



# BIOLOGÍA

**2º BACHILLERATO**

**TEMA 18: Metabolismo III: Anabolismo**

## TEMA 18 METABOLISMO III ANABOLISMO.

### ANABOLISMO

El anabolismo es el conjunto de **procesos bioquímicos** mediante los cuales las células **sintetizan** la mayoría de las sustancias que las constituyen.

Muchas reacciones anabólicas **precisan energía**, que es proporcionada por el ATP obtenido en los procesos catabólicos. Por otra parte, muchas de las reacciones anabólicas son **reacciones de reducción** acopladas a las **de oxidación del NADH y NADPH formados en las reacciones catabólicas**.

Se pueden diferenciar dos grandes grupos de procesos anabólicos:

1. Síntesis de moléculas orgánicas a partir de inorgánicas: FOTOSÍNTESIS Y QUIMIOSÍNTESIS
2. Síntesis de moléculas orgánicas a partir de otras orgánicas: BIOSÍNTESIS DE BIOMOLÉCULAS

### FOTOSÍNTESIS.

Es un proceso mediante el cual algunos organismos son capaces de **transformar la energía de la luz solar** en energía química (**ATP**) y utilizarla para **sintetizar compuestos orgánicos a partir de moléculas inorgánicas**.

Los vegetales, algas y cianobacterias realizan la **fotosíntesis oxigénica**, en la que se libera oxígeno como producto final. El resto de bacterias fotosintéticas realizan la fotosíntesis **anoxigénica** ya que no produce oxígeno.

En vegetales y algas, la fotosíntesis tiene lugar en los **cloroplastos** donde se encuentran los **pigmentos fotosintéticos** y comprende dos etapas que se realizan en zonas distintas de los cloroplastos

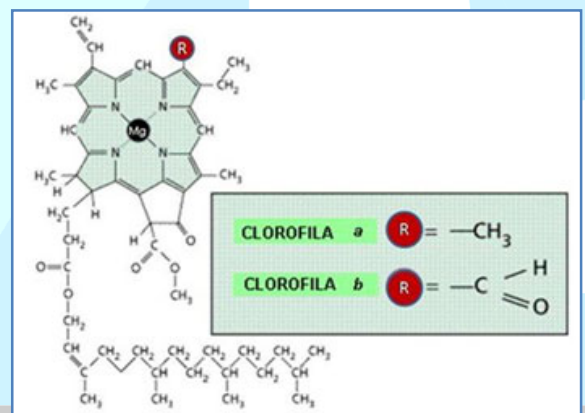
1. **Fase lumínica.** Se capta la luz solar por medio de estos pigmentos y se produce **oxígeno, energía química en forma de ATP y coenzimas reducidas (NADPH)**.
2. **Fase oscura.** Se **fija CO<sub>2</sub> atmosférico** y se convierte **en materia orgánica**. Es una fase en la que no es necesaria la luz, pero se realiza tanto con luz como sin ella.

### 1 FASE LUMÍNICA DE LA FOTOSÍNTESIS.

#### 1.1. CAPTACIÓN DE ENERGÍA LUMÍNICA

La captación de energía lumínica se realiza en las membranas de los **tilacoides** de los **cloroplastos**, por pigmentos fotosensibles de dos clases:

- **Clorofilas:** Son moléculas que contienen un anillo tetrapirrólico en cuyo interior se encuentra un átomo de magnesio y una cadena lateral del diterpeno fitol. Las clorofilas más abundantes son la clorofila a y la clorofila b.
- **Carotenoides** Son pigmentos accesorios de naturaleza isoprenoide (lípidos). Los más importantes son el  $\beta$ -caroteno y la xantofila.

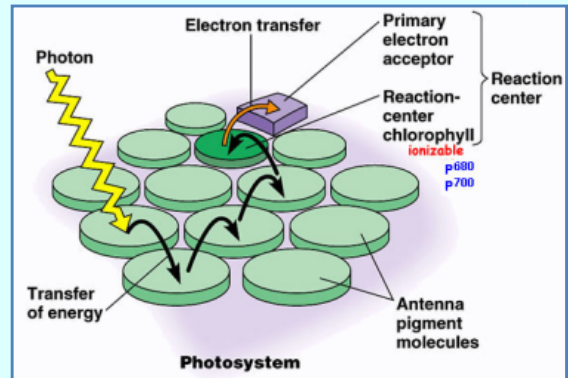


**Fotosistemas.**

Los **pigmentos fotosintéticos** asociados a **proteínas** de membrana forman los **fotosistemas**, constituidos por dos partes:

- **El complejo antena.** Formado por varios cientos de moléculas de pigmentos, principalmente clorofilas, que actúan captando los fotones.
- **El centro de reacción.** Constituido por una clorofila diana, un aceptor primario de electrones y un dador primario de electrones.

Cuando la energía de un **fotón** excita a una molécula de pigmento del complejo antena, esta energía se transfiere a las moléculas de clorofila vecinas hasta alcanzar la clorofila diana, que queda oxidada por pérdida de electrones que son transferidos a un **aceptor primario** de electrones. La clorofila diana recupera su estado reducido captando electrones proceden de dador primario de electrones.



Existen dos fotosistemas:

• **Fotosistema I (P700):** La clorofila diana es un dímero de clorofila a I cuya máxima excitación se consigue al absorber luz a 700 nm de longitud de onda. El aceptor primario es una clorofila que transfiere los electrones a una **quinona**. El dador de electrones es la **plastocianina**. La antena está constituida por clorofilas a, b y carotenos.

• **Fotosistema II (P680):** La clorofila diana es un dímero de clorofila a II cuya máxima excitación se consigue al absorber luz a 680 nm. El aceptor primario es la **feofitina** que transfiere los electrones a los aceptores **QA** y **QB** que son **plastoquinonas**. El dador primario se denomina YZ y transfiere los electrones procedentes de la **fotólisis** del **agua**. La antena está constituida por clorofilas a, b y xantofilas.

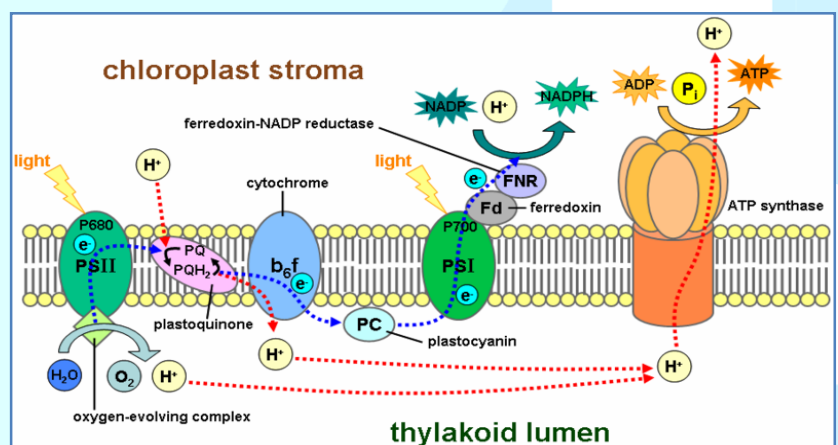
**1.2. TRANSPORTE DE ELECTRONES Y FOTOFOSFORILACIÓN.**

Los electrones excitados por la luz son transportados en una cadena de moléculas situadas en las membranas de los tilacoides en procesos de oxidación y reducción.

Las plantas y cianobacterias poseen los dos fotosistemas (PSI y PSII) y el transporte de electrones puede ocurrir de dos maneras:

a) **Flujo abierto de electrones. Fotofosforilación no cíclica.**

Intervienen los dos fotosistemas (PSI) y (PSII), el agua actúa como dadora inicial de electrones y el NADP actúa como aceptor final de estos.



El transporte de estos electrones se produce en resumen de la siguiente forma:

1. Las moléculas de **clorofila a** (P680) del PSII, excitadas por los fotones de la luz, se oxidan y emiten **electrones**. Las clorofilas oxidadas recuperan los electrones procedentes de los donadores primarios que a su vez los captan de la oxidación del agua. Esta oxidación de las moléculas de agua por la acción de la luz se denomina **fotólisis del agua** y es un proceso que origina protones y electrones y libera oxígeno, lo que los procesos fotosintéticos en los que se produce se denominan también **fotosíntesis oxigénica**



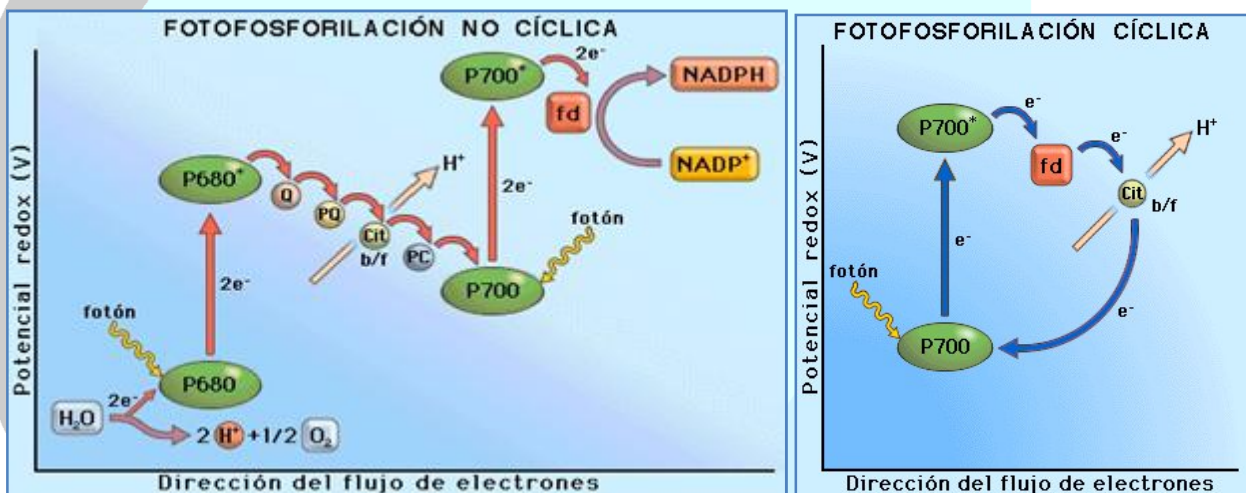
2. Los electrones emitidos por el PSII son captados por el aceptor primario que los pasa a una cadena transportadora hasta el PSI donde reducen la molécula de clorofila al P700 que se encuentra oxidada por acción de la luz y que ha cedido electrones.
3. Los electrones emitidos por P700 son captados por otro aceptor, que mediante otra cadena transportadora los llevarán hasta el NADP reduciéndolo a NADPH.
4. La **energía liberada** en el transporte de electrones desde el PSII al PSI se emplea para bombear **H<sup>+</sup>** del **estroma la interior del tilacoide** y crear así un **gradiente** electroquímico capaz de generar una fuerza protonmotriz, que sirve para que los sistemas **ATP sintetasa** localizados en la membrana tilacoidal **sinteticen ATP**. Este proceso es similar al que vimos en la fosforilación oxidativa que se produce en las mitocondrias.

**En resumen, en este proceso se producen ATP, NADPH y se libera oxígeno.**

**b) Flujo cerrado de electrones. Fotofosforilación cíclica.**

Bajo determinadas condiciones y cuando las plantas requieren un aporte mayor de ATP que de NADPH, se produce un flujo cíclico en el que solo participa el PSI.

En este proceso, los electrones de la clorofila P700 del PSI, excitados por la luz, son cedidos a un aceptor que los transporta por una cadena de nuevo al PSI. De esta manera se **forma ATP pero no se forma NADPH**.



Este tipo de transporte y fotofosforilación es característico también de las **bacterias fotosintéticas**, ya que solo tienen un tipo de fotosistema, formado por una clase especial de clorofilas, que reciben el nombre de **bacterioclorofilas**.

Por otro lado, el poder reductor en forma de NADH lo obtienen a partir de **dadores de electrones** que **no** son el **agua**. Así, las **sulfobacterias** purpúreas utilizan **H<sub>2</sub>S** o las **bacterias verdes** no sulfúreas utilizan **moléculas orgánicas**.

En todos estos casos, al no utilizar agua no se desprende oxígeno y al proceso se le denomina **fotosíntesis anoxigénica**.

De cualquier forma, en estas bacterias se producen moléculas reductoras de NADPH, que al igual que las producidas en la fotosíntesis oxigénica se emplean en la síntesis de ATP y reducción de materia inorgánica.

## 2 FASE OSCURA DE LA FOTOSÍNTESIS

Durante la fase oscura el **NADPH y el ATP** producidos durante la fase lumínica son utilizados en el estroma para la **síntesis de moléculas orgánicas** por reducción de moléculas o iones inorgánicos como el **anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>)**, el **nitrato** o el **sulfato**.

### 2.1. REDUCCIÓN FOTOSINTÉTICA DEL ANHÍDRIDO CARBÓNICO: CICLO DE CALVIN

El **ciclo de Calvin** o ciclo reductor de las pentosas permite a las plantas **incorporar** el **carbono** inorgánico del CO<sub>2</sub> a una **molécula orgánica** en un proceso metabólico que ocurre en el **estroma de los cloroplastos** y que comprende tres fases.

#### 1. Fijación del CO<sub>2</sub> : Carboxilación

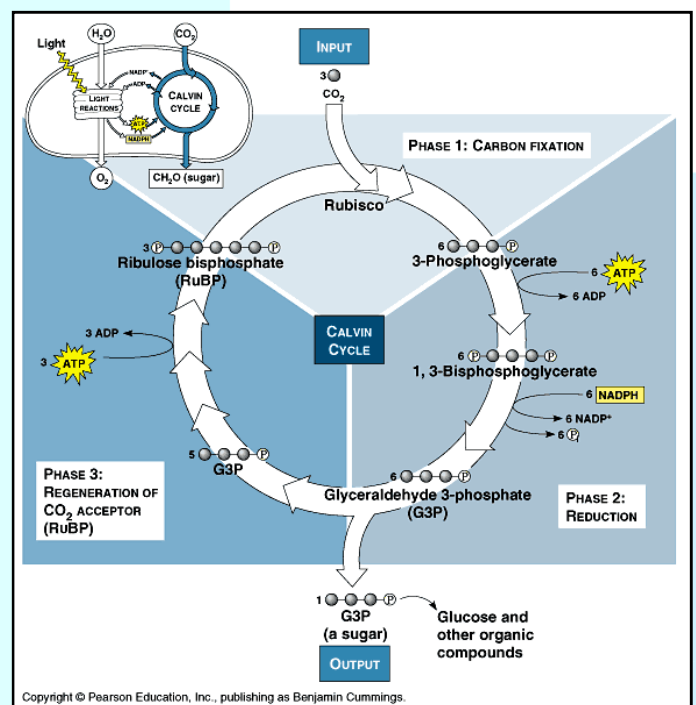
Los trabajos de Calvin, Basshan y Benson realizados entre 1946 y 1953, demostraron que el CO<sub>2</sub> es incorporado por fijación sobre la pentosa C<sub>5</sub>, ribulosa 1,5-bifosfato (RuBP), dando un compuesto intermediario C<sub>6</sub> muy inestable, el cual se escinde en dos moléculas de ácido 3-fosfoglicérico (PGA).

Ambas reacciones, fijación y escisión, son catalizadas por la enzima ribulosa-1,5-difosfato (Rubisco) que se encuentra en el estroma en grandes cantidades lo que teniendo en cuenta la masa de vegetal existente, hace que esta sea la enzima más abundante del planeta.

#### 2. Reducción del carbono incorporado

En el estroma las moléculas de PGA son fosforiladas y reducidas mediante dos reacciones consecutivas de fosforilación y oxido-reducción, que emplean la misma cantidad de ATP y NADPH. Se producen así moléculas de gliceraldehído 3-fosfato, que pueden seguir varios caminos:

- Parte son exportadas al citoplasma, donde sirven para la síntesis de hexosas (glucosa) en una ruta inversa a la glucolisis denominada gluconeogénesis y almidón. La glucosa formada se almacena en forma de almidón.
- Parte interviene en diversa rutas metabólicas como la glucolisis para la obtención de energía o la síntesis de triglicéridos.
- Parte es utilizada en el estroma para regenerar la ribulosas-1,5-difosfato y cerrar el ciclo de Calvin



### 3. Regeneración de la ribulosa-1,5-difosfato.

Una parte del gliceraldehído 3-fosfato (C3) se transforma en ribulosa-1,5-difosfato (C5), mediante un conjunto de complejas reacciones en las que intervienen triosas, tetrasas, pentosas, hexosas y heptosas que intercambian fragmentos de dos o tres átomos de carbono mediante diversa reacciones, la última de las cuales es una fosforilación que requiere ATP y que esta catalizada por la fosforribulosoquinasa

#### ESTEQUIOMETRIA DEL CICLO DE CALVIN

Tal y como podemos ver la fijación de 3 CO<sub>2</sub> requieren 9 ATP y 6 NADPH para dar una molécula de gliceraldehído 3-fosfato (C3). Por tanto para la **síntesis de una molécula de glucosa** (C6) harán falta el doble, es decir **18 ATP y 12 NADPH**.

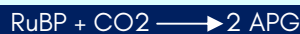
#### BALANCE DE LA FOTOSÍNTESIS DE UNA MOLÉCULA DE GLUCOSA

	FASE LUMINICA	
Fotólisis del agua	$12 \text{ H}_2\text{O} \text{ ----} 6 \text{ O}_2 + 24 \text{ H}^+ + 24 \text{ e}^-$	MEMBRANA DEL TILACOIDE
Reducción del NADP <sup>+</sup>	$12 \text{ NADP}^+ + 12 \text{ H}^+ + 24 \text{ e}^- \text{ ----} 12 \text{ NADPH}$	
<b>BALANCE</b>	$12 \text{ H}_2\text{O} + 12 \text{ NADP}^+ \text{ ----} 6 \text{ O}_2 + 24 \text{ H}^+ + 12 \text{ NADPH}$	
Fotofosforilación	$12 \text{ ADP} + 12 \text{ Pi} \text{ ----} 12 \text{ ATP} + 12 \text{ H}_2\text{O}$	
	FASE OSCURA	
Oxidación del NADPH	$12 \text{ NADPH} + 12 \text{ H}^+ + 6 \text{ CO}_2 \text{ ----} (\text{CH}_2\text{O})_6 + 12 \text{ NADP}^+ + 6 \text{ H}_2\text{O}$	ESTROMA
Consumo de ATP	$18 \text{ ATP} + 18 \text{ H}_2\text{O} \text{ ----} 18 \text{ ADP} + 18 \text{ Pi}$	
ECUACIÓN GLOBAL		
$6 \text{ CO}_2 + 12 \text{ H}_2\text{O} \text{ ----LUZ----} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ O}_2$		

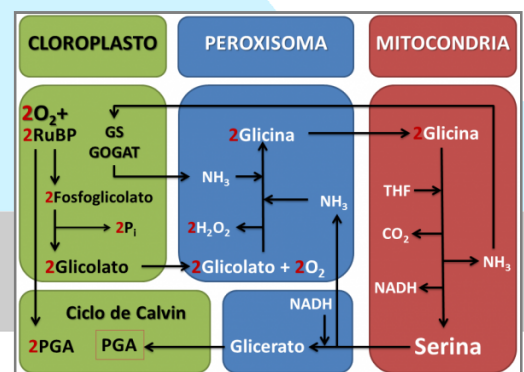
### 3 FOTORRESPIRACIÓN

La enzima **Rubisco** es bifuncional, actuando como **carboxilasa** o como **oxidasa** cuando según las **concentraciones de oxígeno y CO<sub>2</sub>** en el estroma de los cloroplastos.

· Cuando la concentración de CO<sub>2</sub> es alta y la de oxígeno baja, actúa como **carboxilasa** fija una molécula de **CO<sub>2</sub>** en la ribulosa 1,5-difosfato para dar dos moléculas de APG, tal y como hemos visto anteriormente.



· Cuando la concentración de CO<sub>2</sub> es baja y la de oxígeno alta, actúa como **oxidasa**, en cuyo caso no fija CO<sub>2</sub> y la ribulosa 1,5-difosfato se oxida produciendo una molécula de **APG**, que sigue el ciclo de Calvin, y una molécula de ácido fosfoglicólico que se convierte en ácido glicólico y que es transportado a los peroxisomas donde se transforma en glicina y que en las mitocondrias se convierte en serina liberando **CO<sub>2</sub>**. Debido a que es un proceso que consume oxígeno y está asociado a la fotosíntesis, se denomina **fotorrespiración**.



La fotorrespiración supone una **pérdida de eficacia** en la fijación fotosintética del  $\text{CO}_2$  durante el ciclo de Calvin, siendo un **problema grave** cuando las plantas están sometidas a **elevadas temperaturas y sequedad**, pues en estas condiciones la planta **cierra sus estomas** dificultando la entrada de  $\text{CO}_2$  y la salida de  $\text{O}_2$ , lo cual favorece la **fotorrespiración**.

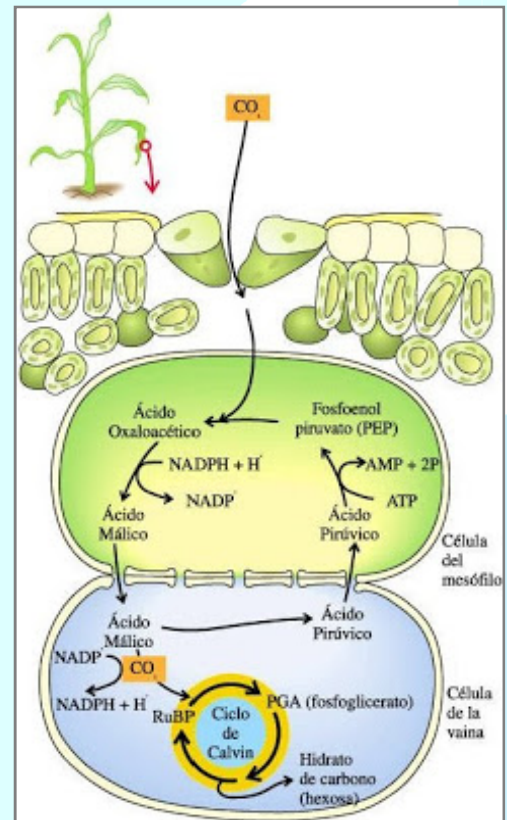
Algunos géneros de plantas que viven en **climas cálidos** han adaptado su metabolismo fotosintético con el fin de **evitar la fotorrespiración**. A este grupo de plantas se les denomina **plantas C4** debido a que el  $\text{CO}_2$  se fija previamente sobre una molécula de tres carbonos para dar una molécula de 4 carbonos, a diferencia de la gran mayoría de las plantas que como hemos visto fija el  $\text{CO}_2$  sobre una molécula de cinco carbonos para dar dos moléculas de 3 carbonos (C3), razón por la que se las llama **plantas C3**.

En las plantas **C4** apenas se produce fotorrespiración. Esto es posible gracias a la estructura anatómica de las hojas de estas plantas. Las **células fotosintéticas** se distribuyen en dos capas concéntricas alrededor de los vasos transportadores de savia. En la corona externa, las células del **mesófilo** realizan la fijación del  $\text{CO}_2$  sobre para dar moléculas de 4 carbonos, mientras que en la corona interna, las células de la vaina **perivascular** donde se realiza el **ciclo de Calvin**. Las interrelaciones entre ambas coronas se conocen como ciclo de Hatch-Slack.

### Ciclo de Hatch-Slack

En las células del **mesófilo**, el  $\text{CO}_2$  se fija sobre el ácido fosfoenolpirúvico (C3) para dar **ácido oxalacético** (C4). La enzima que cataliza esta reacción es una carboxilasa con más afinidad por el  $\text{CO}_2$  que la Rubisco. El ácido oxalacético se transforma en ácido málico, que es transportado a las células de la vaina, donde sufren descarboxilación para dar por un lado ácido pirúvico (C3) que es devuelto a las células del mesófilo para cerrar el ciclo y por otro lado  $\text{CO}_2$  que se incorpora en el ciclo de **Calvin**.

Por tanto, podemos considerar que este ciclo sirve como **lanzadera de  $\text{CO}_2$**  hacia las células de la vaina con el fin de que la  $[\text{CO}_2]$  sea mucho mayor que la  $[\text{O}_2]$  y así la Rubisco actúe como carboxilasa y no como oxidasa **evitando la fotorrespiración**.



## 4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FOTOSÍNTESIS

**a) Intensidad luminosa:** La actividad fotosintética aumenta con la intensidad, hasta un límite que depende de la especie vegetal. Así, hay especies de penumbra y especies fotófilas. En general las plantas C4 presentan mayor rendimiento fotosintético para una misma intensidad luminosa que las plantas C3.

**b) Longitud de onda:** Las plantas precisan luz roja cuya longitud de onda sea superior a 680 nm, y luz azul de longitud de onda inferior a 680. Cuando sólo se ilumina con luz roja solo funciona el fotosistema I, lo cual desencadena el transporte cíclico de electrones y por tanto el rendimiento fotosintético disminuye. Esto se conoce como declive del rojo y se produce al atardecer.

**c) Fotoperiodo:** El rendimiento fotosintético está relacionado con el tiempo de luz y el tiempo de oscuridad. En general a mayor cantidad de luz mayor rendimiento fotosintético. Sin embargo, aunque las fases luminosa y oscura ocurren simultáneamente, son conveniente periodos de oscuridad en los que la planta regenera el NADP reducido durante la fase luminosa.

**d) Temperatura:** Dentro del intervalo de temperatura al que cada especie está adaptada a vivir, existe una temperatura óptima a la cual las enzimas funcionan a pleno rendimiento.

**d) Humedad ambiental:** La humedad ambiental condiciona la apertura y cierre de los estomas. Si el ambiente es seco se cierran si es húmedo se abren. Esto afecta a las plantas C3, pues el cierre de los estomas produce un incremento de la fotorrespiración.

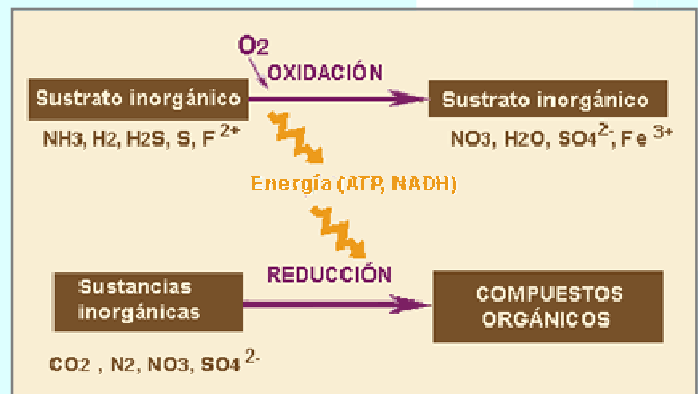
**e) Concentración de O2:** Cuando aumenta la concentración de oxígeno, se incrementa la fotorrespiración y por tanto disminuye el rendimiento fotosintético.

**d) Concentración de CO2:** En este caso ocurre lo contrario. Sin embargo, hay un concentración máxima de CO2 por encima de la cual no se incrementa el rendimiento fotosintético, debido a la saturación del enzima Rubisco. (Saturación por sustrato)

## QUIMIOSÍNTESIS

La quimiosíntesis consiste en la **síntesis de ATP** a partir de la energía que se libera en reacciones de **oxidación** de **compuestos inorgánicos** reducidos. Los organismos que realizan quimiosíntesis se denominan **quimoautótrofos, quimiolitótrofos o quimiosintéticos**; todos ellos son bacterias que usan como fuente de carbono el **dióxido de carbono** en un proceso similar al ciclo de Calvin de las plantas.

En la quimiosíntesis podemos distinguir dos fases: En la primera fase se obtiene ATP y NADH por oxidación de sustratos inorgánicos y en la segunda fase se emplea esta energía y el poder reductor para sintetizar compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas.



Según los compuesto inorgánicos, las principales reacciones quimiosintéticas son:

**a) Nitrificación:** Consiste en la oxidación del amoníaco para dar nitratos. Esta reacción ocurre en dos fases realizadas por distinto grupo de bacterias muy importantes en el ciclo del nitrógeno:

- **Bacterias Nitrosomonas.** Transforman amoníaco en forma de ion amonio en nitritos.



- **Bacterias Nitrobacter.** Transforman nitritos en nitratos.



**b) Bacterias del azufre.** Oxidan el azufre o compuestos de azufre reducidos (sulfuros) y los transforman en sulfatos. Se encuentran las minas de pirita.



**c) Bacterias del hierro:** Oxidan compuestos ferrosos (Fe2+) a férricos (Fe3+). Sus hábitat son las zonas mineras donde hay ion ferroso.



**d) Bacterias del hidrógeno:** Oxidan el hidrógeno molecular para producir agua.





## BIOSÍNTESIS DE BIOMOLÉCULAS

### 1. BIOSÍNTESIS DE GLÚCIDOS.

#### 1.1. BIOSÍNTESIS DE GLUCOSA: GLUCONEOGÉNESIS.

Consiste en la **síntesis de glucosa** a partir de **ácido pirúvico**, proveniente de la **glucolisis**, del **catabolismo de algunos aminoácidos** o de la **fermentación del láctico**. El **pirúvico** en el interior de la **mitocondria** se transforma en **ácido málico** que es exportado de nuevo al **citoplasma** donde se transforma en **fosfoenol piruvato** el cual se transforma en **glucosa** mediante una serie de **reacciones inversas a la glucolisis**.

Básicamente la **gluconeogénesis es el proceso contrario a la glucolisis**, si bien ambas rutas están catalizadas por diferentes sistemas enzimáticos lo que permite una regulación independiente de ambos procesos. La síntesis de una molécula de glucosa requiere **6 moléculas de ATP** por lo que es un proceso energéticamente caro para la célula.

#### 1.2. SÍNTESIS DE POLISACÁRIDOS.

La biosíntesis de almidón y celulosa en los vegetales y la del glucógeno en animales (glucogenogénesis) son procesos semejantes de **polimerización de glucosa**, que previamente debe ser activada mediante la unión a nucleósidos fosforilados, generalmente UTP para dar UDP-glucosa.

### 2. BIOSÍNTESIS DE LÍPIDOS

#### 2.1. BIOSÍNTESIS DE ÁCIDOS GRASOS.

Se produce el hialoplasma a partir de acetil-CoA, que es un metabolito de origen mitocondrial procedente de la descarboxilación oxidativa del piruvato y del catabolismo de algunos aminoácidos.

El acetil-CoA se transforma en malonil-CoA, mediante una reacción de carboxilación catalizada por el enzima acetil-CoA carboxilasa que usa biotina como coenzima.

La síntesis de un ácido graso ocurre por sucesivas incorporaciones de moléculas de malonil-CoA, siguiendo un proceso inverso a la  $\beta$ -oxidación.

#### 2.2. BIOSÍNTESIS DE TRIGLICÉRIDOS Y FOSFOLÍPIDOS.

A partir del glicerol-3-fosfato obtenido en la glucolisis o en el catabolismo de lípidos, se va a formar ácido fosfatídico por esterificación de dos ácidos grasos activados en forma de acil-CoA. A partir del ácido fosfatídico se pueden sintetizar fosfolípidos y triglicéridos.

### 3. BIOSÍNTESI DE AMINOÁCIDOS

Cada aminoácido posee su propio proceso de Biosíntesis, pero en todos ellos podemos distinguir dos procesos diferentes: la síntesis del esqueleto carbonado y el origen del grupo amino.

- **Síntesis del esqueleto carbonado:** Se realiza a partir de precursores sencillos procedentes de la glucolisis y del ciclo de Krebs (ácido pirúvico, ácido  $\alpha$ -cetoglutárico, acetil-CoA, etc.). Solo los organismos autótrofos pueden sintetizar los veinte aminoácidos, los heterótrofos sintetizan un número limitado de aminoácidos dependiendo por tanto de la ingestión en la dieta de los otros que por esta razón se conocen como aminoácidos esenciales. En el hombre son ocho los aminoácidos esenciales: treonina, metionina, lisina, valina, triptófano, leucina, isoleucina y fenilalanina.

- **Origen del grupo amino:** Algunas bacterias son capaces de fijar el N atmosférico para formar compuestos nitrogenados. Las plantas solo pueden fijar el N en forma de nitratos que abundan en el suelo como consecuencia de la acción de bacterias nitrificantes que transforman el amoníaco de excrementos y cadáveres en

nitritos y posteriormente en nitratos. Los animales obtienen el grupo amino gracias al aporte proteico que contienen los alimentos.

Los aminoácidos son imprescindibles para la biosíntesis de proteínas, pero cumplen otras importantes funciones: neurotransmisores, coenzimas, antibióticos, hormonas, pigmentos. También actúan como precursores de las bases púricas y pirimidínicas necesarias para la síntesis de nucleótidos.