

## 1. Conceptos básicos: nutrición autótrofa y heterótrofa.

## 2. Anabolismo autótrofo: Fotosíntesis. Fases generales y función de cada una.

- Conceptos de metabolismo, catabolismo, anabolismo. Tipos de metabolismo: quimioautótrofos, fotoautótrofos, quimioheterótrofos.
- Concepto de ruta metabólica. El papel de las enzimas. Holoenzimas, apoenzimas y coenzimas (NAD(P), FAD, CoA). Concepto de oxidación y reducción. El papel del ATP.
- Fotosíntesis • Concepto. Fases. Fase lumínica: localización, fotosistemas I y II. Antenas, centros de reacción, cadenas de transportadores, fotofosforilación y obtención de poder reductor. Fotólisis del agua. Balance.
- Fase oscura o ciclo de Calvin: localización, el papel de la enzima Rubisco. Balance.
- Factores que influyen en la fotosíntesis.

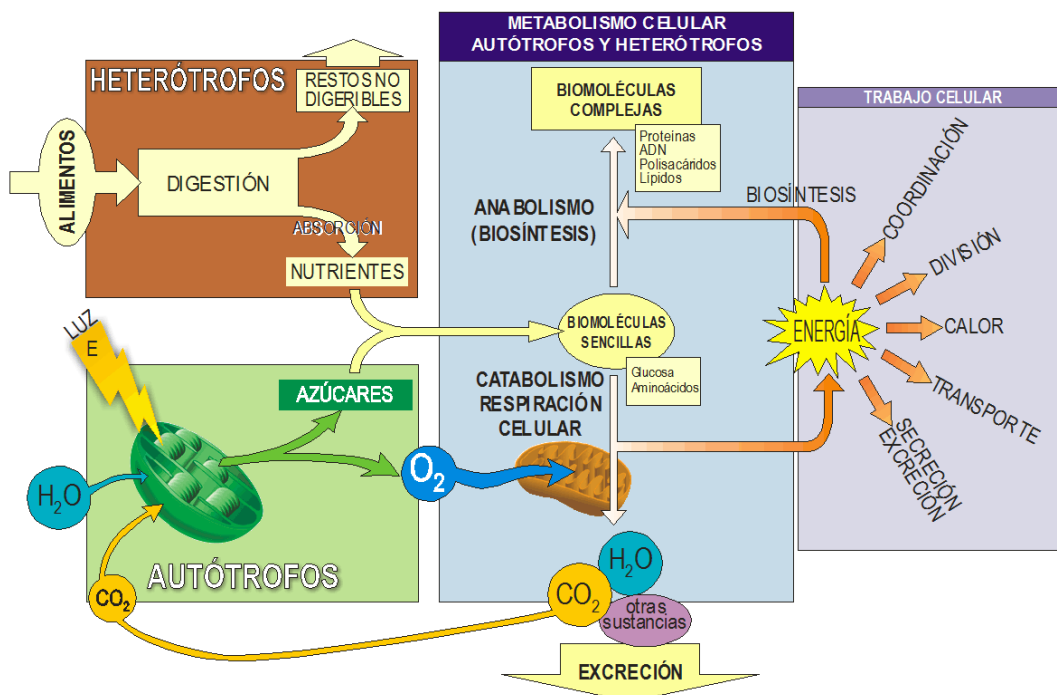
## 1. CONCEPTOS BÁSICOS: NUTRICIÓN AUTÓTROFA Y HETERÓTROFA.

### 1.1 METABOLISMOS CELULAR

Es el conjunto de reacciones químicas que se producen en el interior de las células de un organismo, mediante las cuales los nutrientes que llegan a ellas desde el exterior se transforman. Estas reacciones están catalizadas por **enzimas específicas**.

El metabolismo tiene principalmente dos finalidades:

- **Obtener energía química** utilizable por la célula, que se almacena en forma de **ATP**. Esta energía se obtiene por degradación de los nutrientes que se toman directamente del exterior o bien por degradación de otros compuestos que se han fabricado con esos nutrientes y que se almacenan como reserva.
- **Fabricar sus propios compuestos** a partir de los nutrientes, que serán utilizados para crear sus estructuras o para almacenarlos como reserva.



## 1.2. RUTAS METABÓLICAS.

En las células se producen una gran cantidad de reacciones metabólicas, éstas no son independientes sino que están asociadas formando las denominadas rutas metabólicas. Por consiguiente una **ruta o vía metabólica** es una secuencia ordenada de reacciones en las que el producto final de una reacción es el sustrato inicial de la siguiente.

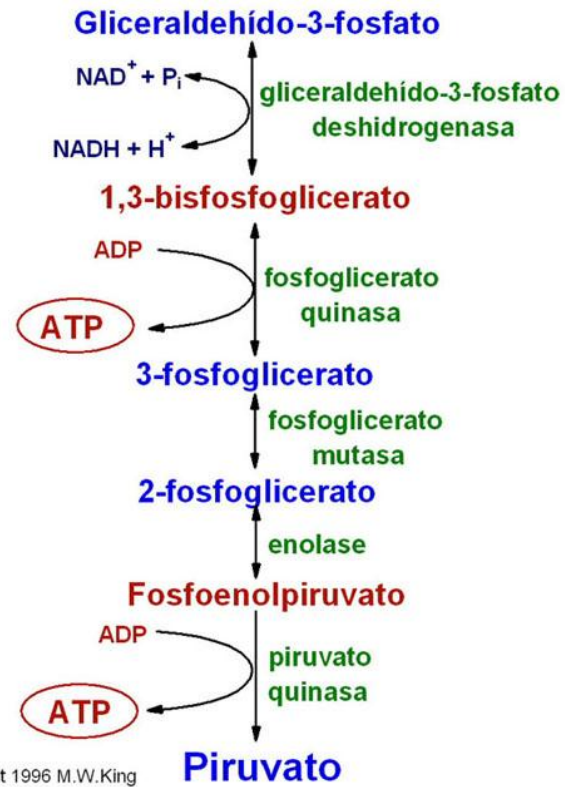
En una ruta un sustrato inicial se transforma mediante las distintas reacciones que constituyen la ruta en un producto final, los compuestos intermedios de la ruta se denomina **metabolitos**.

Cada una de las reacciones de una ruta metabólica esta catalizada por un enzima específico. Para aumentar la eficacia de las rutas, las enzimas que participan se asocian y forman complejos multienzimáticos o se sitúan en un mismo compartimento celular.

**Tipos de rutas metabólicas.** Las rutas metabólicas pueden ser:

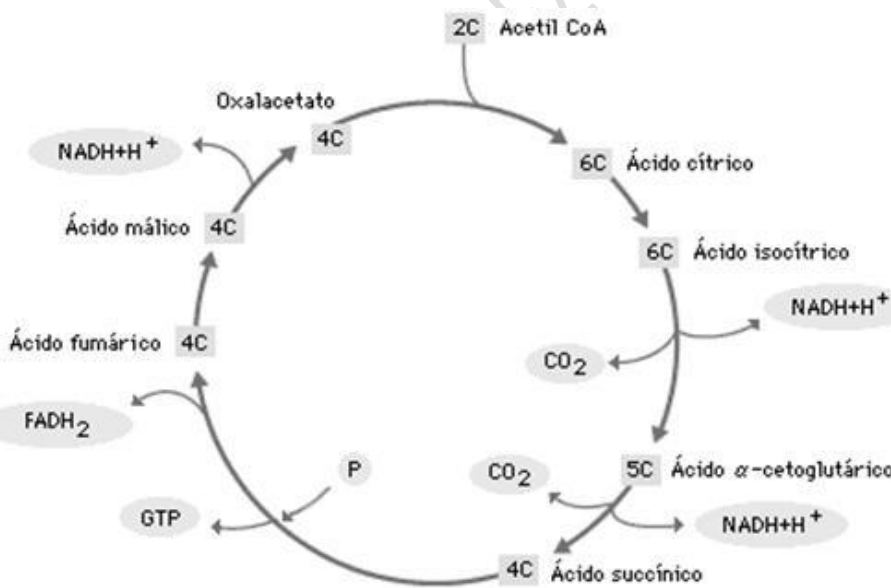
- Lineales.** Cuando el sustrato de la primera reacción (sustrato inicial) es diferente al producto final de la última reacción. En este caso el sustrato de la primera reacción es el sustrato inicial de la ruta y el producto de la última reacción es el producto final de la ruta metabólica.

- Cíclica.** Cuando el producto de la última reacción es el sustrato de la reacción inicial, en estos casos el **sustrato inicial** de la ruta es un compuesto que se incorpora en la primera reacción y el **producto final** de la ruta es algún compuesto que se forma en alguna etapa intermedia y que sale de la ruta.



Frecuentemente los metabolitos o los productos finales de una ruta suelen ser sustratos de reacciones de otras rutas, por lo que las rutas están enlazadas entre sí formando **redes metabólicas complejas**.

Según que las rutas sean degradativas o de síntesis podrán ser: **rutas catabólicas** o **anabólicas** respectivamente.

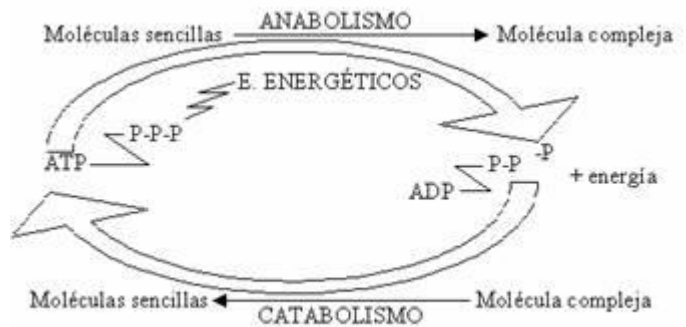


### 1.3. TIPOS DE PROCESOS METABÓLICOS.

Dentro del metabolismo se diferencian dos tipos de procesos: **catabolismo** y **anabolismo**

#### El catabolismo o fase destructiva.

Es el conjunto de reacciones metabólicas mediante las cuales las moléculas orgánicas más o menos complejas (glúcidos, lípidos etc), que proceden del medio externo o de reservas internas, se degradan total o parcialmente transformándose en otras moléculas más sencillas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , ac.láctico, amoniaco etc) y liberándose energía en mayor o menor cantidad que se almacena en forma de ATP. Esta energía será utilizada por la célula para realizar sus actividades vitales (transporte activo, contracción muscular, síntesis de moléculas, etc) .



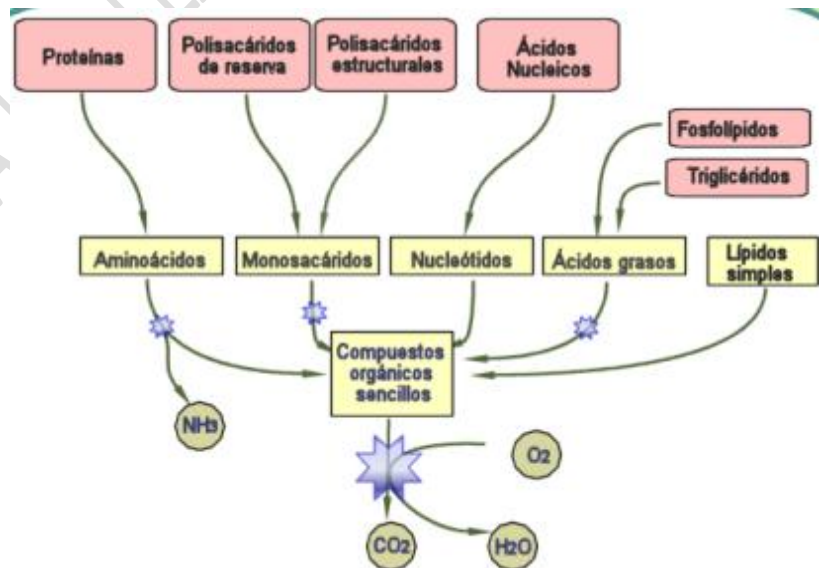
Las reacciones catabólicas se caracterizan por lo siguiente:

- Son **reacciones degradativas**, mediante ellas compuestos complejos se transforman en otros más sencillos.

- Son **reacciones oxidativas**, mediante las cuales se oxidan los compuestos orgánicos más o menos reducidos, liberándose electrones que son captados por coenzimas oxidados que se reducen.

- Son **reacciones exergónicas** en las que se libera energía que se almacena en forma de ATP.

- Son **procesos convergentes** mediante los cuales a partir de compuestos muy diferentes se obtienen siempre los mismos compuestos ( $\text{CO}_2$ , pirúvico, etanol, etc).



#### El anabolismo o fase constructiva.

Es el conjunto de reacciones metabólicas mediante las cuales a partir de compuestos sencillos (inorgánicos u orgánicos) se sintetizan moléculas más complejas. Mediante estas reacciones se crean nuevos enlaces por lo que se requiere un aporte de energía que provendrá del ATP.

Las moléculas sintetizadas se utilizarán por las células para formar sus componentes celulares y así poder crecer y renovarse o serán almacenadas como reserva para su posterior utilización como fuente de energía.

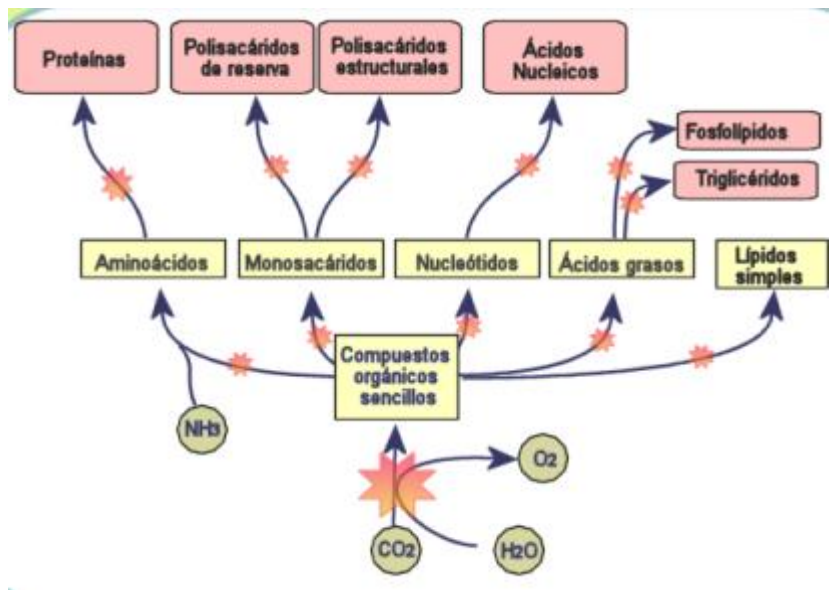
Las reacciones anabólicas se caracterizan por lo siguiente:

- Son **reacciones de síntesis**, mediante ellas a partir de compuestos sencillos se sintetizan otros más complejos.

- Son **reacciones de reducción**, mediante las cuales compuestos más oxidados se reducen, para ello se necesitan electrones que se les ceden los coenzimas reducidos (NADH, FADH<sub>2</sub> etc) que al cederlos se oxidan.

- Son **reacciones endergónicas** que requieren un aporte de energía que procede de la hidrólisis del ATP.

- Son **procesos divergentes** debido a que, a partir de unos pocos compuestos se pueden obtener una gran variedad de productos.



#### 1.4. TIPOS METABOLICOS DE SERES VIVOS

No todos los seres vivos utilizan la misma fuente de carbono y de energía para obtener sus biomoléculas.

- Teniendo en cuenta la fuente de carbono que utilicen podemos distinguir dos tipos de seres:

- Autótrofos**, utilizan como fuente de carbono el CO<sub>2</sub>.

- Heterótrofos**, utilizan como fuente de carbono los compuestos orgánicos.

- Teniendo en cuenta la fuente de energía que utilicen se diferencian dos grupos:

- Fotosintéticos**, utilizan como fuente de energía la luz solar.

- Quimiosintéticos**, utilizan como fuente de energía, la que se libera en reacciones químicas oxidativas (exergónicas).

Si tenemos en cuenta todos estos aspectos conjuntamente, se pueden diferenciar 4 tipos metabólicos de seres vivos:

- ◆ **Fotoautótrofos**: También se denominan fotosintéticos. Son seres que para sintetizar sus biomoléculas, utilizan como **fuentes de carbono el CO<sub>2</sub>**, y como **fuentes de energía la luz solar**. A este grupo pertenecen: las plantas, las algas, las bacterias fotosintéticas del azufre, cianófitas.

- ◆ **Fotoheterótrofos**: Son seres que utilizan como **fuentes de carbono compuestos orgánicos**, y como **fuentes de energía la luz**. A este grupo pertenecen bacterias púrpuras no sulfuradas.

- ◆ **Quimioautótrofos**: Se les denomina también quimiosintéticos. Son seres que utilizan como **fuentes de carbono el CO<sub>2</sub>**, y como **fuentes de energía la que se desprende en reacciones químicas**

**redox de compuestos inorgánicos.** A este grupo pertenecen las llamadas bacterias quimiosintéticas como las bacterias nitrificantes, las ferrobacterias, etc.

♦ **Quimioheterótrofos:** También se les denomina heterótrofos. Son seres que utilizan como **fuelle de carbono compuestos orgánicos** y como **fuelle de energía la que se desprende en las reacciones redox de los compuestos orgánicos.** A este grupo pertenecen los animales, los hongos, los protozoos y la mayoría de las bacterias.

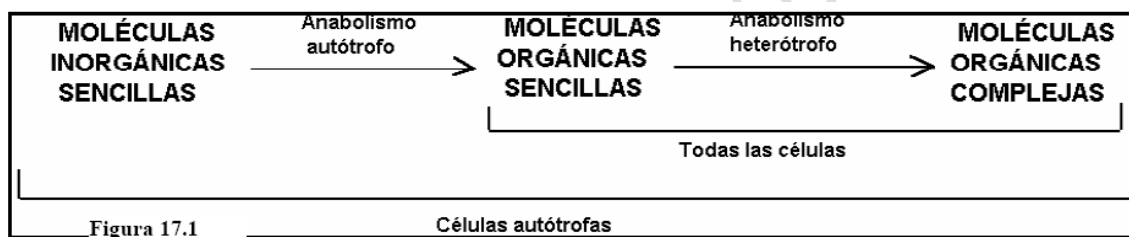
•Según cual sea el aceptor último de los hidrógenos que se liberan en las oxidaciones que ocurren en ellos en las que se desprende energía, pueden ser:

-**Aerobios,** si el aceptor último es el oxígeno

-**Anaerobios,** si el aceptor último es otra sustancia orgánica o inorgánica diferente del oxígeno.

## 2. ANABOLISMO AUTÓTROFO: FOTOSÍNTESIS. FASES GENERALES Y FUNCIÓN DE CADA UNA.

### 2.1.ANABOLISMO



#### Anabolismo autótrofo.

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.).

Según cual sea la fuente de energía que se utilice se diferencian dos tipos de procesos en el anabolismo autótrofo:

-**Fotosíntesis:** Se utiliza como fuente de energía para transformar las moléculas inorgánicas en orgánicas la energía solar. La realizan las plantas, algas y alguna bacteria.

-**Quimiosíntesis:** Se utiliza como fuente de energía, la energía química que se desprende en reacciones de oxidación de compuestos inorgánicos que tienen lugar en el medio. La realizan algunas bacterias.

#### Anabolismo heterótrofo

A partir de moléculas orgánicas sencillas se sintetizan moléculas orgánicas complejas, lo realizan todas las células, ya sean autótrofas o heterótrofas.

En este apartado nos centraremos en la fotosíntesis.

## 2.2.LA 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 **mesosomas y citoplasma** de las células procariotas.

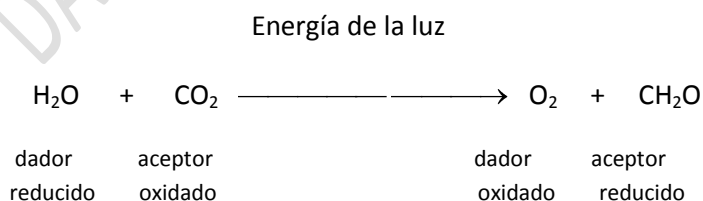
La fotosíntesis es probablemente el **proceso bioquímico más importante de la Biosfera**, ya que la energía solar captada por los organismos fotosintéticos no sólo constituye su propia fuente de energía, sino que es además la fuente de energía de casi todos los organismos heterótrofos a los que les llega 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 se hizo aerobia y oxidante
- Mediante la fotosíntesis se realiza la **síntesis de materia orgánica** (unos cien mil millones 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** es posible gracias a la liberación de oxígeno a la atmósfera como subproducto de la fotosíntesis.
- La fotosíntesis es responsable de la **retirada del  $\text{CO}_2$  atmosférico**, principal gas causante del efecto invernadero.

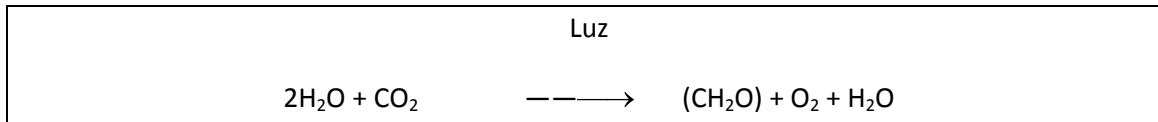
### 2.2.1. Ecuación de la fotosíntesis.

•La fotosíntesis puede considerarse como un proceso de **oxido-reducción**, en el que un compuesto se oxida y cede electrones (generalmente el  $\text{H}_2\text{O}$ ) y otro compuesto los acepta y se reduce (normalmente el  $\text{CO}_2$ ). 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  $\text{O}_2$** . 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 ( $\text{H}_2^{18}\text{O}$ ) se observa que el vegetal libera  $^{18}\text{O}$ . Como la molécula de agua sólo contiene un átomo de oxígeno y en la fotosíntesis se desprende oxígeno molecular ( $\text{O}_2$ ), la reacción global, que hemos formulado anteriormente, 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  $\text{CO}_2$  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 **nitrito** y el **sulfato**.

### 2.2.2.Fases de la fotosíntesis.

Como hemos visto, en la fotosíntesis hay oxidación del agua y reducción del dióxido de carbono pero este proceso de oxidorreducción no se hace ni espontánea ni directamente, sino través de un conjunto de reacciones complejas que suceden en dos etapas: **fase luminosa** y **fase oscura**

#### ➤Fase luminosa.

- Se produce solo **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.

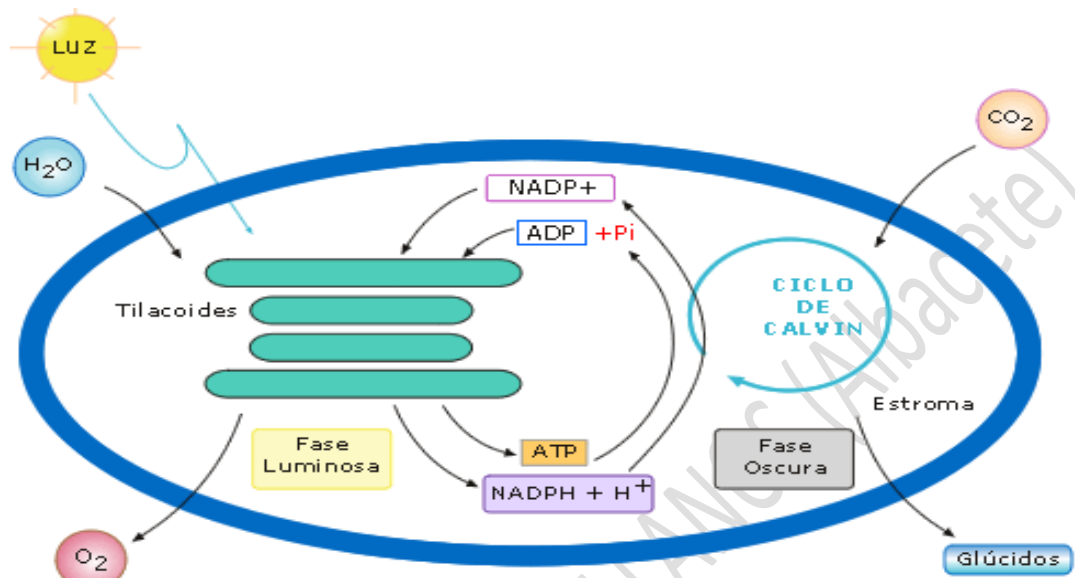
- Durante esta fase los pigmentos fotosintéticos captan **la energía de la luz y la transforman en energía química**: en forma de **poder reductor (NADPH)** y **energía libre (ATP)**. En esta fase se **libera oxígeno** a la atmósfera procedente de la rotura de moléculas de agua (fotólisis del agua).

En la fase luminosa ocurren los procesos siguientes:

- Captación de la luz por los fotosistemas.
- Transporte de electrones desde el  $\text{H}_2\text{O}$  hasta el  $\text{NADP}^+$ .
- Fotofosforilación.

### ➤ Fase oscura.

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).



## 2.3. FASE LUMINOSA DE LA FOTOSÍNTESIS

### 2.3.1. Captación de la luz. Los 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. 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.

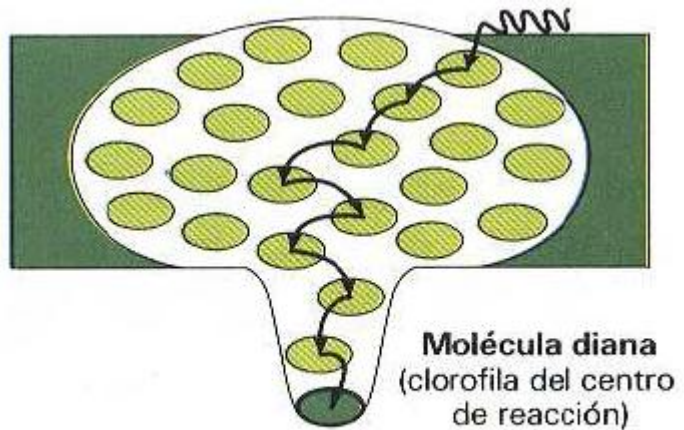
-**Carotenoides.** Son pigmentos liposolubles que pertenecen al grupo de los **terpenos** o isoprenoides, están formadas por la unión de varias unidades de isopreno. Tienen colores rojos, anaranjados y amarillos.

#### • 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  $P_{700}$  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.

✓El **fotosistema II (PS II)**, llamado  $P_{680}$  tiene su máximo de absorción de 680 nm.

#### •Funcionamiento del fotosistema.

Cuando un fotón 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.

#### 2.3.2. Transporte no cíclico de electrones. Reducción del $NADP^+$ y fotólisis del $H_2O$ .

Durante la fase luminosa de la fotosíntesis se produce un **transporte de electrones desde un dador que en las plantas es el  $H_2O$  hasta el  $NADP^+$**  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>

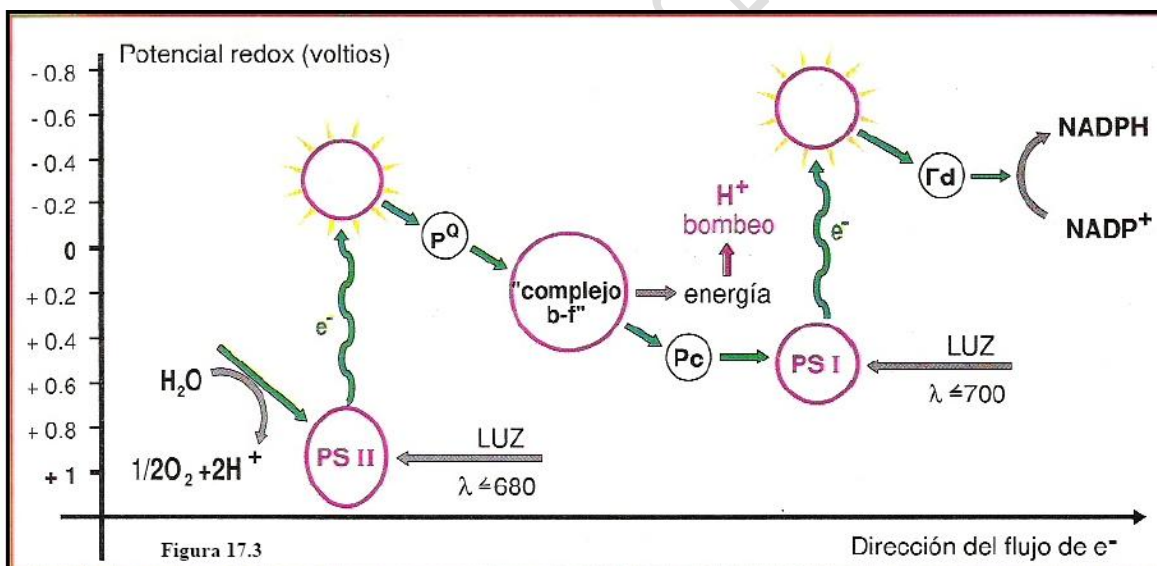
**El transporte de electrones desde el agua al NADP<sup>+</sup> se puede dividir en tres tramos:**

**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.

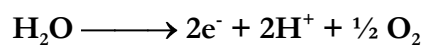
**2º tramo: Recuperación de los electrones cedidos por el PSI**

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.



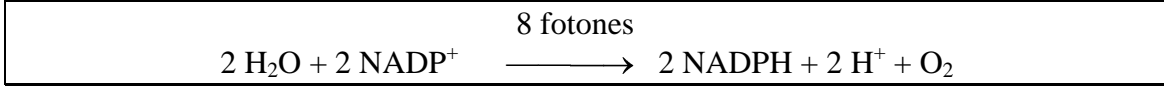
**3º tramo: Recuperación de los electrones cedidos por el PSII. Fotólisis del H<sub>2</sub>O**

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 1/2 O<sub>2</sub> que se libera a la atmósfera.



•El recorrido de dos electrones desde el  $\text{H}_2\text{O}$  hasta el  $\text{NADP}^+$  necesita la energía proporcionada por cuatro fotones de luz, que impactan dos sobre cada uno de los fotosistemas. Como la formación de una molécula  $\text{O}_2$  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:



### 2.3.3. Fotofosforilación

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 intratilacooidal**.

En el curso del transporte de un par de electrones son liberados **cuatro  $\text{H}^+$**  en el espacio intratilacooidal: **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 intratilacoide genera un **gradiente electroquímico**, entre el espacio tilacoide y el estroma, que actúa sobre los  $\text{H}^+$  y tiende a hacerles regresar hacia el estroma. Como la membrana del tilacoide 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 sinteticen ATP a partir de ADP y Pi.

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

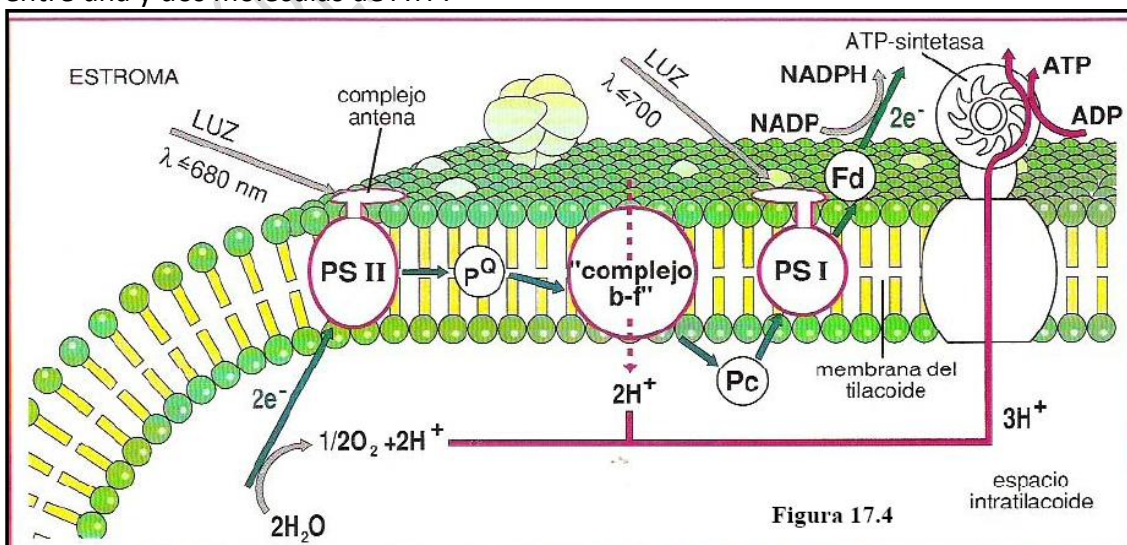


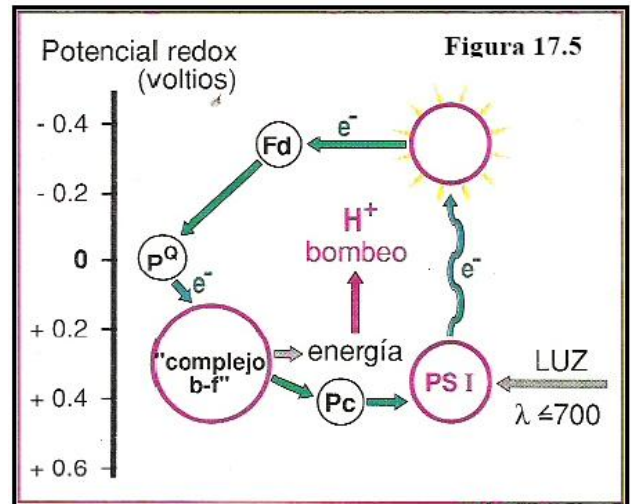
Figura 17.4

### 2.3.4. El transporte cíclico de electrones.

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 el  $\text{NADP}^+$  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 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.

## 2.4. FASE OSCURA

La fase oscura consiste en la **síntesis de moléculas orgánicas** sencillas por **reducción de moléculas inorgánicas** utilizando la energía del NADPH y del ATP sintetizados en la fase luminosa. Ocurre en el **estroma del cloroplasto** y puede suceder tanto en ausencia como en presencia de luz.

El principal sustrato utilizado en la fase oscura es el  $\text{CO}_2$ , que es reducido a monosacáridos sencillos, 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.

### 2.4.1. Reducción del $\text{CO}_2$ . Ciclo de Calvin

La reducción del  $\text{CO}_2$  en la fase oscura de la fotosíntesis se realiza a través de una ruta cíclica llamada **ciclo de Calvin**, en honor a su descubridor.

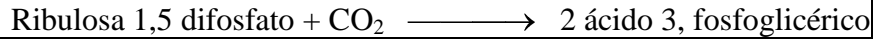
En este ciclo, las moléculas de  $\text{CO}_2$  son reducidas a **gliceraldehído 3- fosfato (G3P)**, triosa que se considera el producto final del proceso, mediante un conjunto de reacciones, que necesitan los hidrógenos aportados por el NADPH y la energía del ATP procedentes de la fase luminosa.

En cada vuelta del ciclo se reduce una sola molécula de  $\text{CO}_2$ , 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:

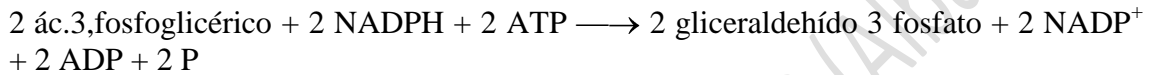
### 1.- Fijación del CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> 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 carbonos, el **ácido 3, fosfoglicérico** (APG). La reacción es catalizada por el enzima **ribulosa 1,5 difosfato carboxilasa** (Rubisco), que es el enzima más abundante de la naturaleza.



### 2.- Fase de reducción.

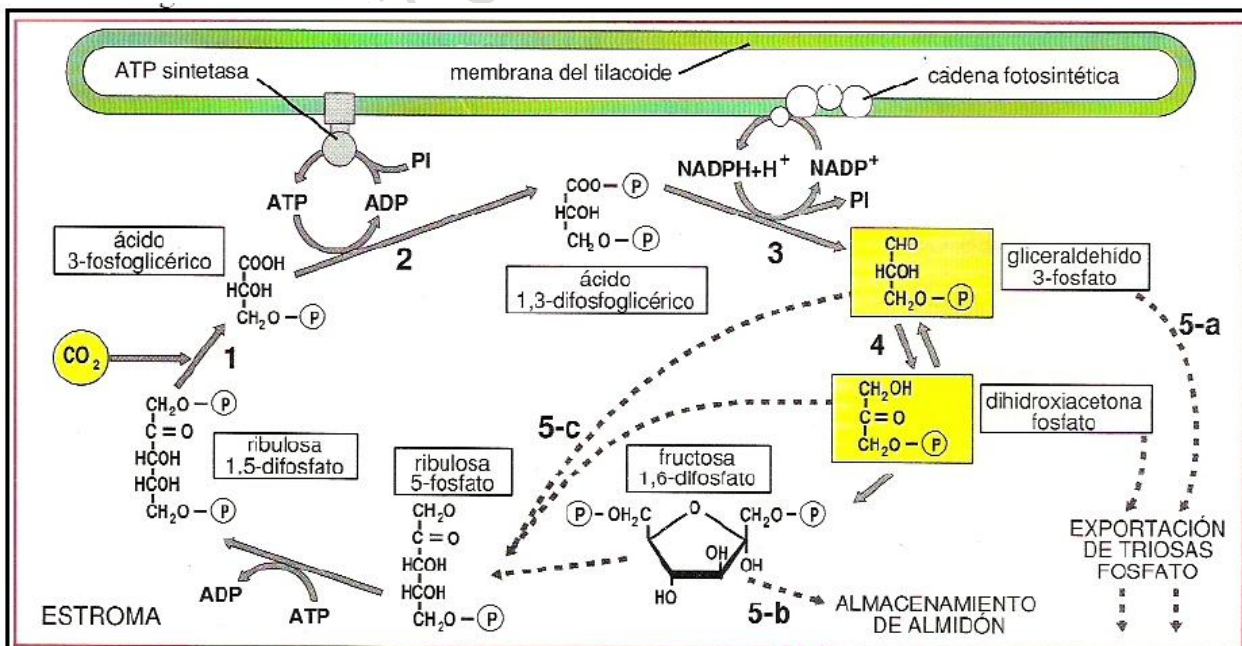
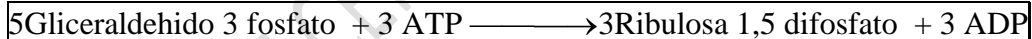
El **ácido 3, fosfoglicérico** es fosforilado y posteriormente reducido a gliceraldehído 3-fosfato. En este proceso se consume **NADPH** y **ATP** fabricadas en la fase luminosa.



### 3.- Fase de regeneración.

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.

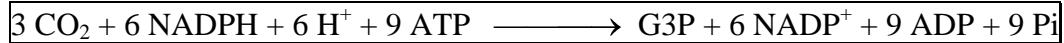
Las otras **cinco moléculas de G3P** se emplean en la **recuperación de las 3 moléculas de ribulosa 1,5 difosfato** utilizadas en la fijación de las tres moléculas de CO<sub>2</sub>; esto se realiza mediante una serie compleja de reacciones en las que se forman compuestos intermedios de 4, 5, 6 y 7 carbonos,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



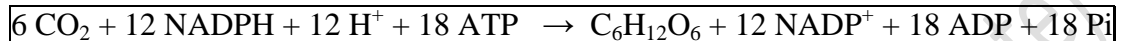
Ciclo de Calvin-Benson.

Figura 17.6

•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:



#### •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**.

#### 2.4.2. 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).

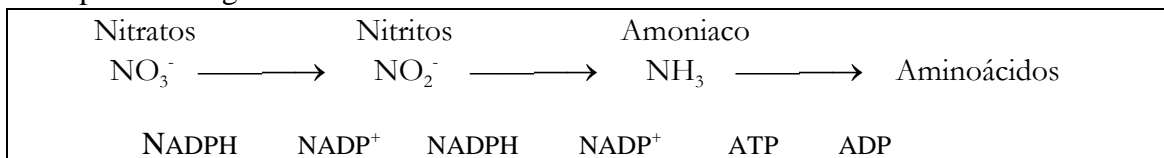
En condiciones naturales, el nitrógeno está a disposición de las plantas en forma de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y el azufre se encuentra como sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Estas formas oxidadas tienen que ser reducidas para su incorporación a las moléculas orgánicas.

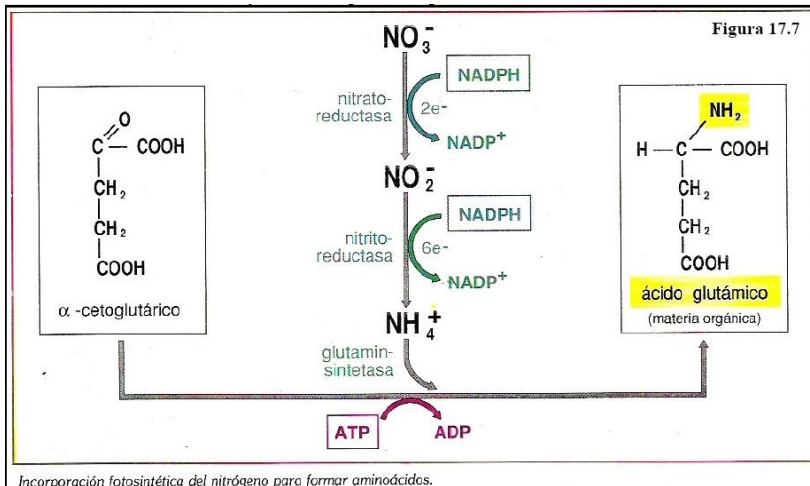
•**La reducción del nitrato en el cloroplasto** se realiza en dos etapas en las que se consumen NADPH y ATP procedentes de la fase luminosa.

-En la primera se produce la **reducción de nitratos a nitritos** con consumo de NADPH.

-En la segunda los **nitritos son reducidos a NH<sub>3</sub>**.

El amoníaco se incorpora a los esqueletos carbonados para formar los aminoácidos, en este proceso se gasta ATP.





●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.

## 2.5. Factores que influyen en la fotosíntesis

El rendimiento de la fotosíntesis o intensidad fotosintética puede medirse en función del  $\text{CO}_2$  absorbido o en función del  $\text{O}_2$  desprendido. Este rendimiento puede verse afectado por distintos factores:

### ●Concentración de $\text{CO}_2$ en el medio.

Si la intensidad luminosa es constante y suficientemente elevada, la actividad fotosintética aumenta al aumentar la concentración de  $\text{CO}_2$  en el medio, hasta llegar a un límite en que se hace constante.

### ●Luz

-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.

-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.

### ●Concentración de $\text{O}_2$ en el medio.

El rendimiento de la fotosíntesis disminuye cuando aumenta la concentración de  $\text{O}_2$  a causa de la fotorrespiración. Es decir el  $\text{O}_2$  tiene efecto inhibitorio debido al proceso de fotorrespiración.

La **fotorrespiración** es el proceso en el que la rubisco en lugar de fijar el  $\text{CO}_2$  en la ribulosa 1,5 difosfato cataliza su oxidación.

### ●Temperatura.

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.

•**Humedad.**

La humedad tanto en el suelo como en el ambiente influye de manera determinante en el rendimiento fotosintético. 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.

**2.6. La fotosíntesis bacteriana o anoxigénica.**

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.

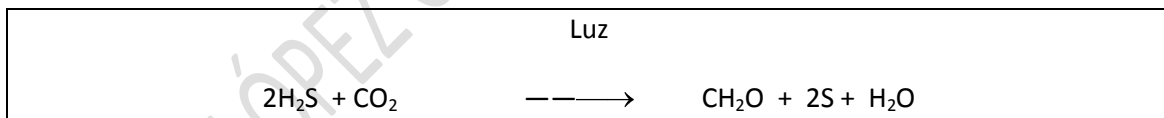
Este proceso por ello se denomina **fotosíntesis anoxigénica**.

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.

**2.7. 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.

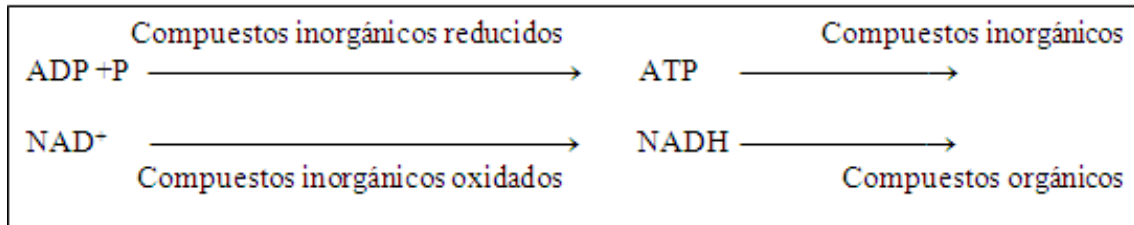
En la quimiosíntesis también se diferencian dos fases como en la fotosíntesis:

- 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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) y obtener compuestos orgánicos.



### Tipos de seres quimiosintéticos.

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

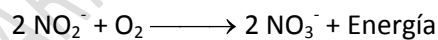
##### -**Bacterias nitrosificantes:**

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



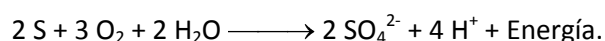
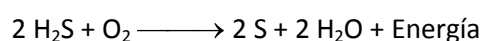
##### -**Bacterias nitrificantes:**

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



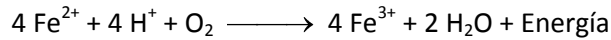
#### •**Bacterias incoloras del azufre**

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 ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ).



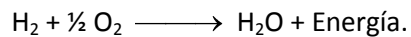
### •Bacterias del hierro o ferrobacterias

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.



## BLOQUE 1.TEST

**En la fase luminosa de la fotosíntesis, el aceptor último de los electrones es el:**

- a) ATP
- b) Dióxido de carbono
- c) NADP
- d) Oxígeno

**¿en qué proceso metabólico obtienen las plantas NADPH?**

- a) En el ciclo de Calvin
- b) En el ciclo de krebs
- c) En la fase oscura
- d) En la fase luminosa

**¿En qué proceso metabólico interviene la enzima RUBISCO?**

- a) En el ciclo de Calvin
- b) En el ciclo de Krebs
- c) En la fotofosforilación
- d) En la transaminación

**Las plantas necesitan dióxido de carbono para**

- a) La cesión de electrones
- b) La respiración
- c) La producción de oxígeno
- d) La regeneración de la ribulosa 1,5 difosfato

**Las plantas necesitan clorofila para...**

- a) La formación de dióxido de carbono
- b) La respiración celular
- c) La producción de oxígeno
- d) La absorción de energía luminosa

**Las plantas liberan oxígeno procedente de:**

- a) La fotólisis del agua

- b) La respiración
- c) De la reducción del dióxido de carbono
- d) De la formación de la ribulosa 1,5 difosfato.

**¿Cuál de los siguientes procesos es propio de la fosforilación cíclica?**

- a) Agua como dadora de electrones
- b) Clorofila como dador de electrones
- c) Presencia de fotosistemas I y II
- d) Se desprende Oxígeno.

**¿En qué estructura de los cloroplastos se localizan los fotosistemas?**

- a) Membrana tilacoidal
- b) Estroma
- c) Espacio tilacoidal
- d) Espacio intermembranoso.

**¿Dónde se localizan los fotosistemas encargados de la captación de la luz para realizar la fotosíntesis?**

- a) Cresta
- b) Membrana interna del cloroplasto
- c) Estroma
- d) Tilacoide

**En relación con la evolución celular ¿qué orgánulo celular procede de endosimbiosis?**

- a) Nucleolo
- b) Reticulo endoplasmático
- c) Cloroplasto
- d) Lisosoma

**El proceso que realizan los organismos fotosintetizadores, con la formación de**

**cofactores reducidos (NADPH) se denomina:**

- a) Fase lumínica cíclica
- b) Fase lumínica no cíclica
- c) Fosforilación oxidativa
- d) Fase oscura o ciclo de Calvin.

**¿Qué compuestos se obtienen en la fase luminosa de la fotosíntesis?**

- a) ATP y NADPH.
- b) ATP y NADH.
- c) Glucosa y ATP.
- d) CO<sub>2</sub> y NADPH.

**El ciclo de Calvin:**

- a) Es la ruta de síntesis de materia inorgánica a partir de orgánica
- b) Corresponde a la fase oscura de la fotosíntesis y tiene lugar en los tilacoides
- c) Corresponde a la fase luminosa de la fotosíntesis y tiene lugar en los tilacoides
- d) Es una ruta anabólica donde se gasta el ATP y el NADPH de la fase luminosa

**El objetivo de la fotosíntesis es**

- a) La respiración de la planta
- b) Obtención de oxígeno
- c) Obtención de agua
- d) La fabricación de compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos

**¿Cómo se denominan los organismos que utilizan compuestos inorgánicos para la obtención de materia orgánica?**

- a) Fotoautótrofos
- b) Fotoheterótrofos
- c) Quimioheterótrofos
- d) Catabólicos

**La fase oscura de la fotosíntesis:**

- a) Se produce en los tilacoides y origina materia orgánica
- b) Se produce en el estroma, originando la fotólisis del agua y liberando O<sub>2</sub>
- c) Ocurre exclusivamente cuando es de noche y en el cloroplasto
- d) Se conoce como ciclo de Calvin y se produce la fijación del CO<sub>2</sub>

**En la fotosíntesis, en la fase luminosa se produce:**

- a) La fotólisis del H<sub>2</sub>O, la cadena de transporte de electrones, la liberación de O<sub>2</sub> y la fosforilación del ADP para formar ATP.
- b) La formación inicial de azúcares de 3 C (fosfogliceraldehído) en el ciclo de Calvin.
- c) La fotólisis del agua, la liberación de O<sub>2</sub> y la formación de glucosa.
- d) La captación de O<sub>2</sub> del aire y la liberación de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>

**La fase luminosa de la fotosíntesis:**

- a) Se llama también Ciclo de Calvin
- b) Es la captación de la energía luminosa en el estroma del cloroplasto
- c) Interviene sólo el fotosistema I
- d) Puede ser cíclica o no cíclica

**El proceso de destrucción de materia orgánica en sustancias sencillas se denomina:**

- a) Fosforilación oxidativa
- b) Catabolismo
- c) Ciclo de Calvin
- d) Anabolismo

10.- La fase oscura de la fotosíntesis se denomina

- a) Fase lumínica.
- b) Ciclo de Krebs.
- c) Ciclo del carbono.
- d) Ciclo de Calvin.

**La fase luminosa de la fotosíntesis se realiza en:**

1. La matriz
2. En los tilacoides
3. En las crestas
4. En el estroma

Los organismos que fabrican su propio alimento se les llama:

- Heterótrofos.
- Consumidores.
- Descomponedores.
- Autótrofos.

**BLOQUE 2.**

**DEFINICIONES.**

Define los siguientes

conceptos con un máximo de 4 renglones:

- Catabolismo
- Anabolismo
- Autótrofo
- Heterótrofo
- Tilacoides
- Fotosistema
- Clorofila
- Organismo quimioautótrofo
- Fotosíntesis

**BLOQUE 3. CUESTIONES CORTAS.** Responda las siguientes cuestiones:

1.- Contesta a estas 4 preguntas:

Explique en qué consiste la fase oscura de la fotosíntesis y dónde tiene lugar dentro del orgánulo correspondiente.

6º. Concepto de fotosíntesis. Explica brevemente las fases de la fotosíntesis y lo que ocurre en cada una de ellas

**Define fotosíntesis. ¿Cuál es la finalidad de cada una de las fases?**

¿Qué es la fotosíntesis? Fases. ¿Dónde se produce cada fase? ¿Qué se produce en cada una de ellas?

2.- Explique brevemente el papel del complejo ATP-sintasa.

3.- Defina anabolismo heterótrofo y anabolismo autótrofo. Ponga un ejemplo de cada tipo.

4. Defina anabolismo y catabolismo. Ponga un ejemplo de un proceso anabólico y de otro catabólico.

5.- Nombre los siguientes procesos (si los conoce) e indique si son catabólicos o anabólicos

a.-  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Glucosa} + \text{O}_2$

b.-  $\text{Glucosa} \rightarrow \text{Ácido láctico} + \text{H}_2\text{O}$

c.-  $\text{Glucosa} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

6. Explique brevemente dónde se produce y en qué consiste la fase oscura de la fotosíntesis Oxigénica

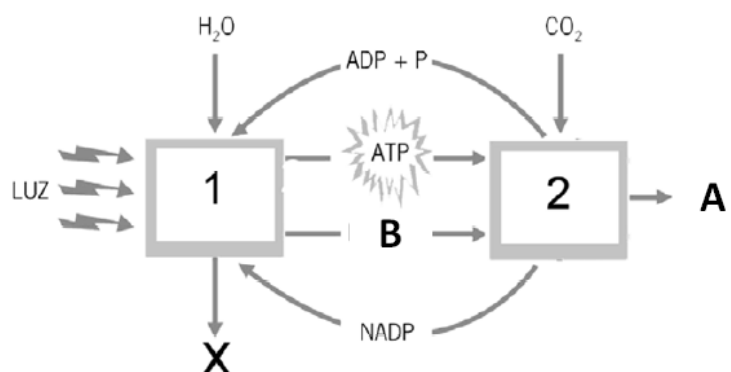
7. Explique brevemente qué es la quimiosíntesis e indique un ejemplo de organismo que la realice.

8. Explique brevemente dónde se produce y en qué consiste la fase luminosa de la fotosíntesis oxigénica.

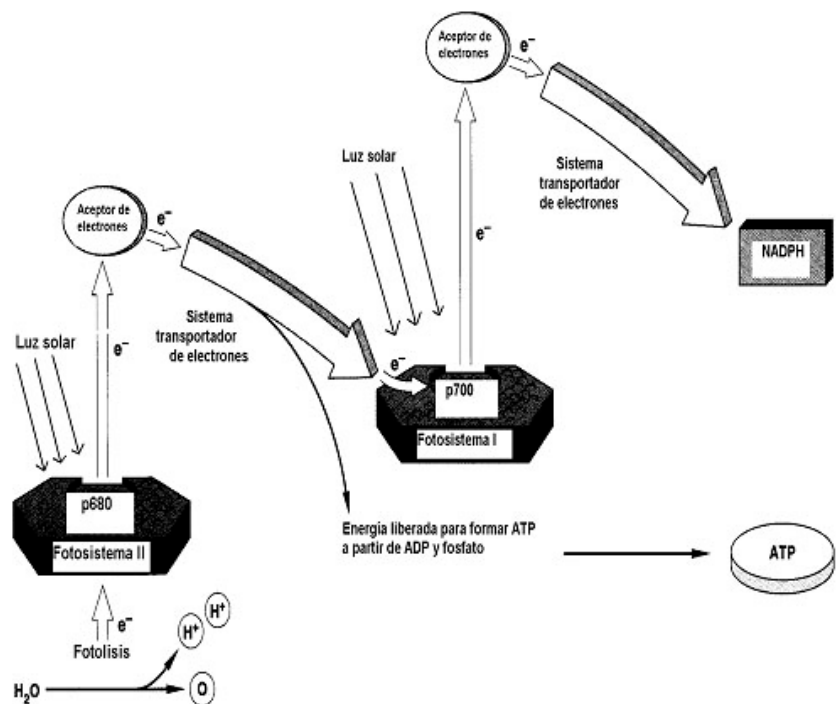
**BLOQUE 4. CUESTIONES SOBRE IMÁGENES.** Responda las siguientes cuestiones:

4.1. Identifique el proceso que representa el siguiente esquema. ¿En qué organismos tiene lugar?

Indique cómo se denominan los procesos 1 y 2 y los productos A, B y X.



4.2. Identifique y explique el proceso metabólico representado en la figura.



4.3 El dibujo esquematiza parte de una ruta metabólica:

1.- ¿Qué proceso metabólico se representa en el esquema? ¿En qué tipo de células se produce?

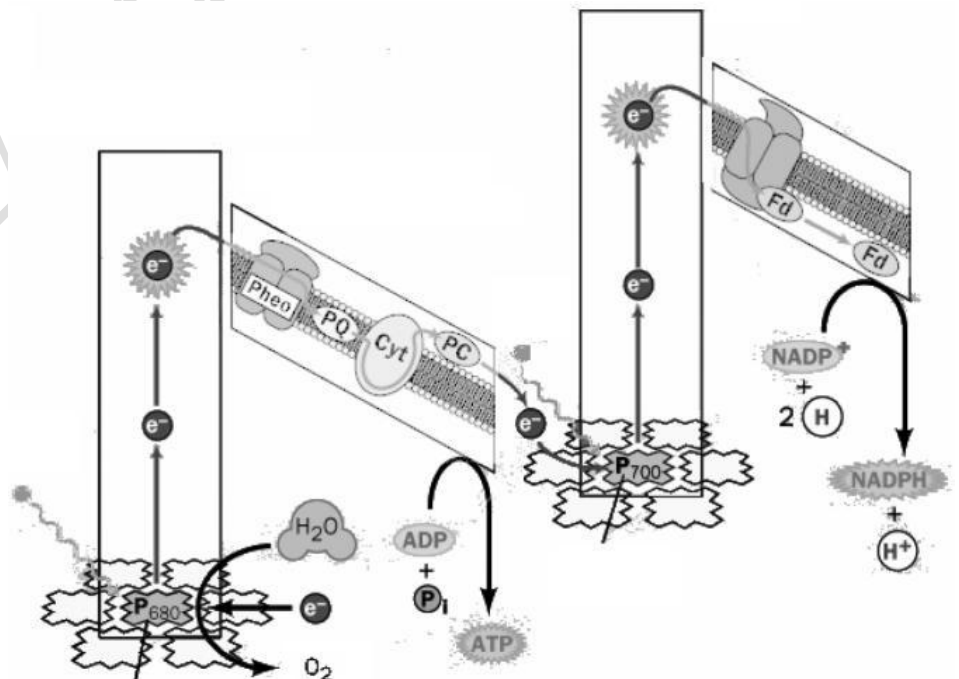
2.- ¿Puede una célula animal realizar este proceso? ¿Por qué?

3.- Indique los orgánulos específicos de una célula vegetal.

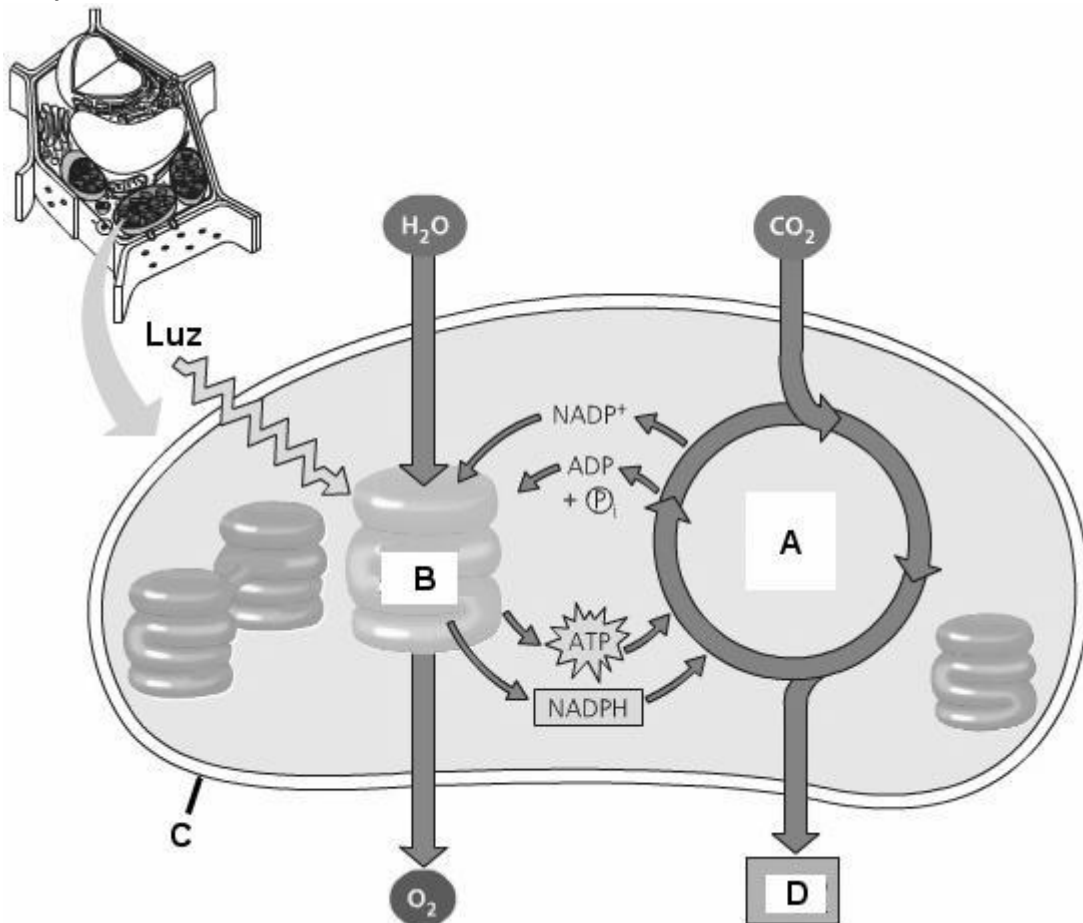
4.- ¿Qué fases tiene la fotosíntesis? ¿Dónde se lleva a cabo cada una de ellas?

5.- Identifique la fase representada en el dibujo y diga la finalidad de la misma.

6.- ¿Qué enzima importante participa en la fase oscura de la fotosíntesis? ¿Cuál es su función? 7.- ¿Qué es el almidón? ¿Cuales son sus constituyentes y en qué tipo de organismos se encuentra?



4.4. Explica el papel del agua y del dióxido de carbono en el proceso que se representa en el dibujo.



4.5. El dibujo esquematiza un orgánulo celular:

- 1.- Nombre los compartimentos señalados con el nº 1, 3, 4, 7 y 8.
- 2.- Mencione las partes de la estructura de este orgánulo asociados con los procesos del Ciclo de Calvin y la fotólisis del agua.
- 3.- Indique tres diferencias entre la fotosíntesis oxigénica y la anoxygenica
- 4.- ¿Qué moléculas forman los fotosistemas? Indique su función.
- 5.- ¿En qué consiste la quimiosíntesis? ¿Qué organismos la realizan?

