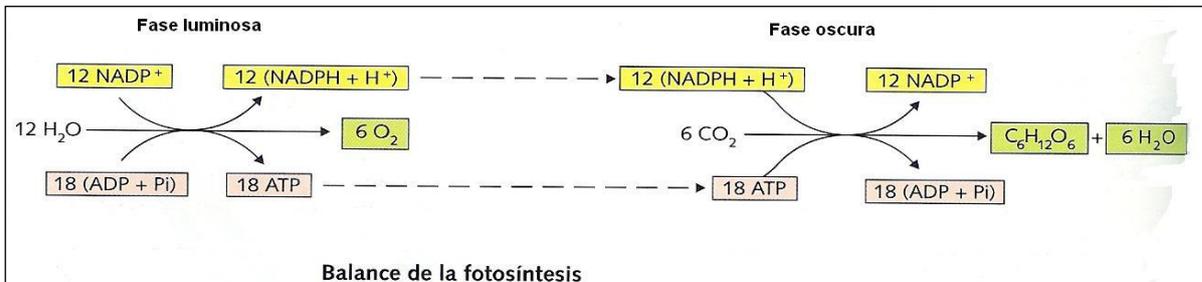
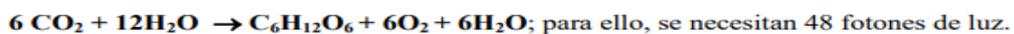
- a) Materia: 6 CO<sub>2</sub> → Glucosa
- b) Energía gastada: Por cada molécula de CO<sub>2</sub>, 3 moléculas de ATP; en total 18 ATP.
- c) Poder reductor: por cada CO<sub>2</sub>, 2 moléculas de NADPH; luego 12 NADPH.

Para la fase luminosa:

Para obtener 12 NADPH, se necesitará la fotólisis de 12 moléculas de H<sub>2</sub>O, por lo que se producirán 6 moléculas de O<sub>2</sub>. Como en la fotofosforilación acíclica se produce 1,33 ATP por cada molécula de agua, las doce necesarias producirán 15,96 ATP; el resto hasta 18 se producen en la fotofosforilación cíclica.

Por otra parte, para los 24 electrones transportados en los 12 NADPH se necesitarán 48 fotones de luz (2 por cada electrón).

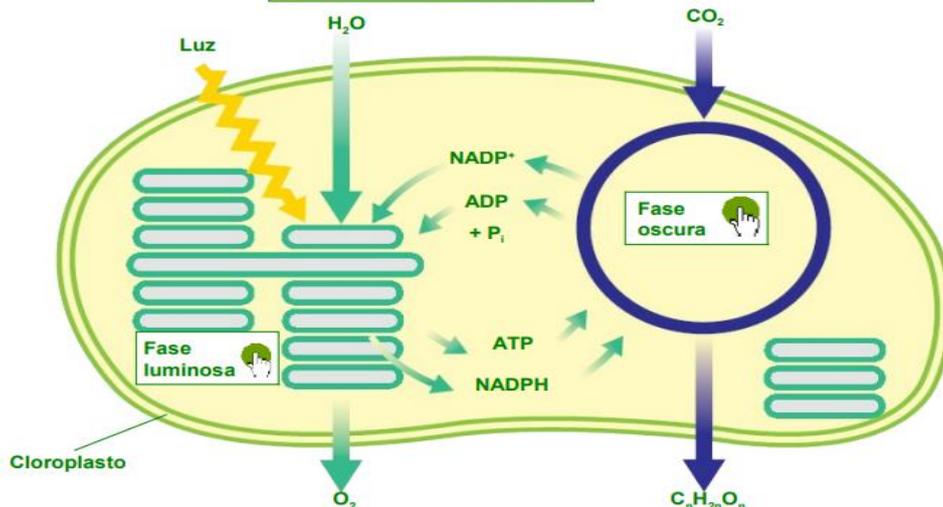
Balance global:



**Visión general de la fotosíntesis**



18 ATP, 12 NADPH 48 fotones



#### ▪ 2.1.4.- Fotosíntesis anoxigénica o bacteriana

Las **bacterias fotosintéticas**, a excepción de las cianobacterias, son organismos anaerobios que realizan un tipo de fotosíntesis en la que la **molécula reductora** (dador de H<sup>+</sup>) **no es el agua**. En este caso, al no intervenir la molécula de agua no se libera O<sub>2</sub> a la atmósfera.

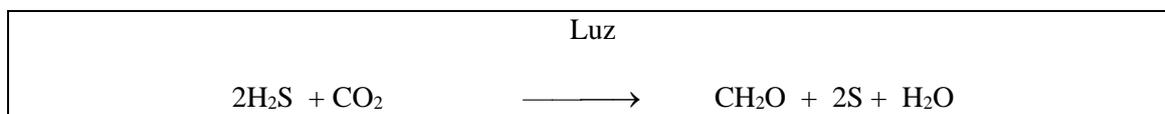
Este proceso por ello se denomina **fotosíntesis anoxigénica**.

Esta fotosíntesis presenta las siguientes características:

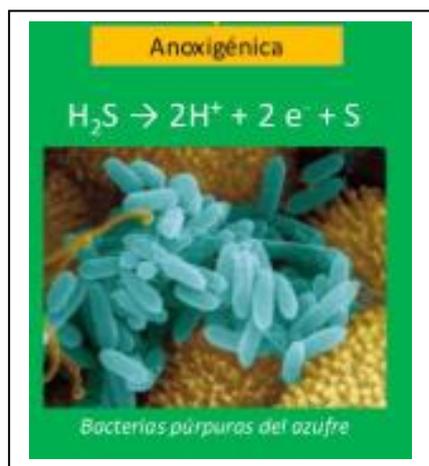
- Transcurre solo en condiciones anaerobias estrictas y sin formación O<sub>2</sub>. Por tanto, el **donante de electrones** es una **molécula distinta al agua**. Esta puede ser un compuesto **inorgánico**, como el H<sub>2</sub>S, u **orgánico**, como el láctico.
- Las bacterias disponen de un **único fotosistema**, semejante al fotosistema I, que contiene **bacterioclorofila** (pigmento semejante a la clorofila de los eucariotas) y **carotenoides**. El fotosistema está localizado en la membrana celular (mesosomas) y reduce moléculas de NADP<sup>+</sup> a NADPH al ser activado por la luz.
- La fijación y reducción del CO<sub>2</sub> transcurre a través del ciclo del Calvin y se produce en el citoplasma celular.

Entre las bacterias fotosintéticas anoxigénicas se encuentran:

- Las **bacterias sulfuradas verdes** y las **bacterias púrpuras** que utilizan el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) como dador de electrones.



- **Bacterias púrpuras no sulfuradas** que utilizan sustancias orgánicas como dadores de electrones, por ejemplo, el isopropanol que reducen a acetona.

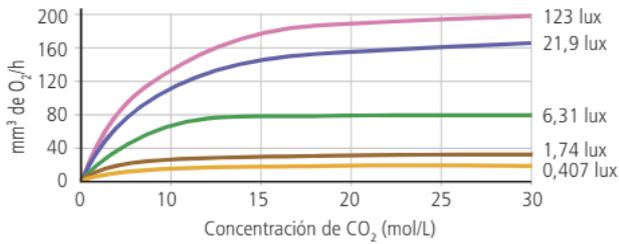


#### ▪ 2.1.5.- Factores que influyen en la fotosíntesis

Como en todo proceso químico, existen factores que condicionan el rendimiento de la fotosíntesis. El rendimiento de la fotosíntesis o intensidad fotosintética puede medirse en función del CO<sub>2</sub> absorbido o en función del O<sub>2</sub> desprendido. Este rendimiento puede verse afectado por distintos factores:

### Concentración de CO<sub>2</sub> ambiental

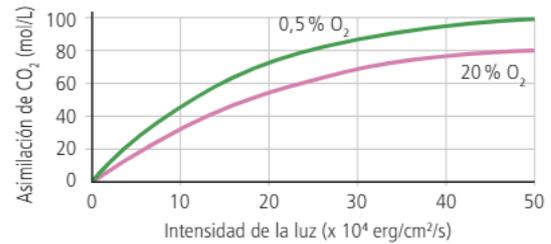
Siempre que se mantenga constante y suficientemente elevada la intensidad lumínica, el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> incrementa el rendimiento de la fotosíntesis. Este aumento se produce hasta alcanzar un valor de asimilación máximo (específico para cada organismo) por encima del cual el rendimiento se estabiliza.



La eficacia de la fotosíntesis aumenta al aumentar la concentración de CO<sub>2</sub>, hasta un valor máximo en que se estabiliza, debido a la saturación de la enzima rubisco en el ciclo de Calvin.

### Concentración de O<sub>2</sub> ambiental

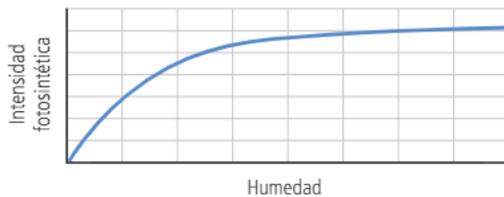
Cuando la concentración de O<sub>2</sub> se incrementa considerablemente en el ambiente, la eficacia de la fotosíntesis disminuye. Esto se debe a la competencia que se establece entre el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> como sustratos de la rubisco, que favorece el proceso de fotorrespiración.



Cuanto mayor es la concentración de oxígeno en el aire, menor es el rendimiento fotosintético, debido a la fotorrespiración (inhibición competitiva entre el O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> por el centro activo de la rubisco)

### Humedad

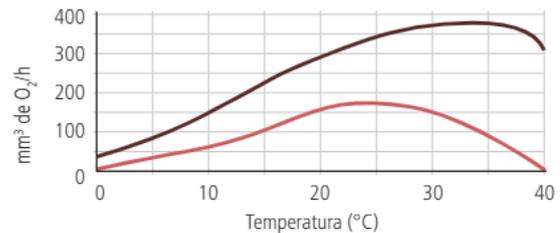
La concentración de agua condiciona el rendimiento de la fotosíntesis. Al disminuir el grado de humedad, se produce una sensible reducción de la fotosíntesis, ya que, además de ser necesaria como fuente de e<sup>-</sup> y H<sup>+</sup> en la fase lumínica, se cierran los estomas para evitar pérdidas de agua, decreciendo así la asimilación de CO<sub>2</sub>.



Si la humedad en el ambiente es escasa se cierran los estomas para evitar la pérdida de agua y por tanto afecta al intercambio de gases (toma de CO<sub>2</sub> y liberación del O<sub>2</sub> de la fase lumínica) y con ello al rendimiento fotosintético.

### Temperatura

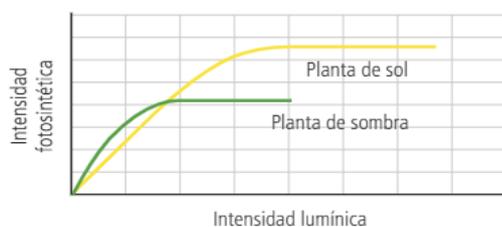
Para intensidades lumínicas altas, el rendimiento fotosintético aumenta con la temperatura hasta alcanzar un punto máximo a partir del cual va disminuyendo. Este punto se corresponde con la temperatura óptima de la actividad de las enzimas, por encima y por debajo del cual la actividad se reduce considerablemente.



Las reacciones fotosintéticas como todas las reacciones químicas catalizadas por un enzima, aumentan su velocidad con la temperatura hasta alcanzar un valor máximo que varía de unas especies a otras, por encima del cual las enzimas se desnaturalizan y el rendimiento disminuye.

### Intensidad lumínica

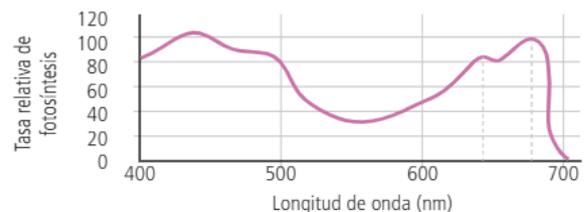
Para intensidades lumínicas relativamente bajas, la fotosíntesis es proporcional a la intensidad de la luz; pero si esta va aumentando, llega un momento en que el rendimiento se estabiliza según las características óptimas de los pigmentos de cada especie.



En general la actividad fotosintética aumenta al aumentar la **intensidad luminosa**. Pero cada especie está adaptada a unas condiciones óptimas de iluminación, y superados ciertos límites se pueden deteriorar los pigmentos fotosintéticos. Así hay especies heliófilas que precisan una fuerte iluminación, otras son esciófilas y prefieren zonas de penumbra.

### Tipo de luz

El rendimiento óptimo de la fotosíntesis se lleva a cabo con luz roja o azul. Con luz roja de 680 nm se absorbe bastante energía. Al disminuir la longitud de onda a 400 nm, se produce una mayor absorción de energía. Cuando la longitud de onda aumenta por encima de los 680 nm, no actúa el PS II; por tanto, decrece el rendimiento por no poder realizarse la fase oscura de la fotosíntesis.



El color de la luz también influye en el rendimiento de la fotosíntesis. El mayor rendimiento fotosintético se consigue con luz roja o azul. Si la longitud de onda es superior a 680 nm, el fotosistema II (PS II) no actúa, por lo tanto, sólo se produciría fase luminosa cíclica y el rendimiento sería menor.

### ▪ 2.1.6.- Fotosíntesis y evolución

Cuando apareció la vida en la Tierra, la atmósfera carecía de oxígeno, por lo que los primeros organismos serían semejantes a las bacterias anaerobias y obtendrían el ATP por fermentación de la materia orgánica contenida en el “caldo primitivo” (originada por síntesis abiótica), sin necesitar una cadena transportadora de electrones.

Los organismos fermentadores sólo podían vivir en lugares con materia orgánica. Surgieron unos nuevos organismos capaces de utilizar la luz para sintetizar ATP. El tipo de fotosíntesis que hacían sólo empleaba el fotosistema I (fotofosforilación cíclica); no tenían, pues, energía suficiente para romper la molécula de H<sub>2</sub>O y utilizarla como donadora de electrones y, por lo tanto, no desprendían oxígeno. Utilizaban en su lugar H<sub>2</sub>S. Con los ATP y NADH obtenidos así, podían reducir el CO<sub>2</sub>, el NO<sup>-3</sup>, etc., y sintetizar materia orgánica. Por primera vez apareció materia orgánica sobre la Tierra, producida por seres vivos, a partir de materia inorgánica.

Hace unos 2.500 millones de años aparecieron las cianobacterias, que poseían un segundo fotosistema, el fotosistema II, acoplado al fotosistema I, lo que les daba una gran cantidad de energía y les permitía romper la molécula de agua (fotólisis) liberando oxígeno a la atmósfera (fotosíntesis oxigénica). A las cianobacterias les sucedieron las algas eucariotas y las plantas terrestres. Este hecho tuvo una gran repercusión ambiental: la atmósfera y la hidrosfera se fueron enriqueciendo en oxígeno, por lo que se pasó de un ambiente reductor a uno oxidante.

Las principales consecuencias del cambio fueron:

- Finalización de la síntesis abiótica de materia orgánica puesto que el ambiente oxidante ya no lo permitía.
- Aparición de los seres aerobios.
- Formación de la capa de ozono, que se convirtió en una excelente pantalla protectora contra las radiaciones de alta energía, posibilitando el desarrollo de la vida fuera del agua.

### 🌈 2.2.- QUIMIOSÍNTESIS

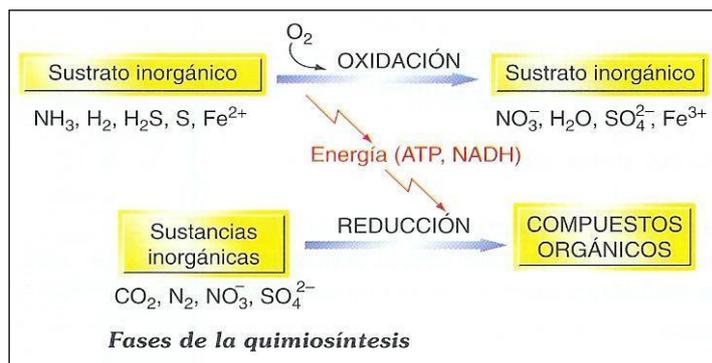
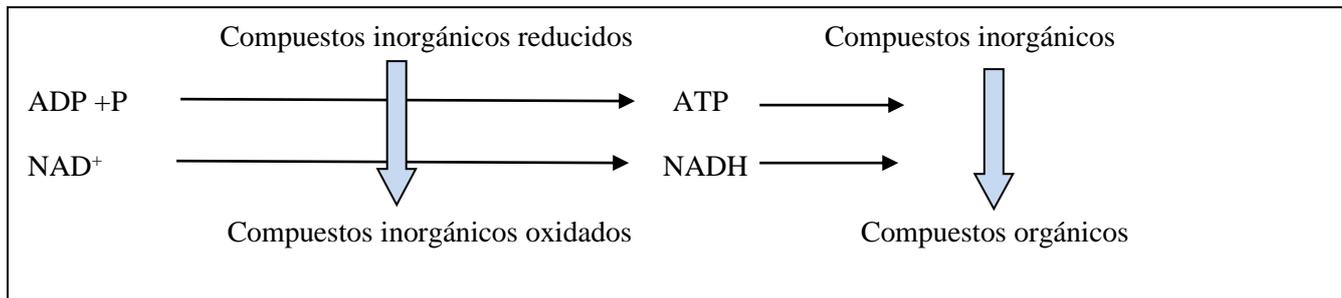
La **quimiosíntesis** al igual que la fotosíntesis es un proceso anabólico autótrofo, mediante el cual se sintetizan compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos.

A diferencia de la fotosíntesis en la que se utiliza la luz como fuente de energía para sintetizar los compuestos orgánicos, en la quimiosíntesis se emplea la energía química que se desprende de la oxidación en el medio de diversos compuestos inorgánicos sencillos (NO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>...)

En la quimiosíntesis también se diferencian **dos fases** como en la fotosíntesis:

- Una **primera fase**, que es equivalente a la fase luminosa. En esta etapa se oxidan compuestos inorgánicos sencillos (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc) liberándose energía y electrones. La energía se utiliza para fosforilar el ADP y formar ATP. Los electrones sirven para reducir normalmente el NAD y formar NADH.

- Una **segunda fase**, que es equivalente a la fase oscura de la fotosíntesis. En esta etapa se utilizan el ATP y el NADH obtenidos en la primera fase para reducir compuestos inorgánicos (CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y obtener compuestos orgánicos.



A los seres que realizan la quimiosíntesis se les denomina **quimioautótrofos o quimiolitotrofos**.

Estos seres son bacterias en su mayor parte aerobias.

Tienen una gran importancia ecológica, por el papel que desempeñan en los ciclos biogeoquímicos produciendo la mineralización de la materia orgánica y con ello el cierre del ciclo de la materia.

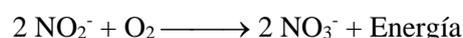
Los sustratos inorgánicos que utilizan estas bacterias proceden, en muchos casos de la actividad biológica de otros seres. Estos sustratos varían de unas bacterias a otras y según cuales sean estos se diferencian varios grupos de bacterias quimiosintéticas:

- Bacterias nitrificantes o bacterias del nitrógeno:** Son bacterias que viven en el suelo y en el agua. Utilizan como sustratos compuestos reducidos del nitrógeno. Estas bacterias oxidan el amoníaco procedente de la descomposición de la materia orgánica a nitratos, a este proceso se le denomina **nitrificación**. Esta oxidación se realiza en dos etapas en cada una de las cuales interviene un tipo de bacterias:

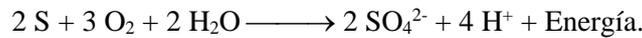
- **Bacterias nitrosificantes:** A este grupo pertenecen las bacterias del género **Nitrosomas**. Estas bacterias oxidan el amoníaco a nitritos.



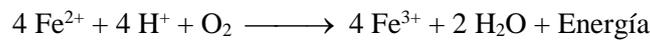
- **Bacterias nitrificantes:** Aquí se incluyen las del género **Nitrobacter**. Estas bacterias oxidan los nitritos a nitratos.



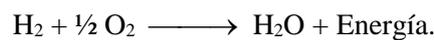
- **Bacterias incoloras del azufre (sulfooxidantes):** Comprende una serie de bacterias que viven en las aguas residuales, fuentes hidrotermales y en ambiente ricos en azufre o derivados del mismo. Estas bacterias utilizan como sustrato azufre, sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y tiosulfato ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ).



- **Bacterias del hierro o ferrobacterias (ferrooxidantes):** Son bacterias que oxidan sales ferrosas a férricas. Viven en aguas procedentes de vertidos mineros donde abundan estas sales.

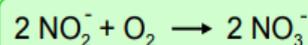
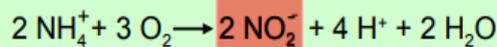


- **Bacterias del hidrógeno:** Estas utilizan el hidrógeno como sustrato. La mayoría son quimioautótrofas facultativas, pueden utilizar el hidrógeno molecular o compuestos orgánicos. Suelen vivir en aguas termales geotérmicas con temperaturas muy elevadas.

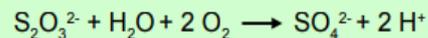
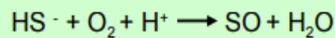
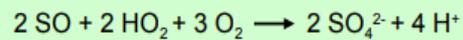
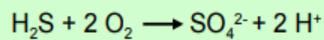


# Quimiosíntesis

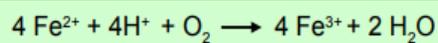
## QUIMIOSÍNTESIS DEL NITRÓGENO



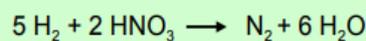
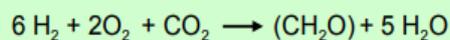
## QUIMIOSÍNTESIS DEL AZUFRE



## QUIMIOSÍNTESIS DEL HIERRO



## QUIMIOSÍNTESIS DEL HIDRÓGENO



### ✚ 2.3.- FORRESPIRACIÓN Y LAS PLANTAS C<sub>3</sub> Y C<sub>4</sub>

- **Fotorrespiración:** La enzima rubisco, además de catalizar la fijación del CO<sub>2</sub> actuando como carboxilasa, puede actuar como oxigenasa incorporando oxígeno a la ribulosa - difosfato, lo que tras varias reacciones origina agua y CO<sub>2</sub>.

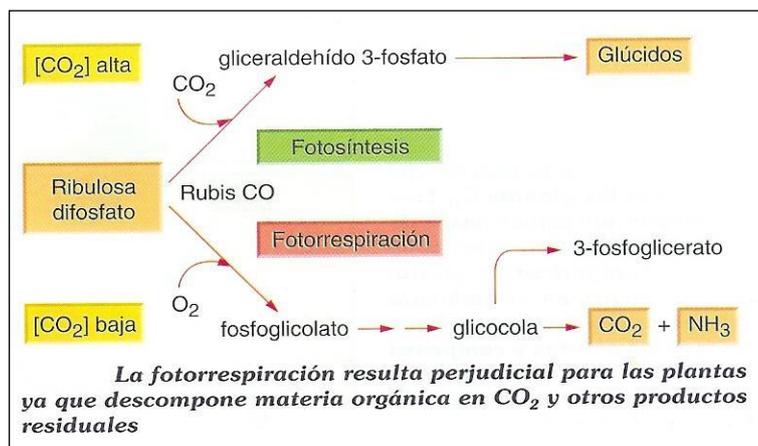
El oxígeno compite con el CO<sub>2</sub> como sustrato para unirse al centro activo de la enzima en un proceso conocido como fotorrespiración.

Este fenómeno tiene lugar cuando la concentración de oxígeno es alta, o la de CO<sub>2</sub> es baja.

La fotorrespiración supone un lastre o una limitación a la eficacia fotosintética (se reduce en un 50 % la capacidad fotosintética), y su función no está muy clara en la actualidad, aunque se piensa que puede ser un mecanismo de defensa para proteger a las plantas de la fotooxidación, que a bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>, puede causar daños irreversibles a los cloroplastos. Además, la energía se pierde, ni se genera ATP ni NADPH.

Este proceso se origina durante el día, la planta captura O<sub>2</sub> y desprende CO<sub>2</sub>, y no va acompañado de fosforilación oxidativa (no se sintetiza ATP). Por consiguiente, nada tiene que ver este proceso con la respiración mitocondrial (es la que realizan las células vegetales, pero en la oscuridad y dentro de la mitocondria).

La fotorrespiración (oxidación de glúcidos en presencia de luz) tiene lugar cuando el ambiente es cálido y seco, y los estomas de las hojas, se cierran durante el día para evitar la pérdida de agua. Entonces, el oxígeno producido en la fotosíntesis alcanza grandes concentraciones, mientras disminuye la concentración de CO<sub>2</sub>.

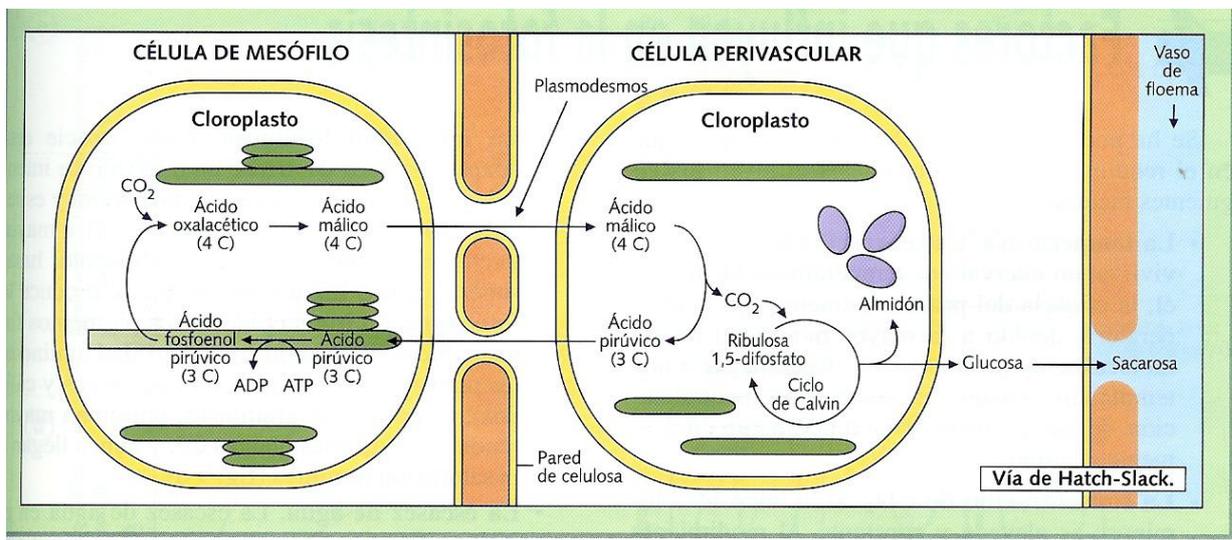


- **Plantas C<sub>3</sub>:** son la mayoría de las plantas, que fabrican glúcidos a partir del CO<sub>2</sub> mediante el ciclo de Calvin en el estroma de los cloroplastos. Muchas, sobre todo, las de clima templado, fijan el CO<sub>2</sub> directamente en moléculas de 3 átomos de carbono (ácido fosfoglicérico o PGA) mediante la enzima rubisCO, por eso se las denomina plantas C<sub>3</sub>.
- **Plantas C<sub>4</sub>:** En las plantas de clima tropical (caña de azúcar, maíz, etc) donde la fotorrespiración podría ser un grave problema, lo han resuelto fijando el CO<sub>2</sub> mediante una ruta alternativa, llamada ruta de Hatch-Slack o de las plantas C<sub>4</sub>. En estas plantas se distinguen dos tipos de cloroplastos: unos que se encuentran en las células internas,

lindantes con los vasos conductores de las hojas, y otros que se encuentran en las células del parénquima clorofílico periférico, el denominado mesófilo. En estos últimos se realiza la fijación del CO<sub>2</sub>.

Los cloroplastos del mesófilo captan el CO<sub>2</sub> durante la noche, cuando pueden abrir los estomas sin peligro de pérdida de agua. La molécula aceptora del CO<sub>2</sub>, es el ácido fosfoenolpirúvico (PEPA), y la enzima que actúa es la fosfoenolpiruvato carboxilasa, que no se ve perjudicada por una concentración alta de O<sub>2</sub>. Dicha enzima cataliza la fijación del escaso CO<sub>2</sub> al fosfoenolpirúvico, formándose ácido oxalacético, un compuesto de cuatro carbonos que es el primer producto de la fotosíntesis, de ahí que a estas plantas se les llame plantas C<sub>4</sub>. El ácido oxalacético pasa a **ácido málico** (también con 4 C) y éste, a través, de los plasmodesmos, pasa a los cloroplastos de las células internas, donde se disocia en CO<sub>2</sub> (que se incorpora al ciclo de Calvin) y en pirúvico (que regenera el fosfoenolpiruvato).

El ciclo de Calvin es común a todas las plantas, la ruta C<sub>4</sub> únicamente conduce al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> cerca de la enzima rubisco.



### 3.- ANABOLISMO HETERÓTROFO

Según acabamos de ver, la fotosíntesis y la quimiosíntesis son procesos anabólicos que sólo realizan las células autótrofas y que consisten en transformar sustancias inorgánicas en sustancias orgánicas, utilizando para ello la energía libre que queda transformada en energía química.

El resto de los procesos anabólicos consisten en transformar sustancias orgánicas sencillas en otras más complejas, utilizando para ello la energía contenida en el ATP. Su objetivo es la fabricación de los componentes celulares: glúcidos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Por lo tanto, básicamente son semejantes en heterótrofos y autótrofos, la diferencia radica en el modo de obtener las sustancias orgánicas sencillas: de los alimentos o de la fotosíntesis y quimiosíntesis, respectivamente.

A. autótrofo	A. heterótrofo
Moléculas Inorgánicas	Moléculas orgánicas sencillas.
	Moléculas orgánicas complejas

Entre estas rutas hay que destacar:

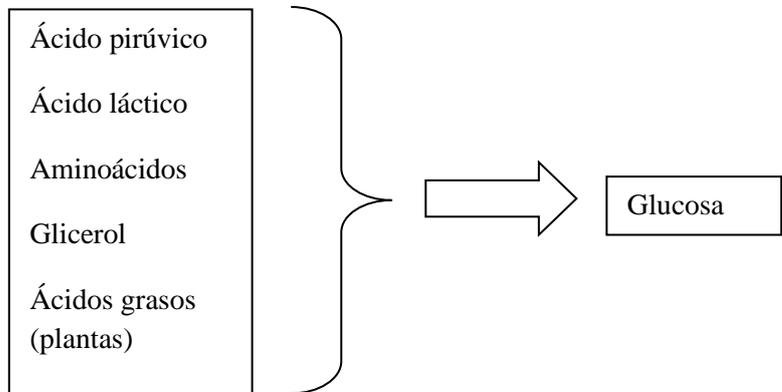
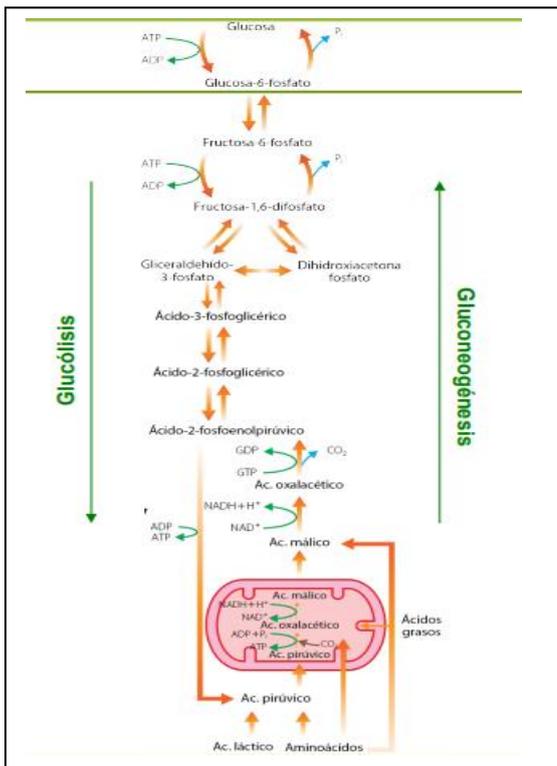
### 3.1.- Anabolismo de los glúcidos

#### GLUCONEOGÉNESIS (Síntesis de glucosa)

Es anabolismo de los glúcidos. Es una **ruta anabólica** que pueden realizar todas las células, mediante la cual se sintetiza **glucosa** a partir de **compuestos orgánicos no glucídicos**, como el ácido láctico, los aminoácidos, el glicerol, y sobre todo el ácido pirúvico; y en los vegetales, también a partir de los ácidos grasos. Se inicia en las **mitocondrias**, pero en su mayor parte ocurre en el **citósol**.

En los mamíferos la gluconeogénesis, ocurre principalmente en el hígado y contribuye a mantener constante el nivel de glucosa en el plasma sanguíneo incluso en los periodos de ayuno, esto es importante porque algunas células como los eritrocitos y las células cerebrales utilizan únicamente glucosa como fuente de energía

Es un proceso casi inverso a la glucólisis.

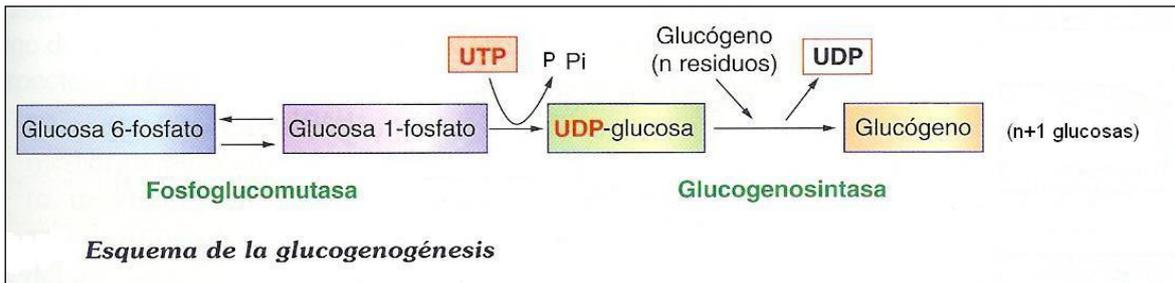
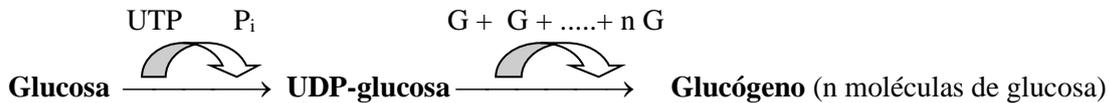


#### GLUCOGENOGÉNESIS (Síntesis de glucógeno)

Es anabolismo de glúcidos. El glucógeno se almacena en el hígado y en el músculo esquelético. La ruta anabólica mediante la cual se sintetiza glucógeno a partir de la glucosa se denomina **glucogenogénesis**.

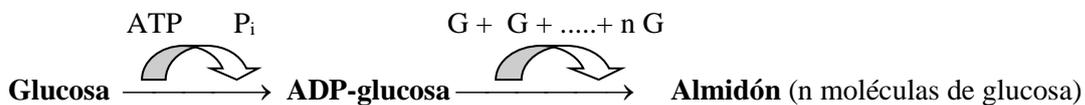
En ella se diferencian dos etapas:

- Se activa la glucosa mediante el **UTP** formándose la **uridín-difosfato-glucosa** (UDP-glucosa = glucosa activada)
- Se añaden las moléculas de **glucosa** procedentes de la **UDP-glucosa** a la molécula de **glucógeno** en formación.



### AMILOGÉNESIS (Síntesis de almidón)

Es anabolismo de glúcidos. Es la síntesis de almidón en los plastos de las células vegetales, a partir de moléculas de glucosa, las cuales son activadas, no por UTP (como ocurría en la glucogenogénesis), sino por ATP.



### ✚ 3.2.- Anabolismo de los lípidos

### BIOSÍNTESIS DE ÁCIDOS GRASOS

Es anabolismo de lípidos. Los lípidos con función de reserva más importantes son los triglicéridos o grasas (molécula de glicerina + 1 - 2 - 3 moléculas de ácido graso)

Su síntesis tiene tres etapas:

- Síntesis o formación de los ácidos grasos: se produce en el citosol (citoplasma) a partir de acetil - CoA (de origen mitocondrial). El proceso se lleva a cabo gracias al **complejo enzimático ácido graso sintetasa (SAG)**. El acetil-CoA se carboxila por la acetil CoA carboxilasa y origina malonil - CoA. Esta molécula se condensa con otro acetil - CoA, y provoca la formación de la cadena del ácido graso
- Síntesis o formación de la glicerina: Para que la glicerina se una a la/s molécula/s de ácido graso, debe estar en forma de glicerol 3 - fosfato. Este se va a formar a partir de:



### 3.3.- Anabolismo de las proteínas

#### BIOSÍNTESIS DE AMINOÁCIDOS

Es anabolismo de proteínas. Las proteínas son macromoléculas formadas por la unión secuencial y sucesiva de pequeños monómeros llamado aminoácidos. Existen 20 aminoácidos diferentes.

En los seres humanos y en muchos otros animales existen 10 aminoácidos que no podemos sintetizar y que debemos obtenerlos de la dieta que ingerimos: son los denominados **aminoácidos esenciales** (Leucina - Isoleucina - Lisina - Metionina - Fenilalanina - Treonina - Triptófano - Valina - Arginina - Histidina)

Los otros 10 aminoácidos sí los podemos sintetizar en nuestro organismo: son los denominados **aminoácidos no esenciales** (Ácido glutámico - Glutamina - Prolina - Ácido aspártico - Asparagina - Alanina - Glicina - Serina - Tirosina - Cisteína)

Las plantas pueden sintetizar en su interior los 20 aminoácidos anteriores.

Cada aminoácido va a tener su propia vía de síntesis, e incluso puede variar según el tipo celular.

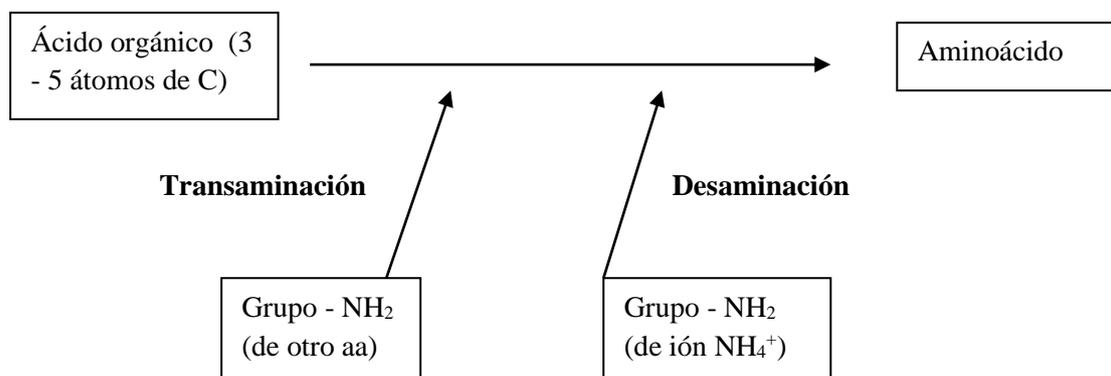
La síntesis de aminoácidos se realiza a partir de un ácido orgánico de entre 3 - 5 átomos de C, al que se le añade un grupo amino (- NH<sub>2</sub>).

El grupo - NH<sub>2</sub> puede proceder de:

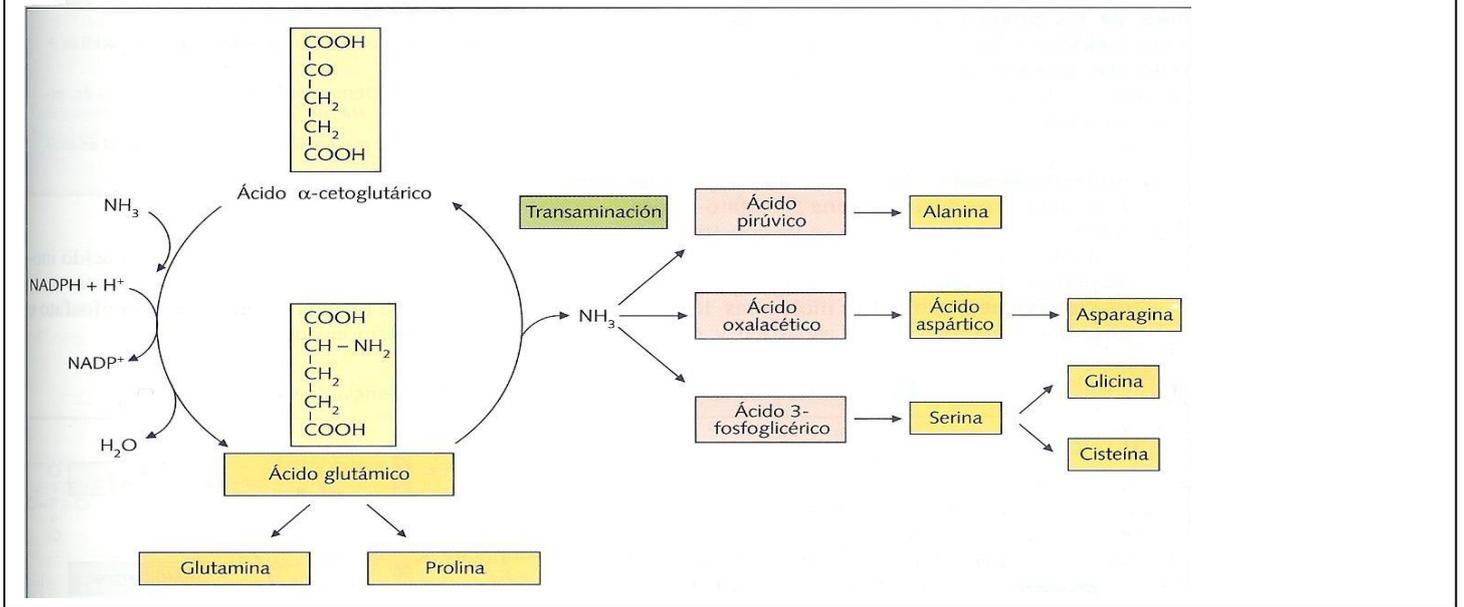
- otro aminoácido directamente = **transaminación**
- un ión amonio libre (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) procedente de otro aminoácido que ha perdido anteriormente un grupo amino = **desaminación**

Para la síntesis de aminoácidos es importantísimo el ácido α cetoglutárico (compuesto del ciclo de Krebs). Esa molécula se combina con el ión amonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup> gracias a una enzima de la matriz mitocondrial y forma el ácido glutámico.

El ácido glutámico origina directamente a los aminoácidos prolina y glutamina, y además es fundamental, ya que aporta grupos amino - NH<sub>2</sub> a otras moléculas (transaminación) para la biosíntesis de otros aminoácidos no esenciales.



### Biosíntesis de los aminoácidos no esenciales

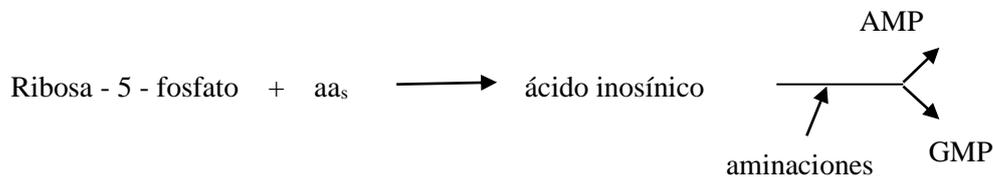


### 3.4.- Anabolismo de los ácidos nucleicos

#### BIOSÍNTESIS DE BASES NITROGENADAS

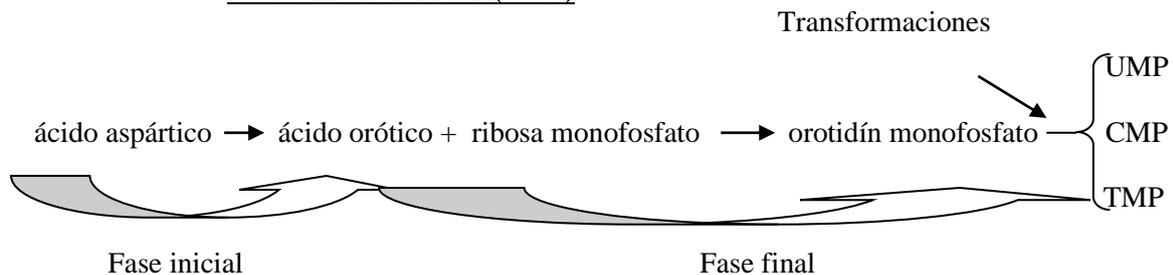
Es anabolismo de ácidos nucleicos. Las células necesitan, para formar ácidos nucleicos, pentosas - ácido fosfórico y bases nitrogenadas.

- La **síntesis de nucleótidos con bases púricas (A - G)** comienza con la ribosa 5 - fosfato, que tras múltiples reacciones en las que intervienen varios aminoácidos (glutamina - ácido aspártico - glicina), se obtiene ácido inosínico, a partir del cual por diferentes aminaciones, se formarán el adenosín - monofosfato (AMP) y el guanosín - monofosfato (GMP)



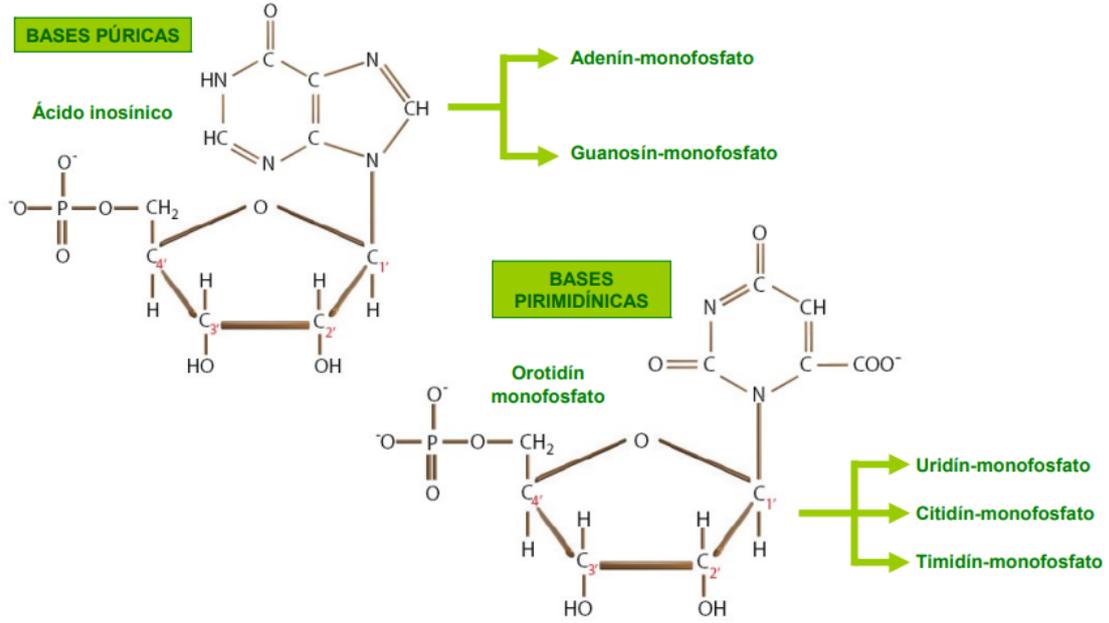
- La **síntesis de nucleótidos con bases pirimidínicas (C - T - U)**, a diferencia del grupo anterior presenta dos fases:

- Inicial:** a partir de ácido aspártico se forma el anillo pirimidínico del ácido orótico
- Final:** el ácido orótico se une a la ribosa monofosfato y forma el nucleótido orotidín monofosfato, a partir del cual, mediante distintas transformaciones se obtienen el uridín - monofosfato (UMP), el citidín - monofosfato (CMP) y el timidín - monofosfato (TMP)

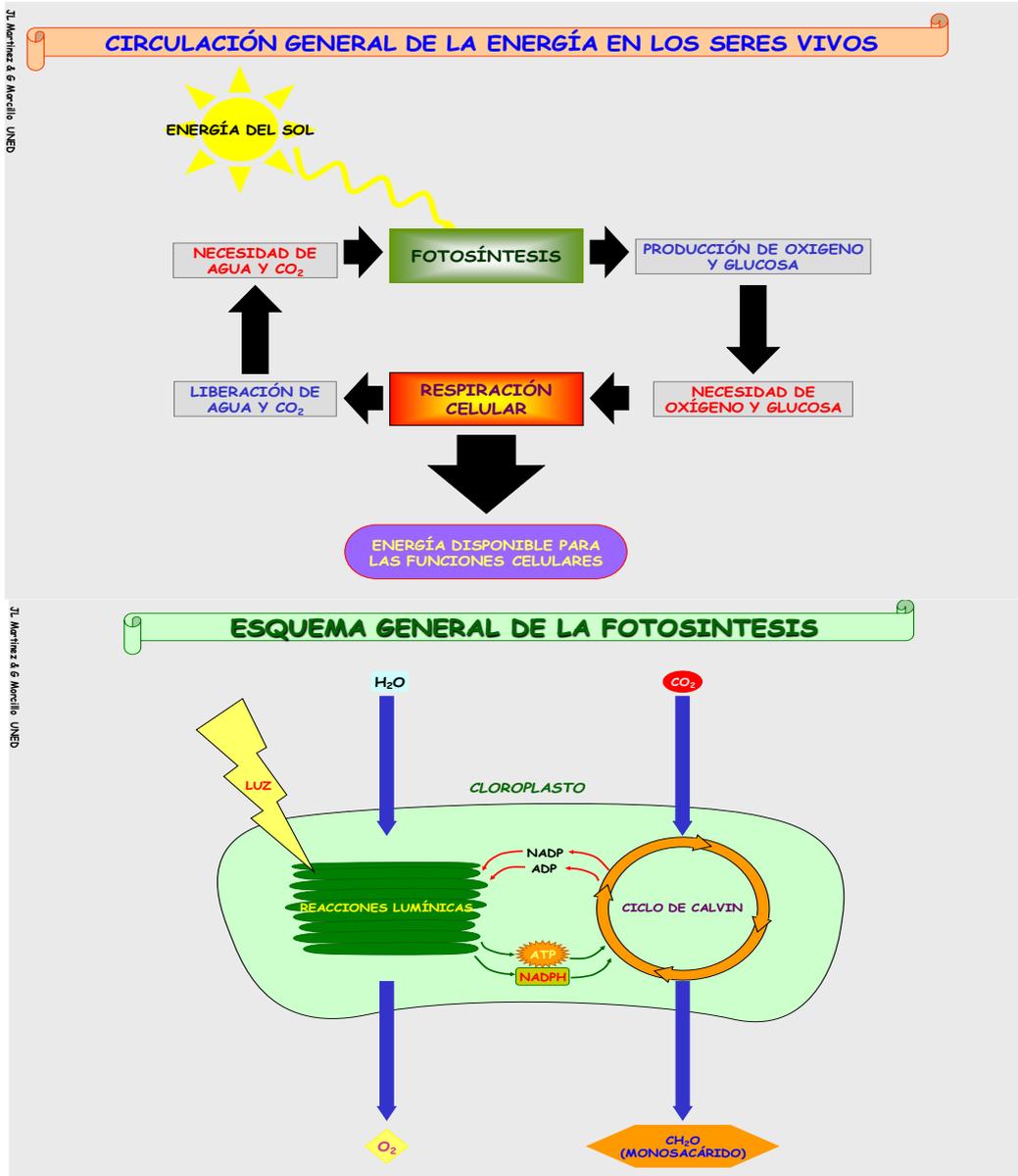




## Síntesis de nucleótidos

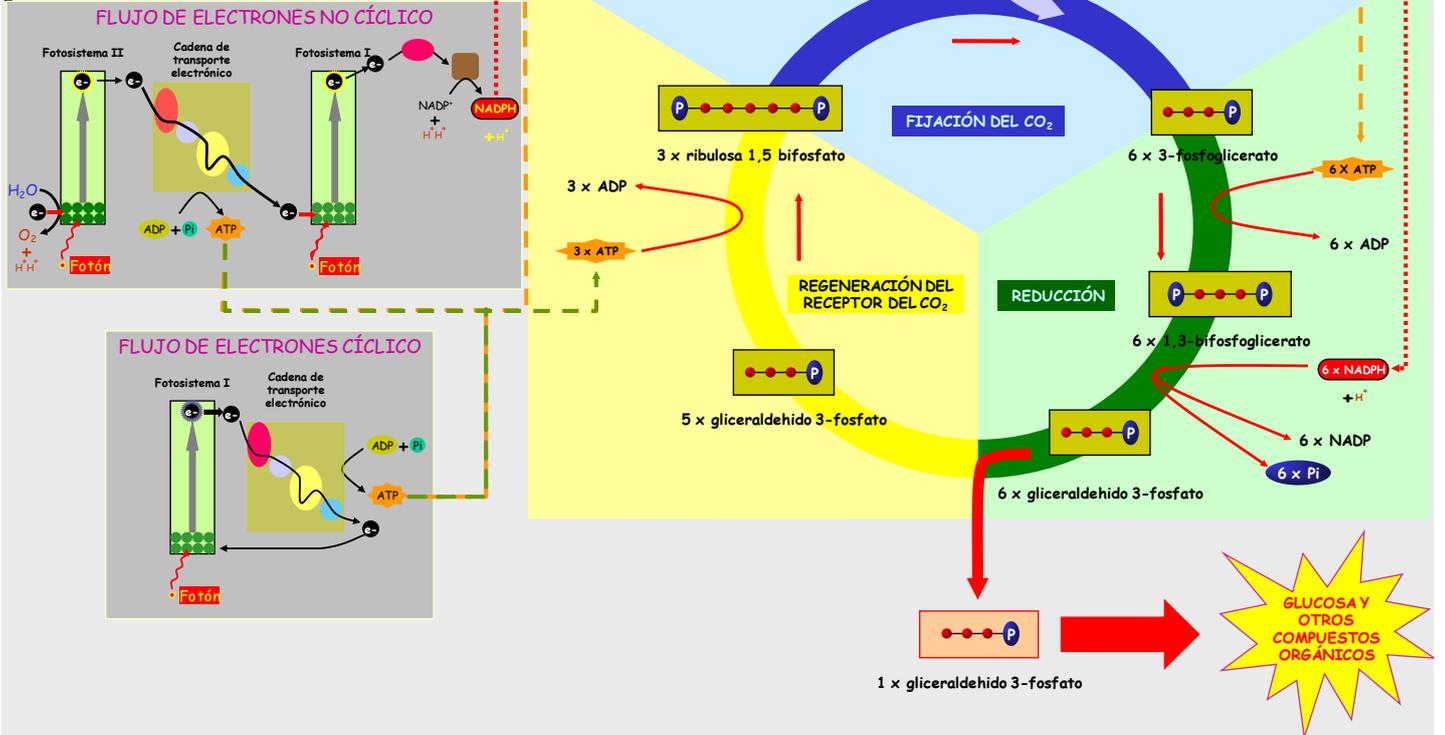


## ESQUEMAS RESUMEN DE LA FOTOSÍNTESIS



## FASE OSCURA - CICLO DE CALVIN

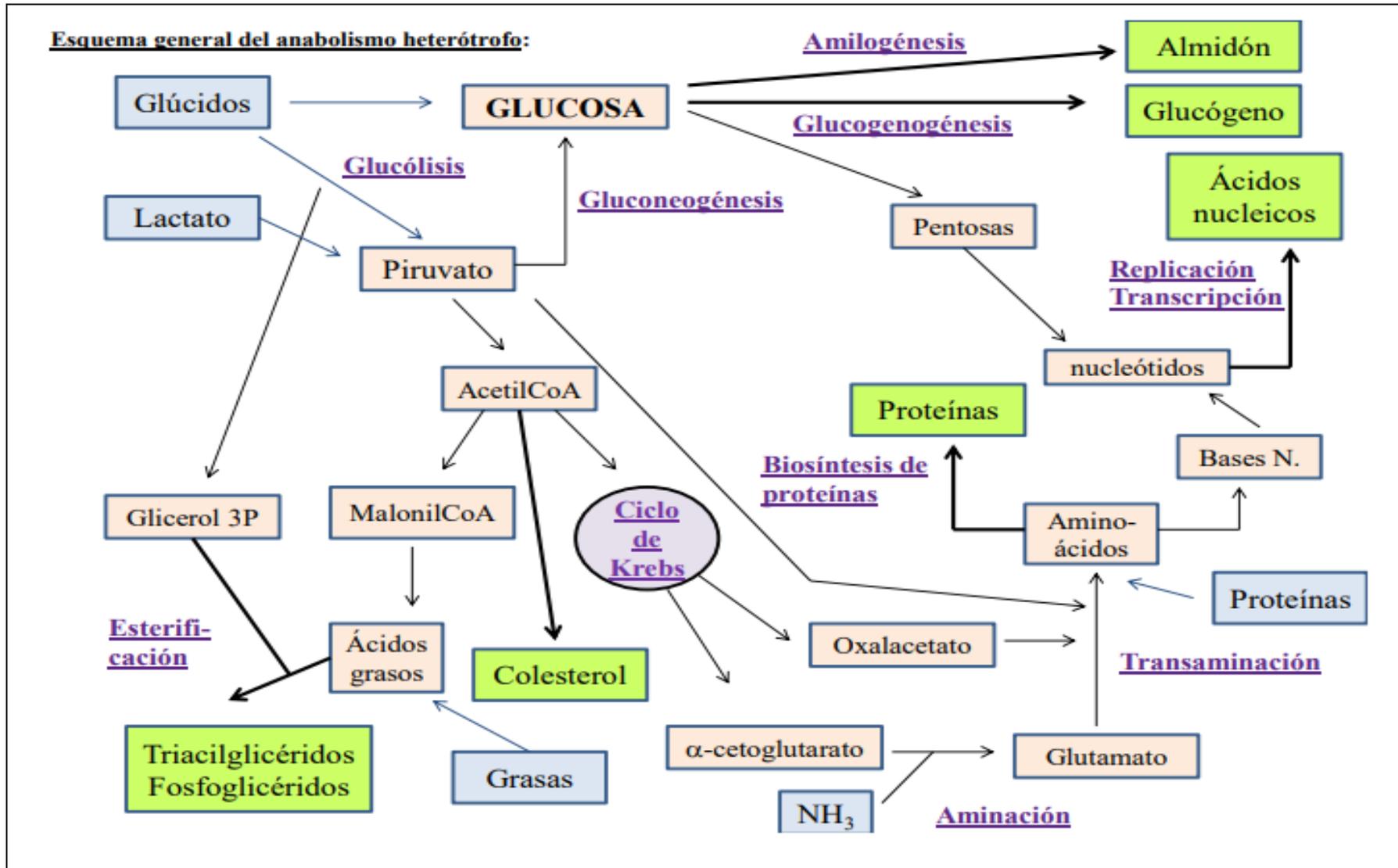
### FASE LUMINICA



### Topografía de la fotosíntesis:

FASE	PROCARIOTAS	EUCARIOTAS
Luminosa	Mesosomas	Membrana tilacoidal
Oscura	Citoplasma	Estroma

#### 4.- PANORAMA GENERAL DE LAS RUTAS ANABÓLICAS (ANABOLISMO)



TEMA 14: METABOLISMO CELULAR. ANABOLISMO

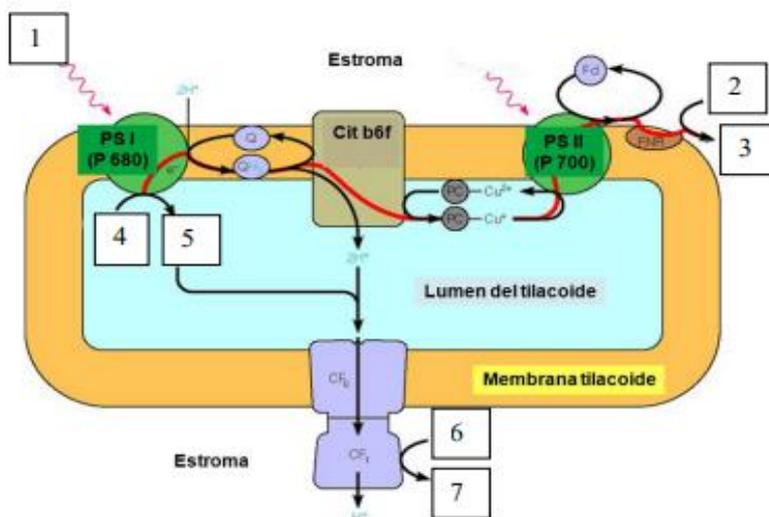
Actividades de repaso de la unidad

- 1.- ¿Todos los organismos autótrofos son fotosintéticos?
- 2.- Indica las semejanzas y las diferencias entre fotosíntesis y quimiosíntesis.
- 3.- ¿Qué diferencia hay entre un pigmento diana y un pigmento antena?
- 4.- ¿Qué se entiende por fotólisis del agua y cuántas moléculas han de sufrir este proceso, para generar una molécula de O<sub>2</sub>?
- 5.- Tanto en la respiración mitocondrial como en la fase luminosa acíclica hay enzimas que trabajan con NADH o NADPH, una cadena transportadora de electrones y ATP-sintetasas, pero hay ciertas diferencias. Responde a las cuestiones de la siguiente tabla:

	<b>Respiración</b>	<b>Fotosíntesis</b>
La cadena transportadora de electrones está en:		
El transportador de hidrógeno es (NADH o NADPH):		
¿Se produce oxidación del NADH o reducción del NADP <sup>+</sup> ?		
¿Qué enzima interactúa con el NADH o el NADP <sup>+</sup> ?		
¿Actúa dicha enzima al principio o al final del proceso?		
Los protones (H <sup>+</sup> ) son aportados por:		
Los protones (H <sup>+</sup> ) son introducidos en:		
Los protones (H <sup>+</sup> ) se unen ..... para producir:		
La parte globosa de la ATP-sintetasa está dirigida hacia:		
La síntesis de ATP se denomina:		

- 6.- Indica cuáles son los objetivos de la fase luminosa y de la fase oscura de la fotosíntesis, explicando la relación entre ambas. ¿Sería correcto decir que “la fase luminosa se realiza durante el día, mientras que la fase oscura ocurre durante la noche”? Razona la respuesta.
- 7.- ¿En qué orgánulos de la célula eucariota transcurren los siguientes procesos metabólicos?
  - a) β-oxidación de los ácidos grasos
  - b) Fotofosforilación
  - c) Glucólisis
  - d) Fosforilación oxidativa
  - e) Captación de luz por el complejo antena
  - f) Ciclo de Calvin
  - g) Ciclo de los ácidos tricarbónicos
- 8.- ¿Por qué disminuye el rendimiento de la fotosíntesis en las plantas C<sub>3</sub>, cuando en ellas hay escasez de agua? ¿Por qué no sucede esto en las plantas C<sub>4</sub>?

- 9.- ¿El oxígeno que se desprende durante la fotosíntesis procede del CO<sub>2</sub> o del H<sub>2</sub>O?
- 10.- ¿A qué molécula orgánica se une el CO<sub>2</sub>, durante la fotosíntesis, para convertirse en carbono orgánico?
- 11.- ¿Cuáles son los productos iniciales y finales de la gluconeogénesis y de la glucólisis? ¿Se puede decir que simplemente son vías metabólicas inversas? Razona la respuesta.
- 12.- ¿Por qué el ácido pirúvico entra en la mitocondria para iniciar la gluconeogénesis?
- 13.- ¿Por qué la gluconeogénesis tiene procesos en los que el ácido oxalacético pasa a málico y de nuevo a oxalacético?
- 14.- ¿Qué molécula actúa como cebador (iniciador de la reacción) en la síntesis de ácidos grasos?
- 15.- ¿Cuántas moléculas de malonil-CoA (3 carbonos) se necesitan para obtener ácido lignocérico (24 carbonos)?
- 16.- ¿Cuál sería el balance neto de la síntesis de un ácido graso de 14 C?
- 17.- ¿En qué parte de la célula se realiza la biosíntesis de los ácidos grasos?
- 18.- ¿Qué molécula es la que, por transaminación, proporciona -NH<sub>2</sub>, en gran número de vías sintetizadoras de aminoácidos?
- 19.- Describa los procesos principales que ocurren durante la fase dependiente de la luz (fase luminosa) de la fotosíntesis. (Opción A-Junio 2004)
- 20.- Defina y diferencie los siguientes pares de conceptos referidos a los microorganismos: autótrofo/heterótrofo; quimiosintético/fotosintético; aerobio/ anaerobio. (Opción B-Junio 2002)
- 21.- Observa el esquema adjunto y responde a las cuestiones:



a) Indica lo que corresponde a cada número:

- 1 \_\_\_\_\_
- 2 \_\_\_\_\_
- 3 \_\_\_\_\_
- 4 \_\_\_\_\_
- 5 \_\_\_\_\_
- 6 \_\_\_\_\_
- 7 \_\_\_\_\_

b) Escribe el proceso concreto de la fotosíntesis que se representa en el dibujo:

c) Indica la finalidad de este proceso

d) ¿A cuántos electrones da lugar la fotólisis de 4 moléculas de agua?

e) Si se cultiva una planta regada con agua cuya molécula está marcada con el isótopo radiactivo  $^{15}\text{O}$ , razona en qué molécula producida por la planta se desprenderá radiactividad.

22.- En la segunda mitad del siglo XVIII, el clérigo británico Joseph Priestley realizó el siguiente experimento: colocó una vela en un recipiente transparente y lo cerró, dejando que la vela ardiera hasta apagarse, para a continuación introducir una planta en el mismo recipiente. Al cabo de poco tiempo encendió la vela y esta volvió a arder aun cuando el recipiente se mantuvo siempre cerrado. Explica razonadamente estas preguntas:



a) ¿Por qué la vela terminó apagándose?

b) ¿Por qué introdujo una planta y no un animal?

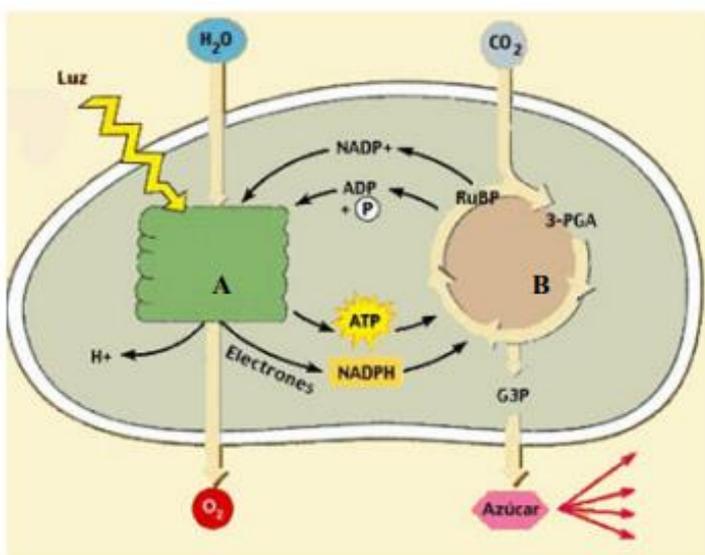
c) ¿Por qué tuvo que esperar un tiempo después de introducida la planta?

d) ¿Por qué la vela volvió a arder?

e) Explica otra versión de este experimento, representada en la imagen siguiente:



23.- Observa la imagen y responde a las cuestiones siguientes:



a) Escribe la denominación de los procesos A y B:

A \_\_\_\_\_

B \_\_\_\_\_

b) Indica la localización de los procesos A y B:

A \_\_\_\_\_

B \_\_\_\_\_

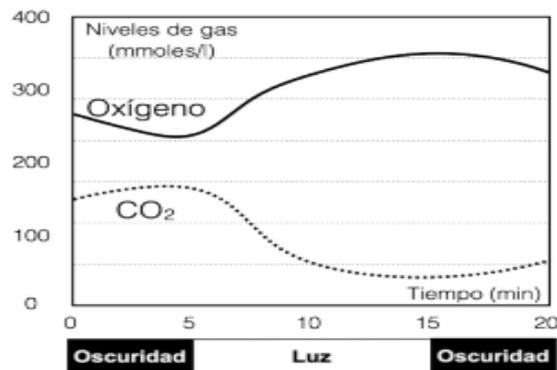
c) Señala el nombre de una enzima esencial del proceso B  
\_\_\_\_\_

d) Escribe los sustratos que entran y salen en el proceso B.

- e) ¿Qué características estructurales del cloroplasto son esenciales para la fotosíntesis?
- f) ¿Es posible la fase oscura de la fotosíntesis sin la fotofosforilación cíclica?
- g) Calcula el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{H}_2\text{O}$  y el ATP necesarios para la síntesis de tres moléculas de sacarosa.
- h) Indica las similitudes y las diferencias bioquímicas entre la fotosíntesis y la quimiosíntesis

24.- Se plantó un arbusto en una campana en la que se registraban los niveles de gases presentes en el ambiente, tal y como muestra la gráfica

- a) Entre el minuto 5 y 15 se aplicó luz y se observó un aumento de oxígeno. ¿En qué localización celular se origina (concreta lo máximo posible)?
- b) Explica brevemente cuál es el origen de ese oxígeno y qué relación tiene con la presencia de luz.
- c) Al mismo tiempo se observó un descenso del  $\text{CO}_2$ . ¿Cómo se llama la ruta metabólica que lo explicaría? ¿Dónde se produce?. Cita 2 productos de dicha ruta
- d) Durante la fase de oscuridad la cantidad de oxígeno disminuyó y la de  $\text{CO}_2$  aumentó, ¿a qué procesos metabólicos podrían deberse estos cambios y en qué orgánulo se producen?
- e) Durante el periodo que hay luz, razona si se siguen llevando a cabo los procesos citados en el apartado anterior

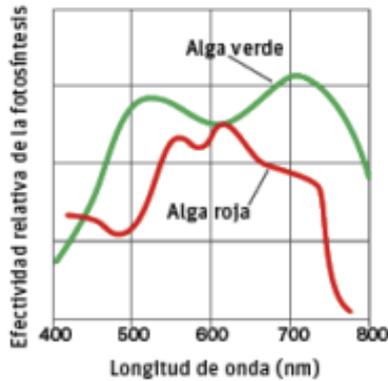


25.- Un investigador observa que la actividad fotosintética es dos veces mayor cuando a las plantas cultivadas se les aumenta la temperatura de  $25^\circ\text{C}$  a  $45^\circ\text{C}$ . Sin embargo, encuentra que temperaturas por encima de  $55^\circ\text{C}$  disminuyen drásticamente dicha actividad. Dé una explicación razonada a estos hechos.

26.- La fotosíntesis es un proceso esencial para los seres vivos. Responde:

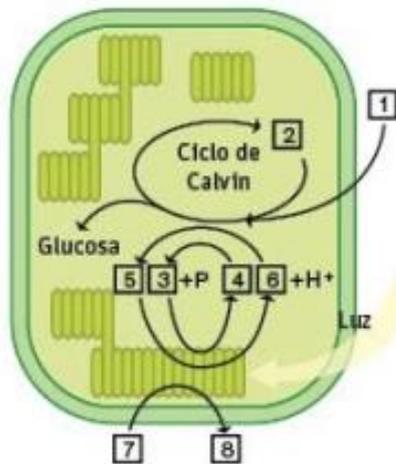
- a) ¿Cuáles son los productos resultantes de la fase lumínica?
- b) ¿Cuáles son los productos resultantes de la fase oscura?
- c) ¿En qué partes de la célula se localizan estas fases?

27.- En esta gráfica se representa el espectro de efectividad relativa de la fotosíntesis de dos organismos: un alga verde y un alga roja. Contesta razonadamente.



- a) Las dos algas, cuando son expuestas a la misma fuente de luz, ¿absorben las mismas longitudes de onda lumínica con idéntico grado de efectividad
- b) ¿Cuál de las tres longitudes de onda de la luz, 500, 620 o 700 nm, es aprovechada con igual eficacia en la fotosíntesis por ambas algas?

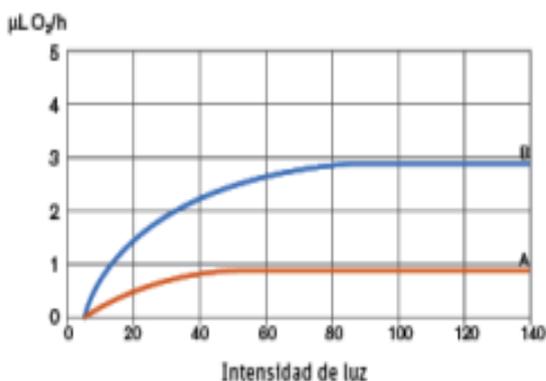
28.- En esta figura se indican esquemáticamente las actividades más importantes de un cloroplasto.



- a) Identifica los elementos de la figura representados por los números 1 a 8.
- b) Señala, mediante un esquema, qué nombre reciben las distintas estructuras del cloroplasto.
- c) ¿En cuál de esas estructuras tiene lugar el proceso por el que se forman los elementos 4 y 6 de la figura?
- d) ¿Dónde se produce el ciclo de Calvin?
- e) Explica brevemente en qué consiste el ciclo de Calvin de la fotosíntesis.

29.- El gráfico muestra los resultados obtenidos en la velocidad de la fotosíntesis (medida en  $\mu\text{L O}_2/\text{h}$ ) frente a la intensidad de la luz (medida en unidades arbitrarias), en un ensayo realizado para conocer los efectos de los niveles de  $\text{CO}_2$  sobre dicha velocidad en una planta anual.

La temperatura a la cual se llevaron a cabo los experimentos fue siempre de  $20^\circ\text{C}$ . La curva A representa al grupo de plantas que creció en una atmósfera de 0,01 % de  $\text{CO}_2$ , y la curva B al grupo de plantas que se desarrolló a 0,04 % de  $\text{CO}_2$ .



- Di, razonando las respuestas, cuál podría ser el factor limitante en las plantas A en estos dos casos.
- a) Hasta las 50 unidades de intensidad lumínica.
- b) A partir de las 50 unidades de intensidad lumínica.

30.- Existen cuatro especies bacterianas con estas características fundamentales.

- a) Clostridium tetani, anaerobia estricta.
- b) Mycobacterium tuberculosis, aerobia estricta.
- c) Streptococcus lactis, anaerobia aerotolerante.
- d) Escherichia coli, aerobia facultativa.

Explica qué significan estos modos de vida, y comenta lo que sepas sobre estas especies de bacterias.

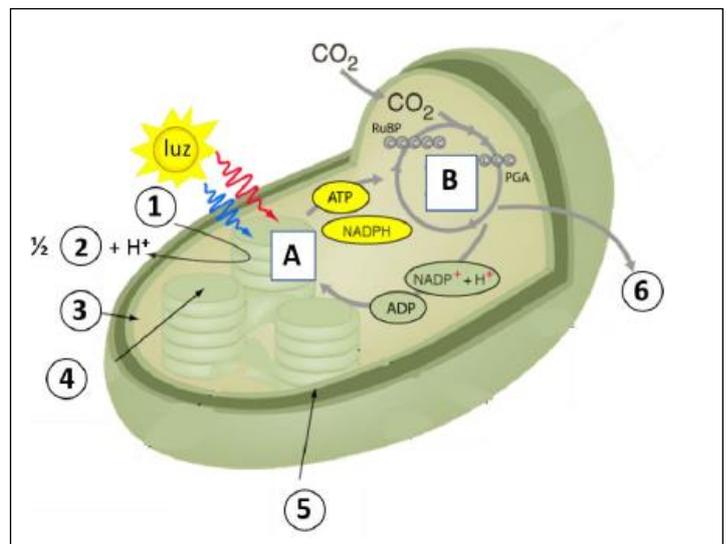
31.- Imagina que acudes a una persona amiga tuya que ya está en la universidad para que te resuelva dudas sobre el metabolismo de la glucosa. Con intención de simplificar el tema, te dice que solo los vegetales autótrofos pueden sintetizarla, y que nosotros necesitamos tomarla en la dieta. Con los conocimientos que posees actualmente, ¿qué te parece su respuesta?

32.- Aplica lo que sabes acerca de la fotosíntesis al caso hipotético que se plantea a continuación. Imagina que conseguimos mantener cloroplastos enteros y en perfectas condiciones vitales, dispersos en una disolución acuosa adecuada y de la que se ha eliminado por completo el dióxido de carbono. Supongamos que los cloroplastos solo tienen en su interior abundantes moléculas de NADP<sup>+</sup>, de fosfato libre, de ADP y de todas las enzimas y transportadores electrónicos necesarios. Responde razonadamente a lo siguiente.

- a) ¿Qué pasará si iluminamos adecuadamente los cloroplastos durante largo tiempo?
- b) Si agregamos al cultivo algunos protozoos que no dañen en absoluto a los cloroplastos, ¿crees que podrá suceder algo especial?
- c) ¿Se te ocurre alguna consideración ecológica a propósito de este experimento imaginario?

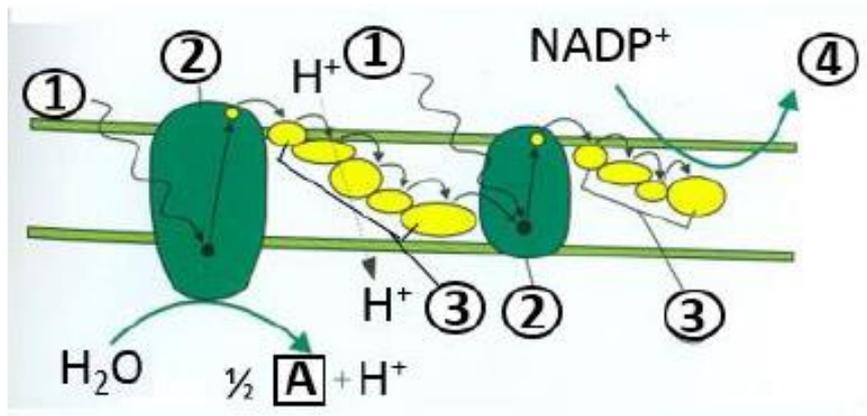
33.- Observa el esquema de la figura que representa de forma resumida un proceso metabólico esencial en la biosfera.

- a) Identifique de qué proceso se trata, en qué orgánulo tiene lugar y el tipo de seres vivos que lo llevan a cabo.
- b) Indique la denominación de las **fases A y B** citando la localización subcelular donde se realizan.
- c) Identifique qué números del 1 al 6 corresponden con los productos finales obtenidos en el proceso. ¿Cuál es el papel del agua en este proceso?.



34.- El esquema representa una ruta metabólica característica de los vegetales. Conteste a las siguientes cuestiones:

- Identifique la ruta metabólica, y la parte de esa ruta, que se representan en el esquema. ¿En qué orgánulo se realiza y cuál es su función global?
- Sustituya los números 1 al 4 de la figura con el término al que hagan referencia.
- ¿Cómo se denomina y en qué parte del orgánulo se realiza el proceso a la izquierda de la figura, en el que interviene una molécula de agua? ¿Cuál es el producto representado por la letra A?



35.- En relación con la figura adjunta, responda las siguientes cuestiones:

- (a) ¿Qué proceso biológico se representa en la figura?. ¿Cuál es su finalidad? ¿Qué tipo de células lo llevan a cabo?

- (b) Indique qué corresponde a cada número

