

## El catabolismo de los glúcidos

Los diversos polisacáridos y disacáridos son hidrolizados a monosacáridos en el tubo digestivo, en el tejido muscular o en las reservas de almidón vegetales y, generalmente, el último producto es la glucosa. Para la degradación por respiración de la glucosa se dan varias fases.

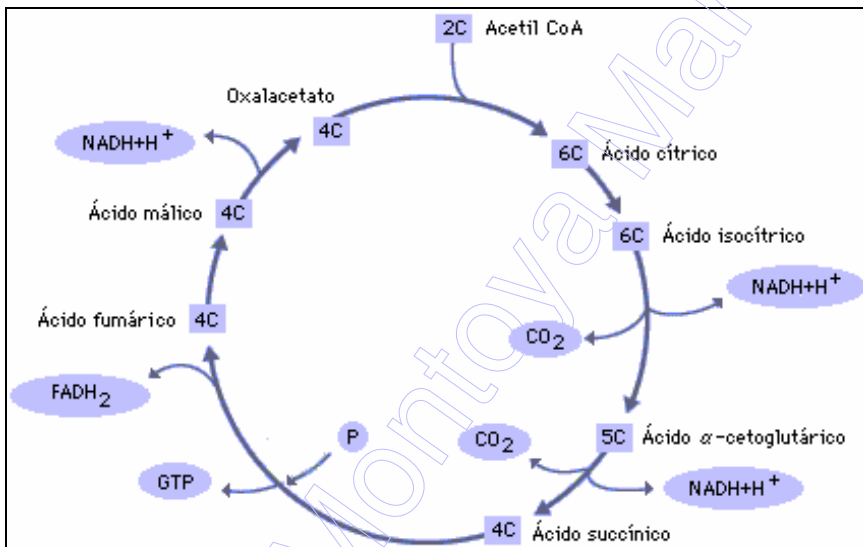
### La glucólisis

La glucólisis es una fase anaerobia y se da en el citoplasma celular. En la primera etapa la glucosa se fosforila y se isomeriza consumiendo 2 ATP y generando dos compuestos de 3C. En la segunda etapa estos compuestos se oxidan, se isomerizan y se desfosforilan en varios pasos generando 2 ATP y 1 NADH cada uno y produciendo al final dos moléculas de ácido pirúvico.

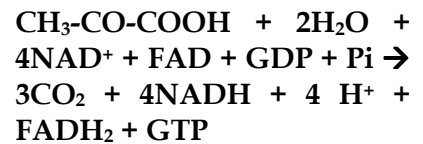
### La respiración

Es un proceso por el que, a partir de las sustancias producidas en la glucólisis, se obtiene energía en forma de ATP (siempre hablando del catabolismo de los glúcidos). Se da en las mitocondrias, y el aceptor final de electrones, es decir, el compuesto que se reduce, es el oxígeno, que se transforma en agua. Comprende tres fases :

- En el sistema **piruvato deshidrogenasa** el ácido pirúvico (3C) se oxida y descarboxila para poder entrar en la matriz mitocondrial con la intervención de varias enzimas, y se transforma en **acetil-S-CoA** (2C), desprendiéndose un **NADH + H<sup>+</sup>** y un **CO<sub>2</sub>**.
- Ya en la matriz se da el **ciclo de Krebs**, en el que el acetil-S-CoA (2C) se incorpora al ciclo uniéndose al ácido oxalacético (4C) y dando ácido cítrico (6C). En este ciclo intervienen muchas moléculas (H<sub>2</sub>O, CoA-SH, NAD<sup>+</sup>, GDP y FAD) y el ácido cítrico va sufriendo isomerizaciones, descarboxilaciones y oxidaciones transformándose en otros ácidos (isocítrico → α-cetoglutárico → succinil CoA → succínico → fumárico → málico → oxalacético) y desprendiéndose **2CO<sub>2</sub>**, **3 NADH + H<sup>+</sup>**, **1GTP** y **1FADH<sub>2</sub>**.



**Reacción global del sistema piruvato deshidrogenasa y del ciclo de Krebs :**



Para la degradación total de una molécula de glucosa son necesarias dos vueltas en el ciclo de Krebs.

- El **transporte de electrones en la cadena respiratoria** se da en las crestas mitocondriales. En la glucólisis y el ciclo de Krebs sólo se han obtenido 4ATP, pero también se han obtenido 10(NADH + H<sup>+</sup>) y 2 FADH<sub>2</sub>, que serán oxidadas por complejos enzimáticos (cadena transportadora de electrones o cadena respiratoria) para obtener ATP.

El **NADH + H<sup>+</sup>** cede sus protones y electrones al **complejo NADH deshidrogenasa**, éste los cede a la **coenzima Q**, que cede los electrones al **citocromo b** y los electrones van pasando a los **citocromos c<sub>1</sub>, a y a<sub>3</sub>**. Finalmente el citocromo a<sub>3</sub> cede los electrones al **oxígeno** para formar agua con dos protones.

En cada paso de los electrones de un complejo a otro se desprende energía (**fosforilación oxidativa**) que, según la **hipótesis quimiosmótica** de Mitchell, es empleada en **bombear protones** (H<sup>+</sup>) desde la matriz hasta el espacio intermembranal, en el que se establece un gradiente electroquímico que produce que los protones vuelvan a la matriz, lo que sólo pueden hacer a través de los complejos enzimáticos **ATP sintetasas**. Este flujo de protones suministra

energía para sintetizar ATP. El  $\text{FADH}_2$  se incorpora a la cadena en el complejo **coenzima Q**. A partir de un  $\text{NADH} + \text{H}^+$  se obtienen **tres ATP** y a partir de un  $\text{FADH}_2$  se obtienen **dos ATP**.

Rendimiento energético de la oxidación completa de una molécula de glucosa :

Glucólisis	glucosa $\rightarrow$ 2 ácido pirúvico + <u>2 ATP</u> + 2 ( $\text{NADH} + \text{H}^+$ )	2 ATP
Ciclo de Krebs	2 ácido pirúvico $\rightarrow$ 8 ( $\text{NADH} + \text{H}^+$ ) + 2 $\text{FADH}_2$ + 2 GTP	2 ATP
Cadena respiratoria	10 ( $\text{NADH} + \text{H}^+$ ) + 2 $\text{FADH}_2 \rightarrow$ <u>30 ATP</u> + <u>4 ATP</u>	34 ATP
		38 ATP

## Las fermentaciones

Proceso catabólico en el que el aceptor final de electrones y protones es una **molécula orgánica**, por lo que es un **proceso anaeróbico**. Sólo hay **síntesis de ATP a nivel de sustrato**, por lo que se obtiene baja rentabilidad energética. Las coenzimas reducidas ( $\text{NADH} + \text{H}^+$ ) no se pueden oxidar en la cadena respiratoria, por lo que se consumen oxidando compuestos inorgánicos sin obtener energía.

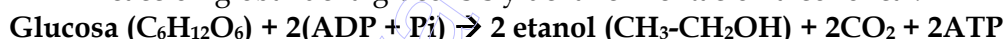
Las fermentaciones se dan en microorganismos (levaduras y bacterias) y ocasionalmente en el tejido muscular animal.

### • La fermentación alcohólica

Es la transformación de ácido pirúvico en **etanol** y **dióxido de carbono**. Cuando las levaduras están catabolizando un líquido rico en azúcares mediante respiración y se agota el oxígeno, realizan la glucólisis y luego la fermentación alcohólica. Los azúcares son transformados en ácido pirúvico y éste desprende una molécula de  $\text{CO}_2$  pasando a acetaldehído (por acción de la enzima piruvato descarboxilasa), que actúa como aceptor de hidrógenos y se transforma en alcohol etílico (etanol), gracias a la intervención de la enzima alcohol deshidrogenasa. También se pueden producir glicerina, ácido succínico y ácido acético.

Las levaduras que la realizan son anaerobias facultativas y pertenecen al género *Saccharomyces*. Producen cerveza, whisky, ron vino, sidra y pan.

Reacción global de la glucólisis y de la fermentación alcohólica :

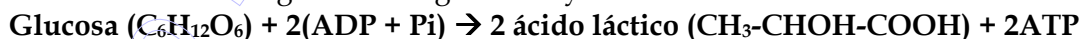


### • La fermentación láctica

Es la transformación de glucosa en **ácido láctico**, con producción de ATP. Se produce en los músculos animales cuando hay escasez de oxígeno para realizar la respiración y se transforma el ácido pirúvico en ácido láctico, que se acumula en forma de cristales (agujetas). También los microorganismos fermentan la lactosa de la leche, con lo que se agria y coagula la proteína caseína.

Se realiza la glucólisis produciéndose dos ATP y dos ( $\text{NADH} + \text{H}^+$ ). Luego se realiza la fermentación láctica para **regenerar las coenzimas  $\text{NAD}^+$**  de modo que no se detenga el proceso. El aceptor de hidrógenos es el ácido pirúvico.

Reacción global de la glucólisis y de la fermentación láctica :



Si el sustrato es la lactosa, primero se hidroliza en una molécula de glucosa y en otra de galactosa (que luego se isomeriza a glucosa). Esta fermentación la realizan las bacterias *Lactobacillus* obteniéndose productos derivados de la leche como el queso, el yogur y el kéfir.

## La fotosíntesis

Proceso de anabolismo autótrofo cuya finalidad es fabricar moléculas orgánicas complejas a partir de moléculas inorgánicas y de la luz solar, cuya energía es almacenada en forma de ATP.

### Pigmentos fotosintéticos

Son los encargados de captar la energía luminosa gracias a que sus electrones captan la energía de los fotones para ascender de nivel energético. Los electrones van circulando por la cadena

transportadora de electrones en la que diversas moléculas se oxidan y reducen sucesivamente desprendiendo energía que es aprovechada por las enzimas ATP-sintetasas para fabricar ATP.

### **Fotosistemas**

Son los lugares donde se absorbe la energía luminosa y están compuestos de pigmentos fotosintéticos y de proteínas. Se dividen en dos subunidades. En la antena (LHC) predominan los pigmentos sobre las proteínas, pero no hay pigmentos diana. Hay pigmentos antena, que sólo pueden captar la energía luminosa y transmitirla a otros pigmentos. En el centro de reacción (CC) predominan las proteínas y es donde está el pigmento diana, que recibe toda la energía de los pigmentos antena y la utiliza para transferir electrones al primer aceptor de electrones, reponiéndolos del primer dador de electrones.

**Tipos de fotosíntesis** : si el dador de electrones es el agua se llama fotosíntesis oxigénica, porque se desprende oxígeno ; y si el dador de electrones es el sulfuro de hidrógeno se llama fotosíntesis anoxigénica o bacteriana, ya que se desprende azufre.

### **Fotosíntesis oxigénica**

Se da en las membranas de los tilacoides de los cloroplastos e intervienen varios complejos enzimáticos : fotosistemas I y II, cadena transportadora de electrones y ATP-sintetasas. En ella se distinguen dos fases, la luminosa y la oscura. La luminosa se divide en cíclica y acíclica.

#### **•Fase luminosa acíclica**

Se inicia en el PSII cuando los fotones provocan que la clorofila P680 ceda electrones a la feofitina (Pheo) que luego van pasando por otros aceptores hasta la plastoquinona (PQ). Para reponer los electrones, en el interior de los tilacoides se produce la fotólisis del agua, con lo que los dos electrones son transferidos a la P680 por el dador Z, y los dos protones quedan acumulados en el interior. La PQ utiliza la energía de los electrones para introducir protones en el tilacoide y luego pasa los electrones al complejo citocromo b-f. Los protones que quedan acumulados en el interior del tilacoide, según la hipótesis quimioosmótica salen al estroma por las ATP-sintetasas produciéndose ATP (fotofosforilación del ADP). En el PSI la P700 también se excita cediendo electrones al aceptor A<sub>0</sub> y van pasando por otros aceptores hasta la ferredoxina (Fd), que finalmente se los cede a la enzima NADP<sup>+</sup>-reductasa, la cual reduce al NADP<sup>+</sup> con dos protones del estroma y dos electrones (fotoreducción del NADP<sup>+</sup>). Los electrones perdidos por la P700 los repone la plastocianina (PC) después de recibirlos del complejo b-f.

#### **•Fase luminosa cíclica**

Se realiza para subsanar el déficit de ATP necesario para la fase oscura. Cuando la clorofila P700 se excita y libera electrones, éstos llegan a la Fd, que los pasa a un citocromo b<sub>6</sub>, el cual se los cede a la PQ. Ésta capta dos protones y los introduce en el tilacoide, cediendo los dos electrones al citocromo f, que finalmente se los cederá a la PC que cierra el ciclo entregándoselos a la clorofila P700. Los protones pasan por las ATP-sintetasas generando ATP. En esta fase no se desprende oxígeno ni hay reducción del NADP<sup>+</sup>.

• **Fase oscura o biosintética** se utiliza ATP y NADPH para sintetizar materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas.

La síntesis de compuestos de carbono se realiza mediante el ciclo de Calvin. En el estroma, el CO<sub>2</sub> se une a la ribulosa-1,5-difosfato (5C) generando dos moléculas de ácido 3-fosfoglicérico (3C), que mediante el consumo de ATP y NADPH es transformado en gliceraldehído 3-fosfato, el cual puede regenerar la ribulosa-1,5-difosfato o transformarse en almidón, ácidos grasos y aminoácidos en el estroma ; y en glucosa y fructosa ya en el citosol. En este ciclo por cada CO<sub>2</sub> incorporado se precisan 2 NADPH y 3 ATP. La fase oscura no requiere, pues, la presencia de luz ni de clorofila. La reacción global de la fotosíntesis sería :



De ella se deduce que para fabricar una glucosa serían necesarios 12 NADPH y 18 ATP.

Para la síntesis de compuestos orgánicos nitrogenados, primero los iones nitrato son reducidos a iones nitrito gastando un NADPH ; gastando otro se reducen los nitritos a amoníaco, que rápidamente es captado por el ácido α-cetoglutarico dando ácido glutámico (aminoácido) y gastando un ATP. Algunas bacterias pueden fijar el N<sub>2</sub> atmosférico.

De la misma manera se pueden sintetizar compuestos orgánicos con azufre reduciendo el ion sulfato a sulfito y luego a sulfuro de hidrógeno, que se combina con la acetilserina para formar el aminoácido cisteína.

En el **rendimiento** de la fotosíntesis intervienen diversos factores :

- La concentración de CO<sub>2</sub>, que aumenta el rendimiento hasta un cierto límite.
- La temperatura, cuanto más mejor, hasta un límite en el que las enzimas se desnaturalizan.
- La concentración de O<sub>2</sub>, que disminuye el rendimiento debido a los procesos de fotorrespiración.
- La intensidad luminosa, que hasta unos límites es beneficiosa y depende de cada planta.
- La escasez de agua, que disminuye el rendimiento ya que los estomas se cierran y el CO<sub>2</sub> no puede salir produciéndose la fotorrespiración.
- El tiempo de iluminación.
- El color de la luz. Los pigmentos están especializados en absorber determinados colores y los demás no los pueden absorber. Si  $\lambda > 680$  nm no funciona el PSII y sólo se produce la fase luminosa cíclica, con lo que el rendimiento es mucho menor.

Eduardo Montoya Marín lcc-by-no-sa