

# 9 - METABOLISMO (I). CATABOLISMO

El metabolismo puede definirse como el conjunto de reacciones químicas que tienen lugar en las células, mediante las que realizan todas sus actividades, generales y específicas. Mediante las reacciones químicas del metabolismo se obtiene energía y esa energía se utiliza para realizar (también mediante reacciones químicas) esas actividades (regenerar moléculas y estructuras, crecer, mantener la composición celular interna...; cualquier función que una célula desarrolle).

## 1. EL METABOLISMO. CONCEPTOS GENERALES

Las reacciones químicas que constituyen el metabolismo se rigen por los principios generales de la química. Por ello es importante tener claros ciertos conceptos, como el papel de la energía en las reacciones químicas y los procesos de oxidación – reducción.

Este desarrollo de conceptos generales solo es explicativo, para comprender los procesos del metabolismo que se tratarán posteriormente. A efectos de evaluación y EBAU, solo necesitaremos quedarnos con el papel del ATP y de los transportadores de electrones y las diferencias entre el catabolismo y el anabolismo que se exponen en la tabla final de este apartado.

### 1.1. LA ENERGÍA EN LAS REACCIONES METABÓLICAS

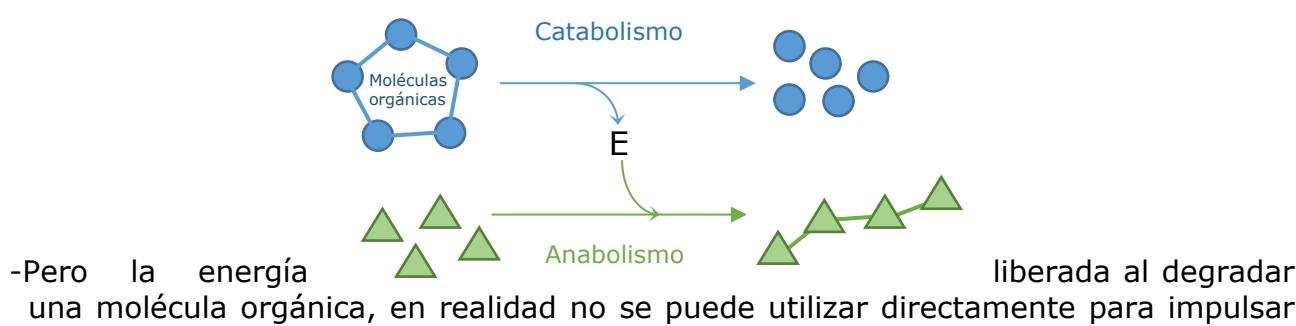
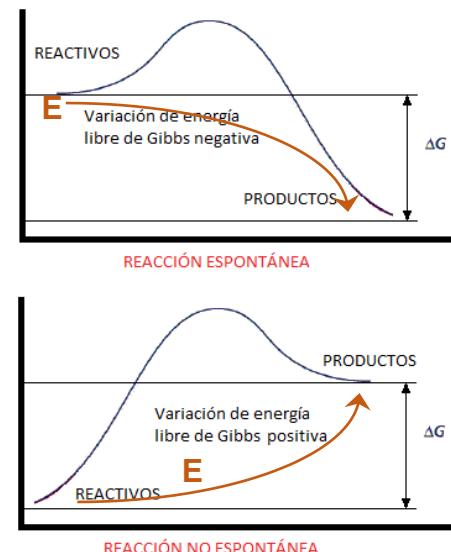
-En química general, una reacción transcurre espontáneamente si los sustratos contienen más energía que los productos → la **reacción es exergónica** → desprende energía.

-Si los reactivos contienen menos energía que los productos la reacción solo ocurre si hay aporte de energía y se dice que es **endergónica** → consume energía.

-En el metabolismo celular, las reacciones exergónicas son reacciones de degradación (se rompen moléculas en otras más pequeñas) en las que se libera energía (ej. glucólisis). Esta parte del metabolismo es el **catabolismo**.

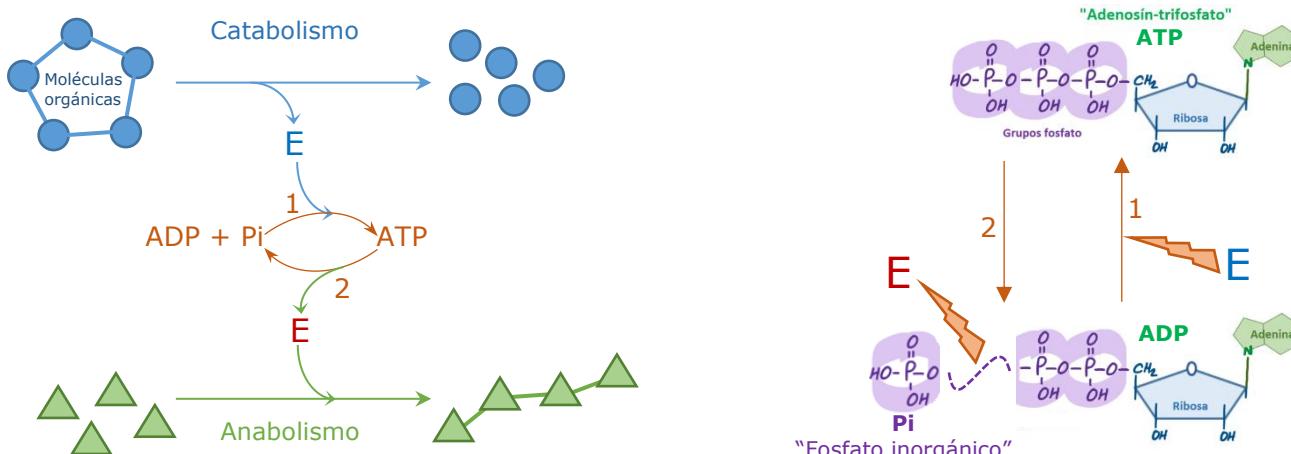
-Las reacciones endergónicas son reacciones de síntesis (se unen moléculas para formar otras más grandes) en las que se necesita aporte de energía (ej. unión de aminoácidos para la síntesis de proteínas). Esta parte del metabolismo es el **anabolismo**.

-La energía necesaria para el anabolismo es la energía química contenida en moléculas orgánicas (sintetizadas por los autótrofos o consumidas por los heterótrofos). Las reacciones exergónicas de degradación de esas moléculas orgánicas -catabolismo- desprenden energía, que es aprovechada para impulsar las reacciones endergónicas del anabolismo.



una reacción anabólica sino que ese acoplamiento de reacciones exergónicas con reacciones endergónicas tiene un **intermediario transportador de energía**, el ATP, de forma que la energía liberada en una reacción catabólica (exergónica) [E] se utiliza para sintetizar ATP<sup>1</sup> que, cuando actúe, se degradará a ADP + Pi<sup>2</sup>, siendo la energía liberada en esta degradación [E] la que impulsará a la reacción anabólica (endergónica).

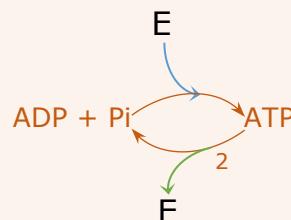
Las células necesitan energía para realizar sus procesos, pero la única energía útil, la que pueden utilizar directamente, es la que se libera al romper ATP<sup>2</sup> [E]. Por eso, todas las vías de consecución de energía en una célula irán destinadas a degradar moléculas orgánicas (como la glucosa) y utilizar la energía que se desprende [E] para sintetizar ATP<sup>1</sup>, única forma útil de energía para los procesos celulares (no solo para procesos de anabolismo).



### TRANSPORTADORES DE ENERGÍA

-El sistema más habitual de transferencia de energía en los procesos metabólicos es el **ATP-ADP** (hidrólisis y síntesis del ATP).

-No es el único. También, en menor medida, GTP, UTP, CTP.



### ¿PARA QUÉ SE UTILIZA LA ENERGÍA LIBERADA EN LA HIDRÓLISIS DEL ATP?

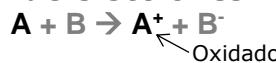
-Cuando se hidroliza el ATP<sup>2</sup> (cuando se le rompe el enlace del último fosfato) a ADP + Pi (o el ADP a AMP + Pi) se desprende mucha energía que no solo se utiliza para el anabolismo. El ATP puede utilizarse para la biosíntesis y para el trabajo celular:

- **Síntesis de biomoléculas** a partir de precursores más pequeños (**anabolismo**).
- **Movimiento**: cilios-flagelos.
- **Trabajo mecánico**: contracción muscular, citocinesis.
- **Transporte activo** a través de membrana.
- Generación de **potenciales de membrana**.
- **Producción de formas especiales de energía** como la bioluminiscencia.

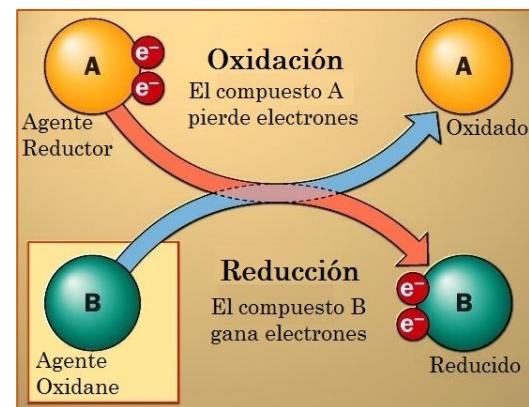
## 1.2. LOS PROCESOS DE OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN EN LAS REACCIONES METABÓLICAS

-Los procesos de degradación y síntesis de moléculas en la célula están emparejados con transferencias de electrones entre moléculas. Son las **reacciones redox, de oxidación-reducción**.

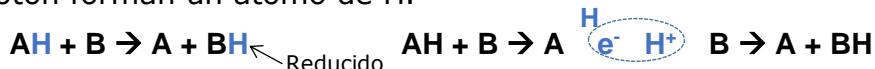
-**Oxidación:** Pérdida de electrones de una molécula → **dador de electrones - reductor**.



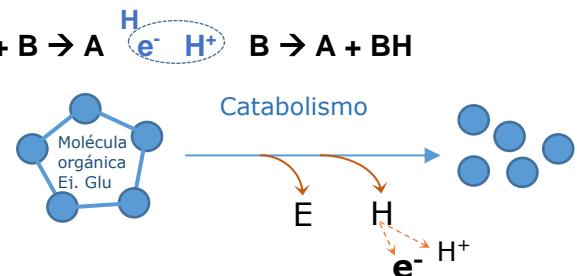
-**Reducción:** Ganancia de electrones de una molécula → **aceptor de electrones - oxidante**.



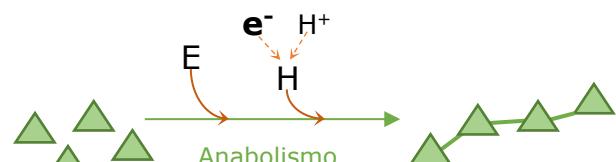
-Son dos procesos acoplados, ya que siempre que se oxida una molécula otra se reduce. En muchos casos (y especialmente, en el metabolismo celular), la transferencia de electrones va acompañada de la transferencia de protones ( $H^+$ ). Recordemos que un electrón y un protón forman un átomo de H.



-En las células, las reacciones de **degradación** (catabolismo) llevan aparejadas **oxidaciones**: al romperse moléculas orgánicas (como la glucosa) en otras moléculas más sencillas, se libera energía (reacciones exergónicas), pero también se desprenden electrones -*de alta energía*- (y protones  $H^+$ , ya que lo que se desprende en realidad son átomos de H, que se disocian en su protón y su electrón).



-Las reacciones de **biosíntesis** (anabolismo) llevan aparejadas **reducciones**: para unir moléculas sencillas y formar otras más grandes se necesita aportar energía (reacciones endergónicas), pero también electrones (y  $H^+$ , ya que lo que se necesita realmente es añadir átomos de H).



-Como en la transferencia de energía, la transferencia de electrones tiene **intermediarios transportadores de electrones**. Son coenzimas como  $NAD^+$ ,  $FAD$ ,  $FMN$  y  $NADP^+$ . Recogen los electrones desprendidos en la degradación de moléculas.

•  **$NAD^+/NADH$ :** Participa, como veremos, en procesos catabólicos como la respiración celular, recogiendo los electrones procedentes del catabolismo y cediéndolos -la forma reducida  $NADH$ - en la cadena respiratoria para generar ATP.

•  **$FMN/FMNH_2$  y  $FAD/FADH_2$ :** Función semejante al  $NADH$ .

•  **$NADP^+/NADPH$ :** Participa, como veremos, en procesos anabólicos como el ciclo de Calvin (en la fotosíntesis), aportando electrones necesarios para las reducciones.

METABOLISMO	
CATABOLISMO	ANABOLISMO
Procesos de degradación	Procesos de biosíntesis
Se desprende energía	Se necesita energía
$ADP + Pi \rightarrow ATP$	$ATP \rightarrow ADP + Pi$
Oxidación de moléculas	Reducción de moléculas
Se liberan electrones (y protones)	Se incorporan electrones (y protones)
$NAD^+ \rightarrow NADH$	$NADPH \rightarrow NADP^+$

## 2. EL METABOLISMO Y LOS TIPOS DE CÉLULAS

-Según su forma de nutrición -el tipo de materia que incorporan del medio para conseguir las moléculas orgánicas necesarias (para la biosíntesis, para conseguir energía, etc.)- las células pueden ser:

**•Autótrofas (nutrición autótrofa):** Incorporan moléculas inorgánicas (como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) con las que sintetizan moléculas orgánicas. Para ello se necesita aporte de energía (ya que son reacciones endergónicas) y, según la fuente de esta energía, se distinguen:

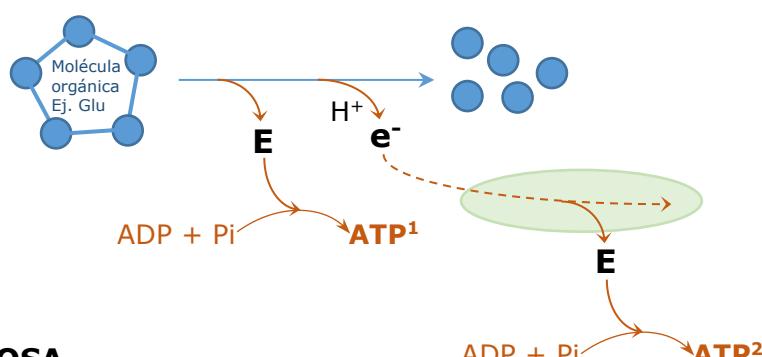
**Fotoautótrofas o fotosintéticas:** Utilizan la luz solar.

**Quimioautótrofas o quimiosintéticas:** Utilizan la energía que se libera en reacciones de moléculas inorgánicas reducidas.

**•Heterótrofas (nutrición heterótrofa):** Incorporan directamente moléculas orgánicas de otros seres vivos, ya que no pueden sintetizarlas a partir de moléculas inorgánicas.

## 3. EL CATABOLISMO

Los procesos catabólicos consisten en reacciones químicas secuenciales mediante las cuales, moléculas orgánicas (ej. **glucosa**) son degradadas, rotas, dando moléculas cada vez más pequeñas. En este **proceso de degradación** se libera la energía contenida en aquellas moléculas, que será aprovechada directamente para generar ATP<sup>1</sup>. También se liberan electrones de alta energía (recordemos que los procesos catabólicos son procesos de **oxidación**, de pérdida de electrones) que, en algunos casos y bajo determinadas condiciones, podrán ser transportados a determinados procesos (ej. la cadena respiratoria) mediante los cuales, la energía que contienen será utilizada también para producir ATP<sup>2</sup>. Vemos entonces que el fin último del catabolismo va a ser, en términos generales, la **degradación (y oxidación) de moléculas orgánicas para obtener energía en forma de ATP** (en otras ocasiones, el fin será la obtención de metabolitos necesarios para la obtención de determinadas moléculas: algún aminoácido, algún monosacárido, etc.).

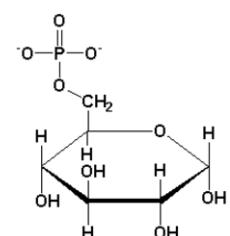


### 3.1. LA GLUCOSA

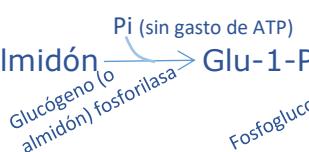
-En forma de **Glucosa-6-fosfato** es el **principal combustible celular**.

-Procedencia:

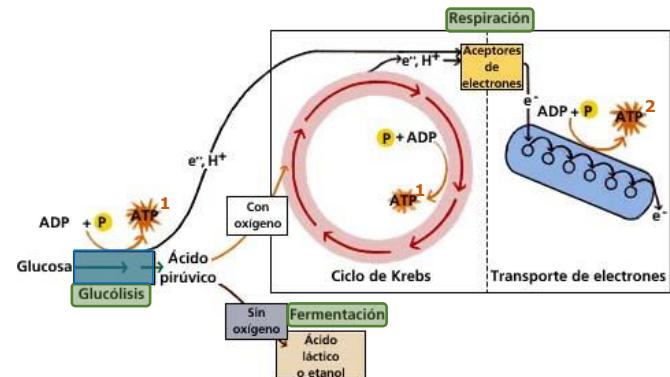
- Nutrientes** de alimentos incorporados del entorno, en heterótrofos.
- Sintetizada** en los autótrofos, por fotosíntesis (o quimiosíntesis).
- Por transformación de otras moléculas orgánicas mediante la **gluconeogénesis**.
- Por hidrólisis de glucógeno o almidón mediante la **glucogenolisis**.



**•Glucogenolisis:** Glucógeno/Almidón → Glu-1-P → Glu-6-P



**3.2. DEGRADACIÓN/OXIDACIÓN DE LA GLUCOSA:** La glucosa se utiliza como combustible mediante su degradación (y oxidación), a través de reacciones que liberan su energía (y electrones) al romper la molécula. Esa energía va siendo utilizada directamente para formar moléculas de ATP<sup>1</sup>. La energía de los electrones desprendidos se puede aprovechar para generar más ATP<sup>2</sup>.



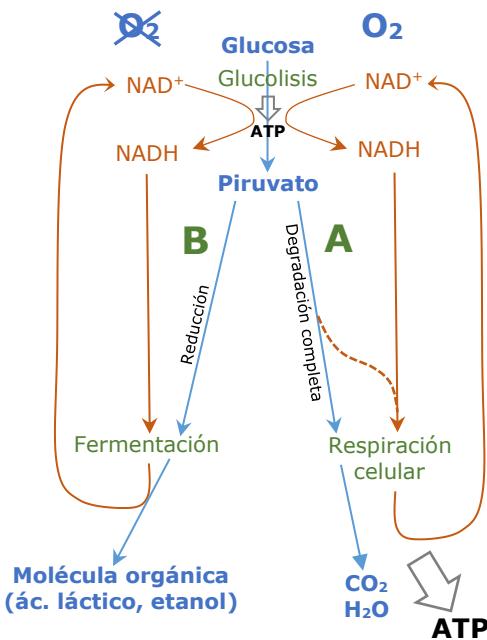
Transcurre en dos fases:

**1<sup>a</sup>: Glucolisis.** Degradación (y oxidación) parcial de la glucosa. Se obtiene ATP y 2 ácido pirúvico o piruvato. Fase común previa de las dos vías posteriores.

**2<sup>a</sup>: Metabolismo del piruvato** resultante de la glucolisis, que puede seguir dos vías alternativas:

**A:** Degradación (y oxidación) completa por la **respiración celular**. **Vía aerobia**, en presencia de O<sub>2</sub> (aceptor final de los electrones que se irán desprendiendo). El piruvato (y, por tanto, la glucosa) se degradará totalmente, hasta CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Se obtiene mucho ATP. [Existe la respiración anaerobia, en la que el acceptor final no es el O<sub>2</sub> sino otra molécula inorgánica -raramente una orgánica-. Algunas bacterias.].

**B:** Reducción por **fermentación**. **Vía anaerobia**, sin necesidad de O<sub>2</sub>. El piruvato se reducirá para recuperar el NAD<sup>+</sup> consumido en la glucolisis. La glucosa, en este caso, solo se habrá degradado parcialmente hasta moléculas orgánicas sencillas (el propio piruvato de la glucolisis). Se obtiene poco ATP, solamente el de la glucolisis.



## 4. LA GLUCOLISIS

-Proceso catabólico, anaerobio, en el citoplasma. Proceso de degradación parcial de la glucosa que ocurre en prácticamente todas las células. 10 reacciones enzimáticas.

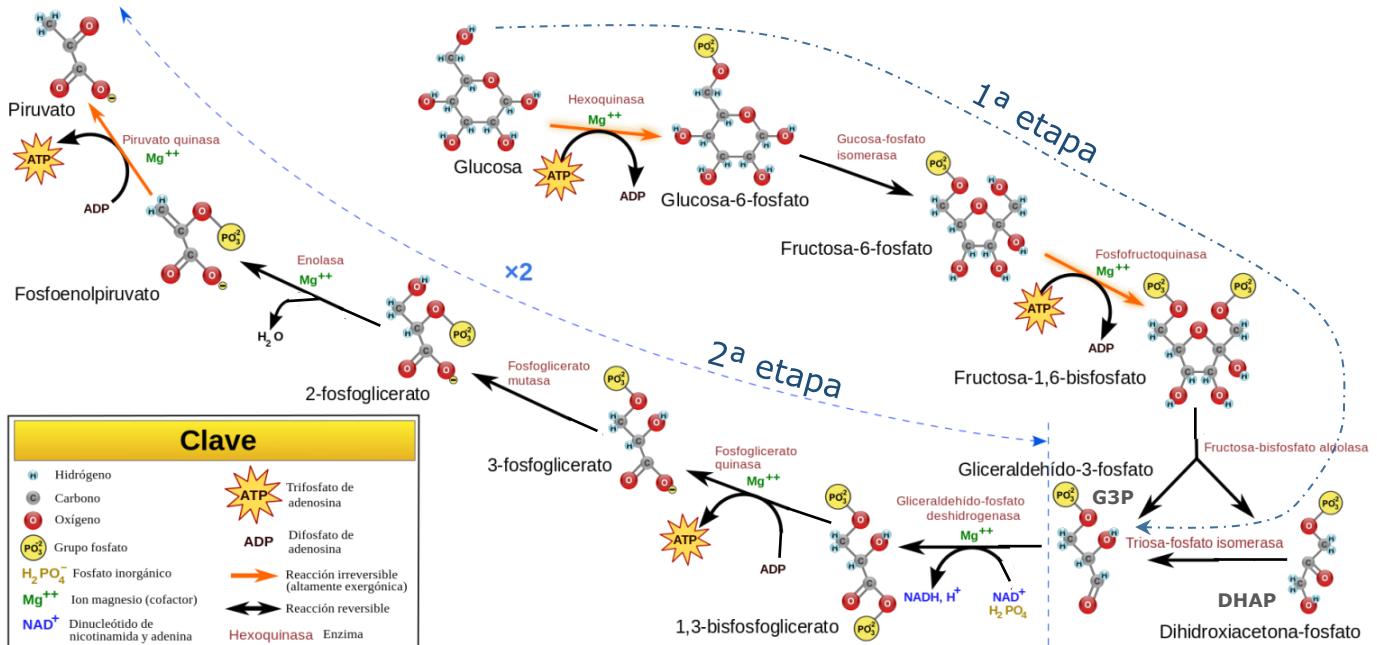


Imagen modificada de Wikipedia

En la 1ª etapa se obtiene una molécula de G3P y otra de DHAP. Pero esta última se acaba transformando en otra de G3P, por lo que tendremos 2 de G3P, que seguirán la misma ruta hasta transformarse en 2 de piruvato.

### -Fórmula general:



### -2 etapas:

- Fase preparatoria (de 6 carbonos), de inversión de energía, se gastan 2ATP.
- Fase de beneficios (de 3 carbonos), de "cosecha" de energía, se obtienen 4ATP (por fosforilaciones a nivel de sustrato) y 2NADH (por reducirse el  $\text{NAD}^+$  al recoger los electrones desprendidos).

**-Balance:** Por cada molécula de Glu se obtiene: **2Ácido pirúvico, 2ATP y 2NADH**. Si la Glu procede de la Glucogenolisis no es necesario fosforilarla (ya es Glu-6-P) y, por tanto, rinde 1ATP más (se evita la primera reacción, que consume 1ATP).

-El **NADH** formado **debe reoxidarse a  $\text{NAD}^+$**  para que este pueda volver a estar disponible, para recoger los electrones liberados en la glucolisis y esta pueda así continuar. Esto se conseguirá en una de las dos vías alternativas posteriores: en la respiración celular (en condiciones aerobias – con producción de mucho más ATP) o mediante fermentación (en condiciones anaerobias - no se produce más ATP).

La glucolisis es la única vía de obtención de ATP en condiciones anaeróbicas, pero si hay  $\text{O}_2$  y la célula es capaz de utilizarlo, la glucolisis es solo una fase inicial y la glucosa continuará su degradación total por la vía de la **respiración celular**, obteniéndose mucho más ATP.

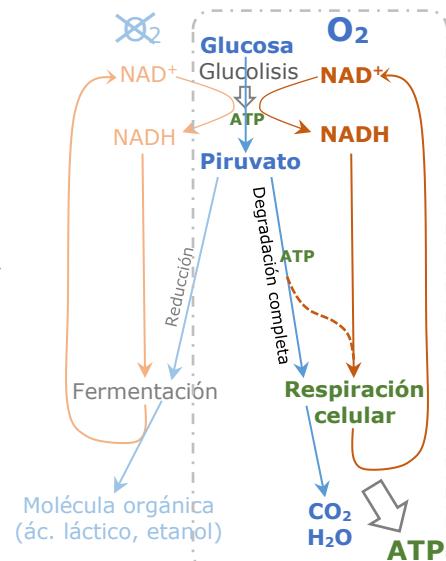
## 5. LA RESPIRACIÓN CELULAR

-Respiración celular (o aerobia) → una molécula de glucosa (el piruvato resultante de la glucolisis) se degrada (y se oxida) totalmente hasta  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . De esta forma, se obtiene toda la energía que contenía la molécula de glucosa, produciéndose gran cantidad de ATP.

-Eucariotas: en mitocondrias. Prokariotas: en citoplasma y membrana plasmática.

-El piruvato obtenido en la glucolisis (fase inicial) se degrada (y se oxida) en tres etapas:

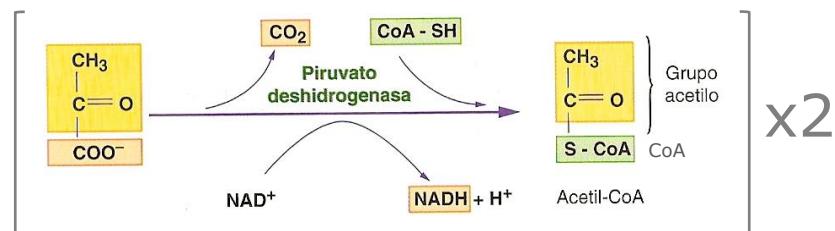
1. **Descarboxilación oxidativa** del ácido pirúvico → acetil-coenzima A ( $+1\text{CO}_2$ )
2. **Ciclo de Krebs**. acetil-coenzima A →  $2\text{CO}_2$
3. **Transporte de electrones** (cadena respiratoria) y **fosforilación oxidativa**.



### 5.1. DESCARBOXILACIÓN OXIDATIVA

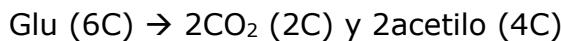
-El ácido pirúvico (2 moléculas) de la glucolisis entra en la **matriz mitocondrial**.

-Se produce su descarboxilación (pérdida de  $1\text{CO}_2$ ) y su oxidación por  $\text{NAD}^+$ .



-Como resultado, del piruvato queda ahora una molécula de 2C: un grupo acetilo, que es transportado a la siguiente etapa por el coenzima A (CoA), formándose **Acetil-CoA**. De la glucosa (6C) quedan ya 2 moléculas de solamente dos átomos de C (ya que en la glucolisis se habían formado 2 piruvatos), que entran así en la siguiente etapa, el ciclo de Krebs.

**Balance** por cada molécula de glucosa que entra en la glucolisis: **2Acetil-CoA, 2NADH (+2H<sup>+</sup>) y 2CO<sub>2</sub>**.

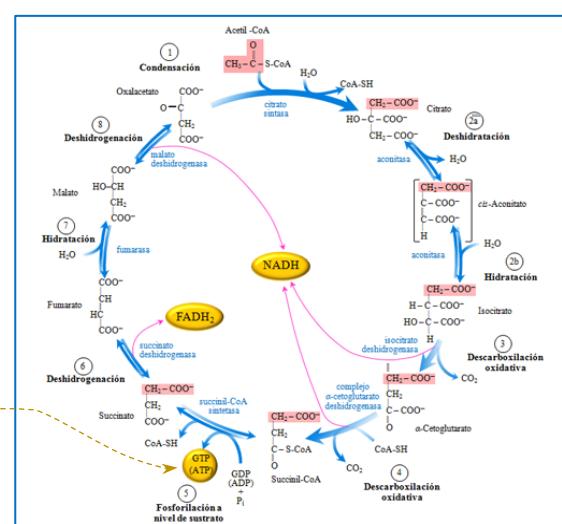


### 5.2. CICLO DE KREBS

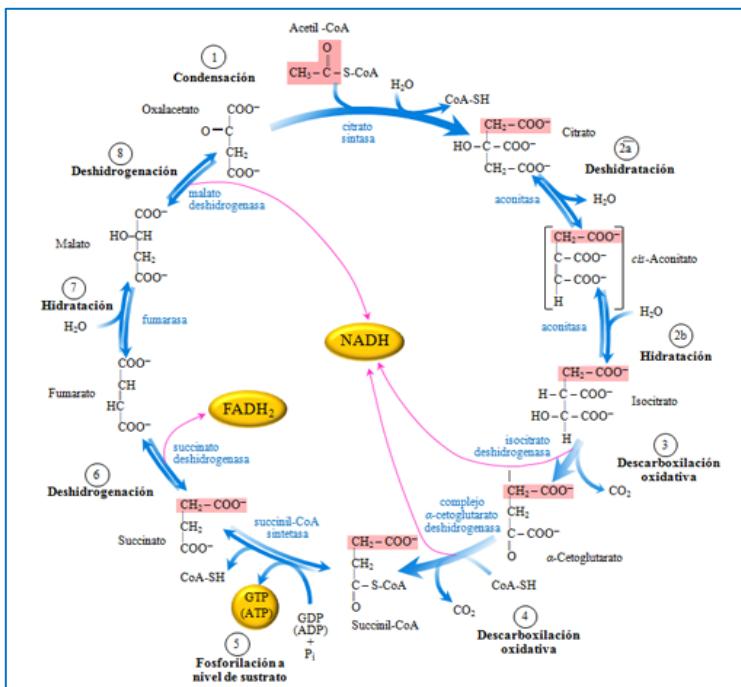
-También llamado *Ciclo del ácido cítrico* o de los *ácidos tricarboxílicos*.

**Ruta cíclica** en la **matriz mitocondrial** (en el citoplasma en prokariotas).

**Degrado/oxidación total del acetil-CoA** (de los dos C del acetilo, lo que quedaba de la glucosa inicial) a  $\text{CO}_2$ . La energía que contenía se libera en forma de energía química (GTP, convertible en ATP) y electrones de alta energía (recogidos por  $\text{NAD}^+$  y  $\text{FAD}$ , que se reducen a  $\text{NADH}$  y  $\text{FADH}_2$  respectivamente).



### -Fórmula general:



cadena respiratoria hasta el oxígeno, generando la mayor parte de la energía de la respiración celular.

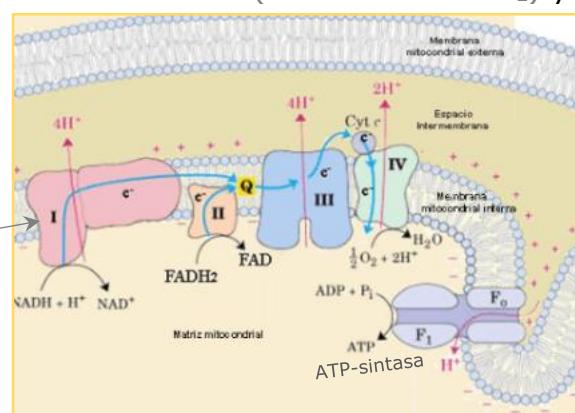
**La molécula de glucosa se ha acabado de degradar completamente a 6 CO<sub>2</sub>**

### 5.3. LA CADENA RESPIRATORIA: TRANSPORTE DE ELECTRONES Y FOSFORILACIÓN OXIDATIVA

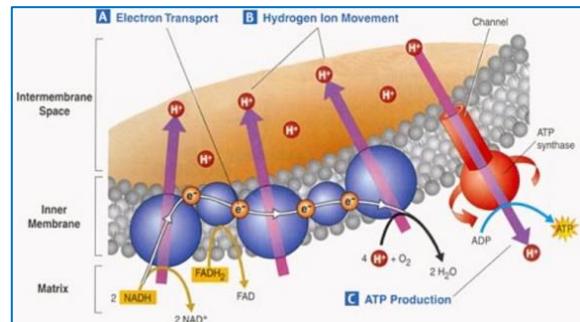
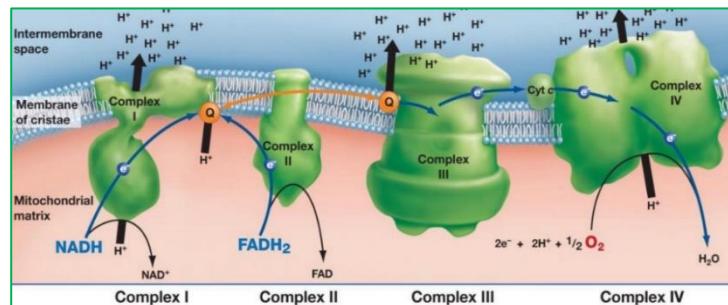
**-Se parte de las moléculas de NADH y FADH<sub>2</sub>** formadas en la glucolisis (2NADH), en la descarboxilación oxidativa (2NADH) y en el ciclo de Krebs (6NADH + 2FADH<sub>2</sub>) y que recogieron los electrones desprendidos en aquellas etapas. Esos electrones de alta energía pasan a una cadena de transporte electrónico (o cadena respiratoria), localizada en la membrana mitocondrial interna y formada por cuatro complejos proteicos transportadores de electrones -I, II, III, IV- (además de la ubiquinona o coenzima Q10, Q y el citocromo C, Cit C).

-Los electrones circulan por la cadena, de unos complejos a otros, por reacciones de oxidación-reducción, de forma espontánea porque se produce desde compuestos en los que tienen un nivel energético mayor a compuestos en los que tienen un nivel energético menor → transporte "cuesta abajo". Así, en ese flujo, a cada paso de un componente a otro, los electrones van liberando parte de su energía. Esa energía se utilizará para formar ATP en las ATP-sintetasas de la membrana mitocondrial interna.

-Los electrones llegan al final de la cadena ya sin energía y son recogidos por el O<sub>2</sub>, acceptor final que, al recibirlos, se reduce a H<sub>2</sub>O (junto con H<sup>+</sup> que se fueron desprendiendo a la vez que los electrones).



**-HIPÓTESIS QUIMIOSMÓTICA DE MITCHEL:** ¿CÓMO SE RELACIONA EL FLUJO DE ELECTRONES Y LA LIBERACIÓN DE SU ENERGÍA CON LA PRODUCCIÓN DE ATP? La energía liberada por los electrones al circular a través de la cadena respiratoria en su avance hasta el O<sub>2</sub> es empleada por algunos componentes de la cadena para *translocar* protones (H<sup>+</sup>), desde la matriz mitocondrial hasta el espacio intermembrana, originándose así un **gradiente electroquímico** en la membrana mitocondrial interna (mayor concentración de H<sup>+</sup> y más cargas + en el espacio intermembrana que en la matriz). Este gradiente hace que los protones tiendan a volver a la matriz, pero debido a la impermeabilidad de la membrana mitocondrial interna, solo pueden pasar a través de la **ATP-sintasa** (o ATPasa), que aprovecha la energía producida por el flujo de H<sup>+</sup> a favor de gradiente para fosforilar ADP y sintetizar ATP. Es la **fosforilación oxidativa**: obtención de ATP en la cadena respiratoria, aprovechando la energía liberada por los electrones del NADH y del FADH<sub>2</sub> en su camino hasta el O<sub>2</sub>, electrones obtenidos en fases anteriores: glucólisis, descarboxilación oxidativa y ciclo de Krebs (previamente, ya se había obtenido ATP por **fosforilación a nivel de sustrato**: ATP obtenido directamente aprovechando la energía liberada en reacciones químicas: en la glucólisis y en el ciclo de Krebs).



#### -Balance:

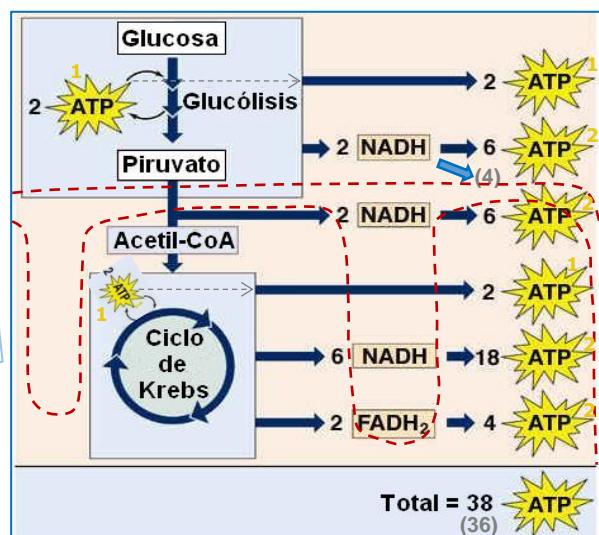
- Por cada NADH: 3ATP.
- Por cada FADH<sub>2</sub>: 2ATP (sus electrones se encuentran en un nivel de energía inferior y entran en la cadena a la altura del complejo II).

#### 5.4. BALANCE FINAL DE LA RESPIRACIÓN CELULAR

-El total de moléculas de ATP obtenidas por cada molécula de glucosa (no fosfatada) en el proceso completo de la respiración celular es la suma de las obtenidas por **fosforilación a nivel de sustrato**<sup>1</sup> (2+2), más las obtenidas por **fosforilación oxidativa**<sup>2</sup> (34). Pueden obtenerse, por tanto, **hasta 38 ATP**.

-El balance de 38 ATP es el máximo teórico, ya que el gradiente de H<sup>+</sup> de la membrana mitocondrial interna puede emplearse para otros fines como el transporte de sustancias a través de la misma membrana.

-Además, las dos moléculas de NADH originadas en la glucólisis se encuentran en el citosol, a diferencia de las demás, que se generan en la matriz mitocondrial. Sus electrones deben llegar a la matriz mitocondrial para poder pasar a la cadena respiratoria y lo hacen mediante intermediarios que recogen sus electrones y los transportan hasta la matriz mitocondrial para que, desde ahí, puedan incorporarse a la cadena respiratoria. Este sistema recibe



el nombre de **lanzadera**. En las células de hígado, corazón y riñón, funciona la **lanzadera del aspartato-malato**, proteína que transporta los electrones del NADH del citosol hasta NAD<sup>+</sup> de la matriz mitocondrial para reducirlo a NADH, que cederá esos electrones al complejo I de la cadena respiratoria, con lo que el balance final es de 38 ATP. En las células del cerebro, del músculo esquelético y en las de los músculos de vuelo de insectos, opera la **lanzadera del glicerol-fosfato**, que transporta los electrones del NADH del citosol hasta FAD<sup>+</sup> de la matriz mitocondrial para reducirlo a FADH<sub>2</sub>, que como vimos cede esos electrones al complejo II, con lo que el balance final es de 36 ATP.



## 6. LA FERMENTACIÓN

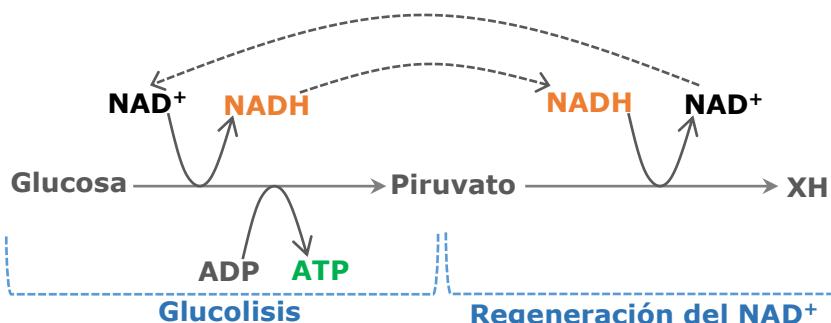
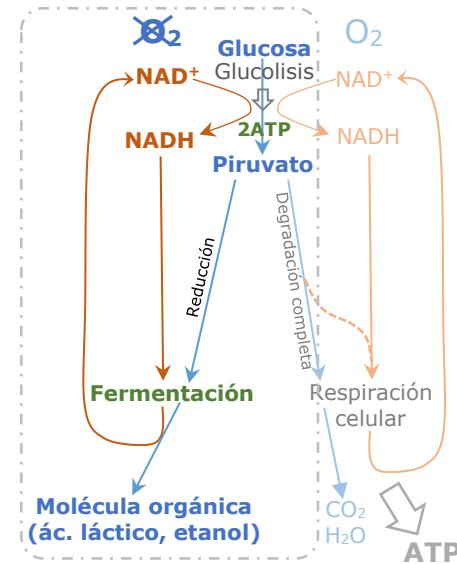
-Constituye una vía catabólica de degradación y **oxidación incompleta** de la glucosa (y otros combustibles orgánicos) mediante la cual las células obtienen energía **en ausencia de oxígeno**. La única vía de obtención de energía (ATP) es la glucolisis, con alguna reacción adicional al final.

-En el **citosol**.

**-La degradación de la glucosa es incompleta:** el producto final es otra molécula orgánica, aún con gran parte de la energía que tenía la glucosa.

-El rendimiento es de **2 ATP por molécula de glucosa**, las obtenidas en la glucolisis.

-El piruvato no continúa su degradación y no interviene la cadena de transporte de electrones, por lo que el NADH producido en la glucolisis no puede ceder sus electrones allí y volver a NAD<sup>+</sup>. El objetivo de las reacciones adicionales de las diferentes fermentaciones es precisamente regenerar el NAD<sup>+</sup> necesario para que continúe la glucolisis. El NADH cede sus electrones a una molécula orgánica (piruvato - acetaldehído), que se reducirá para reoxidar el NADH a NAD<sup>+</sup> (estando así, de nuevo, disponible para la glucolisis) y originará el producto final (ácido láctico - etanol) característico de cada tipo de fermentación.



-En suma, **permite obtener energía sin O<sub>2</sub>** (glucolisis) **y, en su fase final, regenera el NAD<sup>+</sup> para que la glucolisis pueda continuar**.

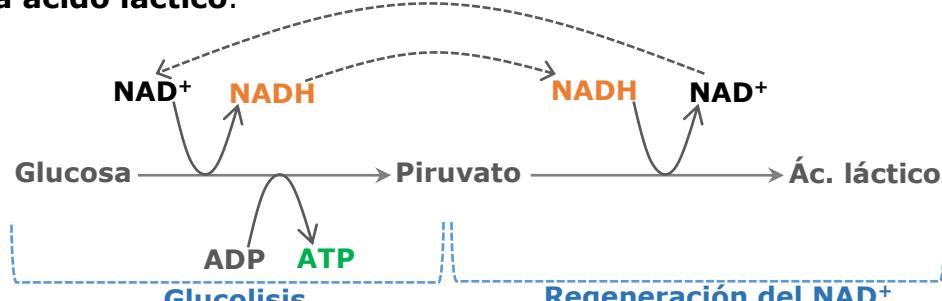
-La llevan a cabo:

- **Anaerobios aerotolerantes y estrictos** (ej. muchas bacterias), como única fuente de energía.
- **Anaerobios facultativos**, como fuente de energía en situaciones de ausencia de oxígeno (ej. células musculares, levaduras).

-Dependiendo de cómo se regenere el NAD<sup>+</sup> en la fase final, se consideran varios tipos de fermentaciones. Dos de ellas son la fermentación láctica y la alcohólica.

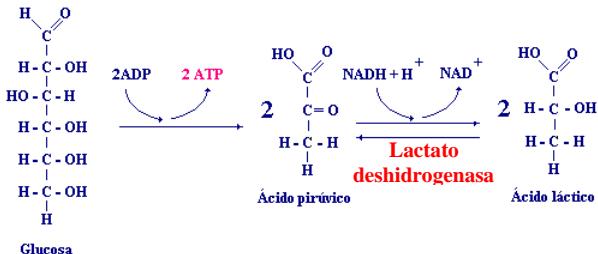
## 6.1. FERMENTACIÓN LÁCTICA

-El **ácido pirúvico** obtenido en la glucolisis recibe los electrones del NADH, siendo así **reducido a ácido láctico**.



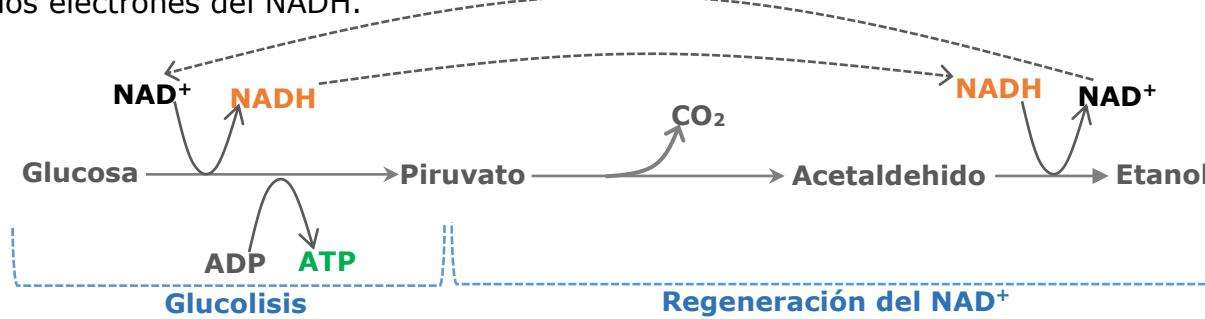
-La realizan microorganismos como las bacterias del género *Lactobacillus*, responsables del agriado de la leche (por producción de ácido láctico al utilizar la lactosa) y de la obtención de sus derivados: yogur, quesos... También se da en las células del músculo esquelético durante ejercicios intensos en los que el aporte de oxígeno es insuficiente para seguir la vía aeróbica. [El ácido láctico del músculo es retirado y transformado en glucosa en la *gluconeogénesis*].

<https://medium.com/cartas-desde-el-imperio/roque-one-13-y-de-postre-un-yogur-a19ba50c023a>

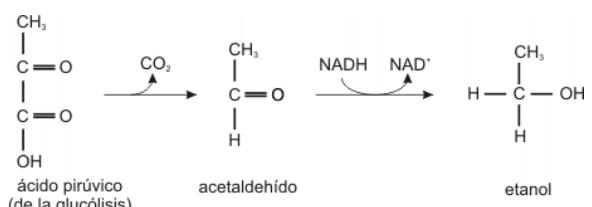


## 6.2. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

-El **ácido pirúvico** obtenido en la glucolisis es **reducido a etanol**, previa descarboxilación que lo transforma en acetaldehído, compuesto que será el que reciba los electrones del NADH.



-La realizan levaduras del género *Saccharomyces*, responsables de la elaboración de bebidas alcohólicas como sidra, vino o cerveza y la del pan.



## 7. EL DESTINO DE LOS ELECTRONES DESPRENDIDOS

-Los electrones liberados en la degradación (oxidación) de moléculas orgánicas (glucosa) tendrán diferentes destinos según el tipo de célula y sus condiciones, pero siempre se transfieren hasta otra molécula que actúa como **aceptor final** de electrones. Según cuál sea ese acceptor final de electrones, las células pueden ser:

- **Aerobias:**  $O_2$ . Mayoría de células.
- **Anaerobias (estrictas):** **Otra molécula inorgánica u orgánica.** Células que viven en entornos sin oxígeno. Algunas bacterias que hacen una respiración anaerobia.
- **Anaerobias facultativas:**  $O_2$  si está presente; si escasea degradan (y oxidan) las moléculas orgánicas por vía anaerobia (*"sin oxígeno"*), acabando los electrones en una **molécula orgánica**. Es lo que ocurre en las vías fermentativas, en las que los electrones del NADH se transfieren al piruvato, que acabará transformándose en otra molécula orgánica (etanol - ácido láctico). Levaduras, células musculares esqueléticas, algunas bacterias.

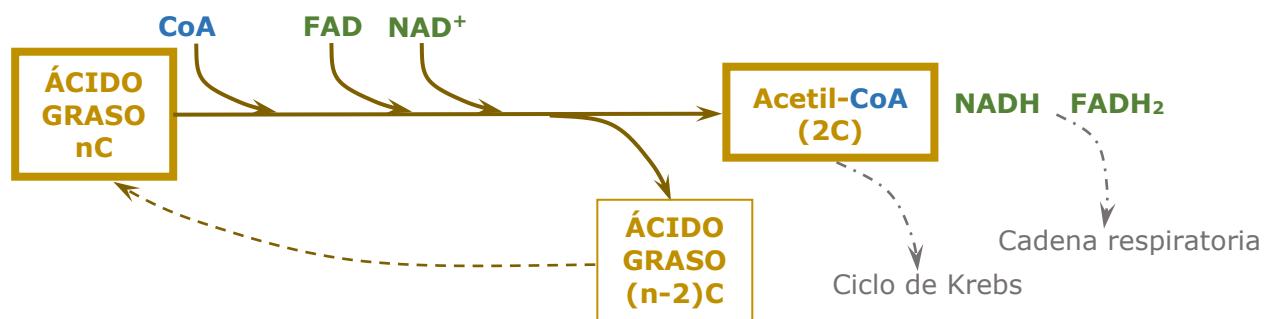
## 8. EL CICLO DE KREBS Y OTRAS RUTAS METABÓLICAS

-El ciclo de Krebs no solo interviene en la degradación de la glucosa, sino que es una vía común a muchas rutas, catabólicas y anabólicas → **carácter anfibólico** (doble función en el metabolismo celular).

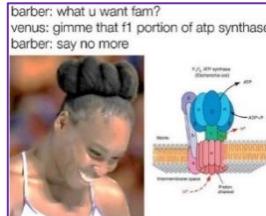
-**FUNCIÓN CATABÓLICA:** El ciclo de Krebs es la ruta en la que converge el catabolismo de glúcidos y lípidos (y algunos aminoácidos) para obtener energía, pues el **acetil-CoA** que se oxida en el ciclo de Krebs **puede proceder, principalmente, de:**

1. Oxidación de la glucosa en la **glucolisis**, como se vio anteriormente.

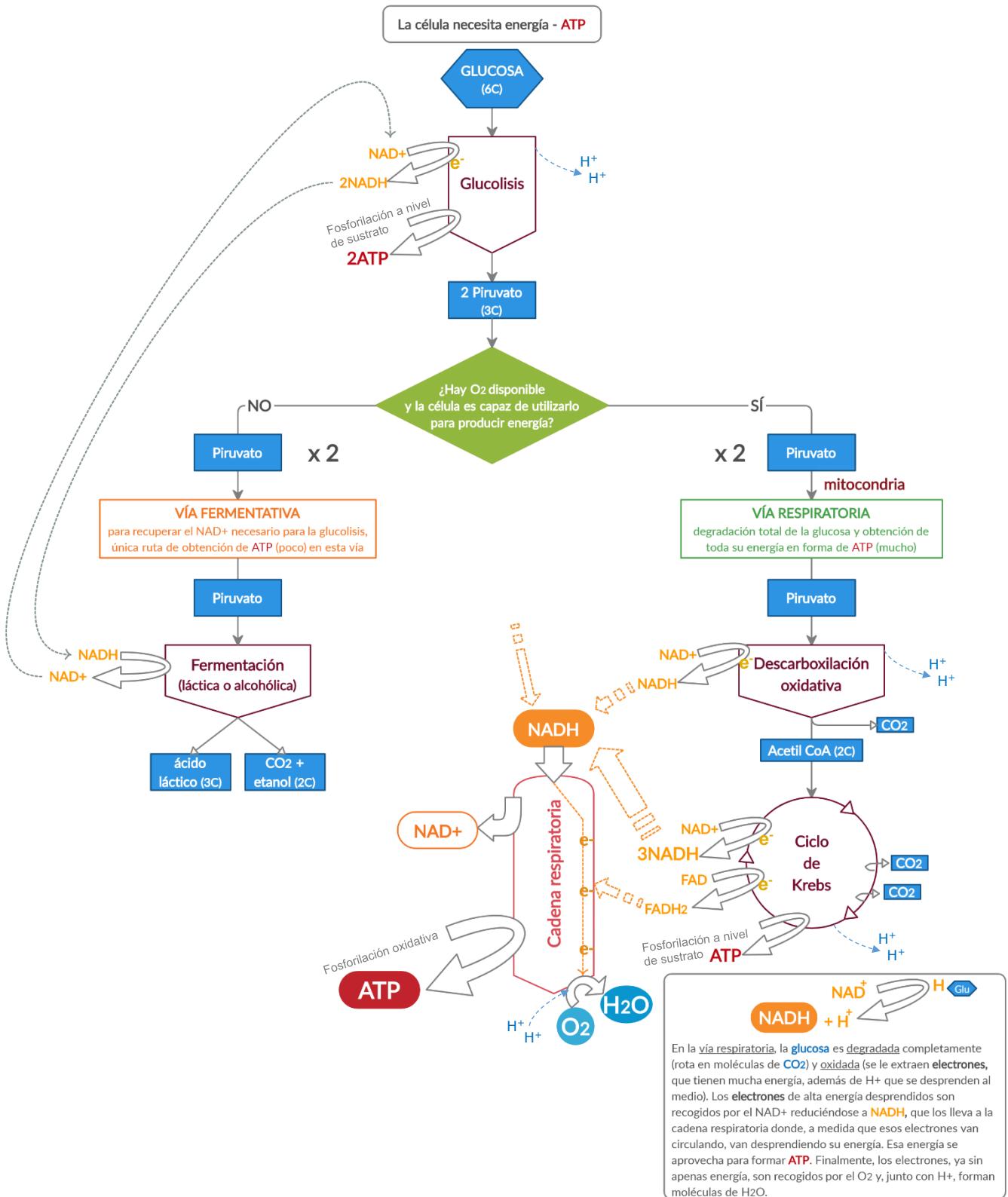
2.  **$\beta$ -oxidación de los ácidos grasos:** Ocurre en la matriz mitocondrial cuando se utilizan las grasas para obtener energía en forma de ATP. Consiste en una secuencia repetida de reacciones de oxidación (por  $NAD^+$  y FAD) que van separando fragmentos de 2C (en forma de acetil-CoA) sucesivamente en cada ciclo repetido del proceso, hasta que el ácido graso se degrada por completo en forma de moléculas de acetil-CoA. Estas entrarán en el ciclo de Krebs y los coenzimas reducidos (NADH y  $FADH_2$ ) irán directamente a la cadena respiratoria, para generar ATP.



-**FUNCIÓN ANABÓLICA:** El ciclo de Krebs aporta precursores para las rutas biosintéticas de muchas moléculas como ciertos aminoácidos, glucosa, ácidos grasos o bases nitrogenadas.



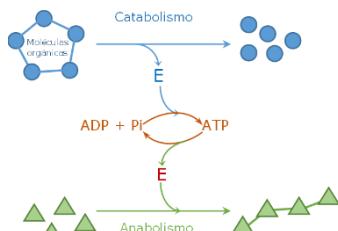
# VISIÓN GLOBAL DEL CATABOLISMO



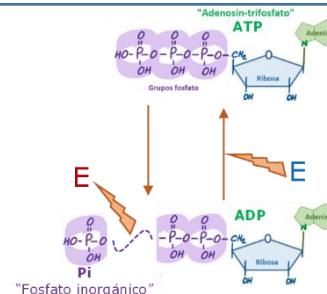
## LA ENERGÍA EN EL METABOLISMO

**-CATABOLISMO:** Procesos de **degradación** (y oxidación) de moléculas orgánicas. Se libera **energía** → para formar ATP.

**-ANABOLISMO:** Procesos de **biosíntesis** (y reducción) de moléculas. Se **necesita energía** ← aportada por el ATP.



La energía utilizada para procesos de anabolismo es la desprendida por reacciones de catabolismo, a través de un **intermediario transportador de energía**, el **ATP**, única forma útil de energía para los procesos celulares.



### **-UTILIDADES DEL ATP:**

- Biosíntesis de moléculas (anabolismo).
- Movimiento: cilios-flagelos.
- Trabajo mecánico: contracción muscular, citocinesis.
- Transporte activo a través de membrana.
- Generación de **potenciales de membrana**.
- Producción de **formas especiales de energía** como la bioluminiscencia.

**-TIPOS DE CÉLULAS** según tipo de moléculas que incorporan para conseguir moléculas orgánicas:

- **Fotoautótrofas o fotosintéticas:** Luz solar como fuente de energía.
- **Autótrofas:** Utilizan moléculas inorgánicas para sintetizar moléculas orgánicas.
- **Quimioautótrofas o quimiosintéticas:** Energía liberada de reacciones químicas.
- **Heterótrofas:** Incorporan moléculas orgánicas de otros seres vivos.

## EL CATABOLISMO

Reacciones químicas secuenciales en las que moléculas orgánicas (ej, glucosa) son **degradadas** y **oxidadas** (se desprenden sus electrones). Se libera energía y electrones de alta energía.

**Degradación y oxidación de moléculas orgánicas para obtener energía en forma de ATP.**

**-GLUCOLISIS:** Proceso anaerobio, en el citoplasma.

**Degradación parcial de la glucosa (6C) a ácido pirúvico 2x(3C)**

- **Primera etapa:** Se gastan 2ATP.
- **Segunda etapa:** Se obtienen 4ATP y 2NADH (el NAD<sup>+</sup> recoge los electrones desprendidos).



La glucolisis es la única vía de obtención de ATP en condiciones anaeróbicas, pero si hay O<sub>2</sub> y la célula es capaz de utilizarlo, la glucolisis es solo una fase inicial y la glucosa continuará su degradación total por la vía de la **respiración celular**, obteniéndose mucho más ATP.

**-RESPIRACIÓN CELULAR:** Proceso aerobio, en la mitocondria.

**Degradación total del piruvato de la glucolisis hasta CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, en presencia de oxígeno**

**1. DESCARBOXILACIÓN OXIDATIVA:** El piruvato entra en la matriz mitocondrial y libera 1CO<sub>2</sub>.  

$$[\text{Ácido pirúvico} \rightarrow \text{Acetyl-coenzima A} (+ 1\text{CO}_2 + 1\text{NADH})] \times 2$$

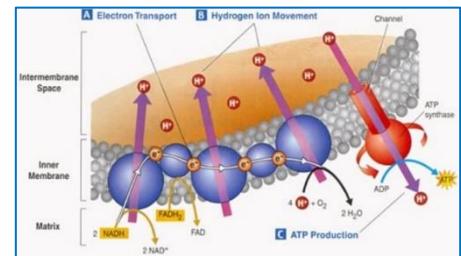
**2. CICLO DE KREBS:** En la matriz mitocondrial. **Degradación/oxidación total del Acetyl-CoA a 2CO<sub>2</sub>**. La energía se libera en forma de energía química (GTP→ATP) y electrones de alta energía (recogidos por NAD<sup>+</sup> y FAD → NADH y FADH<sub>2</sub>).

$$[\text{Acetyl CoA} + \text{ADP} + \text{Pi} + 3\text{NAD}^+ + \text{FAD} \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{CoA-SH} + \text{ATP} + 3\text{NADH} + \text{FADH}_2] \times 2$$
  
 La molécula de glucosa se ha acabado de degradar completamente a 6CO<sub>2</sub>

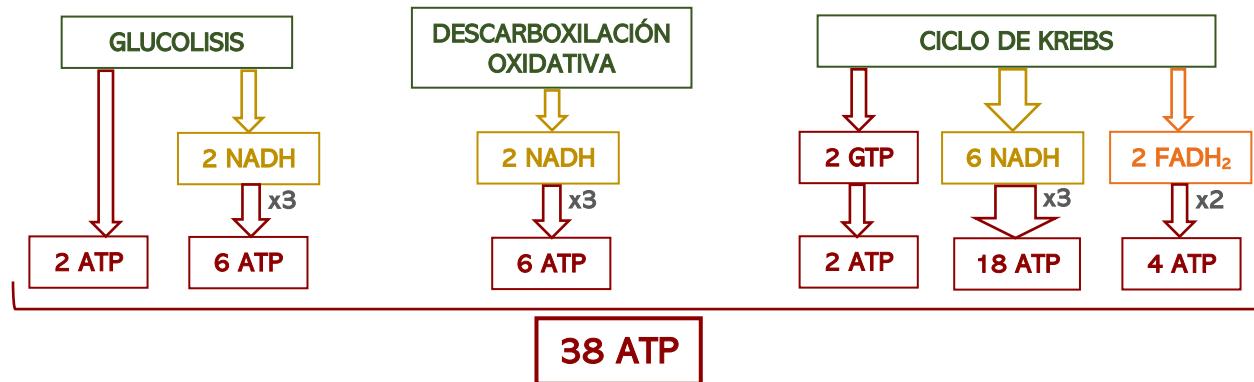
**3. CADENA RESPIRATORIA: TRANSPORTE DE ELECTRONES Y FOSFORILACIÓN OXIDATIVA:** Se parte de los electrones desprendidos en la glucolisis, en la descarboxilación oxidativa y en el ciclo de Krebs.



- Los transportadores de electrones ceden sus electrones de alta energía a una cadena de transporte electrónico (cadena respiratoria), formada por 4 complejos proteicos en la membrana mitocondrial interna.
- Los electrones circulan por la cadena liberando su energía, que se utiliza para bombear protones al espacio intermembrana → gradiiente electroquímico en la membrana mitocondrial interna → los H<sup>+</sup> tienden a volver a la matriz, a través de las ATP-sintetasas → generación de ATP.
- Los electrones llegan al final de la cadena ya sin energía y son recogidos por el O<sub>2</sub>, acceptor final que, al recibirlos, se reduce a H<sub>2</sub>O (junto con H<sup>+</sup> que se fueron desprendiendo a la vez que los electrones).



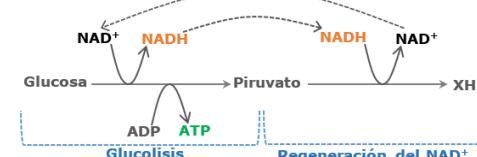
### BALANCE FINAL DE LA RESPIRACIÓN CELULAR



**-FERMENTACIÓN:** Vía anaeróbica de degradación incompleta de la glucosa, en el citoplasma.

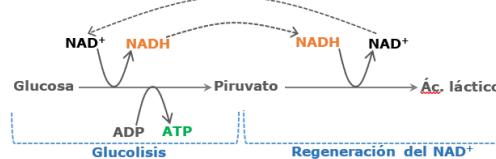
Degradación parcial, sin oxígeno, de la glucosa, a otra molécula orgánica → 2ATP (glucolisis)

- El piruvato de la glucolisis no continua su degradación, sino que se reducirá recibiendo los electrones del NADH para recuperar el NAD<sup>+</sup> consumido en la glucolisis.
- Permite obtener energía sin O<sub>2</sub> (glucolisis) y, en su fase final, regenera el NAD<sup>+</sup> para que la glucolisis pueda continuar.
- La realizan anaerobios aerotolerantes y estrictos y anaerobios facultativos.



**Láctica:** Ácido pirúvico es reducido a ácido láctico.

- Bacterias del género Lactobacillus → obtención de yogur, queso.
- Células del músculo esquelético con aporte insuficiente de oxígeno.



**Alcohólica:** Ácido pirúvico es reducido a etanol, previa descarboxilación a acetaldehído.

- Levaduras del género Saccharomyces → elaboración de pan, sidra, vino, cerveza.

