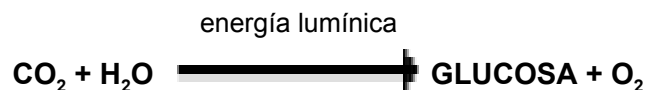


FOTOSÍNTESIS Y RESPIRACIÓN CELULAR

FOTOSÍNTESIS

Ecuación general (cualitativa):



- es un proceso **anabólico** (el CO_2 se anaboliza a glucosa) y **endergónico** (es un proceso que requiere del aporte externo de energía, en este caso, la energía solar).

- es un proceso de **óxido-reducción**

Importante: para que exista una **reacción de óxido-reducción**, en el sistema debe haber un átomo o molécula que **ceda electrones**, y otro que los **accepte**. Cuando un átomo o molécula pierde electrones, se oxida y, cuando capta electrones del medio, se reduce.

Considerando la ecuación general, el H_2O pierde sus electrones (sus Hidrógenos) y se oxida de esta manera a O_2 (sus electrones se usarán para la síntesis de glucosa). Por otro lado, el CO_2 se reduce gracias a los los hidrógenos provenientes del H_2O y se transforma en glucosa (fig. 1).

La fotosíntesis se subdivide en dos etapas: la etapa Fotoquímica y la Bioquímica

En la etapa fotoquímica, la energía lumínica es transformada en energía química, es decir, se incorpora a los enlaces químicos (enlaces covalentes) de moléculas químicas como el ATP y el NADPH (fig. 1). El pigmento que se vincula con la captación de la energía lumínica es la **clorofila**. En la etapa bioquímica (o ciclo de Calvin-Benson) el ATP y el NADPH sintetizados en la etapa previa aportan la energía y el poder reductor (los hidrógenos) para la síntesis de glucosa a partir de CO_2 . Es decir que a partir de una molécula inorgánica se sintetiza una molécula biológica.

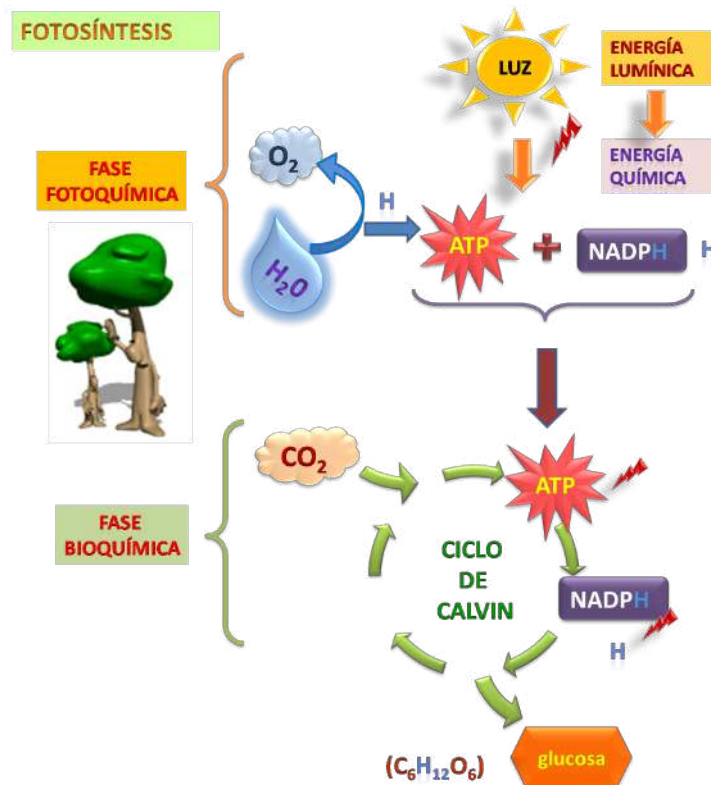


Figura 1: Esquema de las fases de la fotosíntesis. En la fase fotoquímica, la energía lumínica es transformada en energía química, de enlace, dado que es captada por el ATP y por el NADPH. Luego, en la etapa bioquímica, el ATP y el NADPH aportan la energía y los hidrogenos para la síntesis de glucosa.

1) Etapa fotoquímica

- Como puede observarse en la fig. 2, las clorofilas de ambos fotosistemas absorben la energía de la luz y sus electrones pasan a un estado energéticamente más elevado. Como consecuencia de esto los electrones abandonan dichos fotosistemas (fotooxidación) y son captados por otras moléculas llamadas aceptores primarios.
- el déficit de electrones en el fotosistema II es compensado con electrones que provienen de la fotólisis del H₂O. Por este mecanismo el H₂O se oxida y forma O₂ liberado a la atmósfera.
- los electrones desprendidos del fotosistema II se transfieren por una cadena de transporte de electrones, que permite la síntesis de ATP (modelo quimiosmótico).
- los electrones desprendidos del fotosistema I tienen como aceptor final al NADP⁺ que se reduce a NADPH + H⁺. El fotosistema I queda con déficit de electrones que van a ser

aportados por los provenientes del fotosistema II. Se cubre así el déficit de electrones del fotosistema I.

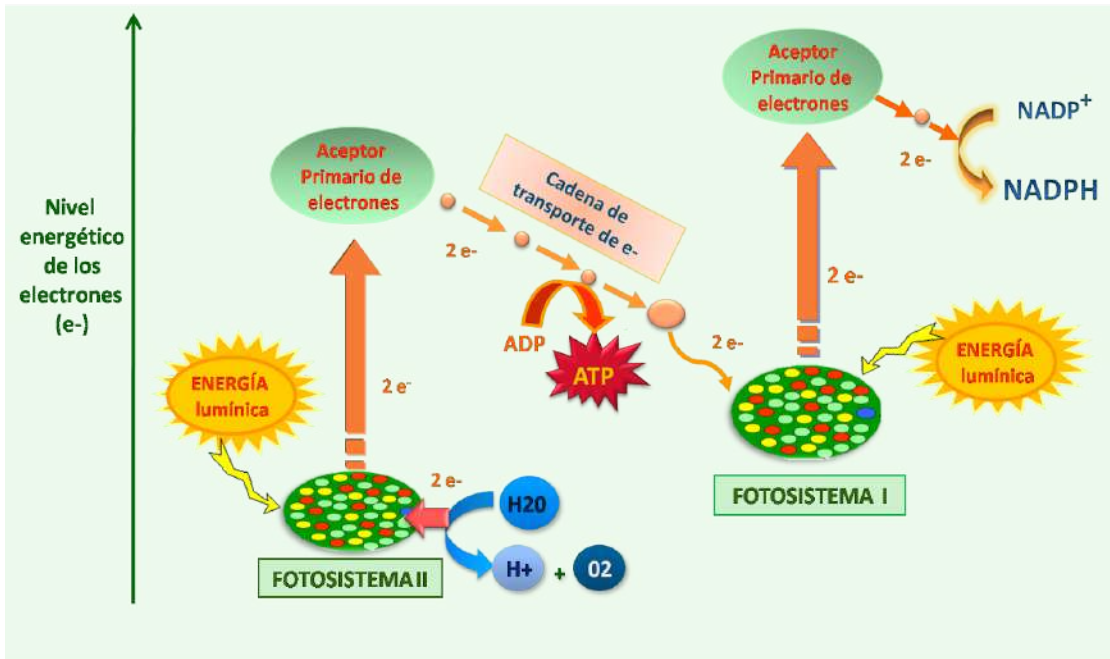
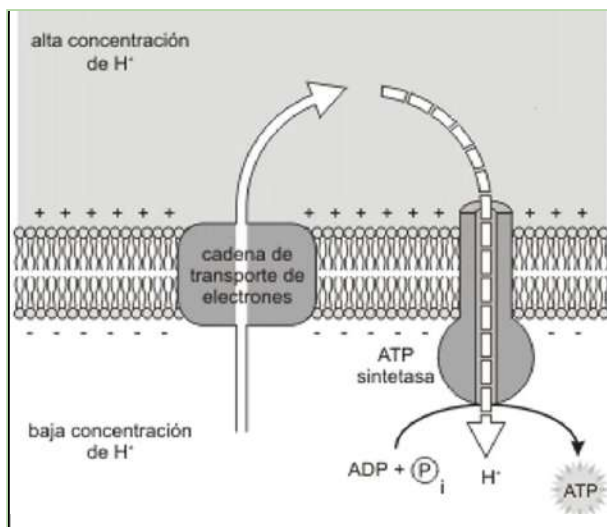


Figura 2: esquema que resume la fase fotoquímica donde se observan ambos fotosistemas y el flujo de electrones desde el agua hasta el NADPH.

El Modelo quimioosmótico



Cuando hay un transporte de electrones a lo largo de una cadena transportadora, los electrones en su trayecto liberan energía. Esa energía es utilizada para transportar H^+ en contra de su gradiente generando así un gradiente electroquímico de H^+ . La energía contenida en ese gradiente se utilizará, al retornar los H^+ al estroma, para la síntesis de ATP. De esto se ocupa el complejo ATP sintetasa.

Figura 3: Proceso de quimioósmosis que consiste en una cadena de transporte de electrones, un bombeo de protones hacia el interior tilacoidal que permite generar un gradiente electroquímico de protones y finalmente, la energía contenida en este gradiente permite la síntesis de ATP.

La siguiente tabla sintetiza los sustratos y productos de la etapa fotoquímica.

Tabla 1: Sustratos, productos y lugares donde suceden las reacciones de la etapa fotoquímica.

Sustratos	Productos	Lugar
NADP+	NADPH + H ⁺	Membrana tilacoidal (euca)
ADP + Pi	ATP	Membrana plasmática (proca)
H ₂ O	O ₂	

2) Etapa bioquímica o Ciclo de Calvin-Benson

Como se observa en la Figura 4, la etapa bioquímica consiste en una serie compleja de reacciones químicas encadenadas en forma de ciclo. Es decir que se parte de cierto compuesto y al finalizar el ciclo se debe formar el mismo compuesto de partida. Este ciclo es el Ciclo de Calvin que comienza con la unión entre ribulosa 1-5 difosfato y el CO₂ (fase de fijación). Se forma otra molécula (PGA) que con gasto de energía del ATP y electrones provistos por el NADPH formará otra molécula, PGAL (fase de reducción). Algunos PGAL se utilizan para regenerar ribulosa 1-5 difosfato (fase de regeneración) y otros para la síntesis de otras moléculas como la glucosa.

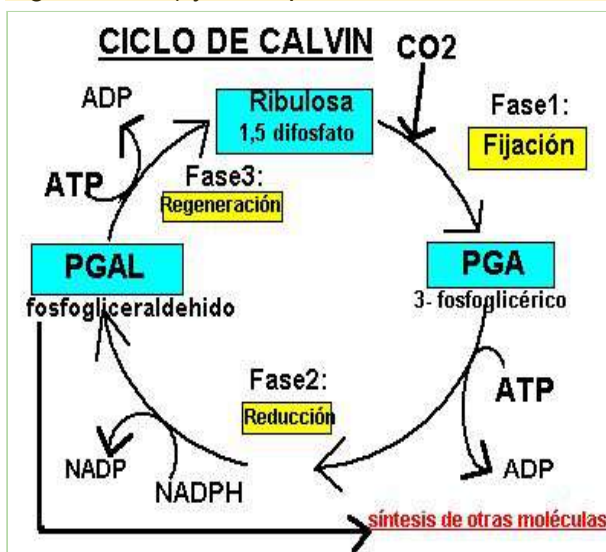


Figura 4: Ciclo de Calvin Benson o etapa bioquímica que consiste en 3 etapas: fijación de CO₂ a una molécula ya existente (la Ribulosa di fosfato), reducción de ese CO₂ a PGAL y finalmente la fase de regeneración donde parte del PGAL generado se transforma nuevamente a Ribulosa di fosfato.

Resumen de sustratos y productos de la etapa bioquímica

Tabla 2: Sustratos, productos y lugares donde suceden las reacciones de la etapa bioquímica.

Sustratos	Productos	Lugar
NADPH + H ⁺	NADP ⁺	Estroma (euca)
ATP	ADP + Pi	Citoplasma (proca)
CO ₂	GLUCOSA	

Integración de las etapas fotodependiente y fotoquímica

En la fig. 5 se observa la relación entre las 2 etapas de la fotosíntesis ya que en las mismas los productos generados en la etapa fotoquímica (el ATP y el NADPH) son a su vez los reactivos o sustratos del ciclo de Calvin o etapa bioquímica. La etapa fotoquímica ocurre en las membranas de los tilacoides en eucariontes y la etapa bioquímica en el estroma de estos organismos.

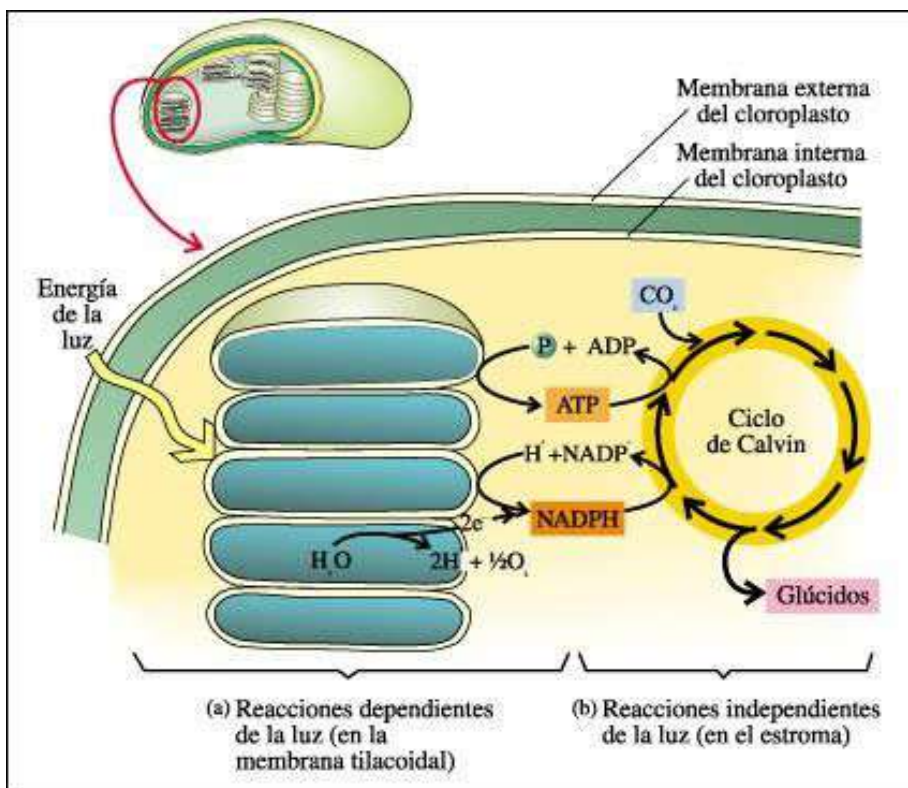


Figura 5: Interrelación de las etapas fotoquímica y bioquímica y lugares físicos donde suceden los procesos.

RESPIRACIÓN CELULAR y FERMENTACIÓN

La mayoría de los organismos oxidan hidratos de carbono como fuente principal de energía celular. Las vías catabólicas más comunes en que se genera esta energía útil

(en forma de ATP) son la respiración celular y la fermentación. Ambos procesos utilizan una vía en común llamada glucólisis. Los pasos posteriores a seguir dependerán de las condiciones ambientales (presencia o ausencia de oxígeno) y fisiológicas (la posibilidad de cada célula de poder llevar a cabo el/los procesos). En la mayoría de las células eucariotas, en presencia de O_2 la vía que se da es la respiración celular, en la cual se logra la oxidación total de la glucosa y es un mecanismo muy eficiente con alto rendimiento de ATP. En ausencia de O_2 , la célula realiza el proceso de fermentación. En eucariontes, el proceso de respiración ocurre en la mitocondria mientras que la fermentación es citosólica (fig. 6).

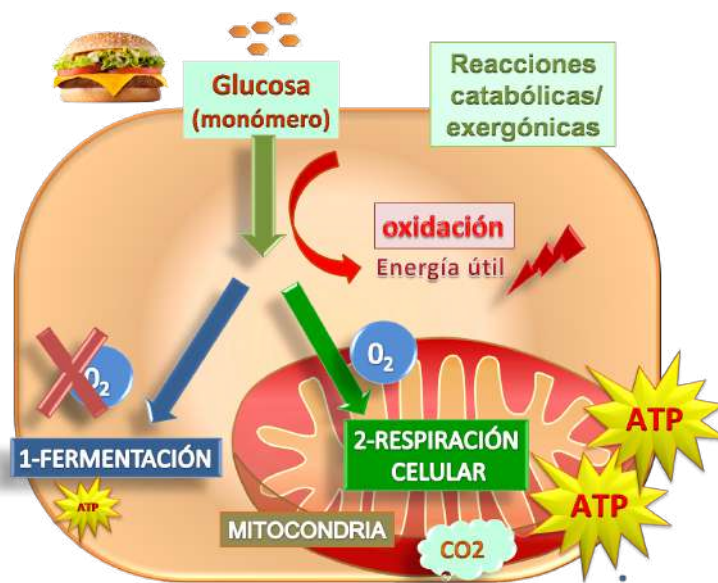


Figura 6: Esquema general de la respiración celular y de la fermentación.

Respiración celular

Ecuación general (cualitativa):



- es un proceso **catabólico** (la glucosa se cataboliza a CO_2) y **exergónico** (es un proceso que libera energía que permitirá sintetizar ATP)

- es un proceso de **óxido-reducción** (un compuesto se oxida cuando cede electrones o Hidrógenos y se reduce cuando gana electrones o Hidrógenos).

Durante el proceso de respiración celular la glucosa se degrada completamente a CO_2 y la energía liberada por este proceso se destina para la síntesis de ATP

Etapas de la respiración celular (aeróbica, en presencia de O_2)

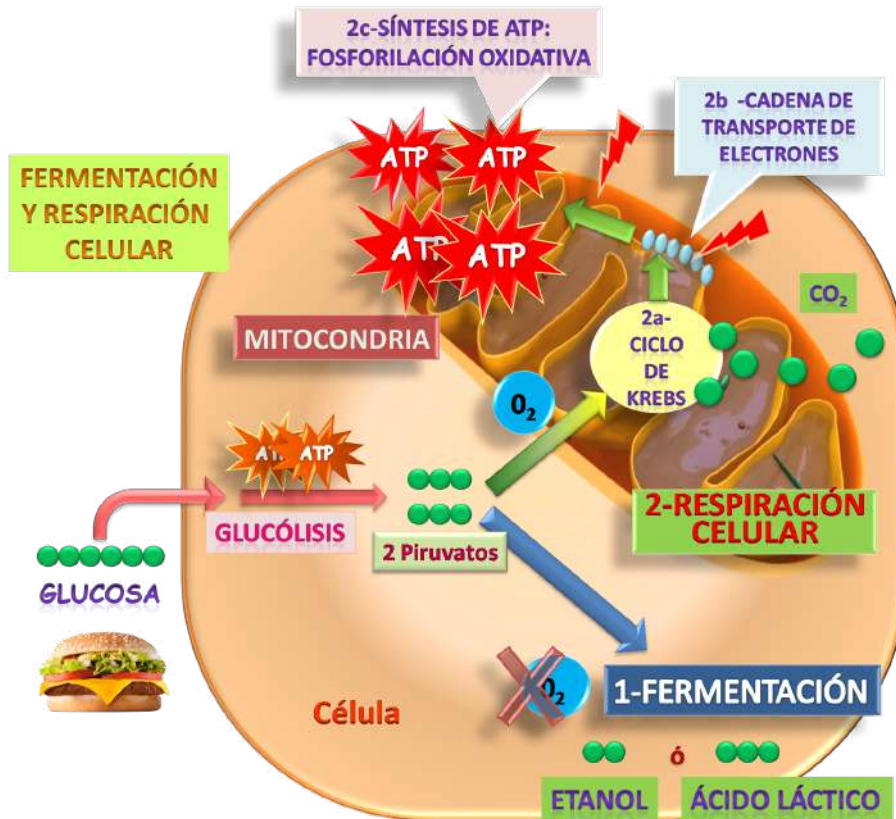


Figura 7: Esquema general de la respiración celular y de la fermentación. A partir de la glucólisis se genera ácido pirúvico. Dependiendo de las condiciones, se podrán llevar a cabo dos vías diferentes. En presencia de oxígeno, se continúa con el ciclo de Krebs, la cadena de transporte de electrones y la fosforilación oxidativa (en mitocondrias en células eucariotas). En ausencia de oxígeno, la célula realiza la fermentación (láctica o alcohólica), un proceso anaeróbico en el cual se oxida parcialmente la glucosa

La respiración celular consiste en una serie de **4 pasos** generales cuya finalidad es la ruptura de la molécula de glucosa y la captura de la energía útil en forma de ATP: glucólisis, ciclo de Krebs (2a), cadena de transporte de electrones (2b) y fosforilación oxidativa (2c) (fig. 7)

1) Glucólisis: implica la degradación parcial de la glucosa (molécula de 6 carbonos) a 2 moléculas de ácidos pirúvicos (molécula de 3 carbonos). Consiste en una serie de reacciones encadenadas. Hay reacciones de oxidación (cuyos electrones se utilizan para reducir NAD^+ a NADH), reacciones en las que se requiere energía (que se obtiene del ATP) y reacciones en las que se libera energía (que se utiliza para formar ATP). Es un proceso universal presente en casi todos los organismos vivos.

Tabla 3: Sustratos, productos y lugares donde suceden la glucólisis

Sustratos	Productos	Lugar
GLUCOSA	2 ACIDO PIRÚVICO	Citoplasma
2 NAD^+	2 $\text{NADH} + \text{H}^+$	
2 $\text{ADP} + \text{Pi}$	2 ATP	

2) Descarboxilación oxidativa: cada ácido pirúvico se oxida originando un acetilo (dos carbonos) y los electrones liberados pasan al NAD^+ que se reduce a $\text{NADH} + \text{H}^+$. El acetilo se transfiere a la coenzima A formando así acetil-CoA. Además de oxidarse, el ácido pirúvico “pierde” un átomo de carbono en forma de CO_2 . (Aclaración: en el siguiente cuadro se tiene en cuenta lo que ocurre con 1 ácido pirúvico. Hay que recordar que por glucosa original hay 2 ácidos pirúvicos)

Tabla 4: Sustratos, productos y lugares donde sucede la descarboxilación oxidativa.

Sustratos	Productos	Lugar
ACIDO PIRÚVICO	ACETIL-CoA + CO_2	Matriz mitocondrial (euca)
NAD^+	$\text{NADH} + \text{H}^+$	Citoplasma (proca)

3) Ciclo de Krebs: conjunto de reacciones encadenadas en forma de ciclo. Se produce la oxidación completa de cada acetil-CoA. Los electrones liberados se utilizan para reducir al NAD^+ a $\text{NADH} + \text{H}^+$ y también al FAD^+ a FADH_2 . También hay liberación de energía que es utilizada para sintetizar GTP. En este ciclo se liberan también 2 CO_2 a la atmósfera. (Aclaración: en el siguiente cuadro se tiene en cuenta lo que ocurre con 1 acetil-CoA. Recordar que por cada glucosa original se formaron 2 acetil-CoA).

Tabla 5: Sustratos, productos y lugares donde sucede el ciclo de Krebs.

Sustratos	Productos	Lugar
ACETIL-CoA	2 CO_2	Matriz mitocondrial (euca) Citoplasma (proca)
3 NAD^+	3 $\text{NADH} + \text{H}^+$	
1 FAD^+	1 FADH_2	
1 $\text{GDP} + \text{Pi}$	1 GTP	

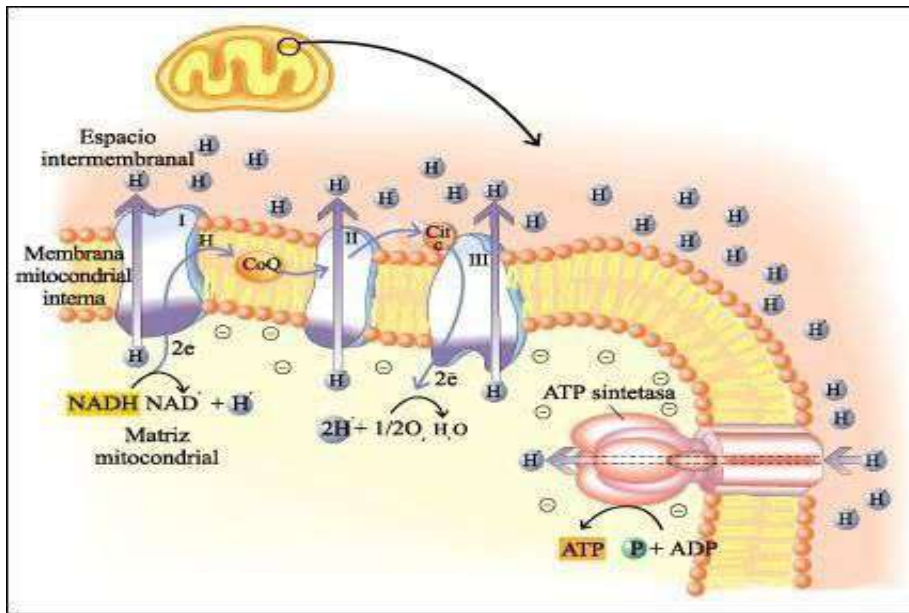


Figura 8: Transporte de electrones y generación quimioosmótica de ATP: En la membrana mitocondrial se transportan los electrones a través de la membrana mitocondrial interna y la energía liberada por ellos se utiliza en el bombeo de protones hacia del espacio intermembranal. La membrana es impermeable a los protones y estos retornan a la matriz mitocondrial a través de la ATP sintetasa. Este flujo libera energía que la enzima utiliza para sintetizar ATP.

4) Cadena respiratoria: todas las moléculas de NADH + H⁺ y de FADH₂ formadas hasta el momento se oxidan (formando entonces NAD⁺ y FAD⁺). Esos electrones pasan por una serie de complejos transportadores de electrones (la cadena respiratoria) siendo el último aceptor de esos electrones al final de la cadena el O₂, que entonces se reduce y forma H₂O. Este proceso, se lleva a cabo en la membrana plasmática de procarionotas y en la membrana interna mitocondrial en eucariotas.

(Aclaración: en el siguiente cuadro no se precisa la cantidad de NADH + H⁺ y FADH₂ pero correspondería a todos los formados y acumulados hasta el momento)

Tabla 6: Sustratos, productos y lugares donde se desarrolla la cadena respiratoria.

Sustratos	Productos	Lugar
NADH + H ⁺	NAD ⁺	Membrana interna mitocondria (euca)
FADH ₂	FAD ⁺	Membrana plasmática (proca)
O ₂	H ₂ O	

5) Fosforilación oxidativa (síntesis de ATP): a medida que los electrones eran transportados en la cadena respiratoria, liberaron energía. Esa energía (y de acuerdo con la hipótesis o modelo quimiosmótico) se utiliza para transportar H^+ generando un gradiente de H^+ . La energía de ese gradiente se utiliza luego para sintetizar ATP. En este proceso participa la ATP sintetasa.

Tabla 7: Sustratos, productos y lugares donde sucede la fosforilación oxidativa.

Sustratos	Productos	Lugar
ADP + Pi	ATP	Membrana interna mitocondrial (euca). Membrana plasmática (proca)

Rendimiento energético: una molécula de glucosa sometida a respiración celular aeróbica rinde un total de 38 moléculas de ATP.

El Ciclo de Krebs como nudo metabólico

De la degradación de glucosa se obtiene acetil-CoA, que ingresará al ciclo de Krebs y luego continuará la cadena respiratoria y fosforilación oxidativa. Pero de la degradación de otras moléculas también se obtiene acetil-CoA que seguirá ese mismo camino. De la degradación de los ácidos grasos y de las proteínas también se genera acetil-CoA y todo acetil-CoA ingresará entonces a Krebs. A su vez, el ciclo de Krebs es una importante vía de síntesis de biomoléculas.

Vías anaeróbicas: Fermentación

- Implica una degradación parcial de la glucosa, que entonces no es oxidada completamente como en la respiración celular aeróbica.
- Solo genera pequeñas cantidades de ATP (2 moléculas de ATP por molécula de glucosa). El último paso tiene como objetivo la reoxidación del $NADH + H^+$ a NAD^+ para que pueda continuar el proceso de glucólisis.
- Se lleva a cabo en ausencia de oxígeno.
- Un fermentador realiza primero la glucólisis y luego reduce al ácido pirúvico para regenerar el NAD^+ (oxidado)

Hay dos tipos de fermentaciones:

Fermentación alcohólica: el ácido pirúvico se reduce a etanol (los electrones para eso provienen del $\text{NADH} + \text{H}^+$ que se oxida a NAD^+). Se da en algunas bacterias y hongos.

Fermentación láctica: el ácido pirúvico se reduce a ácido láctico (los electrones para eso provienen del $\text{NADH} + \text{H}^+$ que se oxida a NAD^+). Se da en algunas bacterias, en células musculares, en glóbulos rojos.

Rendimiento energético: a un individuo que hace fermentación, una molécula de glucosa le rinde 2 ATP (provenientes de la glucólisis).