

# MICROBIOLOGÍA

## UNIDAD IV FISIOLOGÍA Y METABOLISMO MICROBIANO

Nutrición procariota. Nutrientes. Formas de obtención de energía. Microorganismos autótrofos y heterótrofos: fotótrofos, quimiolitótrofos y quimiorganótrofos. Fotosíntesis oxigénica y anoxigénica. Metabolismo quimiolitotrófico. Donadores inorgánicos de electrones. Metabolismo quimiorganotrofo. Asimilación de carbono: Fijación de  $\text{CO}_2$ . Asimilación de nitrógeno: fijación de  $\text{N}_2$ . Reducción asimilatoria de nitrato y nitrito. Otras fuentes de nitrógeno. Asimilación de amonio. Catabolismo de hidratos de carbono. Degradación de glucosa a piruvato (glucólisis, vía de las pentosa-fosfato y vía de Entner-Doudoroff). Fermentación. Ciclo de los ácidos tricarbónicos. Ciclo del glioxilato. Catabolismo de lípidos y proteínas. Tipos de fermentación. Metabolismo respiratorio: respiración aerobia y respiración anaerobia.



# NUTRICIÓN BACTERIANA

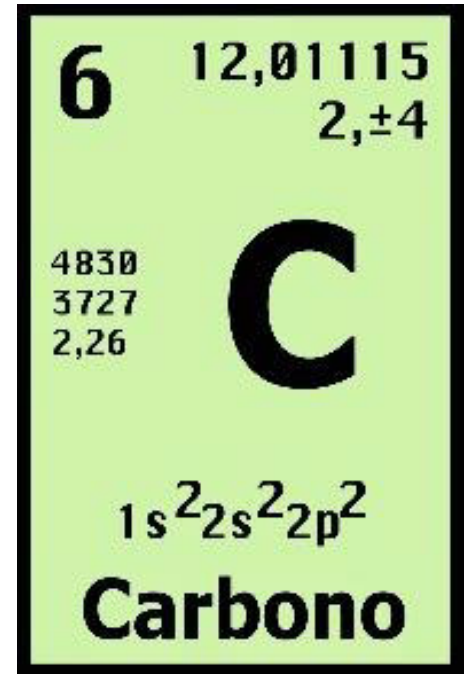


- ❖ Antes de que una célula se divida, deben ocurrir muchas reacciones químicas y las moléculas deben organizarse para formar estructuras específicas.
- ❖ Estas reacciones se denominan colectivamente **METABOLISMO**.
- ❖ Las reacciones metabólicas que liberan energía se llaman reacciones **CATABÓLICAS**, y las que consumen energía, y se llaman reacciones **ANABÓLICAS**.
- ❖ La nutrición microbiana es un aspecto de la fisiología microbiana que trata sobre los monómeros (o ingredientes precursores de los monómeros) que la célula necesita para crecer: los **NUTRIENTES**.
- ❖ La mayor parte de lo que se conoce acerca de las actividades metabólicas de los microorganismos deriva del estudio de cultivos en el laboratorio y de los nutrientes que necesitan para crecer.
- ❖ Organismos diferentes necesitan tipos diferentes de nutrientes y no todos se necesitan en la misma cantidad.
- ❖ Los **MACRONUTRIENTES** se requieren en grandes cantidades, mientras que los **MICRONUTRIENTES** se necesitan en menores cantidades, y a veces sólo como trazas.

# CARBONO



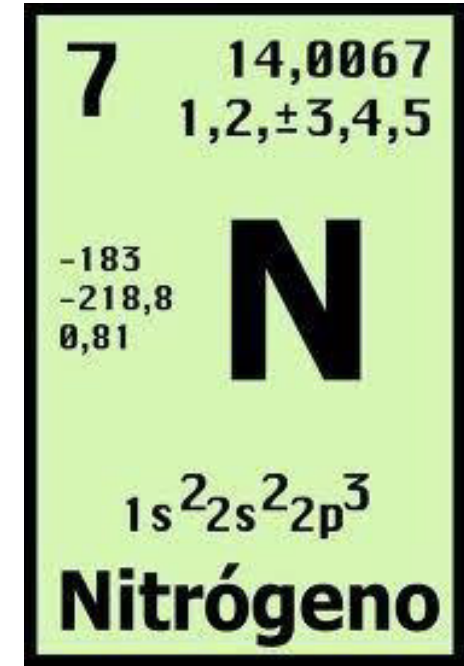
- ❖ **TODAS** las células lo necesitan y la mayoría de los procariotas requieren compuestos **ORGÁNICOS** como fuente de carbono.
- ❖ En términos de peso seco, una célula típica contiene aproximadamente 50% de carbono.
- ❖ Las bacterias pueden asimilar varios compuestos **ORGÁNICOS** carbonados (aminoácidos, ácidos grasos, ácidos orgánicos, azúcares, bases nitrogenadas, compuestos aromáticos) y usarlos para hacer nuevo material celular.
- ❖ Algunos procariotas son **AUTÓTROFOS**, es decir, capaces de construir todas sus estructuras orgánicas a partir de  $\text{CO}_2$  con la energía obtenida de la **LUZ** o de compuestos **INORGÁNICOS**.



# NITRÓGENO



- ❖ Después del carbono, el nitrógeno es el siguiente elemento más abundante en la célula.
- ❖ En una bacteria típica alrededor del 12% de su peso seco es nitrógeno, ya que es un elemento importante en las proteínas, en los ácidos nucleicos y en otros constituyentes celulares.
- ❖ En la naturaleza, el nitrógeno se presenta en forma inorgánica y orgánica.
- ❖ Sin embargo, la mayor parte del nitrógeno natural disponible está en forma INORGÁNICA, como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) o nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ).
- ❖ La mayor parte de las bacterias son capaces de usar  $\text{NH}_3$  como única fuente de nitrógeno, y otras muchas pueden usar  $\text{NO}_3^-$ .
- ❖ El  $\text{N}_2$  puede ser usado como fuente de nitrógeno por algunas bacterias: las fijadoras de nitrógeno.



# TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS MICROBIANOS

Grupo → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

Período ↓

1	1 H																2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn

**Clave:**

- Esencial para todos los microorganismos
- Cationes y aniones esenciales para la mayoría
- Metales traza, algunos esenciales para algunos microorganismos
- Empleados en funciones especiales
- No esenciales pero metabolizados
- No esenciales ni metabolizados

- ❖ Todos los nutrientes se originan a partir de elementos químicos.
- ❖ Pero solamente unos cuantos de estos elementos son los que predominan en biología.

# Tabla periódica de los elementos

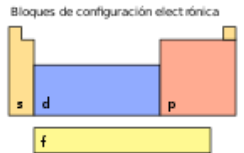
grupo 1																	18					
1	1.00794 1 H Hidrogeno																	4.002602 2 He Helio				
periodo 1																						
2	6.941 3 Li Litio	9.012182 4 Be Berilio															12.0107 6 C Carbono	14.0067 7 N Nitrogeno	15.9994 8 O Oxigeno	18.998403 9 F Fluor	20.1797 10 Ne Neon	
3	22.989769 11 Na Sodio	24.3050 12 Mg Magnesio															26.981538 13 Al Aluminio	28.0855 14 Si Silicio	30.973762 15 P Fosforo	32.065 16 S Azufre	35.453 17 Cl Cloro	39.948 18 Ar Argon
4	39.0983 19 K Potasio	40.078 20 Ca Calcio	44.955912 21 Sc Escandio	47.867 22 Ti Titanio	50.9415 23 V Vanadio	51.9962 24 Cr Cromo	54.938045 25 Mn Manganeso	55.845 26 Fe Hierro	58.933197 27 Co Cobalto	58.6934 28 Ni Niquel	63.546 29 Cu Cobre	65.38 30 Zn Zinc	69.723 31 Ga Galio	72.64 32 Ge Germanio	74.921603 33 As Arsenico	78.96 34 Se Selenio	79.904 35 Br Bromo	83.798 36 Kr Kripton				
5	85.4678 37 Rb Rubidio	88.90585 38 Sr Estroncio	91.224 39 Y Itrio	92.90638 40 Zr Zirconio	95.96 41 Nb Niobio	97.905 42 Mo Molibdeno	(98) 43 Tc Tecnecio	101.07 44 Ru Rutenio	102.9055 45 Rh Rodio	106.42 46 Pd Paladio	107.8682 47 Ag Plata	112.444 48 Cd Cadmio	114.818 49 In Indio	118.710 50 Sn Estanio	121.760 51 Sb Antimonio	127.60 52 Te Telurio	126.9045 53 I Yodo	131.293 54 Xe Xenon				
6	132.90545 55 Cs Cesio	137.327 56 Ba Bario	174.9668 71 Lu Lutecio	178.49 72 Hf Hafnio	180.9478 73 Ta Tantalio	183.84 74 W Wolframio	186.207 75 Re Renio	190.23 76 Os Osmio	192.221 77 Ir Iridio	195.084 78 Pt Platino	196.96657 79 Au Oro	200.59 80 Hg Mercurio	204.3833 81 Tl Talio	207.2 82 Pb Plomo	208.9804 83 Bi Bismuto	(210) 84 Po Polonio	(210) 85 At Astato	(220) 86 Rn Radon				
7	223 87 Fr Francio	226 88 Ra Radio	261 103 Lr Lawrencio	261 104 Rf Rutherfordio	262 105 Db Dubnio	263 106 Sg Seaborgio	264 107 Bh Bohrio	(277) 108 Hs Hessio	(269) 109 Mt Meitnerio	(271) 110 Ds Darmstatio	(272) 111 Rg Roentgenio	(285) 112 Cn Copernicio	(284) 113 Nh Nihonio	(289) 114 Fl Flerovio	(288) 115 Mc Moscovio	(292) 116 Lv Livermorio	(294) 117 Ts Teneso	(294) 118 Og Oganesson				

masa atómica o número másico del isótopo más estable  
 1.ª energía de ionización en kJ/mol  
 símbolo químico  
 nombre  
 configuración electrónica

número atómico  
 electronegatividad  
 estados de oxidación más comunes están en negrita

metales alcalinos  
 alcalinotérreos  
 otros metales  
 metales de transición  
 lantánidos  
 actínidos

metaloides  
 no metales  
 halógenos  
 gases nobles  
 elementos desconocidos masas de elem entre paréntesis  
 ☠️



Notas

- 1 kJ/mol = 96.485 eV.
- Todos los elementos tienen un estado de oxidación implícito cero.
- Los estados de oxidación de los elementos 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.

138.90547 57 La Lantano	140.116 58 Ce Cerio	140.90765 59 Pr Praseodimio	144.242 60 Nd Neodimio	(145) 61 Pm Prometio	150.36 62 Sm Samario	151.964 63 Eu Europio	157.25 64 Gd Gadolinio	158.92535 65 Tb Terbio	162.500 66 Dy Disprosio	164.93033 67 Ho Holmio	167.259 68 Er Erbio	168.934 69 Tm Tulio	173.054 70 Yb Iterbio
(227) 89 Ac Actinio	232.03759 90 Th Torio	231.03588 91 Pa Protactinio	238.02891 92 U Urano	(237) 93 Np Neptunio	(244) 94 Pu Plutonio	(243) 95 Am Americio	(247) 96 Cm Curio	(247) 97 Bk Berkelio	(251) 98 Cf Californio	(252) 99 Es Einstenio	(257) 100 Fm Fermio	(258) 101 Md Mendelevio	(259) 102 No Nobelio

- ❖ Excepto el URANIO, que puede ser metabolizado por algunos procariontes, ningún elemento del período 7 o superior resulta metabolizado.
- ❖ El número atómico de cada elemento se muestra en la esquina superior derecha de cada recuadro.

# MACRONUTRIENTES

Elementos esenciales que se requieren en menores cantidades que el C y el N.

Elemento	FORMA NORMAL DEL NUTRIENTE EN EL AMBIENTE
C	CO <sub>2</sub> , compuestos orgánicos
H	H <sub>2</sub> O , compuestos orgánicos
O	H <sub>2</sub> O , O <sub>2</sub> , compuestos orgánicos
N	NH <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , compuestos orgánicos nitrogenados
P	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (síntesis de ácidos nucleicos y fosfolípidos)
S	H <sub>2</sub> S, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , compuestos orgánicos con S, sulfuros metálicos (FeS, CuS, ZnS, NiS) (componente estructural de aminoácidos cisteína y metionina)
K	K <sup>+</sup> en solución, o como sales de K
Mg	Mg <sup>2+</sup> en solución, o como sales de Mg (estabilizador de ribosomas, membranas celulares y ácidos nucleicos, actividad de muchas enzimas)
Na	Na <sup>+</sup> en solución, o como NaCl y otras sales de Na (estabiliza la pared celular, importante en la termorresistencia de Endosporas).
Ca	Ca <sup>2+</sup> en solución, o como CaSO <sub>4</sub> y otras sales de Ca
Fe	Fe <sup>2+</sup> o Fe <sup>3+</sup> en solución, o como FeS, Fe(OH) <sub>3</sub> y otras sales de Fe



## MICRONUTRIENTES (ELEMENTOS TRAZA)

Elemento	Función celular
Boro (B)	Presente como inductor en bacterias del <i>quorum sensing</i> ; también en la estructura de algunos antibióticos.
Cromo (Cr)	Requerido por los mamíferos para el metabolismo de la glucosa; posible requerimiento por microorganismos, pero no demostrado.
Cobalto (Co)	Vitamina B <sub>12</sub> ; transcaboxilasa (bacterias del ácido propiónico).
Cobre (Cu)	En la respiración, citocromo c oxidasa; en fotosíntesis, plastocianina; algunas superóxido dismutasas.
Hierro (Fe) <sup>b</sup>	Citocromos, catalasas, peroxidasas, proteínas con Fe y S, oxigenasas, todas las nitrogenasas
Manganeso (Mn)	Activador de muchas enzimas; presente en algunas superóxido dismutasas y en la enzima que rompe el agua en fotótrofos oxigénicos (fotosistema II).
Molibdeno (Mo)	Algunas enzimas que contienen flavinas; algunas nitrogenasas, nitrato reductasa, sulfito oxidasa, DMSO-TMAO reductasas, algunas formato deshidrogenasas.
Níquel (Ni)	La mayoría de las hidrogenasas; coenzima F <sub>430</sub> de metanógenos; deshidrogenasa del monóxido de carbono; ureasa.
Selenio (Se)	Formato deshidrogenasa; algunas hidrogenasas; el aminoácido selenocisteína.
Tungsteno (W)	Algunas formato deshidrogenasas; oxotransferasas de los hipotermófilos.
Vanadio (V)	Vanadio nitrogenasa; bromoperoxidasa.
Zinc (Zn)	Anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa, RNA y DNA polimerasas, y muchas proteínas que se unen al DNA.



## FACTORES DE CRECIMIENTO



- ❖ Compuestos orgánicos que se necesitan en muy pequeñas cantidades.
- ❖ Vitaminas, aminoácidos, purinas y pirimidinas.
- ❖ Solo algunas bacterias los necesitan, ya que la mayor parte de los microorganismos son capaces de sintetizar estos compuestos.
- ❖ Algunos requieren uno o más preformados en el medio, y en consecuencia deben estar presentes cuando se cultivan en el laboratorio.

## LAS VITAMINAS



- ❖ Factores de crecimiento que se necesitan más frecuentemente.
- ❖ Muchas funcionan formando parte de coenzimas.
- ❖ Los requerimientos vitamínicos varían mucho entre los microorganismos, desde ninguno a varios.
- ❖ Las bacterias lácticas *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc* se destacan por sus requerimientos vitamínicos complejos, que son aun más amplios que los humanos.



# VITAMINAS Y SUS FUNCIONES



Vitamina	Función
Ácido <i>p</i> -aminobenzoico	Precursor del ácido fólico.
Ácido fólico	Metabolismo de compuestos de un carbono; transferencia de grupos metilo.
Biotina	Biosíntesis de ácidos grasos; $\beta$ -decarboxilaciones; algunas reacciones de fijación de CO <sub>2</sub>
Cobalamina (B12)	Reducción y transferencia de restos monocarbonados; síntesis de desoxirribosa
Ácido lipoico	Transferencia de grupos acilo en la decarboxilación del piruvato y $\alpha$ -cetoglutarato.
Ácido nicotínico	Precursor del NAD <sup>+</sup> ; transferencia de $e^-$ en reacciones redox.
Ácido pantoténico	Precursor del coenzima A; activación del acetilo y derivados acilados.
Riboflavina	Precursor del FMN, FAD en flavoproteínas implicadas en transporte de $e^-$ .
Tiamina (B1)	$\alpha$ -decarboxilaciones; transcetolasa
Vitaminas B6 (grupo piridoxal-piridoxamina)	Transformaciones de aminoácidos y cetoácidos.
Grupo vitamina K; quinonas	Transporte de $e^-$ ; síntesis de esfingolípidos.
Hidroxamatos	Compuestos que unen hierro; solubilización y transporte del hierro al interior celular.



# FORMAS DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA

## DIVERSIDAD METABÓLICA

- ❖ Los microorganismos han aprovechado cada modo de vida posible que esté de acuerdo con las leyes físicas y químicas.
- ❖ Esta enorme versatilidad ha determinado que ocupen todos los hábitats posibles de nuestro planeta.

### TODOS LOS MICROORGANISMOS

Requieren energía

Un método que permita conservarla para otros usos

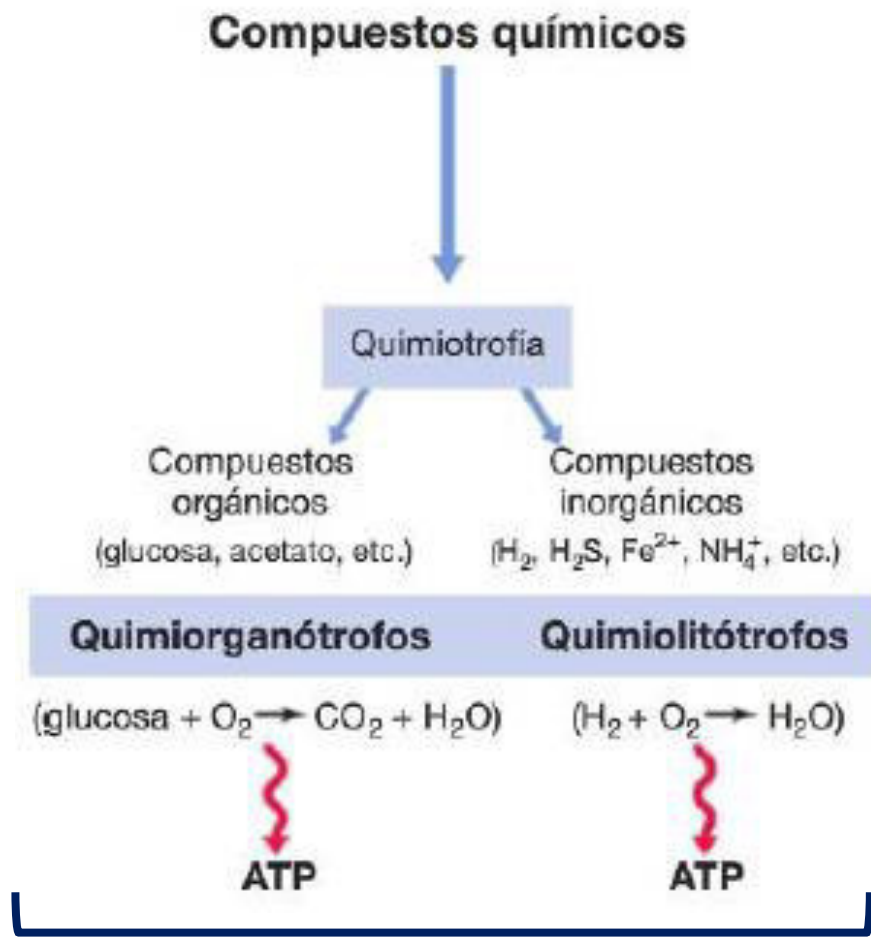
En la naturaleza la energía puede obtenerse a partir de 3 fuentes

COMPUESTOS  
ORGÁNICOS

COMPUESTOS  
INORGÁNICOS

LUZ

# OPCIONES METABÓLICAS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA



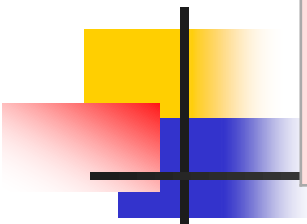
Los organismos quimiótrofos **OXIDAN** compuestos **ORGÁNICOS** o **INORGÁNICOS** para producir ATP.



Los organismos fotótrofos convierten la **ENERGÍA SOLAR** en **ENERGÍA QUÍMICA** en forma de ATP.



FUENTE DE ENERGÍA	FUENTE REDUCTORA	FUENTE DE CARBONO	NOMBRE
Luz <i>Foto-</i>	Orgánico <i>-organo-</i>	Orgánico <i>-heterótrofo</i>	Fotoorganoheterótrofo
		Dióxido de carbono <i>-autótrofo</i>	Fotoorganoautótrofo
	Inorgánico <i>-lito-</i>	Orgánico <i>-heterótrofo</i>	Fotolitoheterótrofo
		Dióxido de carbono <i>-autótrofo</i>	Fotolitoautótrofo
Compuestos químicos <i>Quimio-</i>	Orgánico <i>-organo-</i>	Orgánico <i>-heterótrofo</i>	Quimioorganoheterótrofo
		Dióxido de carbono <i>-autótrofo</i>	Quimioorganoautótrofo
	Inorgánico <i>-lito-</i>	Orgánico <i>-heterótrofo</i>	Quimiolitoheterótrofo
		Dióxido de carbono <i>-autótrofo</i>	Quimiolitoautótrofo

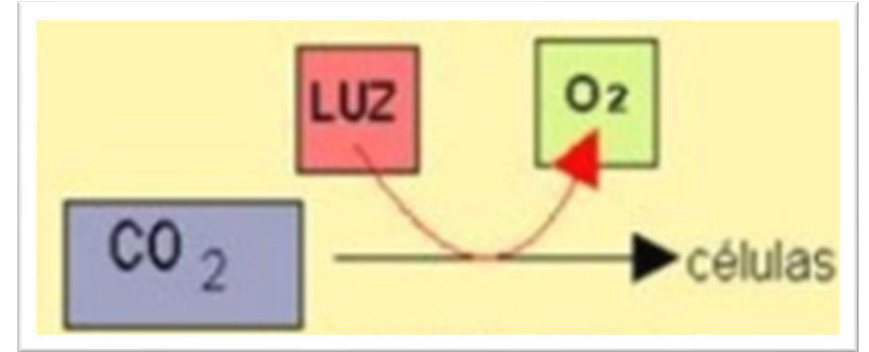




FUENTE DE ENERGÍA	FUENTE DE CARBONO	NOMBRE
Luz <i>FOTO-</i>	Orgánico <i>-HETERÓTROFO</i>	<b>FOTOHETERÓTROFO</b>
	Inorgánico (CO <sub>2</sub> ) <i>-AUTÓTROFO</i>	<b>FOTOAUTÓTROFO</b>
Compuestos químicos <i>QUIMIO-</i>	Orgánico <i>-HETERÓTROFO</i>	<b>QUIMIOHETERÓTROFO</b>
	Inorgánico (CO <sub>2</sub> ) <i>-AUTÓTROFO</i>	<b>QUIMIOAUTÓTROFO</b>

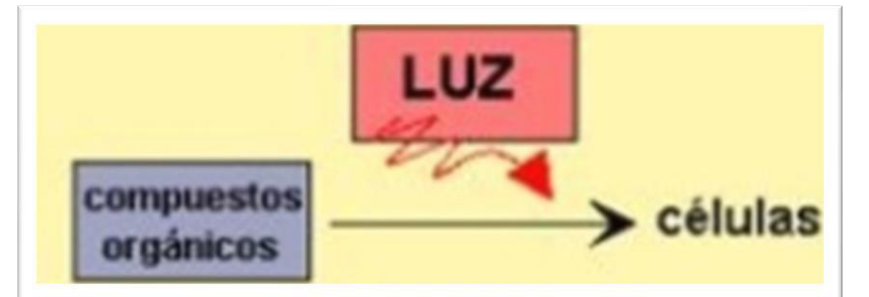
## FOTOAUTÓTROFOS

Utilizan la luz como fuente de energía y  $\text{CO}_2$  como fuente de carbono. Esta categoría incluye, vegetales superiores, algas eucarióticas, algas verdeazuladas y bacterias fotosintéticas.



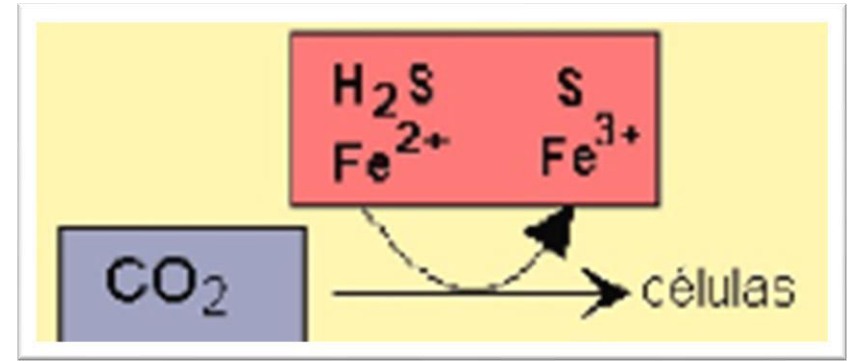
## FOTOHETERÓTROFOS

Utilizan la luz como fuente de energía y compuestos orgánicos como fuente principal de carbono. En esta categoría se incluyen, algunas algas eucarióticas y bacterias no-sulfobacterias (bacterias fotosintéticas).



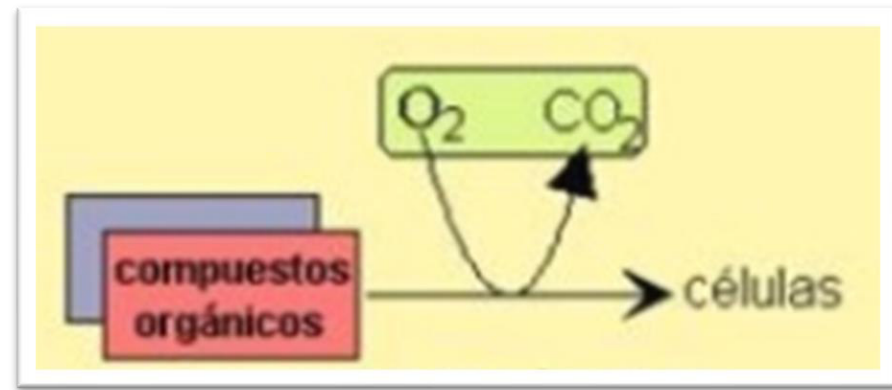
## QUIMIOAUTÓTROFOS

Emplean como energía, la energía química de compuestos inorgánicos reducidos y  $\text{CO}_2$  como fuente principal de carbono. Es una categoría exclusiva de un grupo especializado de bacterias, entre las que se destacan, bacterias nitrificantes, que utilizan ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) y las que llevan a cabo la oxidación de compuestos reducidos del azufre ( $\text{SH}_2$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ).



## QUIMIOHETERÓTROFOS

La fuente de energía y la fuente de carbono provienen de compuestos orgánicos. Esta categoría incluye a todos los animales superiores (consumidores), hongos y protozoos y la gran mayoría de bacterias.

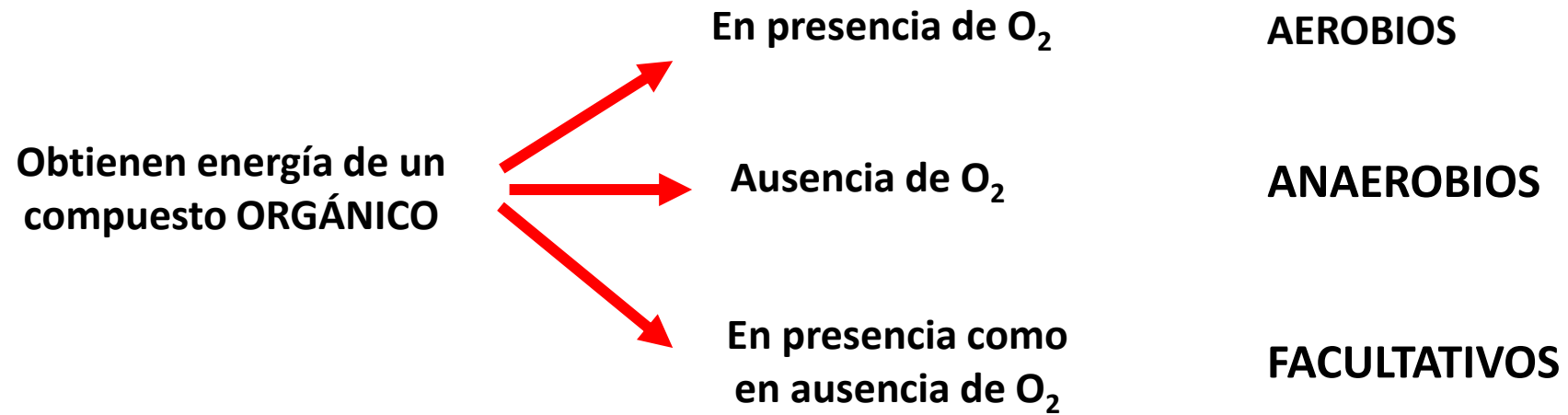






# QUIMIOHETERÓTROFOS

- ❖ Usan como FUENTE DE ENERGÍA compuestos QUIMICOS.
- ❖ Usan como fuente de C compuestos ORGÁNICOS.



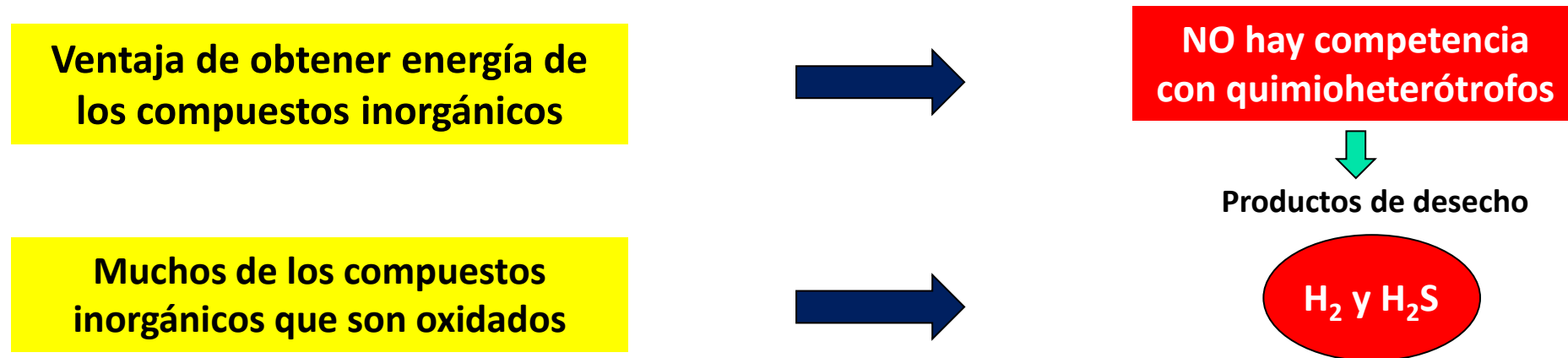


# QUIMIOAUTOTRÓFOS



- ❖ Usan como FUENTE DE ENERGÍA compuestos QUIMICOS.
- ❖ Usan como fuente de C compuestos INORGÁNICOS.

Sólo se da en procariontas: muchas bacterias y arqueas

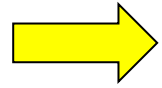


- ❖ Desarrollaron estrategias para explotar recursos que los quimioheterótrofos NO PUEDEN USAR.

# FOTÓTROFOS



Utilizan la LUZ como fuente de energía para generar ATP



Pigmentos



células coloreadas

- ❖ Obtienen energía de la LUZ SOLAR: sintetizan ATP.
- ❖ Esto supone una ventaja muy significativa, ya que no existen problemas de competencia para obtener energía con los quimiótrofos
- ❖ Y la luz está disponible en una amplia variedad de hábitats microbianos.
- ❖ Poseen BACTERIOCLOROFILA que usa  $H_2S$  en vez de  $H_2O$ .
- ❖ La bacterioclorofila usa un espectro de luz más amplio que el que usa la clorofila ya que se extiende desde el infrarrojo al ultravioleta.

FUENTE DE ENERGÍA	FUENTE DE CARBONO	NOMBRE
Luz <i>FOTO-</i>	Orgánico <i>-HETERÓTROFO</i>	<b>FOTOHETERÓTROFO</b>
	Inorgánico ( $CO_2$ ) <i>-AUTÓTROFO</i>	<b>FOTOAUTÓTROFO</b>



## FOTOAUTÓTROFOS

- Usan la energía de la luz solar para fijar el  $\text{CO}_2$ .
- Se combina con  $\text{H}_2\text{O}$  para sintetizar moléculas orgánicas (glucosa).
- Usadas en los procesos anabólicos y respiración celular.

## FOTOHETERÓTROFOS

- No usan  $\text{H}_2\text{O}$  como donador de  $e^-$  y por lo tanto NO producen  $\text{O}_2$ .
- Son AERÓBIOS porque utilizan  $\text{O}_2$  como aceptor final de  $e^-$  en la respiración.



## FOTOSÍNTESIS

### OXIGÉNICA

Produce  $\text{O}_2$

Cianobacterias  
(Plantas superiores y algas)

### ANOXIGÉNICA

NO se produce  $\text{O}_2$

Bacterias rojas y verdes

*Chloroflexi*   *Chlorobi*



## HETERÓTROFAS



Compuestos **ORGÁNICOS**

**QUIMIOHETERÓTROFOS**

Fuente de carbono  
nutriente esencial

## AUTÓTROFAS



**CO<sub>2</sub>**

Muchos **QUIMIOAUTÓTROFOS** y  
prácticamente todos los **FOTÓTROFOS**

- ❖ Los **AUTÓTROFOS** se denominan también **PRODUCTORES PRIMARIOS** porque sintetizan materia orgánica a partir de **CO<sub>2</sub>**, tanto para su propio beneficio como para el de los **QUIMIOHETERÓTROFOS** que se alimentan directamente de los productores primarios o bien a expensas de los productos que excretan.
- ❖ **TODA** la materia orgánica de la Tierra ha sido sintetizada por los productores primarios, en particular por los **FOTÓTROFOS**.



# METABOLISMO EN ARQUEAS

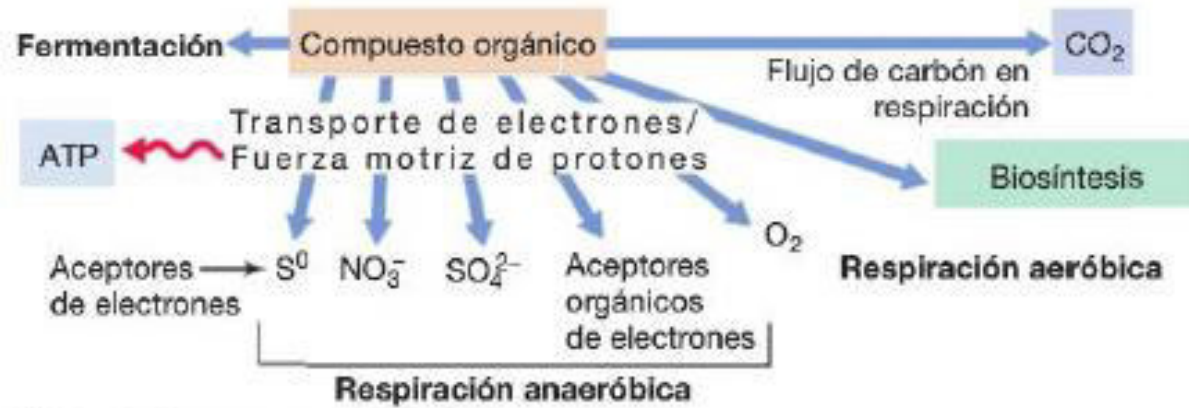


- ❖ La AUTOTROFIA esta muy extendida entre las arqueas y se lleva a cabo a través de varias rutas diferentes.
- ❖ En los metanógenos hipertermófilos y algunos arqueoglobales, el  $\text{CO}_2$  se fija mediante la ruta del acetil-CoA o por alguna variación de dicha ruta.
- ❖ La mayoría de los QUIMIOAUTÓTROFOS HIPERTERMÓFILOS fijan el  $\text{CO}_2$  bien mediante la ruta INVERSA del ácido cítrico, igual que la ruta autotrófica en las bacterias verdes del azufre, o bien mediante el ciclo de CALVIN, que es la ruta autotrófica más extendida entre las bacterias y los eucariotas.
- ❖ Muchas de las rutas catabólicas y anabólicas en arqueas son similares a las presentes en bacterias.

El metabolismo tiene una larga historia evolutiva

# DIVERSIDAD CATABÓLICA

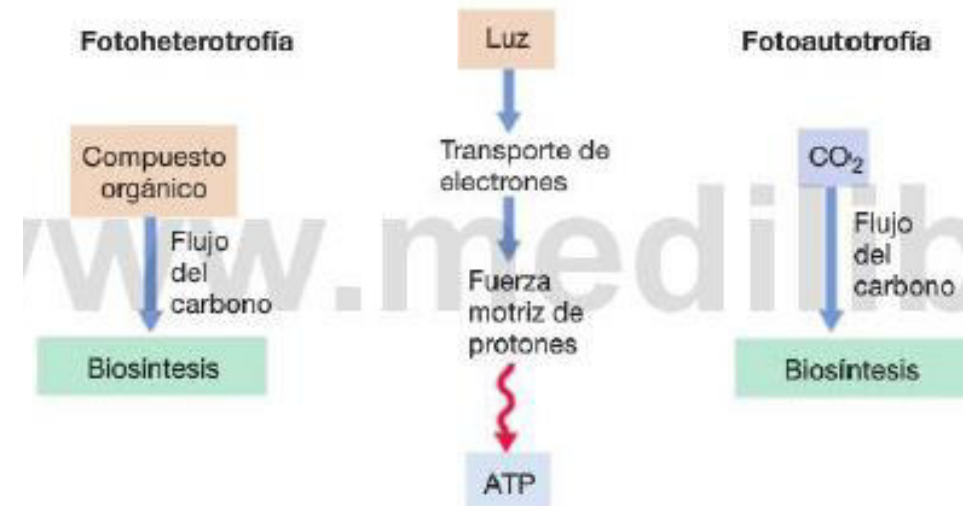
## METABOLISMO QUIMIOHETEROTRÓFICO



## METABOLISMO QUIMIOAUTOTRÓFICO



## METABOLISMO FOTOTRÓFICO





# ASIMILACIÓN DE CARBONO: FIJACIÓN DE CO<sub>2</sub>



AUTOTROFIA en los microorganismos FOTÓTROFOS

Conversión de materia INORGÁNICA en ORGÁNICA

## CICLO DE CALVIN (Descubridor, Melvin Calvin)

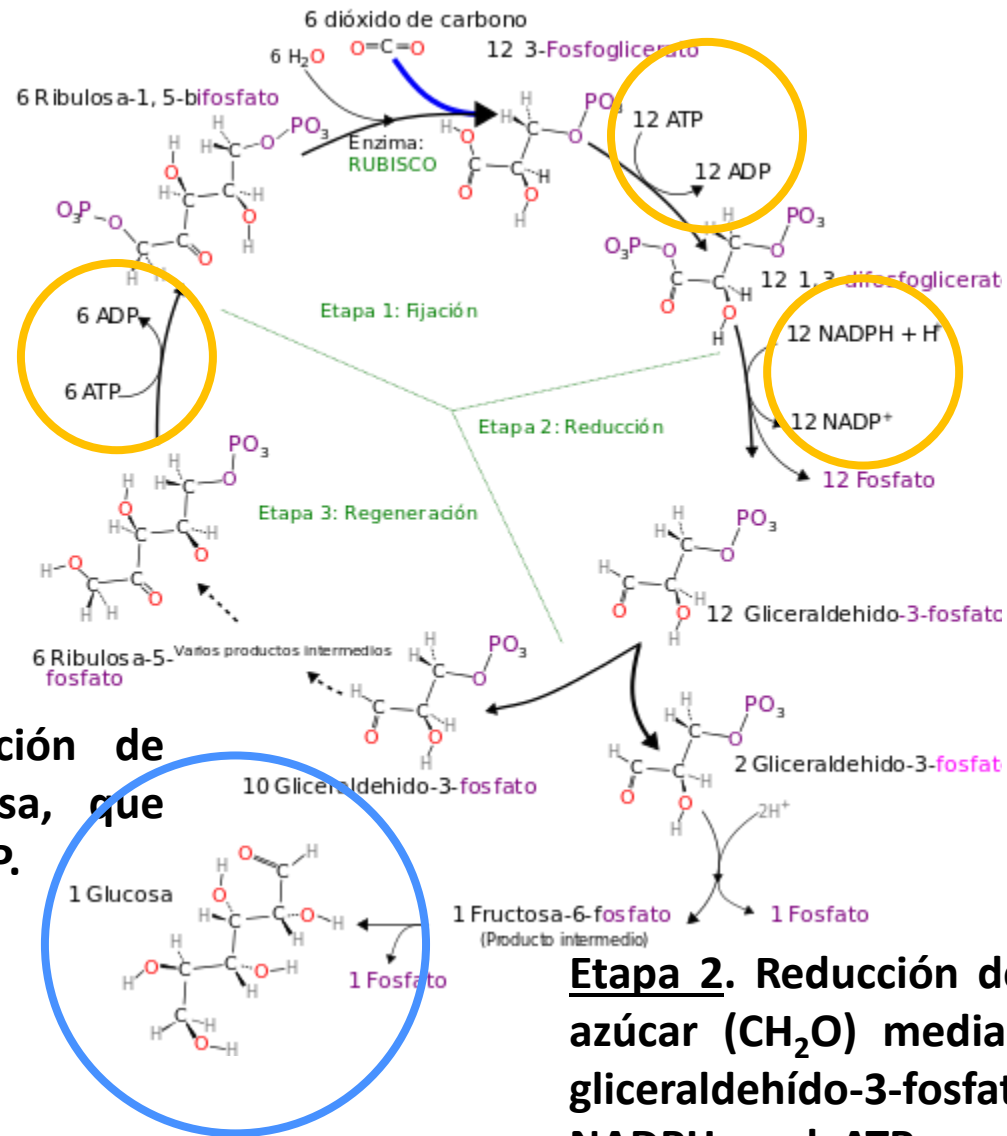
Requiere NAD(P)H, ATP y 2 enzimas clave:

- ✓ Ribulosa-difosfato-carboxilasa
- ✓ Fosforribulocinasa

- ❖ Presente en bacterias púrpuras, cianobacterias, algas, plantas verdes, la mayoría de los QUIMIOAUTÓTROFOS de *Bacteria* e incluso algunas halófilas e hipertermófilas de *Archaea*.
- ❖ La RubisCO cataliza la formación de 2 moléculas de ácido 3-fosfoglicérico (PGA) a partir de ribulosa-difosfato y CO<sub>2</sub>.
- ❖ Luego, el PGA se fosforila y se reduce a un intermediario clave de la glucólisis: el gliceraldehído-3-fosfato.
- ❖ Desde aquí, se puede formar glucosa mediante el camino inverso de las primeras etapas de la glucólisis.



Única ruta para que organismos autótrofos, fotosintetizadores o quimiosintetizadores incorporen materia inorgánica a los seres vivos.

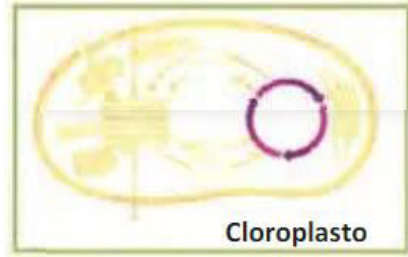


**Etapa 1.** Fijación, carboxilación de difosfato de ribulosa para formar fosfoglicerato (PGA).

**Etapa 3.** Regeneración de difosfato de ribulosa, que también requiere ATP.

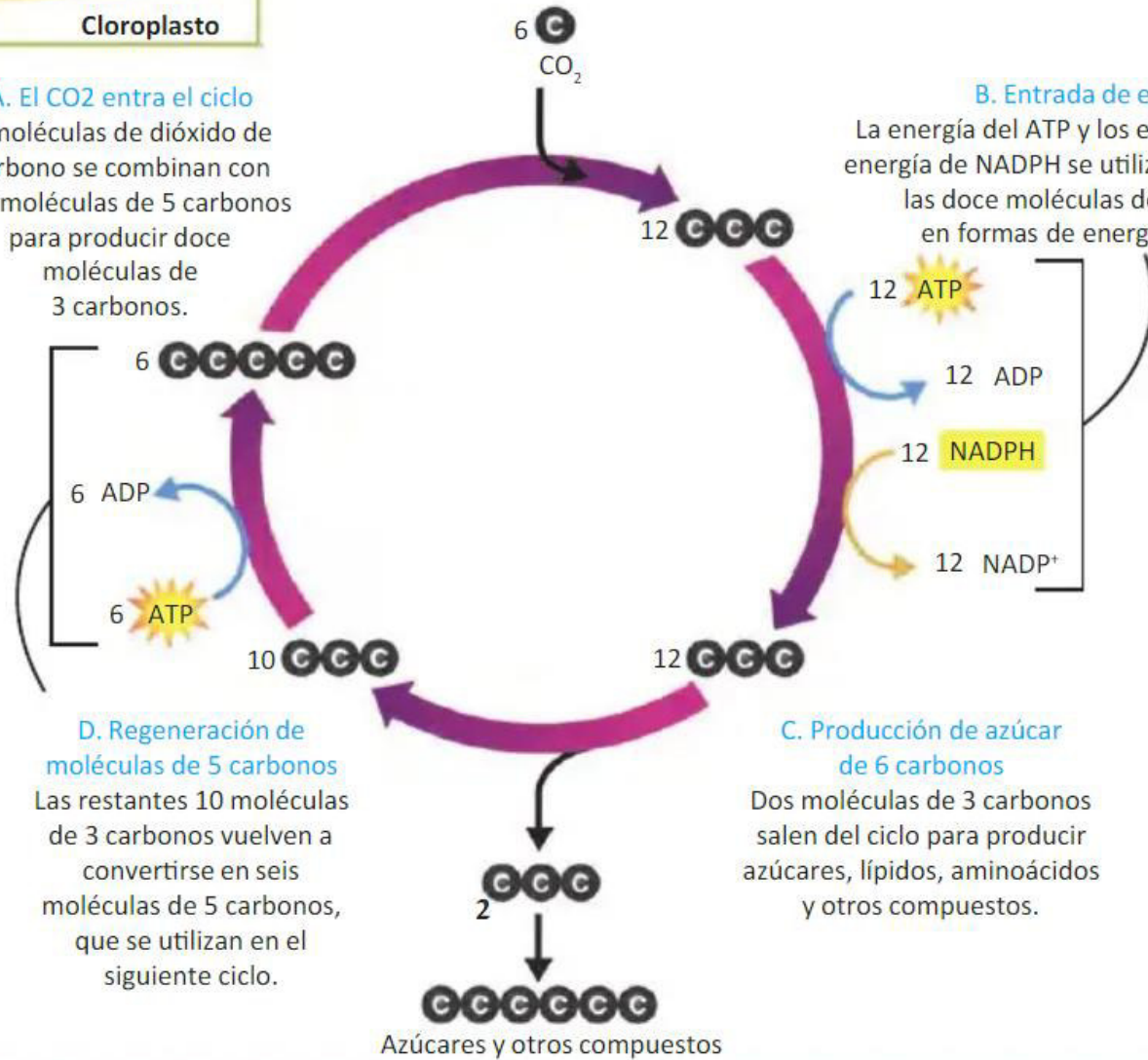
**Etapa 2.** Reducción de PGA al nivel de un azúcar (CH<sub>2</sub>O) mediante la formación de gliceraldehído-3-fosfato (GAP) con el NADPH y el ATP que se producen en las reacciones dependientes de la luz.





**A. El CO<sub>2</sub> entra el ciclo**  
 6 moléculas de dióxido de carbono se combinan con seis moléculas de 5 carbonos para producir doce moléculas de 3 carbonos.

**B. Entrada de energía**  
 La energía del ATP y los electrones de alta energía de NADPH se utilizan para convertir las doce moléculas de 3 carbonos en formas de energía superior.



**D. Regeneración de moléculas de 5 carbonos**  
 Las restantes 10 moléculas de 3 carbonos vuelven a convertirse en seis moléculas de 5 carbonos, que se utilizan en el siguiente ciclo.

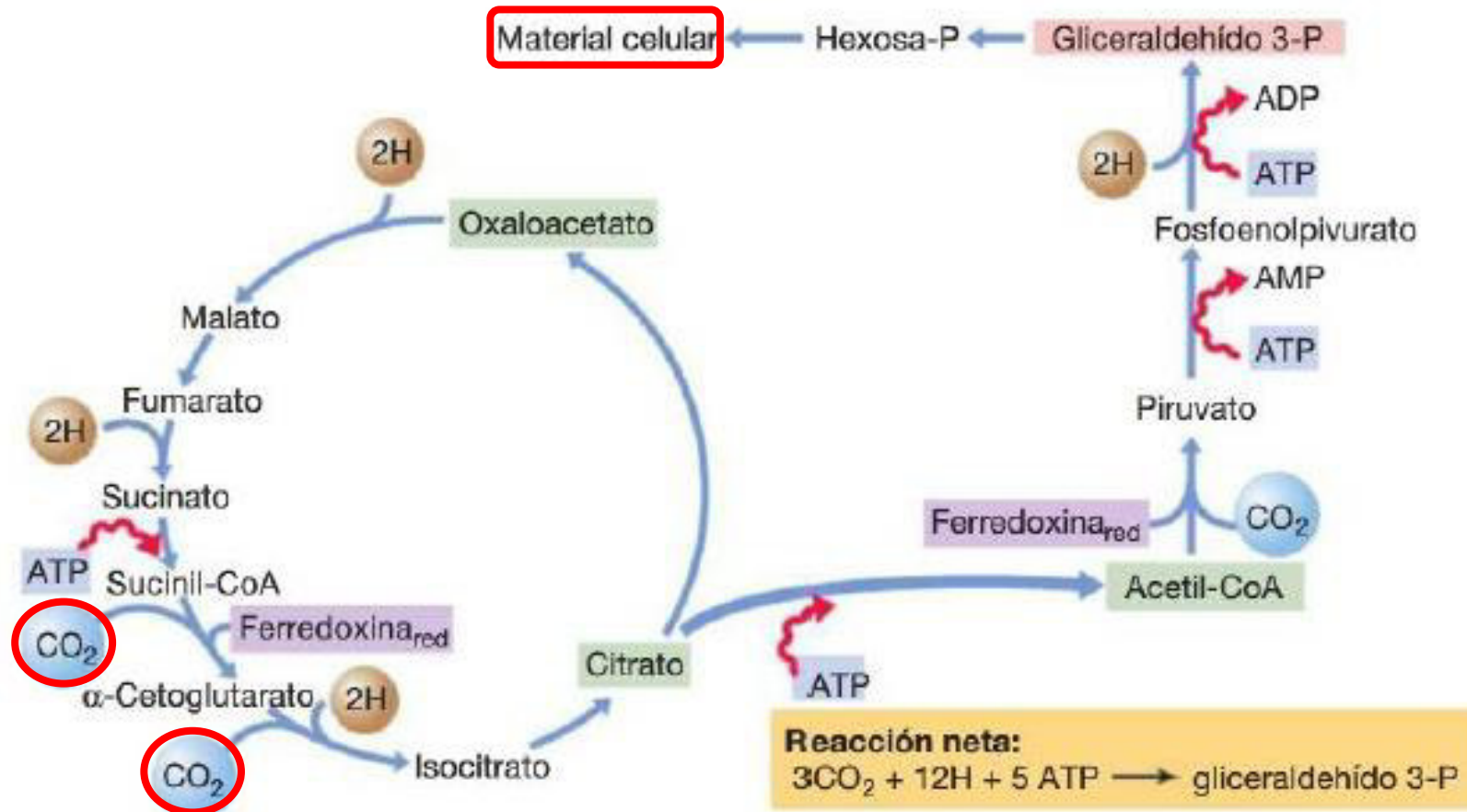
**C. Producción de azúcar de 6 carbonos**  
 Dos moléculas de 3 carbonos salen del ciclo para producir azúcares, lípidos, aminoácidos y otros compuestos.



# CICLO INVERSO DEL ÁCIDO CÍTRICO (de Krebs)



- ❖ Las vías para la fijación autótrofa del  $\text{CO}_2$  difieren entre las bacterias verdes del azufre y no del azufre.
- ❖ En las bacterias VERDES DEL AZUFRE *Chlorobaculum* y *Chlorobium*, el  $\text{CO}_2$  se fija mediante la inversión de las etapas del ciclo del ácido cítrico, una vía llamada el CICLO INVERSO DEL ÁCIDO CÍTRICO (de Krebs).

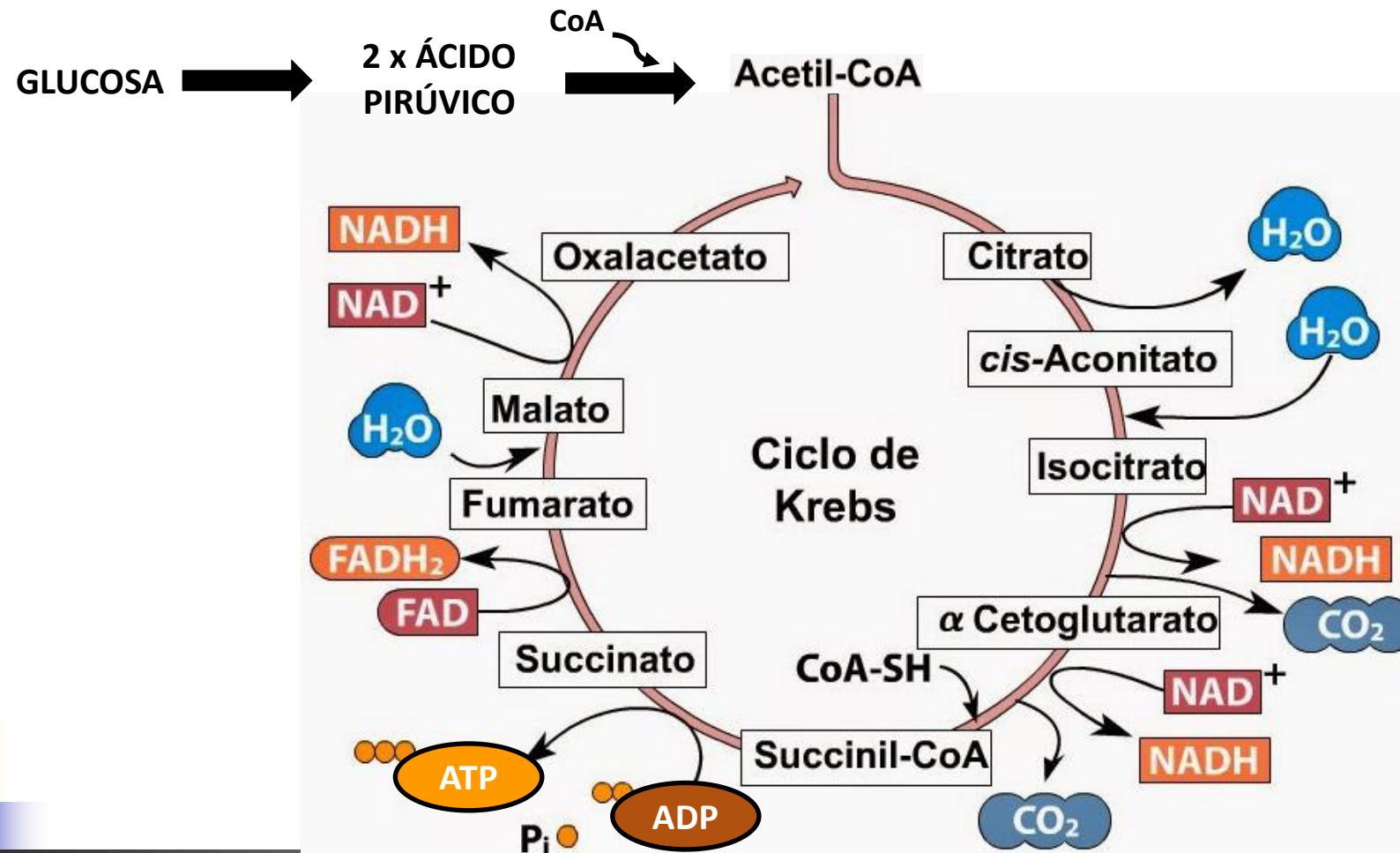


# CICLO DE KREBS, CICLO DE ÁCIDO CÍTRICO O CICLO DE LOS ÁCIDOS TRICARBOXÍLICOS

(matriz mitocondrial)



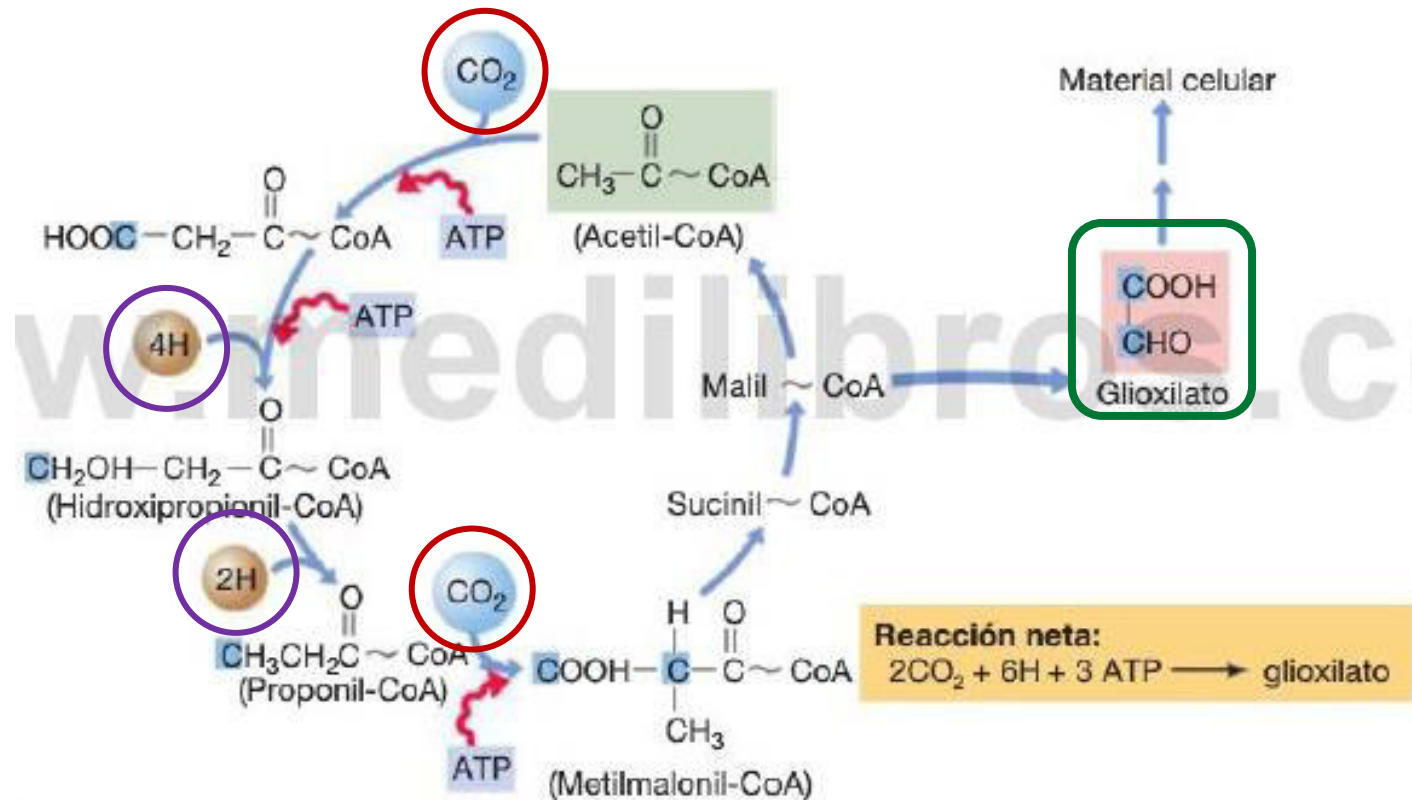
Oxidación de los 2 acetilos (acetil CoA) hasta 2 moléculas de CO<sub>2</sub>, liberando energía en forma utilizable (NADH, FADH<sub>2</sub>) y GTP



# VÍA DEL HIDROXIPROPIONATO



- ❖ El fotótrofo verde NO del azufre *Chloroflexus* crece de manera autótrofa con H<sub>2</sub> o H<sub>2</sub>S como donador de e<sup>-</sup>.
- ❖ Sin embargo, en este organismo no operan ni el ciclo de Calvin ni el ciclo inverso del ácido cítrico.
- ❖ En su lugar, 2 moléculas de CO<sub>2</sub> se reducen a GLIOXILATO mediante una vía cíclica particular: la vía del HIDROXIPROPIONATO, que es un compuesto de 3 carbonos, siendo un intermediario clave.





# QUIMIOLITOTROFIA

ENERGÍA



oxidación de  
compuestos  
INORGÁNICOS

FUENTE DE CARBONO



CO<sub>2</sub>



AUTÓTROFOS

- La generación de ATP en los quimiolitótrofos es similar a la de los quimioorganótrofos.
- Pero el donador de e<sup>-</sup> es INORGÁNICO (en vez de ORGÁNICO).

Algunos son MIXÓTROFOS

ENERGÍA



oxidación de  
compuestos  
INORGÁNICOS

CARBONO



compuestos  
ORGÁNICOS

# FUENTES DE DONADORES DE $e^-$ INORGÁNICOS

## GEOLÓGICOS

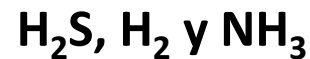
La actividad volcánica es uno de los principales suministros de compuestos reducidos de azufre, principalmente  $H_2S$ .

## BIOLÓGICOS

Combustión de combustibles fósiles y el aporte de residuos industriales

## ANTROPOGÉNICOS

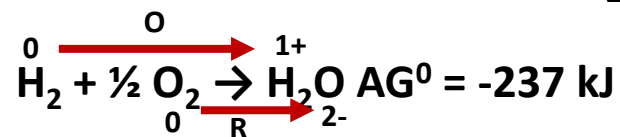
La agricultura y la minería añaden donadores inorgánicos de  $e^-$  al ambiente como los compuestos nitrogenados reducidos y de hierro



## OXIDACIÓN DEL $H_2$

- ❖ El  $H_2$  es un producto habitual del metabolismo microbiano.
- ❖ Los quimiolitótrofos son capaces de utilizarlo como donador de  $e^-$ .
- ❖ Se conocen anaerobios oxidadores de  $H_2$  en *Bacteria* y *Archaea*, que difieren en el aceptor de  $e^-$  que utilizan ( $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Fe^{3+}$ )

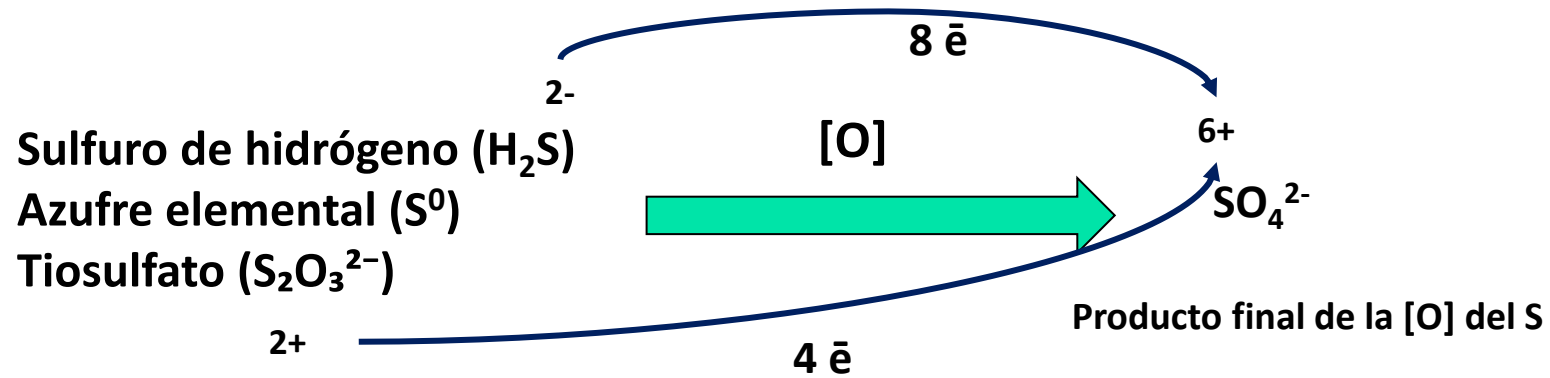
Generación de ATP durante la oxidación del  $H_2$  por el  $O_2$



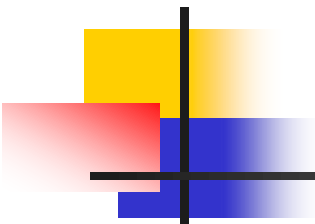
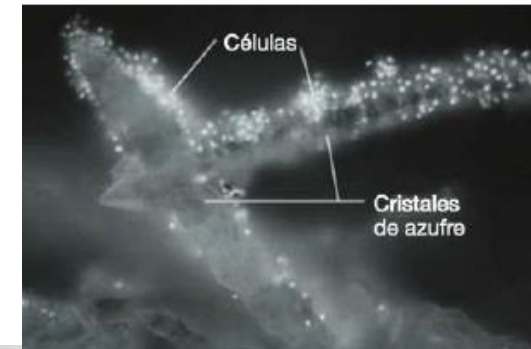
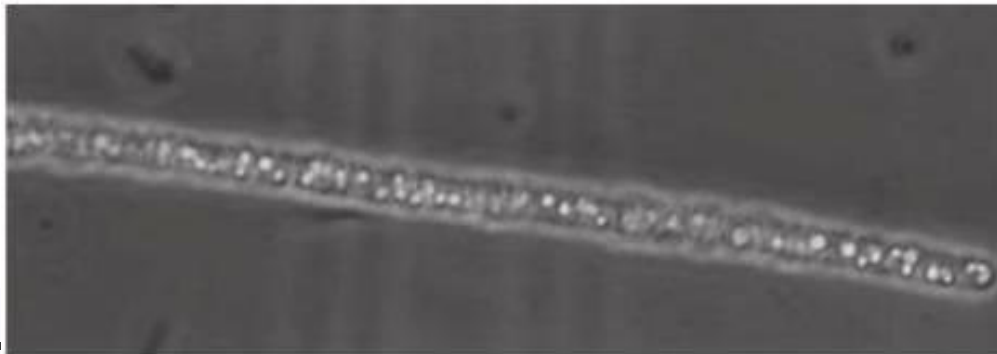
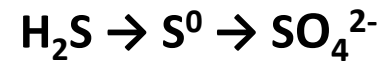
# OXIDACIÓN DE LOS COMPUESTOS REDUCIDOS DEL AZUFRE



Utilizados como donadores de  $e^-$  por las bacterias incoloras del azufre



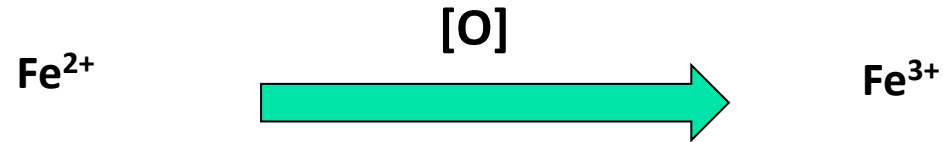
- ❖ La oxidación del  $H_2S$  se produce por etapas, y la primera etapa de oxidación produce azufre elemental,  $S^0$ .
- ❖ Algunas bacterias que oxidan el  $H_2S$  depositan este azufre elemental dentro de la célula como reserva de energía.





# OXIDACIÓN DEL HIERRO

Reacción quimiolitótrofa



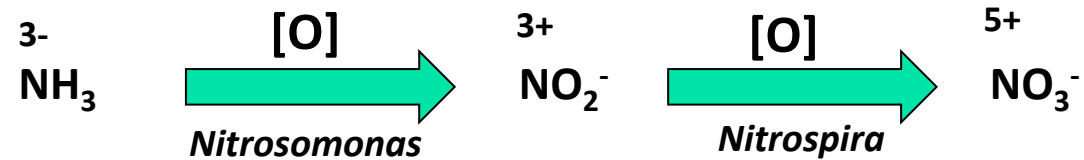
*Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* pueden crecer de modo autótrofo utilizando hierro ferroso como donador de  $e^-$

- Vertidos ácidos mineros, que muestran la confluencia de un río normal y un arroyo de drenaje de una zona minera de carbón.
- El arroyo ácido contiene mucho  $\text{Fe}^{2+}$ .
- A pH bajo, el  $\text{Fe}^{2+}$  no se oxida espontáneamente en el aire, sino que *Acidithiobacillus ferrooxidans* lleva a cabo la oxidación.
- El  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  insoluble y las sales férricas complejas precipitan, formando un precipitado que los mineros del carbón denominan «barro amarillo».



# NITRIFICACIÓN

- ❖ Los compuestos nitrogenados INORGÁNICOS, amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), son sustratos QUIMIOLITÓTROFOS.
- ❖ Se oxidan de forma aerobia mediante las bacterias nitrificantes durante el proceso de nitrificación



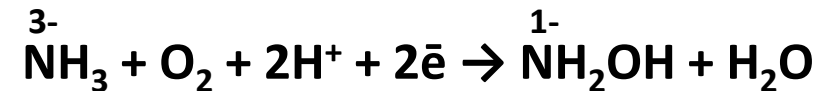
- ❖ Las bacterias nitrificantes están ampliamente distribuidas en suelos y aguas.
- ❖ Por lo tanto, la oxidación completa del  $\text{NH}_3$  a  $\text{NO}_3^-$ , una transferencia de 8 e<sup>-</sup>, la llevan a cabo 2 grupos de organismos que actúan secuencialmente



# BIOENERGÉTICA Y ENZIMOLOGÍA DE LA NITRIFICACIÓN



Los  $e^-$  de sustratos INORGÁNICOS reducidos (compuestos nitrogenados reducidos) entran en una cadena de transporte de  $e^-$  y el flujo de  $e^-$  establece una fuerza protonmotriz que impulsa la síntesis de la ATP.

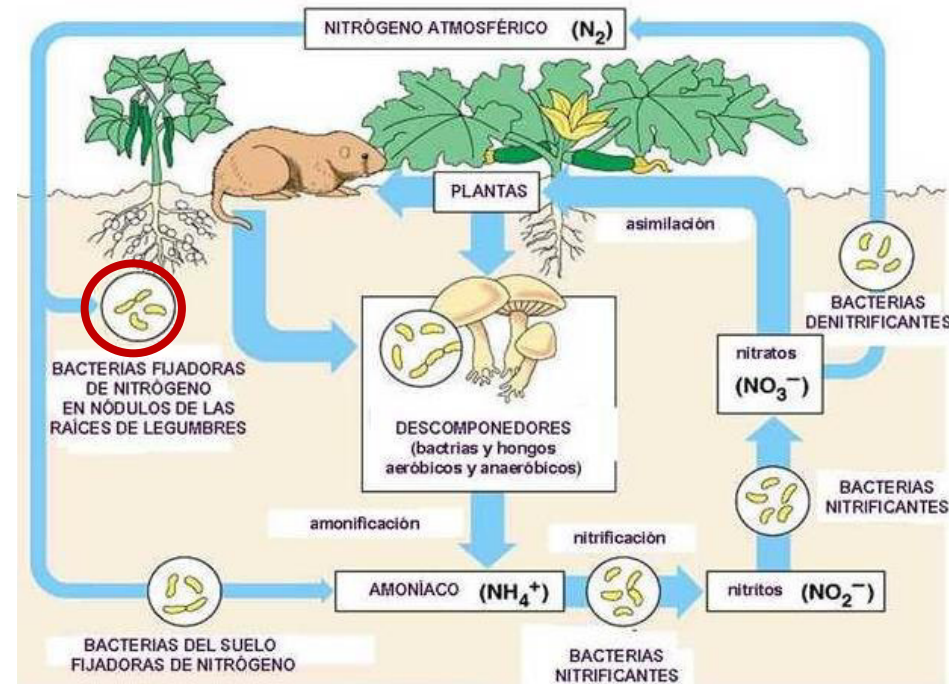


- ❖ Al igual que los quimiolitótrofos oxidadores de azufre y hierro, las bacterias aerobias nitrificantes emplean el ciclo de Calvin para la fijación del  $\text{CO}_2$ .
- ❖ Las bacterias nitrificantes desempeñan funciones ecológicas clave en el ciclo del nitrógeno al convertir el  $\text{NH}_3$  en  $\text{NO}_3^-$ , que es un nutriente vegetal clave.
- ❖ También son importantes en el tratamiento de aguas residuales, retirando las aminas y el amoníaco tóxicos, y liberando menos compuestos nitrogenados tóxicos.
- ❖ Desempeñan una función similar en el agua de los lagos, donde el  $\text{NH}_3$  producido de los compuestos nitrogenados orgánicos por descomposición en los sedimentos se convierte en  $\text{NO}_3^-$  utilizable para algas y cianobacterias

# FIJACIÓN DEL NITRÓGENO



Utilización del  $N_2$  gaseoso como fuente del nitrógeno celular



- ❖ La capacidad de fijar el  $N_2$  libera al organismo de la dependencia de determinadas molécula nitrogenadas ( $NH_3$  o  $NO_3^-$ )
- ❖ Como en los ecosistemas microbianos existe una gran demanda de nitrógeno fijado, la capacidad de fijar  $N_2$  confiere una ventaja ecológica significativa a las células capaces de realizar el proceso.
- ❖ Además, algunas formas de fijación del  $N_2$  son de gran importancia agrícola, al sostener las necesidades de nitrógeno de los cultivos clave, como la soja.

## SÓLO DETERMINADOS PROCARIOTAS PUEDEN FIJAR EL N<sub>2</sub>

- ❖ Algunas bacterias fijadoras del nitrógeno son de vida libre y no requieren un hospedador para llevar a cabo el proceso.
- ❖ En cambio, otras son simbióticas y sólo fijan el N<sub>2</sub> cuando se asocian a determinadas plantas.
- ❖ Pero es la bacteria, y no la planta, la que fija el N<sub>2</sub>.
- ❖ NO se conocen organismos eucarióticos que fijen el N<sub>2</sub>.

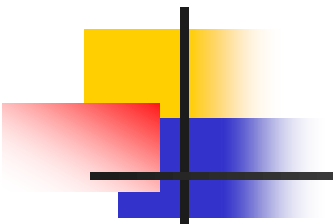




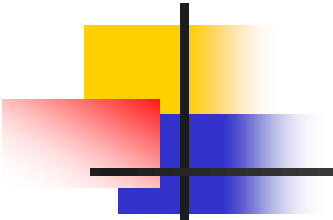
# ORGANISMOS FIJADORES DE NITRÓGENO



AEROBIOS DE VIDA LIBRE /ANAEROBIOS FACULTATIVOS		
QUIMIOORGANÓTROFOS	FOTÓTROFOS	QUIMIOLITÓTROFOS
<i>Azotobacter</i> <i>Azomonas</i> <b><i>Agrobacterium</i></b> <i>Klebsiella</i> <i>Beijerinckia</i> <i>Bacillus polymyxa</i> <i>Mycobacterium flavum</i> <b><i>Azospirillum lipoferum</i></b> <i>Citrobacter freundii</i> <i>Acetobacter diazotrophicus</i> <i>Methylomonas</i> <i>Methylococcus</i> <i>Methylosinus</i> <b><i>Pseudomonas</i></b>	<i>Cianobacterias</i>	<i>Alcaligenes</i> <i>Thiobacillus</i> <i>Acidithiobacillus</i> <b><i>Streptomyces</i></b> <i>thermoautotrophicus</i>



<b>ANAEROBIOS DE VIDA LIBRE</b>		
<b>QUIMIOORGANÓTROFOS</b>	<b>FOTÓTROFOS</b>	<b>QUIMIOLITÓTROFOS</b>
<p><i>Clostridium</i>  <i>Desulfovibrio</i>  <i>Desulfobacter</i>  <i>Desulfotomaculum</i></p>	<p><i>Chromatium</i>  <i>Ectothiorhodospira</i>  <i>Thiocapsa</i>  <i>Chlorobium</i>  <i>Chlorobaculum</i>  <i>Rhodospirillum</i>  <i>Rhodopseudomonas</i>  <i>Rhodomicrobium</i>  <i>Rhodopila</i>  <i>Rhodobacter</i>  <i>Heliobacterium</i>  <i>Heliobacillus</i>  <i>Heliophilum</i>  <i>Heliorestis</i></p>	<p><i>Methanosarcina</i>  <i>Methanococcus</i>  <i>Methanobacterium</i>  <i>Methanospirillum</i>  <i>Methanlobus</i>  <i>Methanocaldococcus</i></p>





## SIMBIÓTICOS

PLANTAS LEGUMINOSAS	PLANTAS NO LEGUMINOSAS
Soja, arveja, trébol, acacia, etc. en asociación con bacterias de los géneros <i>Rhizobium</i> , <i>Bradyrhizobium</i> , <i>Sinorhizobium</i> o <i>Azorhizobium</i> .	<i>Alnus</i> , <i>Myrica</i> , <i>Ceanothus</i> , <i>Comptonia</i> , <i>Casuarina</i> en asociación con actinomicetos de los géneros <i>Frankia</i> , <i>Anabaena</i> (cianobacteria), con el helecho de agua <i>Azolla</i> .





# CATABOLISMO MICROBIANO



## DEGRADACIÓN DE LOS NUTRIENTES

- ❖ Las bacterias son muy versátiles en la degradación de polímeros.
- ❖ Existen microorganismos que se comportan como proteolíticos, amilolíticos, lipolíticos, etc., debido a que tienen un sistema enzimático muy versátil.
- ❖ Las proteínas, los lípidos y los carbohidratos son degradados mediante reacciones enzimáticas que ocurren una después de la otra.
- ❖ La degradación se puede demostrar por la aparición de unidades monoméricas derivadas de los compuestos poliméricos, así, de las proteínas, se obtendrán aminoácidos, y a partir de estos derivados como indol, escatol, ácido sulfhídrico, amoníaco, etc.
- ❖ La degradación de compuestos nitrogenados se evidencia por la aparición de amoníaco u otros compuestos.
- ❖ Siempre que existen las condiciones adecuadas, el microorganismo y el sustrato a degradarse, aparecerán compuestos productos de la degradación.



# CATABOLISMO DE HIDRATOS DE CARBONO



## DEGRADACIÓN DE GLUCOSA A PIRUVATO

### GLUCÓLISIS O RUTA DE EMBDEN-MEYERHOF

Ruta bioquímica mediante la cual se FERMENTA la glucosa para producir energía (ATP) y varios productos resultantes de la fermentación.

Proceso ANAERÓBICO que se puede dividir en 3 etapas principales

#### Etapa I

A partir de glucosa se obtienen 2 moléculas de gliceraldehído-3-fosfato.

#### Etapa II

Ocurre un proceso redox, la energía se conserva en forma de ATP, y se forman 2 moléculas de PIRUVATO.

#### Etapa III

Tiene lugar una 2da reacción redox y se originan los productos de fermentación

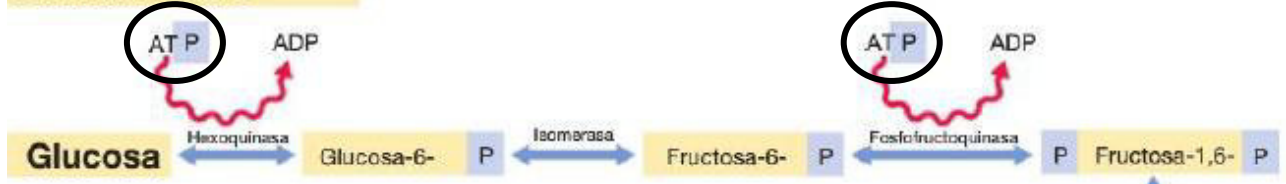


- ❖ La **GLUCÓLISIS** es la ruta de **FERMENTACIÓN** más importante y es un modo de metabolismo **ANAERÓBICO** ampliamente distribuido.
- ❖ Por cada molécula de glucosa que se consume en la glucólisis se producen 2 moléculas de ATP y productos de fermentación.

## **FERMENTACIÓN DE LA GLUCOSA: RESULTADOS NETOS Y APLICACIÓN PRÁCTICA**

- ❖ En la glucólisis hay consumo de glucosa, síntesis neta de 2 ATP y formación de productos de fermentación.
- ❖ Para el organismo, el producto importante es el ATP, que usa en multitud de reacciones que requieren energía, y los productos de fermentación son solo productos de **DESECHO**.
- ❖ Sin embargo, estos son utilizados por los destiladores, cerveceros, productores de derivados lácteos o panaderos.
- ❖ Por esto, la fermentación **NO ES SÓLO UN PROCESO QUE PRODUCE ENERGÍA**, sino un medio de obtener productos naturales que son de utilidad para el consumo humano.

### ETAPA I: REACCIONES PREPARATORIAS

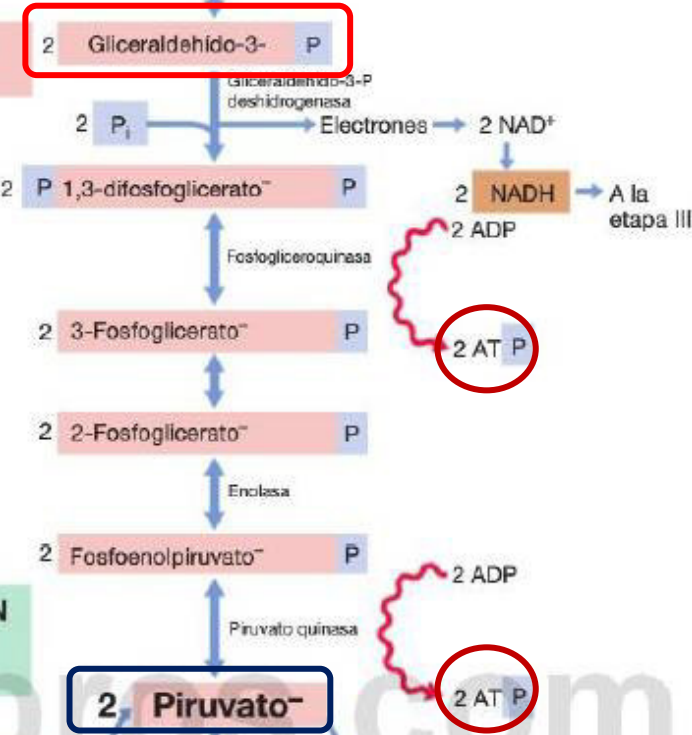


-2 ATP  
+4 ATP  

---

+2 ATP

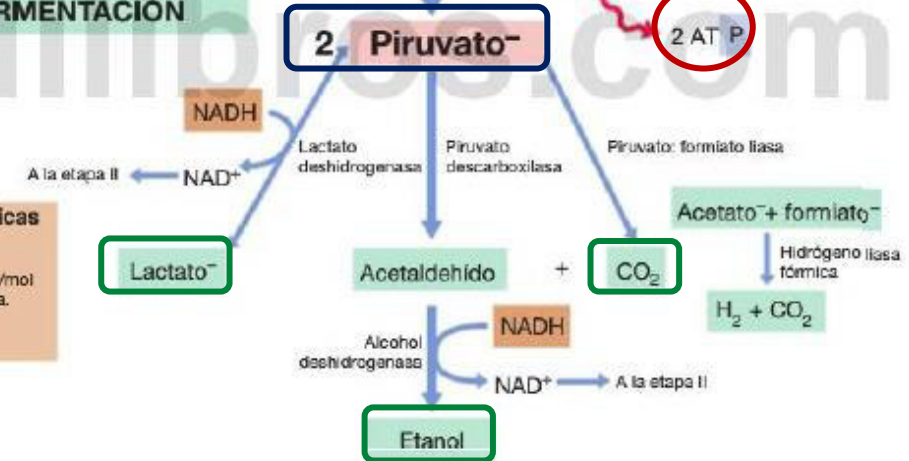
### ETAPA II: OBTENCIÓN DE ATP Y PIRUVATO



**Consumo y generación de ATP en la glucólisis**

Reacción	ATP (ganancia/pérdida)	ATP neto
1. Glucosa → Glucosa-6-P	-1	-1
2. Fructosa-6-P → Fructosa-1,6, difosfato	-1	-2
3. 2 (1,3-difosfoglicerato) → 2(3-fosfoglicerato)	+2	0
4. 2 (Fosfoenolpiruvato) → 2 Piruvato	+2	+2

### ETAPA III: FORMACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE FERMENTACIÓN



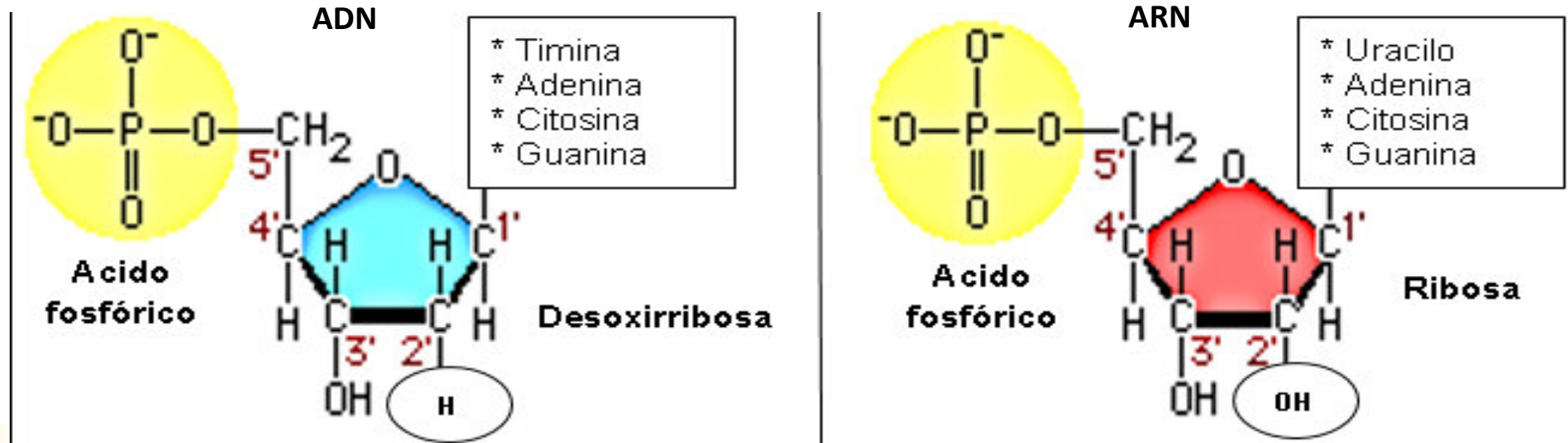
**Balance energético de la glucólisis en levaduras y en bacterias lácticas**

Ejemplos de estequiometría:	Organismos:	Energía libre:
(1) Glucosa → 2 etanol + 2 CO <sub>2</sub>	Levaduras	1. Etanol/CO <sub>2</sub> : -238,8 kJ/mol de glucosa fermentada.
(2) Glucosa → 2 lactato + 2 H <sup>+</sup>	Bacterias de ácido láctico	2. Lactato: -196 kJ.

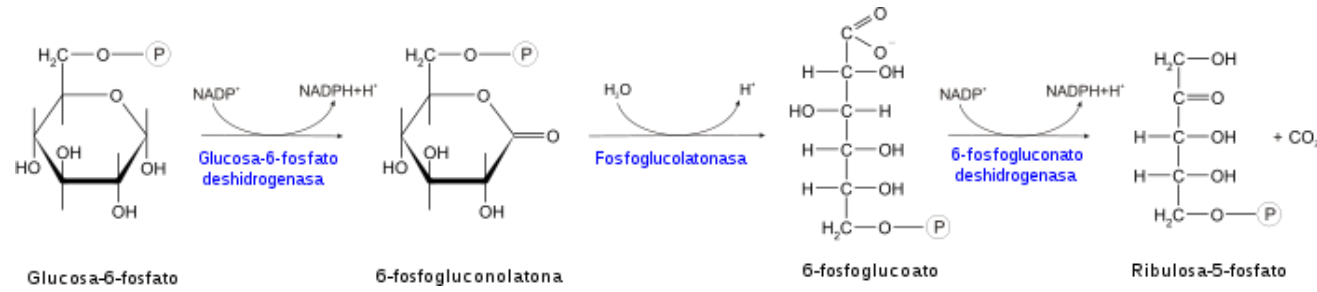
www.medimpro.com

# RUTA DE LA PENTOSA FOSFATO

- ❖ Ruta metabólica estrechamente relacionada con la glucólisis, durante la cual se utiliza la glucosa para generar RIBOSA, necesaria para la biosíntesis de NUCLEÓTIDOS y ÁCIDOS NUCLEICOS.
- ❖ También se obtiene poder reductor en forma de NADPH que se utilizará como coenzima de enzimas propias del metabolismo anabólico.

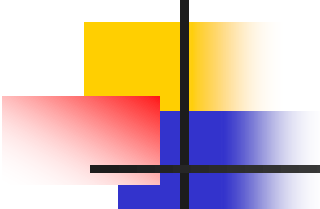
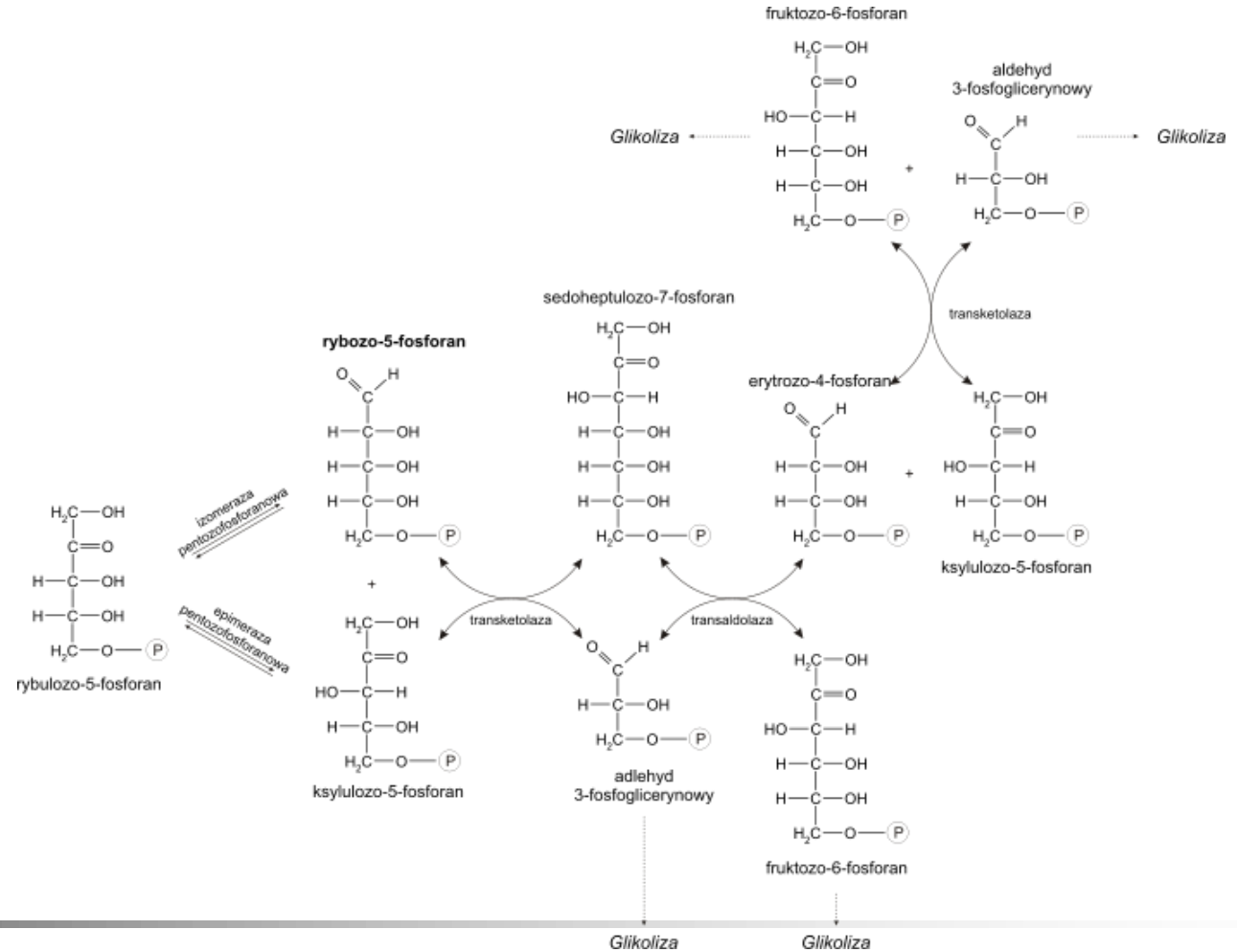


# Tiene lugar en el citosol y puede dividirse en 2 fases



**Fase oxidativa  
(genera NADPH)**

**Fase no oxidativa  
(se sintetizan pentosas-fosfato y otros monosacáridos-fosfato)**



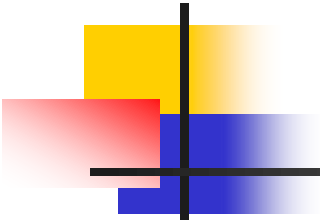


# VÍA DE ENTNER-DOUDOROFF



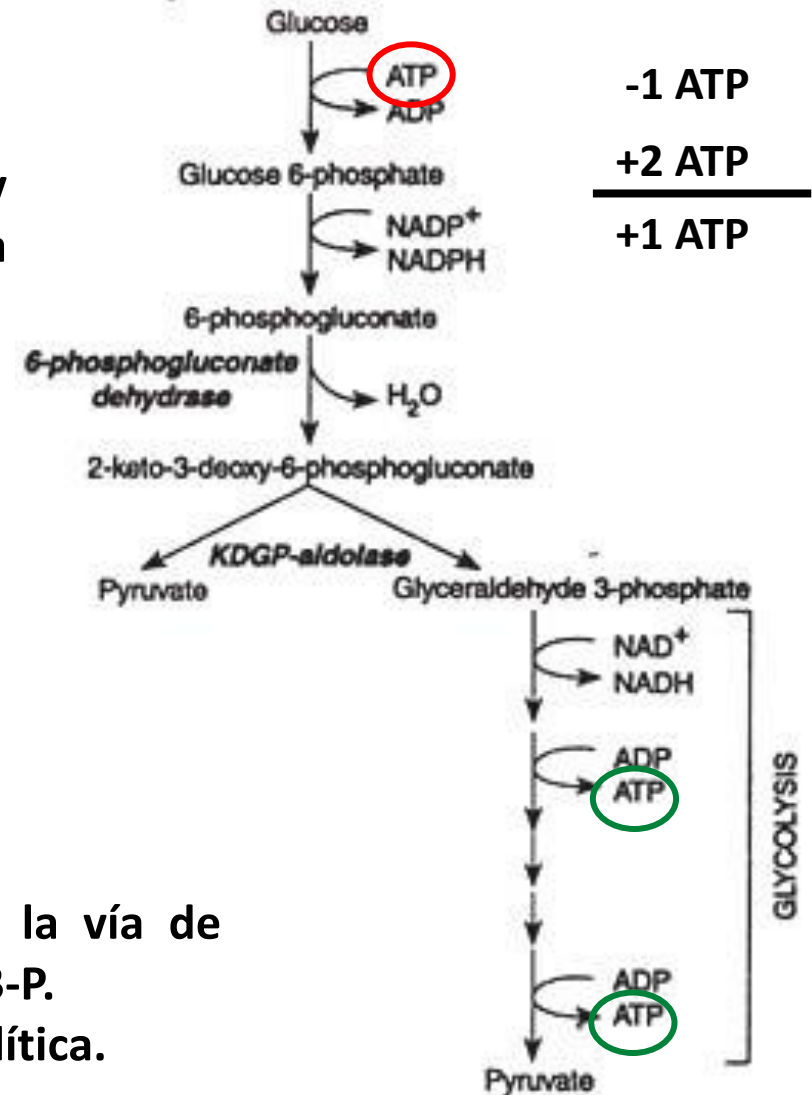
Una variante de la vía glucolítica

- ❖ Ruta metabólica alternativa que cataboliza glucosa a piruvato usando una serie de enzimas distintas a la glucólisis y a la ruta de la pentosa fosfato.
- ❖ La inmensa mayoría de las bacterias utilizan la glucólisis y la vía pentosa fosfato.
- ❖ Esta es una vía 2ria exclusiva de un número reducido de microorganismos carentes de la ruta Embden-Meyerhof.
- ❖ Las especies del grupo de las pseudomonas, bacterias no fermentativas, utilizan esta vía.
- ❖ Fue descrita por primera vez en 1952 por Nathan Entner y Michael Doudoroff

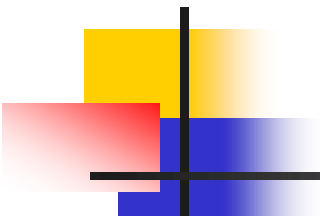




- La glucosa-6-fosfato se oxida a ácido 6-fosfogluónico y NADPH.
- El ácido 6-fosfogluónico se deshidrata y se escinde en piruvato y gliceraldehído-3-fosfato (G-3-P), un intermediario clave de la vía glucolítica.



- El G-3-P se cataboliza como en la glucólisis generando NADH y 2 ATP.
- Se utiliza como un aceptor de e<sup>-</sup> para equilibrar las reacciones redox
- Resulta interesante que como el piruvato se forma directamente en la vía de Entner-Doudoroff y no puede producir ATP de la forma que lo hace el G-3-P.
- La vía de Entner-Doudoroff produce sólo la mitad de ATP que la vía glucolítica.



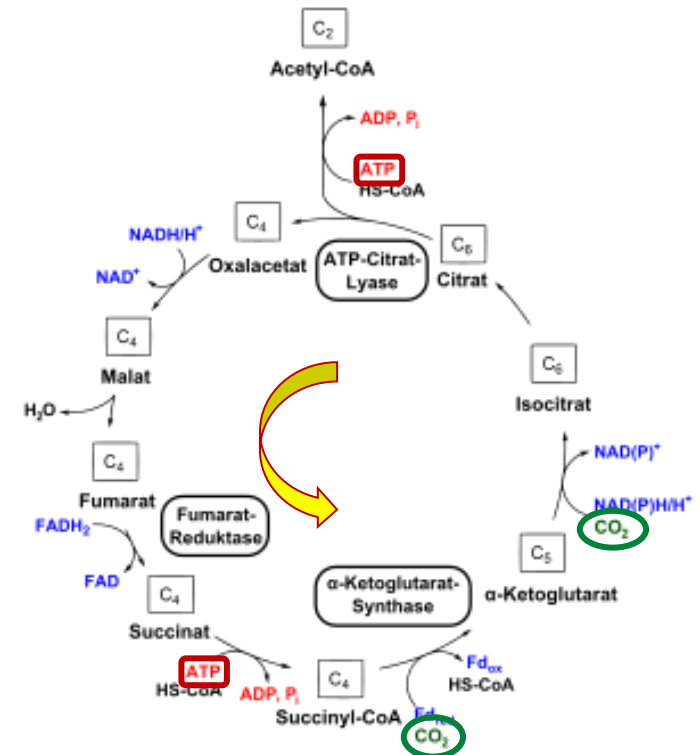


# EL CICLO DE KREBS INVERSO

ciclo del ácido tricarboxílico inverso o ciclo del ácido cítrico inverso

- ❖ Ruta metabólica utilizada por algunas bacterias para producir compuestos orgánicos a partir de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .
- ❖ La reacción es la opuesta al ciclo de Krebs: mientras que en el ciclo del ácido cítrico biomoléculas complejas (glúcidos) se oxidan a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , el ciclo inverso toma  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  para sintetizar compuestos de carbono.

- Es usado por ciertas bacterias, en ocasiones utilizando  $\text{H}_2$ , sulfuro, o tiosulfato como donantes de  $e^-$ .
- Es una opción metabólica posible en las condiciones prebióticas de la Tierra y, por tanto, tiene un gran interés en la investigación del origen de la vida.

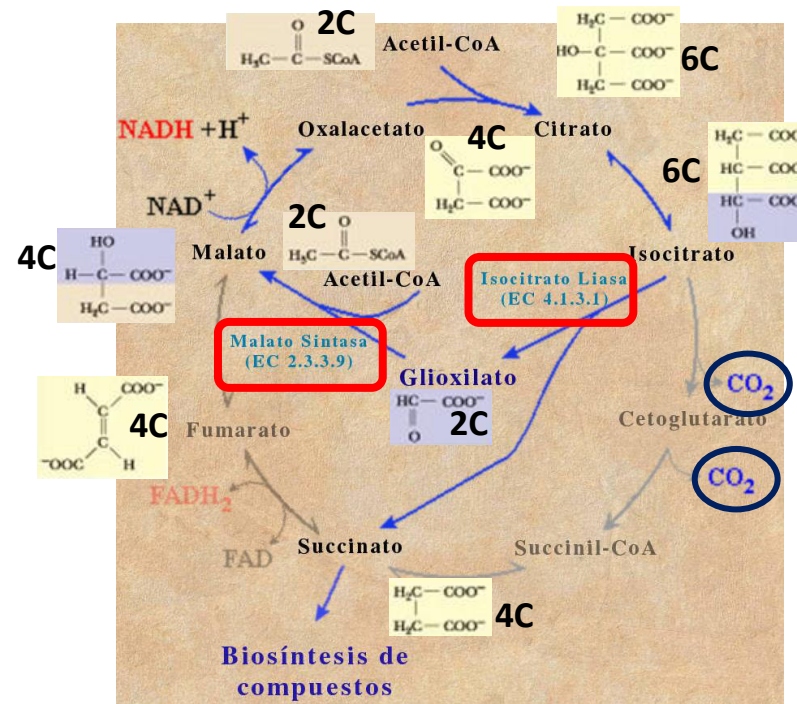


# FERMENTACIONES BACTERIANAS POCO FRECUENTES

## CICLO DEL GLIOXILATO

(variante anabólica del ciclo del citrato)

- ❖ Permite a plantas y microorganismos la utilización de ácidos grasos o del acetato en forma de acetyl-CoA como única fuente carbonada.
- ❖ Transforma unidades acetilo (C2) en succinato (C4)
- ❖ Se da en microorganismos, hongos y plantas, NO en animales.
- ❖ Ocurre en los glioxisomas (peroxisomas).





# Características del Ciclo del GLIOXILATO

- ❖ Ruta ANABÓLICA asimilativa
- ❖ NO se genera energía
- ❖ Se incorpora la utilización de compuestos orgánicos
- ❖ Fuentes de 2 carbonos
  - I. Acetato
  - II. Compuestos que se deriven de Acetil-CoA.
  
- ❖ Asiste en la producción de carbohidratos
- ❖ Organismos que lo llevan a cabo:
  - I. Bacterias
  - II. Plantas
  - III. Protozoarios
  - IV. Hongos
  - V. Invertebrados

NO ocurre en animales superiores ya que carecen de las 2 enzimas clave del proceso.

Malato Sintasa

Isocitrato Liasa

# ENZIMAS PARTICIPANTES

## ISOCITRATO LIASA

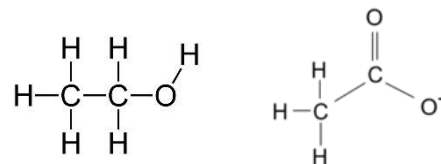
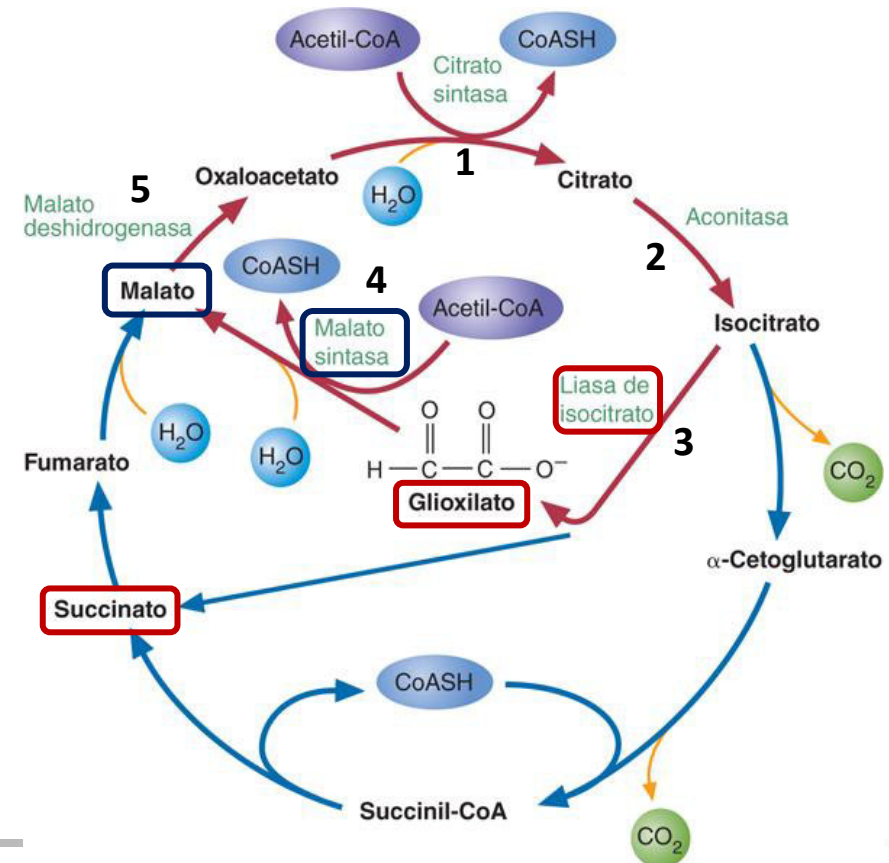
Degrada el isocitrato en succinato y glioxilato

## MALATO SINTASA

Cataliza la reacción donde se une glioxilato con acetil-CoA, para producir malato.

### 5 reacciones

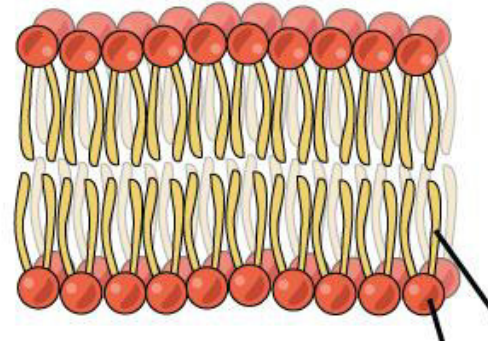
- ❖ La importancia es que da la habilidad a ciertos organismos de crecer en Etanol, acetato, ácidos grasos o compuestos constituidos por solo 2 carbonos.
- ❖ Manera alterna de sobrevivir en ambientes extremos con limitación de nutrientes.
- ❖ Es regulado según las necesidades celulares de cada organismo.



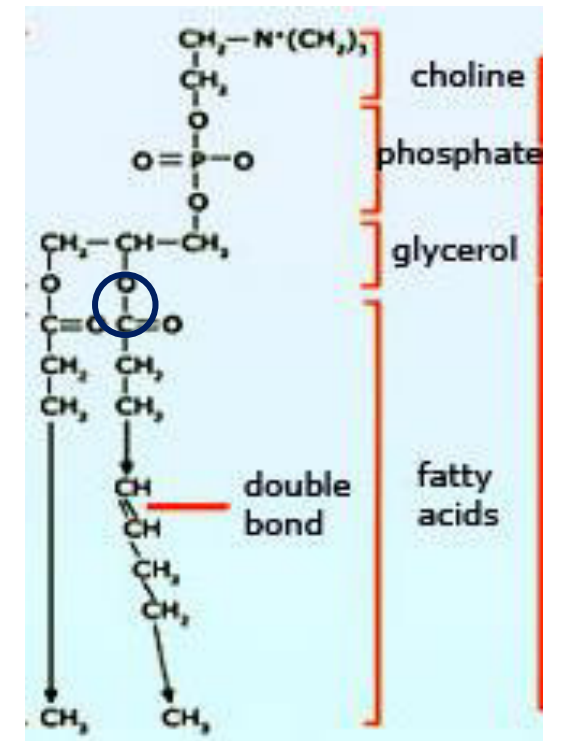
# CATABOLISMO DE LÍPIDOS



- ❖ Las membranas citoplasmáticas de todas las células contienen lípidos.
- ❖ Muchos organismos producen materiales de reserva lipídicos y contienen lípidos en su pared celular.



- ❖ Sustratos excelentes para el metabolismo microbiano productor de energía.
- ❖ Las grasas (ésteres de glicerol y ácidos grasos) están fácilmente disponibles cuando los lípidos se liberan de los organismos muertos.
- ❖ Los microorganismos utilizan las grasas sólo después de la hidrólisis del enlace del éster que realizan las lipasas (enzimas extracelulares).

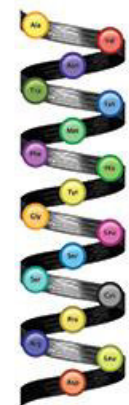


# CATABOLISMO PROTEÍNAS

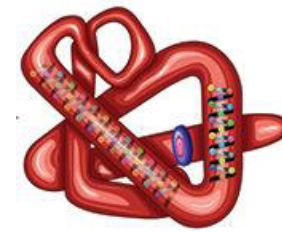
- ❖ Las proteínas son los nutrientes más complejos.
- ❖ A diferencia de los carbohidratos y de las grasas, constituidos por C, H, O, las proteínas tiene aparte N y S.
- ❖ Constituyen un grupo numeroso de compuestos nitrogenados naturales.



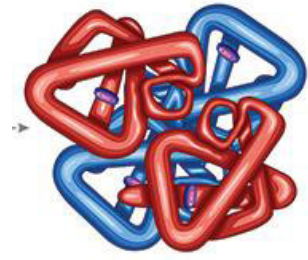
Estructura 1ria  
(Aminoácidos)



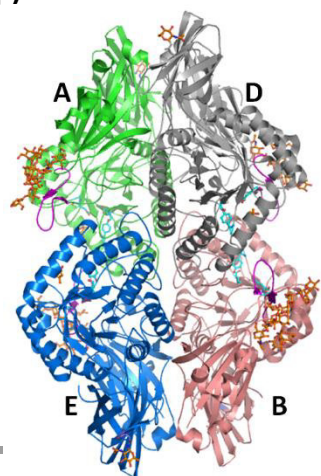
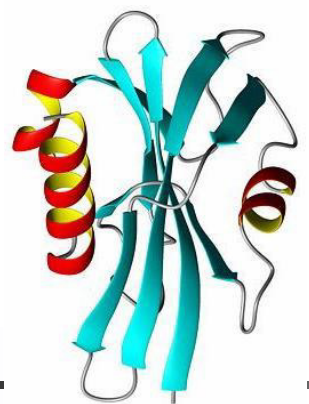
Estructura 2ria  
(Hélice  $\alpha$  o lamina  $\beta$ )



Estructura 3ria  
(Hélice o lamina plegada)



Estructura 4ria  
(Subunidades 3rias ensambladas)





# El proceso de degradación está dividido en 3 etapas



## I. Conversión de moléculas complejas a moléculas más simples

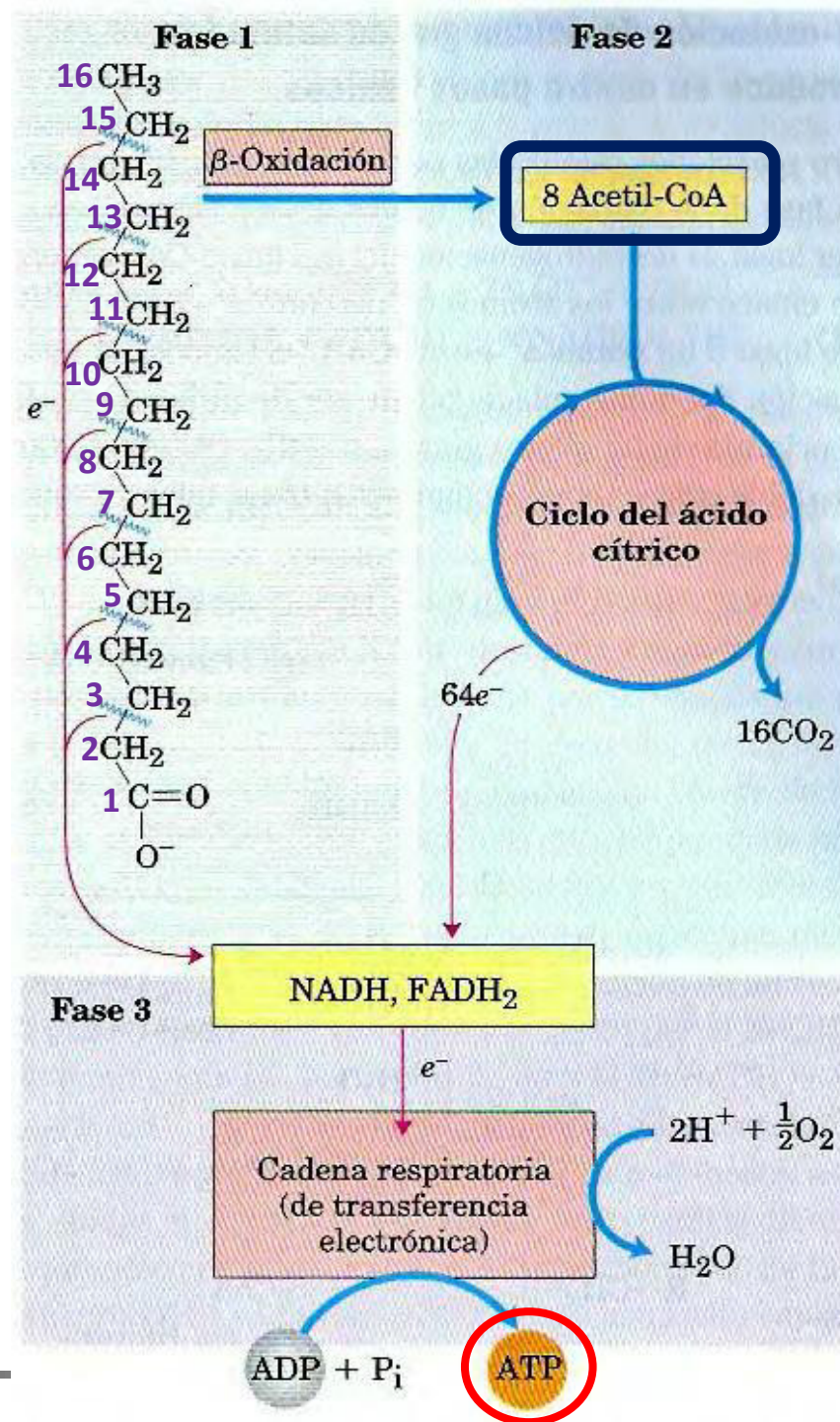
- Una proteína tiene que ser convertida de nuevo en sus constituyentes, que son los aminoácidos.
- Estos procesos degradativos no requieren de energía y ocurren en el interior del microorganismo.

## II. Conversión de estas moléculas simples, en una aún más simple y común, independientemente del origen de las moléculas.

- Tanto los carbohidratos como las proteínas o los lípidos son convertidos en una molécula mucho más simple llamada "ACETIL COENZIMA A".

## III. Se lleva a cabo a partir del Acetil CoA y consiste en generar la energía que necesita la célula para realizar procesos vitales (desplazarse o dividirse).

- En esta etapa ocurre uno de los ciclos metabólicos más importantes de la biología: el ciclo de los ácidos tricarboxílicos O CICLO DE KREBS.

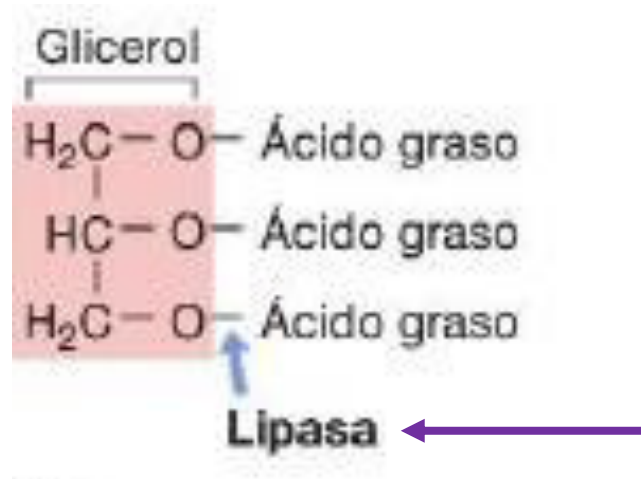




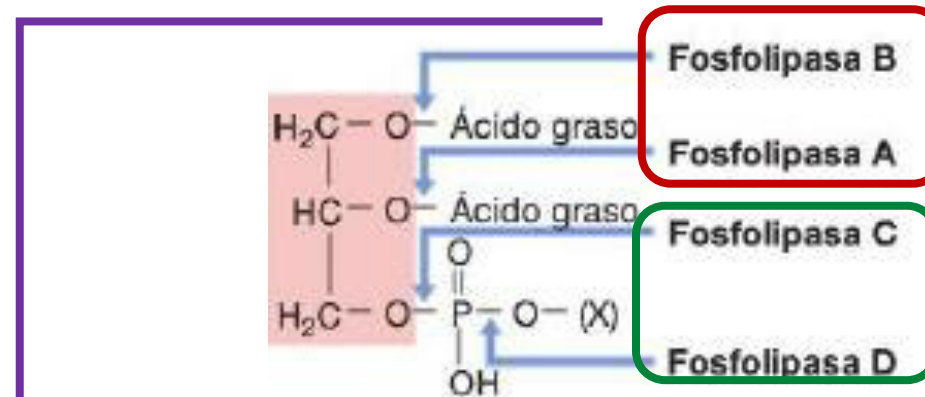
# LIPASAS



- ❖ Atacan ácidos grasos de longitudes variables.
- ❖ Los fosfolípidos los hidrolizan unas enzimas llamadas fosfolipasas, a las que se asigna una letra diferente según el enlace éster que escinden en el lípido.
- ❖ El resultado de la actividad de la lipasa es la liberación de ácidos grasos libres y glicerol, que pueden metabolizar después los microorganismos quimioorganótrofos.



Acción de las lipasas sobre una grasa

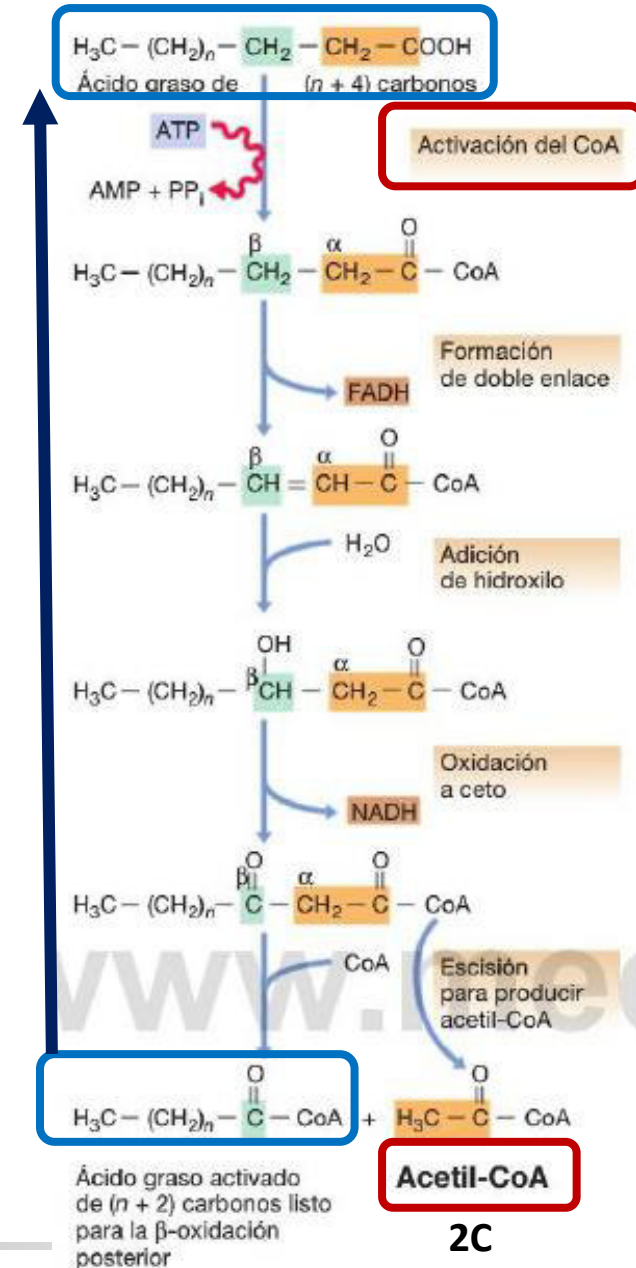


Acción de la fosfolipasa sobre un fosfolípido

# OXIDACIÓN DE ÁCIDOS GRASOS

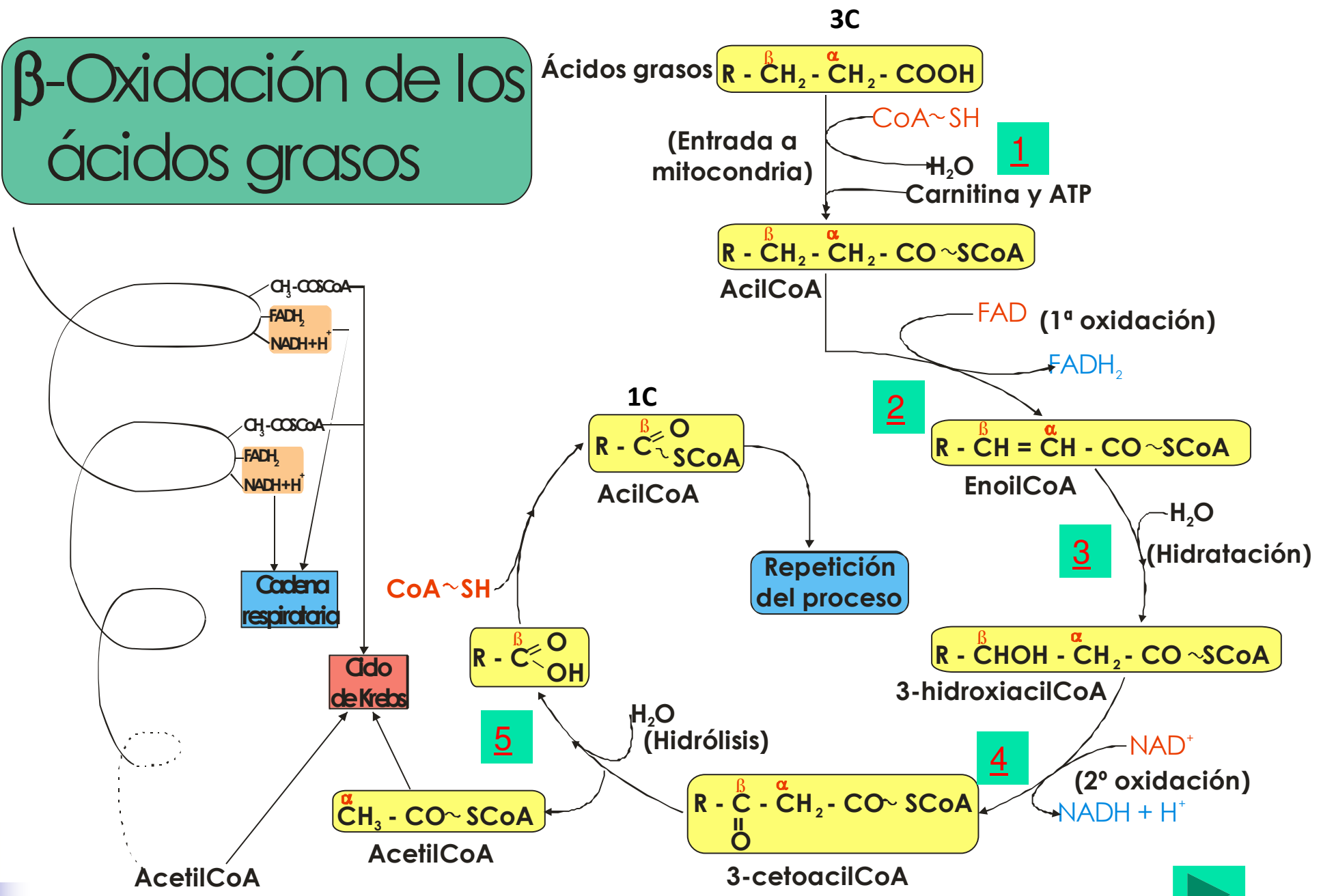


- ❖ Se oxidan por  $\beta$ -oxidación: serie de reacciones en la que en cada ciclo se separan 2 carbonos del ácido graso.
- ❖ El ácido graso se activa 1ro con la coenzima A.
- ❖ La oxidación provoca la liberación de acetil-CoA y la formación de un nuevo ácido graso con 2 átomos de carbono menos.
- ❖ El proceso de la  $\beta$ -oxidación se repite y se libera otra molécula de acetil-CoA.



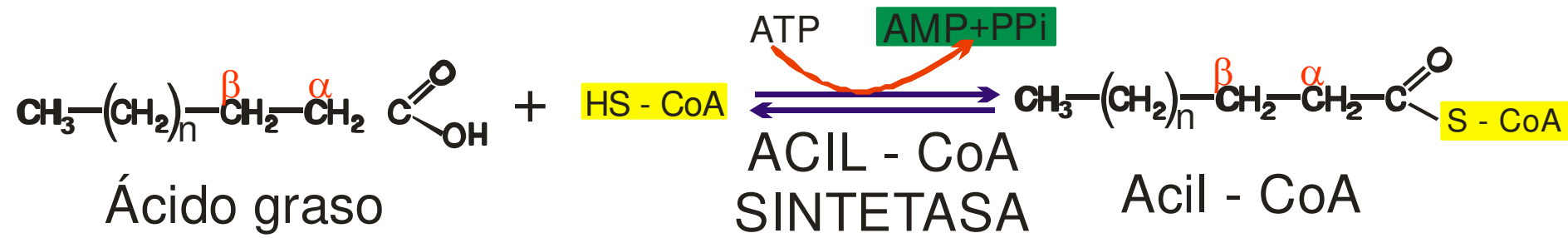


# β-Oxidación de los ácidos grasos



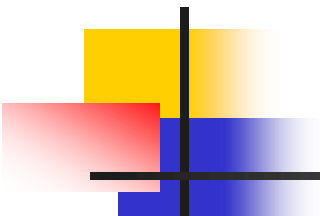
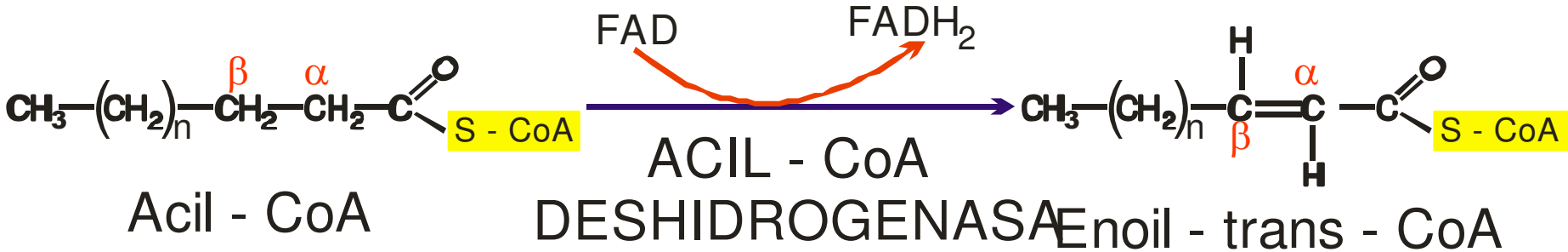
# $\beta$ – Oxidación de los ácidos grasos

## Activación de los ácidos grasos



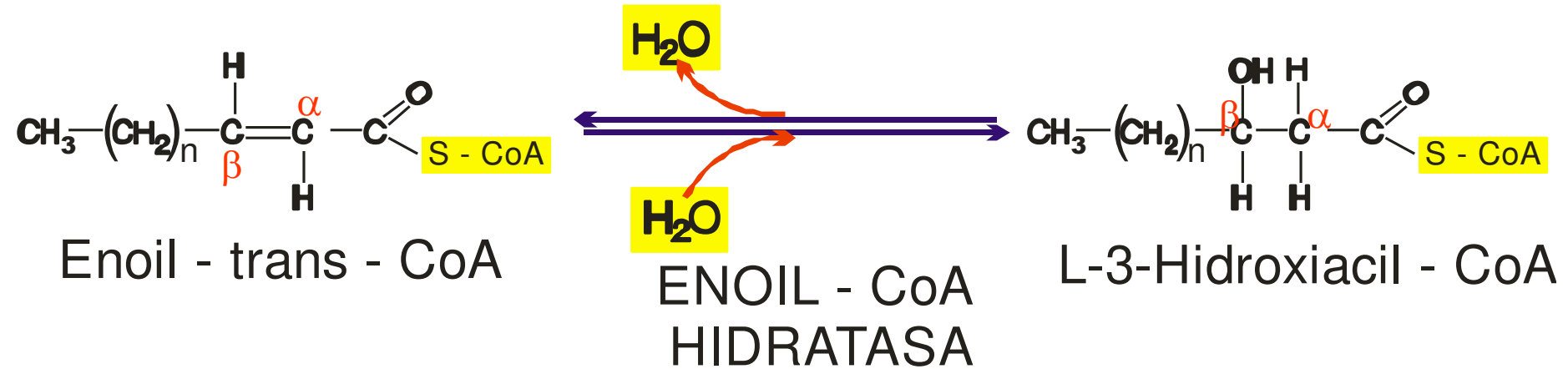
# β – Oxidación de los ácidos grasos

## Primera etapa de deshidrogenación



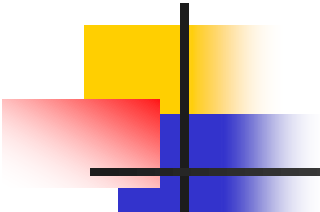
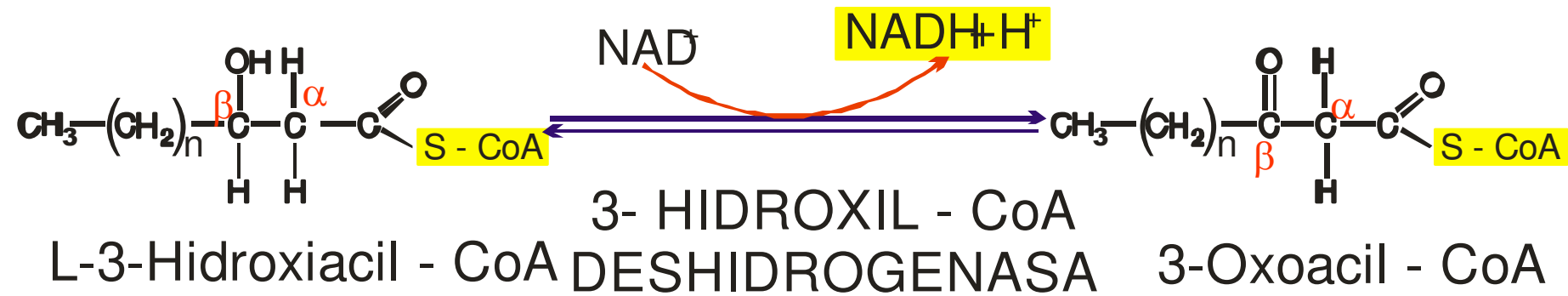
# $\beta$ – Oxidación de los ácidos grasos

## Etapa de hidratación



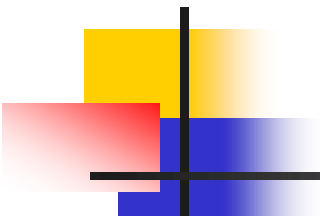
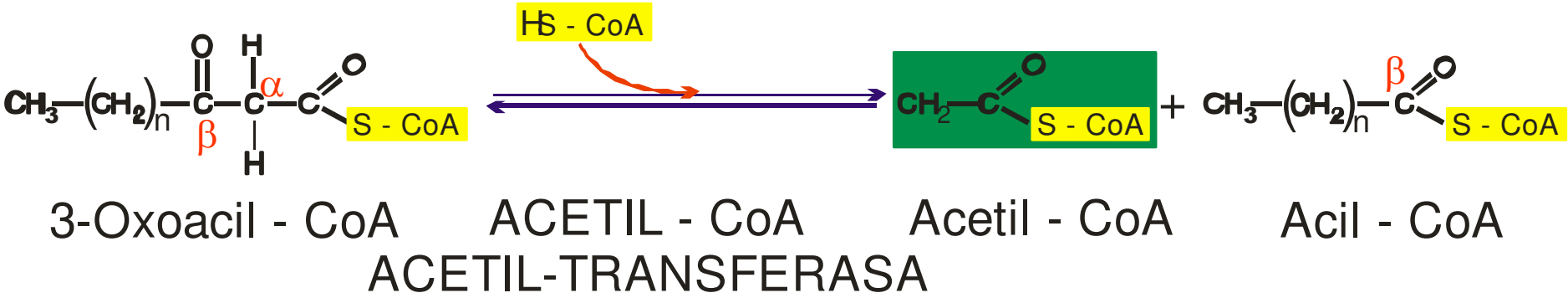
# β – Oxidación de los ácidos grasos

## Segunda etapa de deshidrogenación



# β – Oxidación de los ácidos grasos

## Etapa de escisión







# Balance energético de la $\beta$ -Oxidación de los Ácidos Grasos

Por cada vuelta se obtiene: 1  $\text{FADH}_2$ , 1  $\text{NADH}$  y 1 Acetil-CoA.

Para el ácido palmítico, de 16 átomos de carbono (en siete vueltas) se obtiene: 7  $\text{FADH}_2$ , 7  $\text{NADH}$  y 8 AcetilCoA

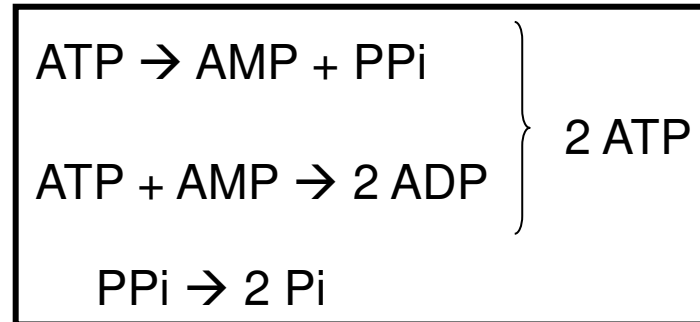
Por cada Acetil-CoA en el ciclo de Krebs se obtiene: 3  $\text{NADH}$ , 1  $\text{FADH}_2$  y 1  $\text{GTP}$ .

$$3 \times 3 \text{ ATP} + 1 \times 2 \text{ ATP} + 1 \text{ GTP} = 12 \text{ ATP}$$

8 Acetil-CoA rinden  $8 \times 12 = 96 \text{ ATP}$

7  $\text{FADH}_2$  rinden  $7 \times 2 = 14 \text{ ATP}$

7  $\text{NADH}$  rinden  $7 \times 3 = 21 \text{ ATP}$



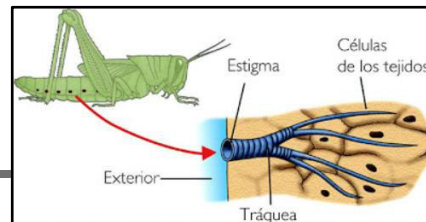
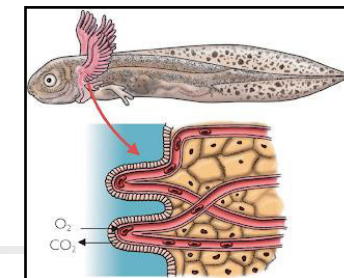
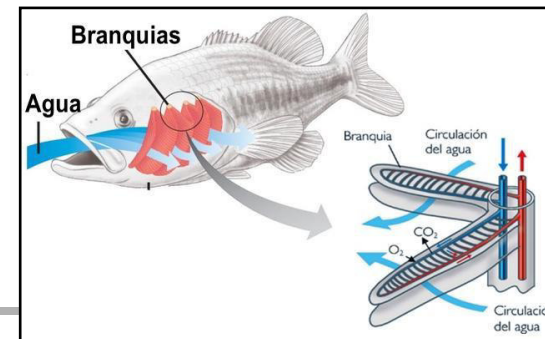
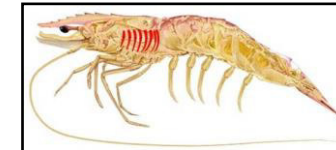
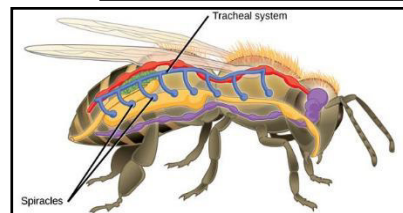
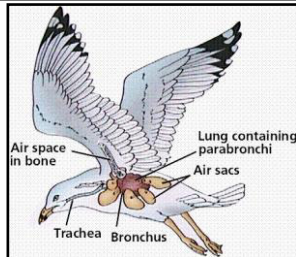
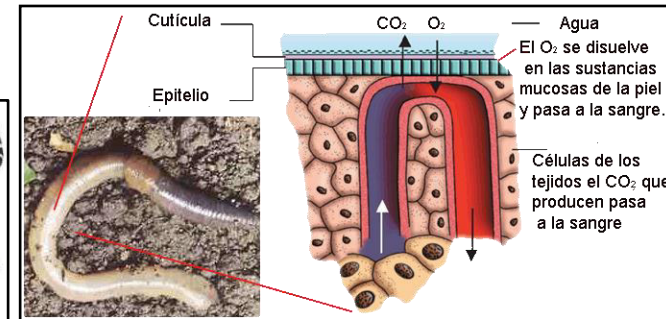
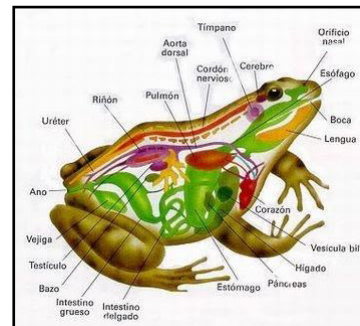
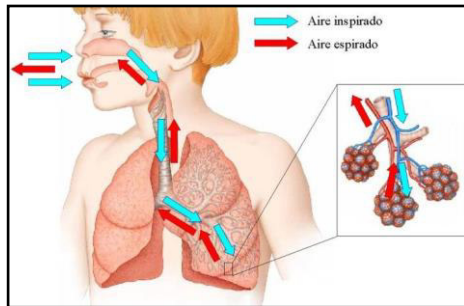
En total:  $96 + 14 + 21 = 131 \text{ ATP}$ , pero se consumen 2  $\text{ATP}$  en la activación del ácido graso al final quedan **129 ATP**. Con una eficacia en torno al 40%, como en la respiración de la glucosa.

# RESPIRACIÓN

Función biológica de los seres vivos por la que absorben  $O_2$  disuelto en aire o agua, y expulsan  $CO_2$

La respiración celular o respiración interna es el conjunto de reacciones bioquímicas por las cuales compuestos orgánicos son degradados completamente, por oxidación, hasta convertirse en sustancias inorgánicas

Proceso CATABOLICO que proporciona energía aprovechable por la célula (ATP)





# CATABOLISMO

## Respiración

Oxidación TOTAL de la materia orgánica.  
Los productos de reacción no contienen energía.  
Se libera TODA la energía.

### Aerobia

Aceptor final el  $O_2$

### Anaerobia

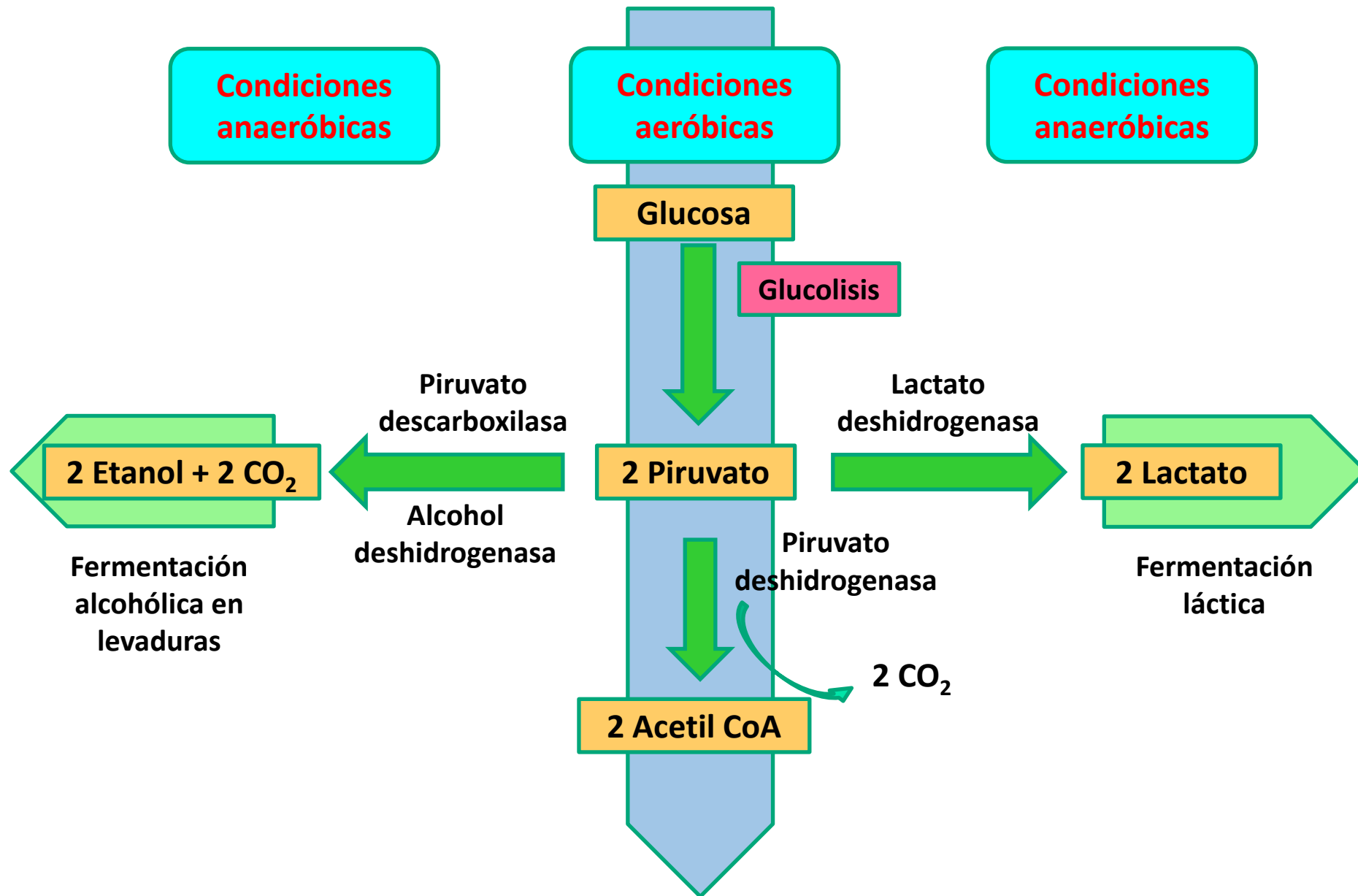
Aceptor final molécula inorgánica distinta del  $O_2$

## Fermentación

Oxidación PARCIAL de la materia orgánica  
Los productos de reacción contienen todavía energía  
Se libera POCA energía  
El aceptor final de  $e^-$  es una molécula orgánica.

Fermentación Alcohólica

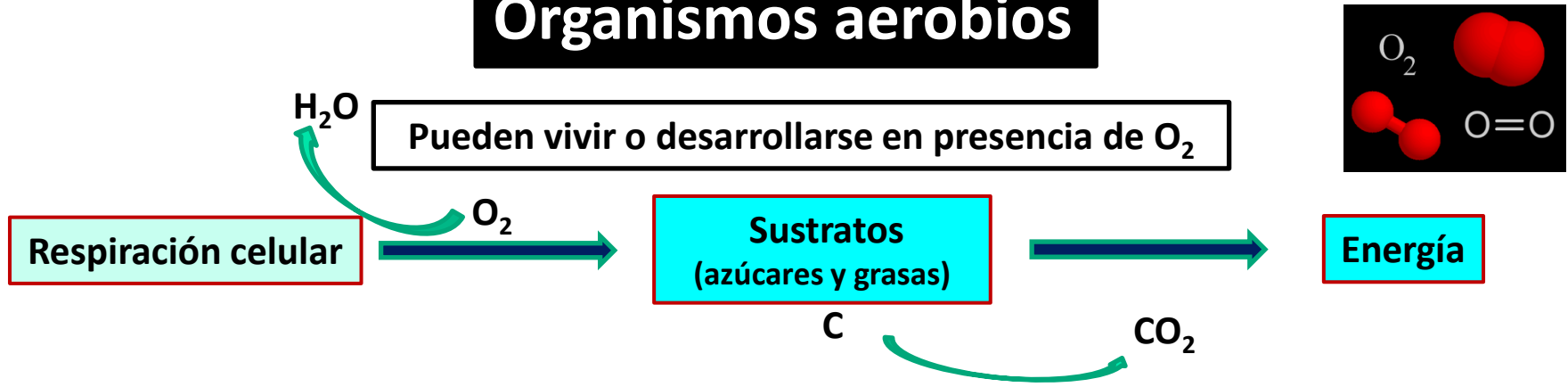
Fermentación Láctica



Eucariotas y algunos microorganismos



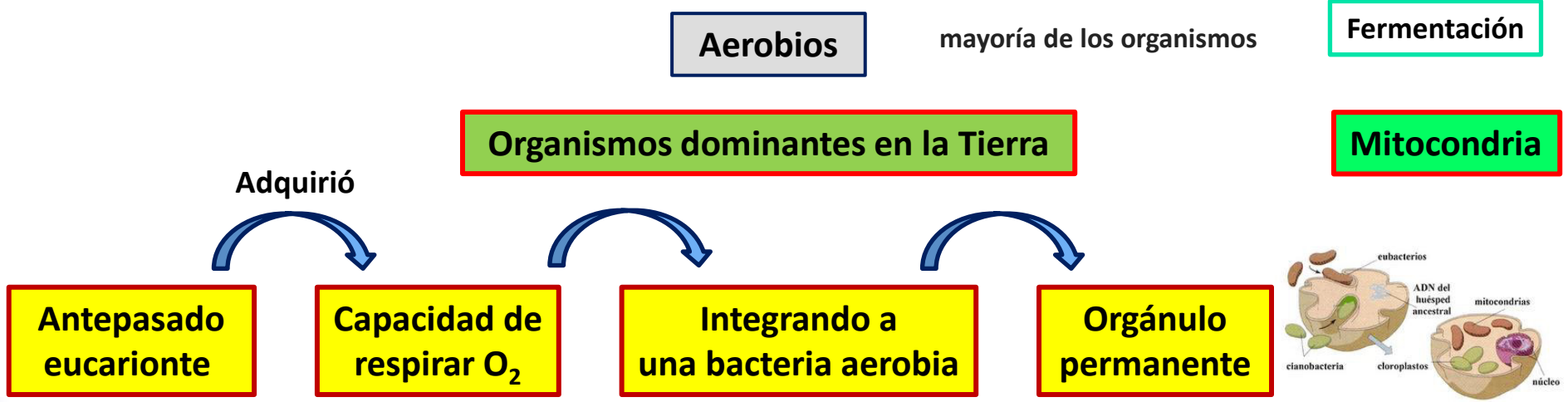
# Organismos aerobios



Surgió en la evolución después de que la fotosíntesis oxigénica liberó  $O_2$  a la atmósfera (2.500 M.a)

Era para contrarrestar la toxicidad del  $O_2$ , más que una manera de aprovecharlo

La oxidación de la glucosa produce más energía que su utilización anaerobia



# MITOCONDRIAS

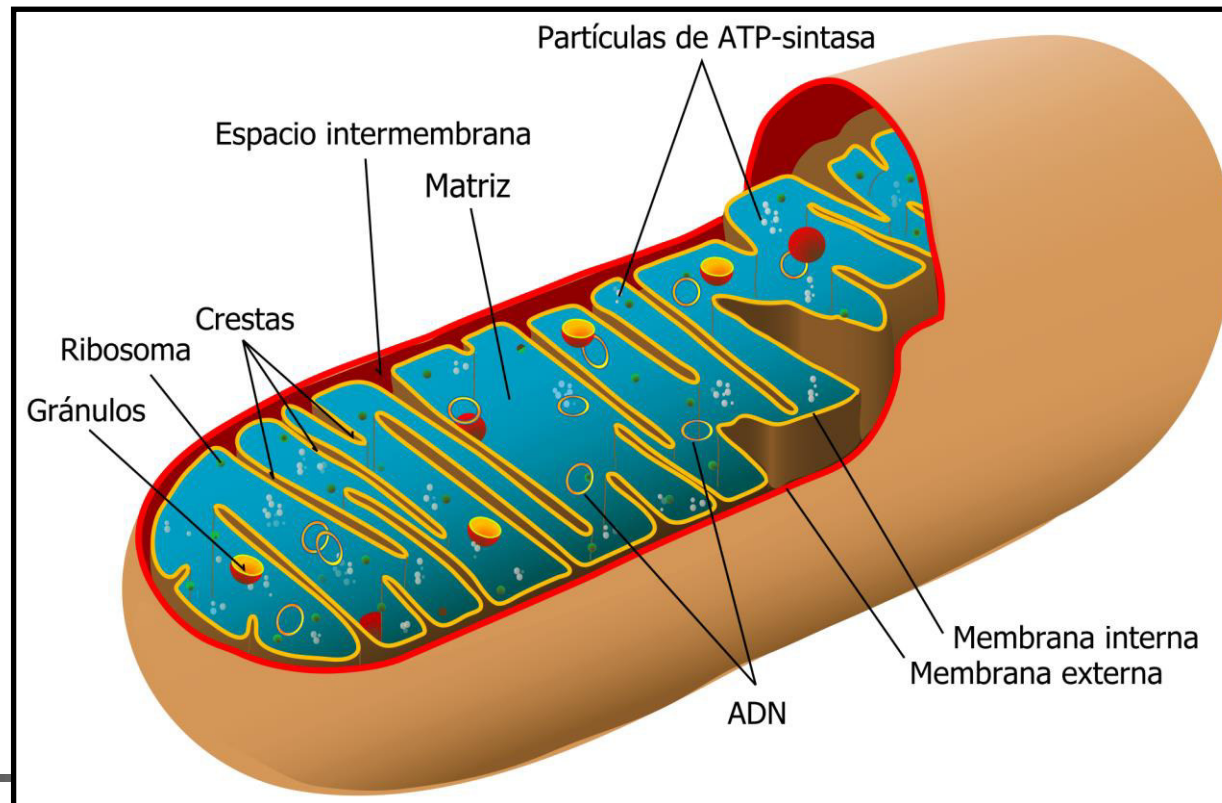
Son las "centrales energéticas" de las células eucariotas

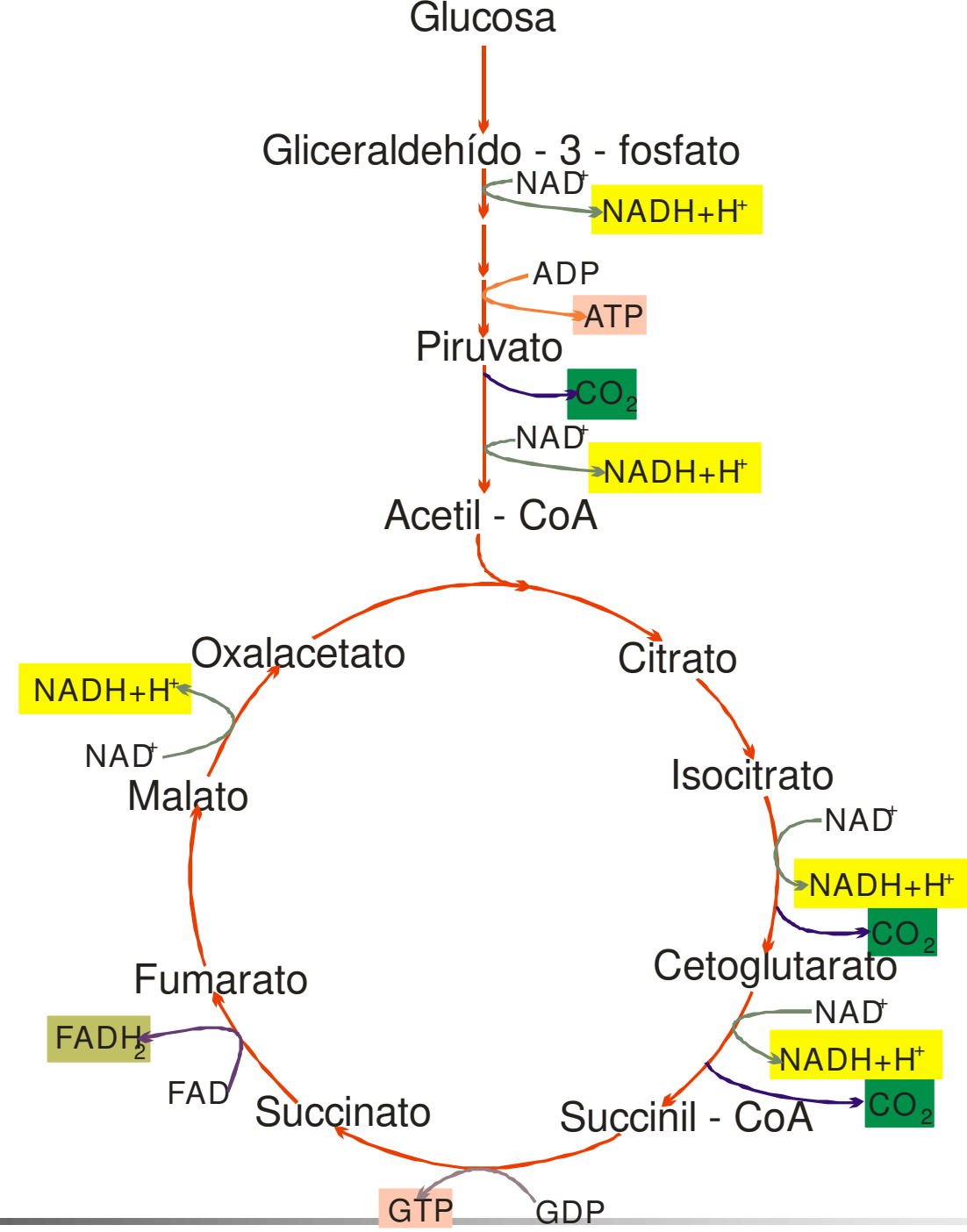
Energía almacenada en moléculas orgánicas

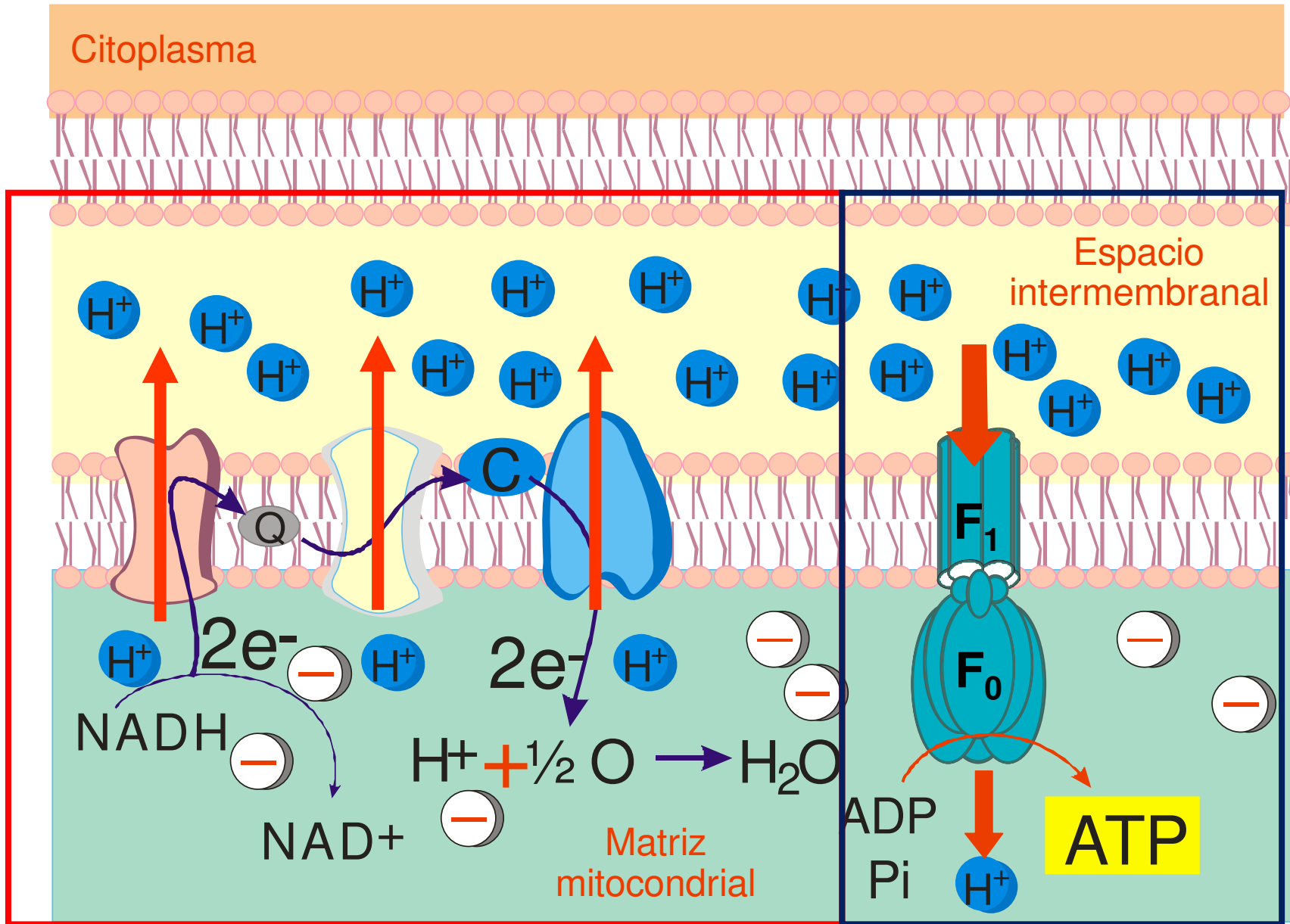
Energía utilizable para la célula

Respiración celular

**Función: Producir un suministro constante de ATP**







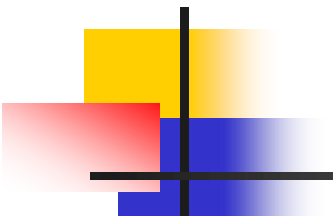
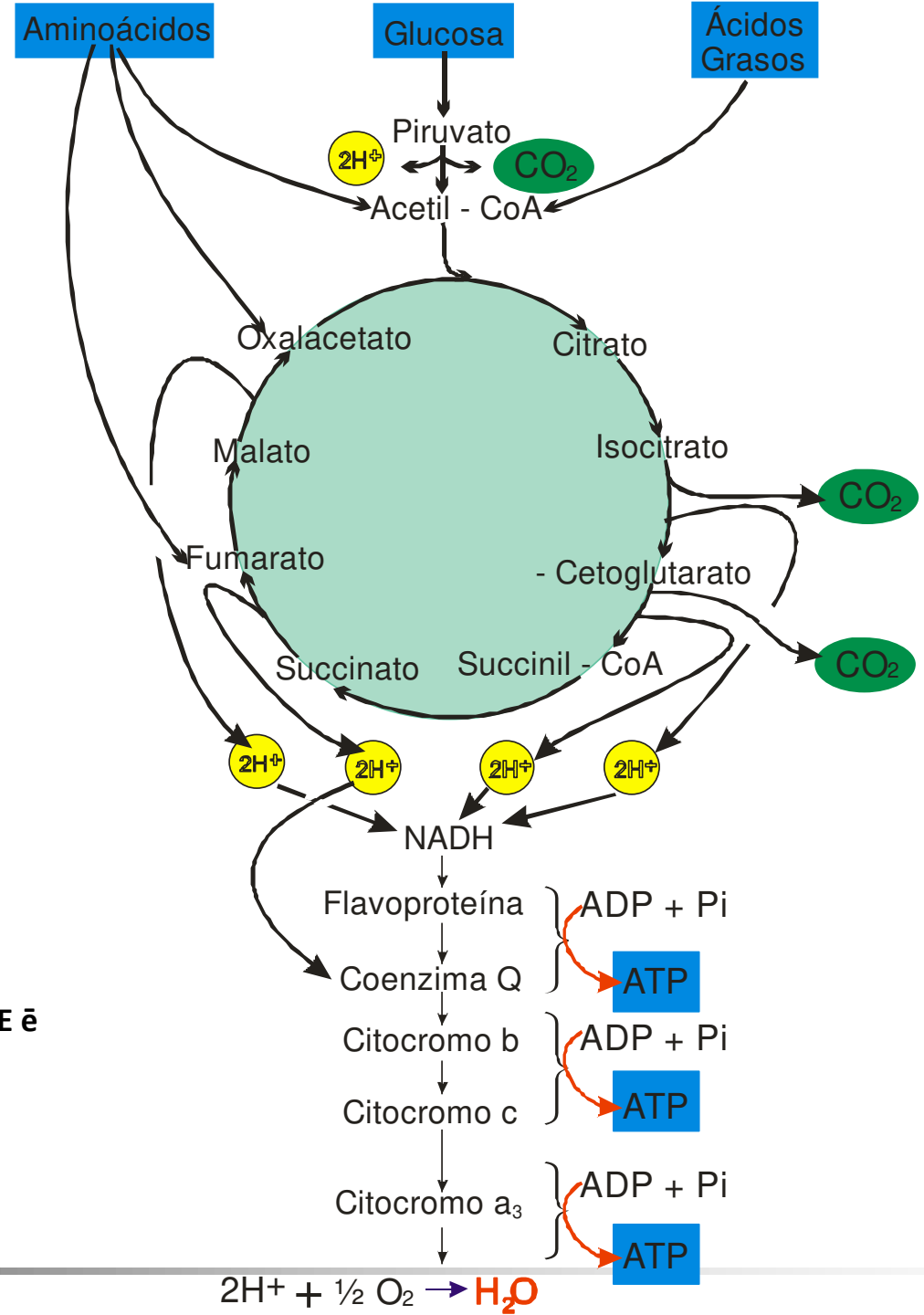




GLUCOLISIS

CICLO DE KREBS

CADENA DE TRANSPORTE DE e<sup>-</sup>





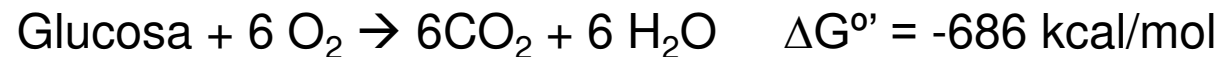
# Balance global de la respiración de la glucosa

Los NADH + H<sup>+</sup> generados en el citoplasma pasan al interior de la mitocondria y en la cadena de transporte electrónico rinden 3 ATP (y no 2 como viene en vuestro libro). Hay casos en que rinde solo 2 ATP.

Los NADH + H<sup>+</sup> que se generan en la matriz mitocondrial general 3 ATP al pasar por la cadena electrónica.

Los FADH<sub>2</sub> formados en la matriz mitocondrial solo generan 2 ATP en la cadena de transporte de e<sup>-</sup>.

El GTP generado en el ciclo de Krebs se cuenta como un ATP

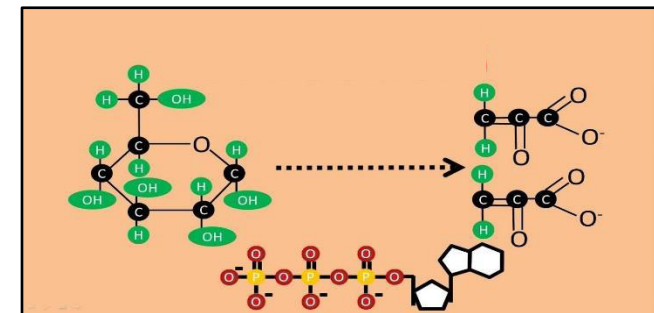
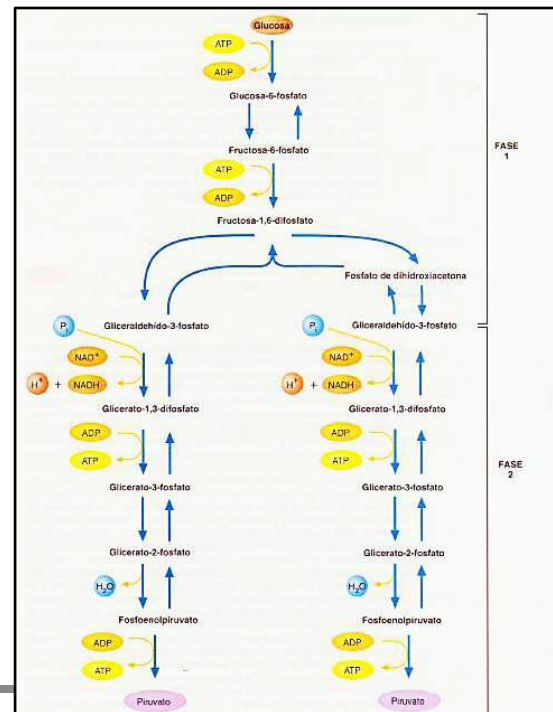
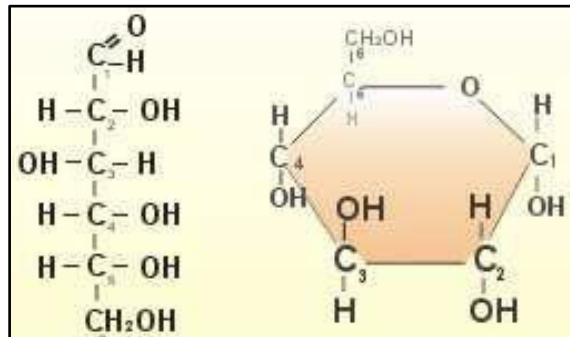


$$\text{Eficacia} \rightarrow (263 / 686) \times 100 = 38\%$$

# OXIDACIÓN DE GLUCOSA

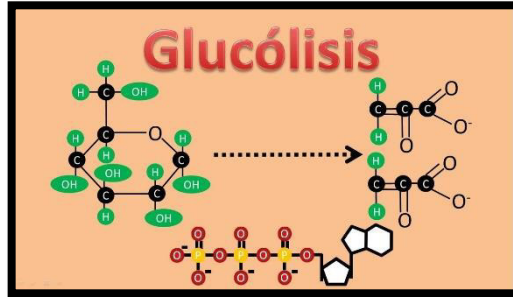
## GLUCOLISIS

- Partición de 1 molécula de glucosa en 2 moléculas de piruvato.
- Se produce en 10 reacciones sucesivas.
- Se realiza en el citoplasma de la célula.
- Se inicia cuando la glucosa entra a través de la membrana celular.
- Se realiza sin presencia de  $O_2$ .



**Glucolisis (citosol de la célula ):**

Durante la glucólisis, 1 molécula de glucosa es oxidada y escindida en 2 moléculas de ácido pirúvico (piruvato). el número de carbonos se mantiene constante (6 en la molécula inicial de glucosa, 3 en cada una de las 2 moléculas de ácido pirúvico).



se obtienen 2 moléculas de ATP y se reducen 2 moléculas de NAD<sup>+</sup>

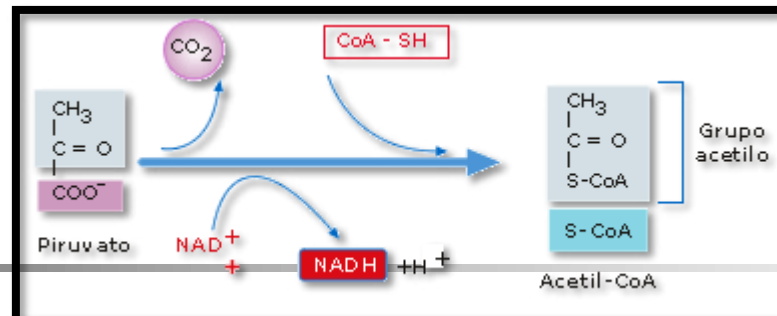
El piruvato obtenido es transportado al interior de la mitocondria

Para que este transporte tenga lugar, los ácidos grasos pasan primero por el retículo endoplasmático donde se unen a la coenzima A

**Formacion de acetil coenzima A (matriz mitocondrial): Acetil CoA**

Los ácidos grasos entran a la matriz mitocondrial mediante traslocación en un transportador de carnitina

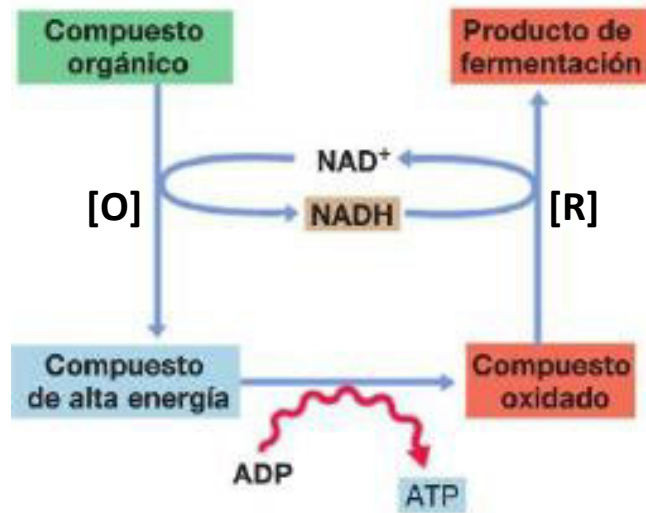
Imprescindible para la síntesis de los ácidos grasos, el colesterol y la acetilcolina.



- ❖ Muchos hábitats microbianos son ANÓXICOS.
- ❖ En estos ambientes, la descomposición de un material orgánico se produce por vía ANAEROBIA.
- ❖ Si en los hábitats microbianos ANÓXICOS no se dispone de los suministros adecuados de aceptores de  $e^-$ , como  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  y  $Fe^{3+}$  los compuestos orgánicos se catabolizan por FERMENTACIÓN

Es un proceso de oxidorreducción (redox)

El SUSTRATO fermentable se OXIDA y REDUCE a la vez



El producto de fermentación se excreta de la célula y sólo se utiliza para la biosíntesis una cantidad relativamente pequeña del compuesto orgánico original.



Proceso CATABOLICO que degrada compuestos y se obtiene ATP

El aceptor de  $e^-$  es una molécula orgánica (piruvato, acetaldehído)

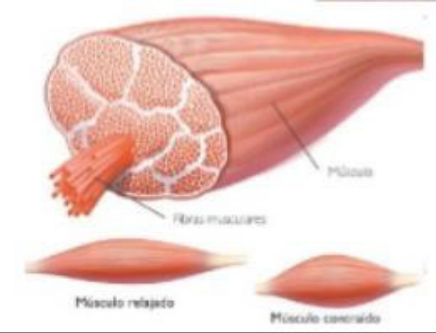
Proceso  
**ANAEROBIO**

Productos finales  
**ORGÁNICOS (EtOH,  
Ac. Lactico)**

**Menor  
rendimiento  
energético que la  
respiración**

### ANAEROBIOS FACULTATIVOS:

Vía alternativa que se usa si no hay  $O_2$



### ANAEROBIOS ESTRICTOS:

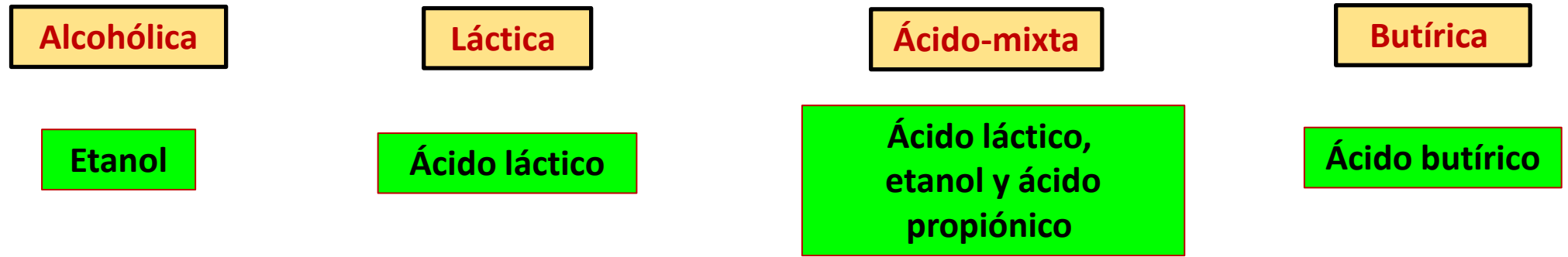
Las únicas vías para producir energía son la fermentación y la respiración anaerobia

- ❖ NO participa nada parecido a una cadena transportadora de  $e^-$ .
- ❖ La mayoría de los organismos anaerobios la utilizan para obtener energía química

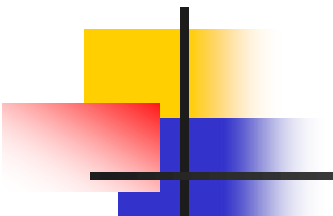
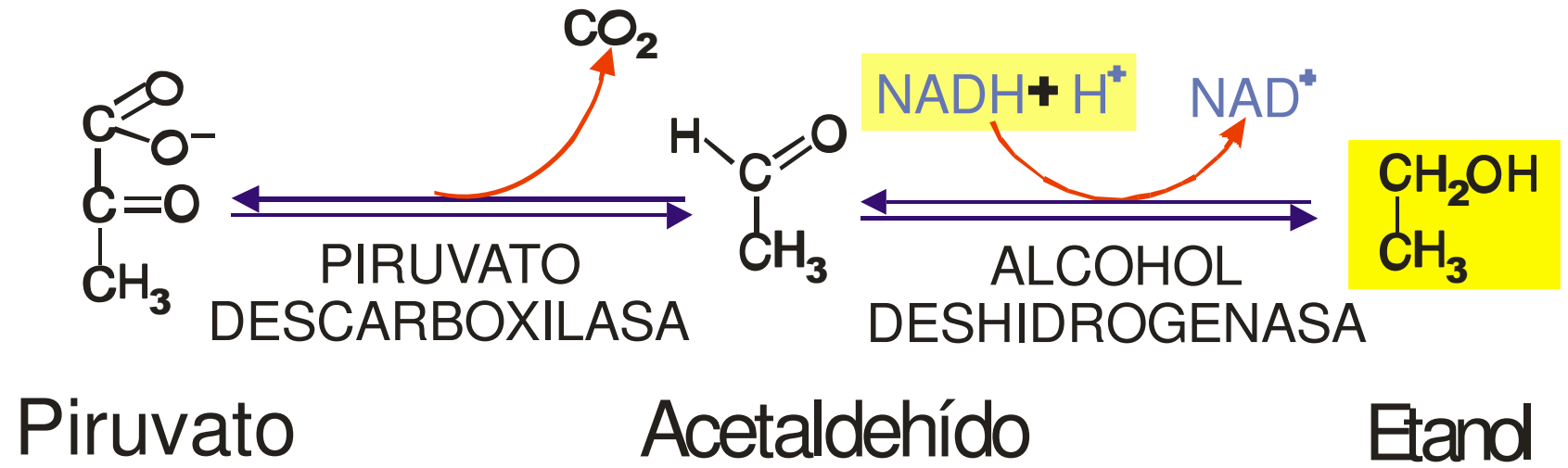


# FERMENTACIÓN

Existen diferentes tipos de fermentación en función de la ruta metabólica utilizada

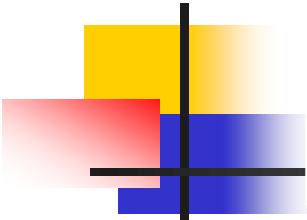


## FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA



## FERMENTACIONES BACTERIANAS FRECUENTES Y ORGANISMOS QUE LAS REALIZAN

TIPO	REACCIÓN	ORGANISMOS
Alcohólica	Hexosa $\rightarrow$ 2 Etanol + 2CO <sub>2</sub>	Levaduras, <i>Zymomonas</i>
Homoláctica	Hexosa $\rightarrow$ 2 Lactato <sup>-</sup> + 2H <sup>+</sup>	<i>Streptococcus</i> , algunos <i>Lactobacillus</i>
Heteroláctica	Hexosa $\rightarrow$ Lactato <sup>-</sup> + Etanol + CO <sub>2</sub> + H <sup>+</sup>	<i>Leuconostoc</i> , algunos <i>Lactobacillus</i>
Ácido propiónico	3 Lactato <sup>-</sup> $\rightarrow$ 2 Propionato <sup>-</sup> + Acetato <sup>-</sup> + CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	<i>Propionibacterium</i> , <i>Clostridium propionicum</i>
Ácido mixta	Hexosa $\rightarrow$ Etanol + 2,3-Butanodiol + Succinato <sup>2-</sup> + Lactato <sup>-</sup> + Acetato <sup>-</sup> + Formiato <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub>	Bacterias entéricas <i>Escherichia</i> , <i>Salmonela</i> , <i>Shigella</i> , <i>Klebsiella</i> , <i>Enterobacter</i>
Ácido butírico	Hexosa $\rightarrow$ Butirato <sup>-</sup> + 2H <sub>2</sub> + 2CO <sub>2</sub> + H <sup>+</sup>	<i>Clostridium butyricum</i>
Butanol	2 Hexosa $\rightarrow$ Butanol + Acetona + 5 CO <sub>2</sub> + 4 H <sub>2</sub>	<i>Clostridium acetobutylicum</i>
Caproato/Butirato	6 Etanol + 3 Acetato <sup>-</sup> $\rightarrow$ 3Butirato <sup>-</sup> + Caproato <sup>-</sup> + 2H <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O + H <sup>+</sup>	<i>Clostridium kluyveri</i>
Acetogénica	Fructosa $\rightarrow$ 3 Acetato <sup>-</sup> + 3H <sup>+</sup>	<i>Clostridium aceticum</i>







# FERMENTACIÓN DEL ÁCIDO LÁCTICO

Las **BACTERIAS DEL ÁCIDO LÁCTICO** son Gram + que producen **ÁCIDO LÁCTICO** como un producto principal o único de la **FERMENTACIÓN**.

Hay 2 rutas

**HOMOFERMENTATIVA**

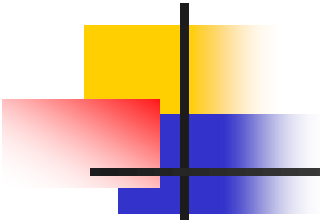


Produce un **ÚNICO PRODUCTO** de fermentación: el **ÁCIDO LÁCTICO**

**HETEROFERMENTATIVA**



Además del **LACTATO** genera otros productos, principalmente **ETANOL + CO<sub>2</sub>**



# VÍAS METABÓLICAS PARA LA FERMENTACIÓN DE LA GLUCOSA

## HOMOFERMENTATIVAS

bacterias homofermentativas del ácido láctico

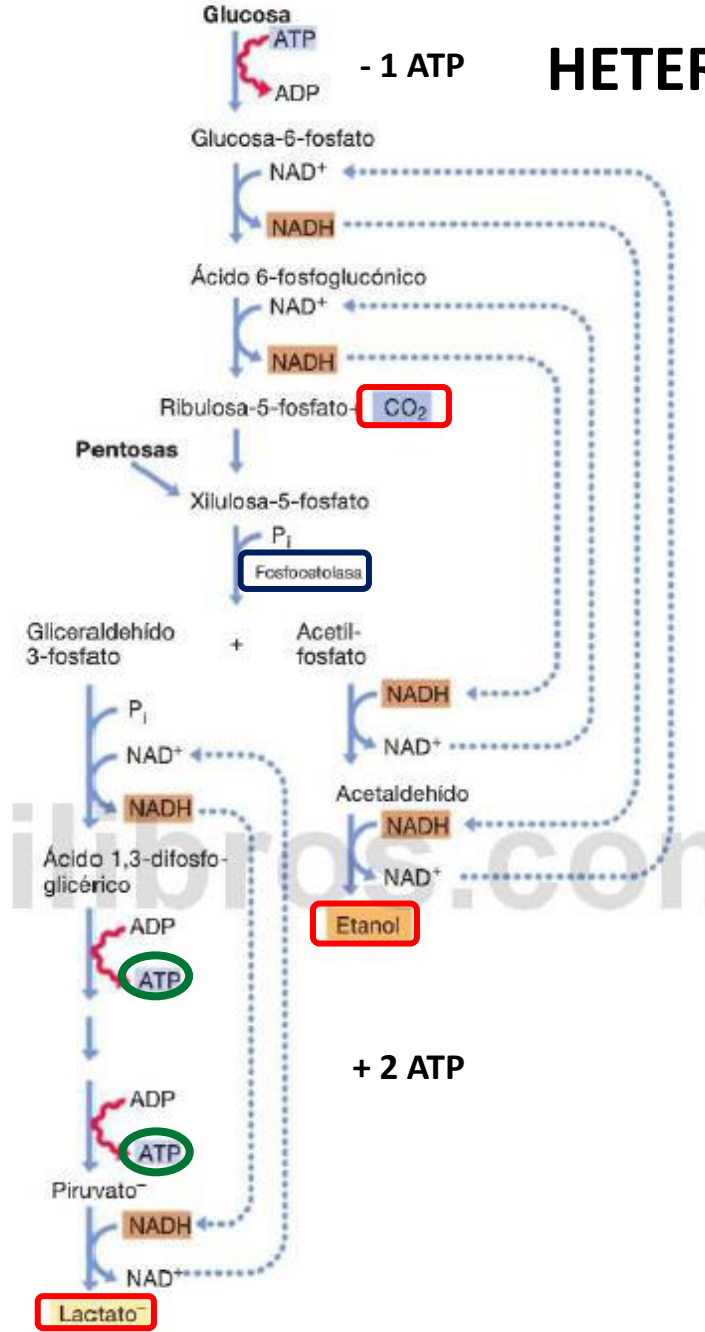
- Contienen ALDOLASA.
- Producen 2 lactatos a partir de glucosa por la vía glucolítica

Ganancia neta por molécula de glucosa fermentada:

- 2 ATP
- 2 Lactatos



# HETEROFERMENTATIVAS



- CARECEN de ALDOLASA por lo que NO pueden descomponer la fructosa-difosfato en triosa-fosfato.
- En su lugar, oxidan la glucosa-6-fosfato a 6-fosfogluconato y luego descarboxilan ésta a pentosa-fosfato, que se convierte en triosa-fosfato y acetil-fosfato mediante la enzima clave FOSFOCETOLASA.

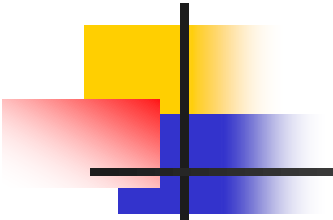
Ganancia neta por molécula de glucosa fermentada:

- 1 ATP
- 1 Lactato
- 1 Etanol + CO<sub>2</sub>

Las etapas iniciales del catabolismo de las bacterias heterofermentativas del ácido láctico son las de la vía de las pentosas-fosfato



- ❖ En las **HETEROFERMENTATIVAS**, la triosa-fosfato se convierte por último en ácido láctico con la producción de ATP.
- ❖ Sin embargo, para conseguir un equilibrio redox, el acetil-fosfato producido se reduce con NADH (generado durante la producción de pentosas-fosfato) y se convierte en ETANOL sin que se sintetice ATP, ya que el enlace con el CoA de alta energía se pierde durante esta reducción.
- ❖ Por ello, las **HETEROFERMENTATIVAS** producen sólo 1 ATP/glucosa en vez de los 2 ATP/glucosa que se producen en las **HOMOFERMENTATIVAS**.
- ❖ Además, como las **HETEROFERMENTATIVAS** descarboxilan el 6-fosfogluconato, producen CO<sub>2</sub> como producto de fermentación (las homofermentativas no).
- ❖ Por lo tanto, un modo sencillo de detectar una **HETEROFERMENTATIVA** consiste en observar la producción de CO<sub>2</sub> en los cultivos de laboratorio.



# FERMENTACIONES ÁCIDO-MIXTAS

Característica de las bacterias entéricas *E. coli*

Se forman 3 ácidos a partir de la fermentación de la glucosa u otros azúcares

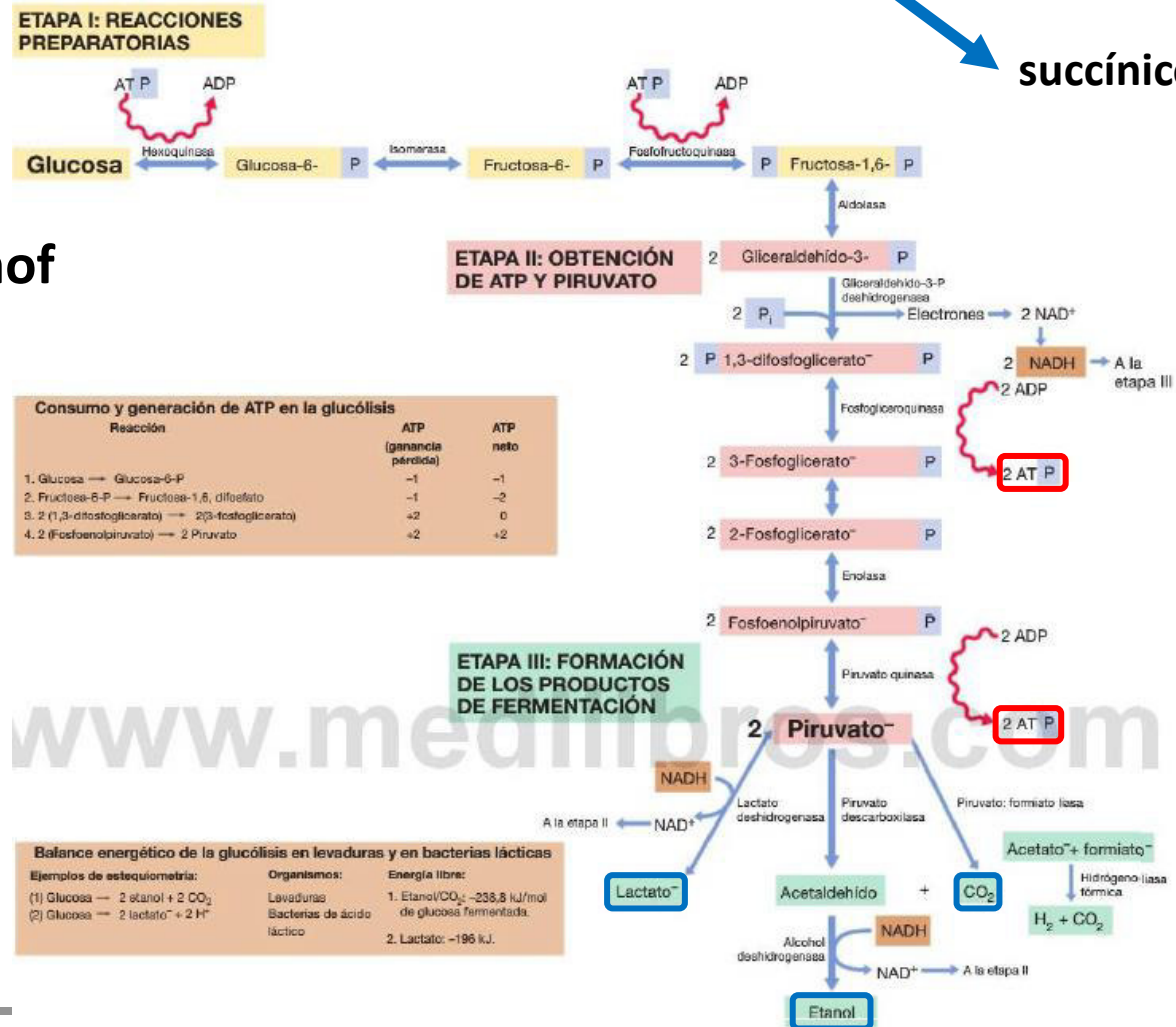
acético

láctico

succínico

También etanol, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>

Ruta de Embden-Meyerhof  
(glucólisis)



Conversión de la glucosa en piruvato y luego del piruvato en productos de fermentación.

# ORGANISMOS ANAEROBIOS O ANAERÓBICOS



**Respiración anaeróbica**

**Cadena de transporte de  $e^-$  análoga a la de la respiración aeróbica (mitocondria)**

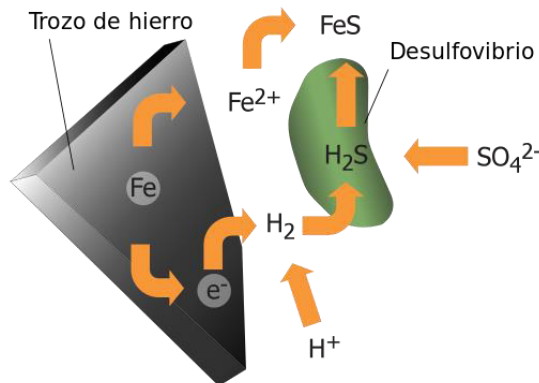
**NO usan  $O_2$  en su metabolismo**

proceso biológico de oxidación-reducción de monosacáridos y otros compuestos

Metabolismo común y exclusivo en muchos microorganismos procariotas



- $SO_4^{2-}$
- $NO_3^-$
- $CO_3^{2-}$
- $CO_2$
- $Fe^{3+}$



Esta respiración es menos eficaz ya que estos compuestos tienen un potencial redox menos positivo que el par  $O_2/H_2O$  que es de + 0,82 V y rinden menos ATP

La vida probablemente evolucionó en condiciones anaerobias junto con la glucólisis produciéndose por cada molécula de glucosa 2 moléculas de ácido pirúvico, el cual puede seguir diferentes caminos:

- La fermentación alcohólica, la láctica, la acética
- La respiración aerobia



# ORGANISMOS ANAEROBIOS O ANAERÓBICOS



## ESTRICTOS

NO pueden vivir o desarrollarse en presencia de  $O_2$

## AEROTOLERANTES

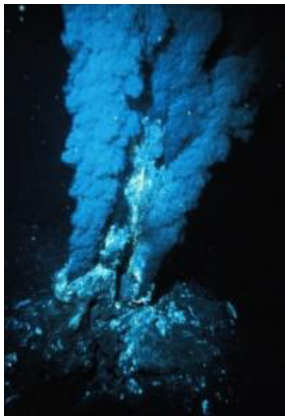
NO pueden usar  $O_2$  para crecer pero toleran su presencia

## FACULTATIVOS

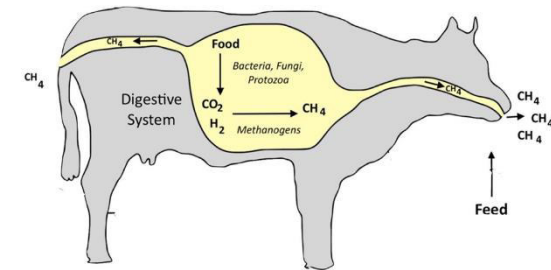
Si hay, usan  $O_2$ , pero pueden desarrollarse en su ausencia

Muchos microorganismos sobreviven en los intestinos de animales, en suelo profundo, en sedimentos y sitios donde el  $O_2$  está casi, o totalmente, ausente.

La mayoría de los organismos anaerobios la utilizan para obtener energía química



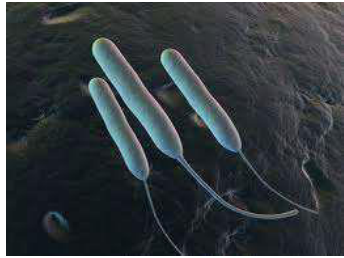
Biodigestor con patas



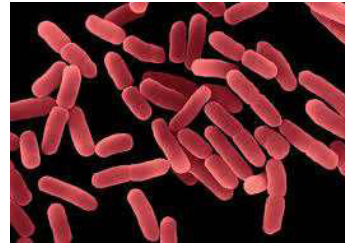
## BIOCOMBUSTIBLE

Generar luz, calor, alimentar una heladera, el motor de un auto.

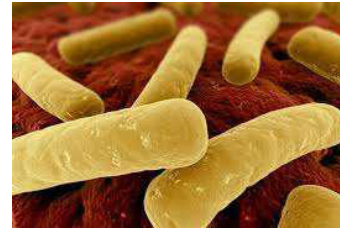
- ❖ La respiración **AERÓBICA** es propia de los organismos eucariontes como Plantas, Animales, Hongos, Protistas y de algunos tipos de bacterias y arqueas.
- ❖ La Respiración **ANAERÓBICA** la realizan exclusivamente algunos grupos de procariotas:



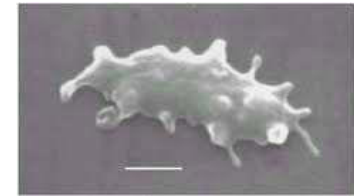
*Pseudomonas*



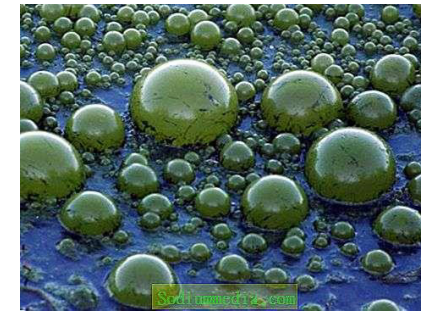
*Bacillus*



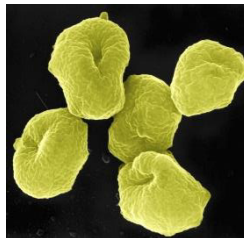
*Clostridium*



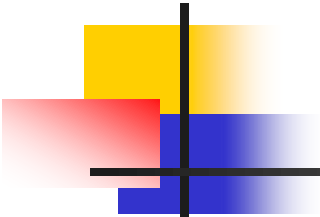
*Thermoplasma*



Arqueas



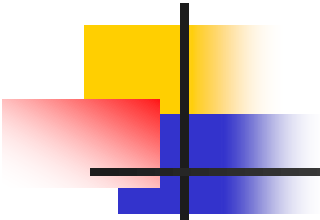






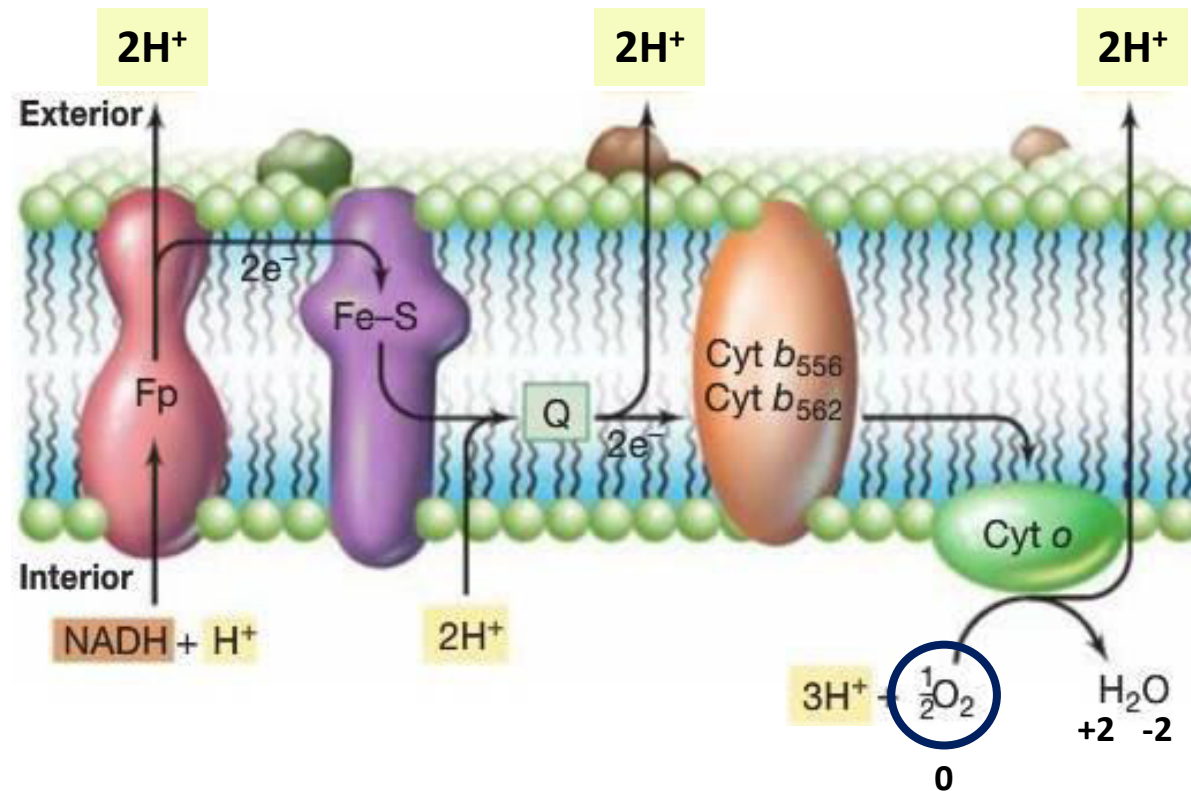
# RESPIRACIÓN ANAEROBIA

- ❖ En algunos organismos, como las bacterias desnitrificantes, que son en su mayor parte **AEROBIOS FACULTATIVOS**, la respiración anaerobia compite con la respiración aerobia.
- ❖ Si el  $O_2$  está presente, las bacterias respiran de forma **AEROBIA**, y los genes que codifican los procesos anaerobios están **REPRIMIDOS**.
- ❖ Cuando se **AGOTA** el  $O_2$ , las bacterias respiran de forma **ANAEROBIA** y se **REDUCE** el aceptor de  $e^-$  **ALTERNATIVO**.
- ❖ Los **ANAEROBIOS ESTRICTOS** que usan respiración anaerobia son **INCAPACES** de utilizar el  $O_2$ .
- ❖ La **ENERGÍA LIBERADA** por la oxidación de un donador de  $e^-$  utilizando  $O_2$  como aceptor de  $e^-$  es **MAYOR** que si el mismo compuesto se oxidara con un aceptor de  $e^-$  alternativo.



# RESPIRACIÓN AEROBIA

Los microorganismos emplean sistemas de transporte de  $\bar{e}$  con citocromos, quinonas, ferrosulfoproteínas y otras proteínas típicas del transporte de  $\bar{e}$ .



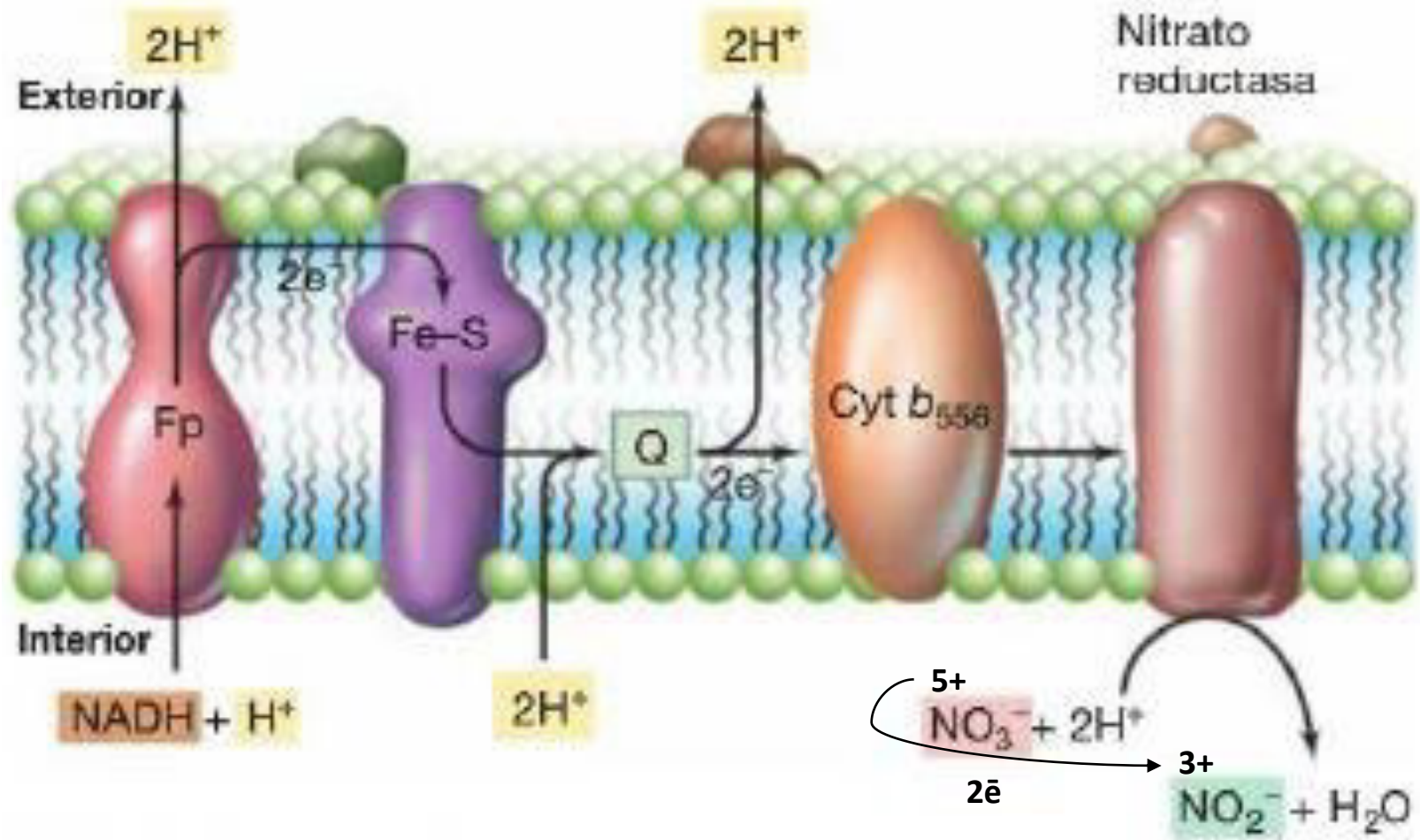


# REDUCCIÓN DEL NITRATO Y DESNITRIFICACIÓN

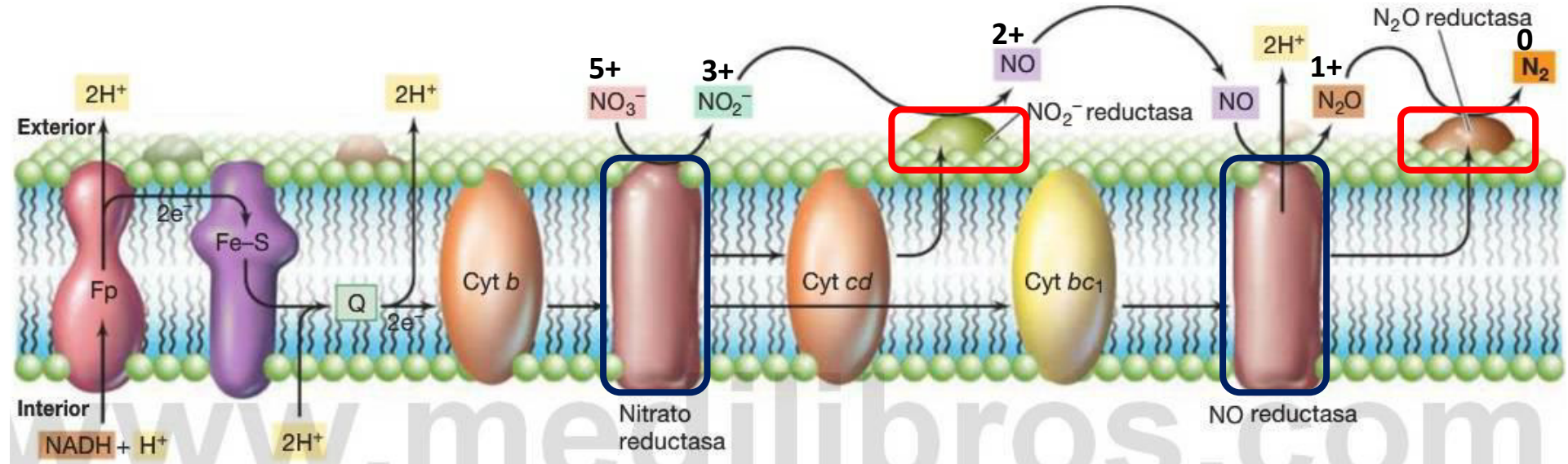


- ❖ Los compuestos nitrogenados inorgánicos son algunos de los aceptores de  $e^-$  más frecuentes en la respiración ANAEROBIA.
- ❖ Uno de los aceptores de  $e^-$  alternativo más habitual es el  $\text{NO}_3^-$ , que se puede reducir a  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{N}_2$ .
- ❖ Como todos estos productos de reducción del  $\text{NO}_3^-$  son gaseosos, se pueden perder con facilidad del ambiente en un proceso que se denomina desnitrificación.
- ❖ La desnitrificación es el principal proceso por el cual se forma  $\text{N}_2$  gaseoso biológicamente.
- ❖ El  $\text{N}_2$  es una fuente de nitrógeno mucho peor que el  $\text{NO}_3^-$  para las plantas y los microorganismos, por lo que la desnitrificación es un proceso perjudicial al menos en agricultura.
- ❖ Sin embargo, es beneficiosa para el tratamiento de las aguas residuales porque convierte el  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{N}_2$ , y se disminuye la carga de nitrógeno fijado en los vertidos de las aguas residuales tratadas que de otra forma estimularía el crecimiento de algas en las aguas receptoras.

# REDUCCIÓN DE NITRATO



# Esquema del transporte de $e^-$ en las membranas de *Pseudomonas stutzeri* durante la desnitrificación



- ❖ La nitrato-reductasa y la óxido nítrico (NO)-reductasa son proteínas integrales de la membrana.
- ❖ Mientras que la nitrito ( $NO_2^-$ )-reductasa y la óxido nitroso ( $N_2O$ )-reductasa son enzimas periplásmicas o periféricas.



## METABOLISMO ASIMILADOR

**SÓLO se REDUCE una cantidad suficiente del compuesto ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$ ) para satisfacer las necesidades biosintéticas, ya que los PRODUCTOS se convierten en MATERIAL CELULAR en forma de macromoléculas.**

- ❖ **MUCHOS organismos llevan a cabo un metabolismo ASIMILADOR de compuestos como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{CO}_2$ .**

## METABOLISMO DESASIMILADOR

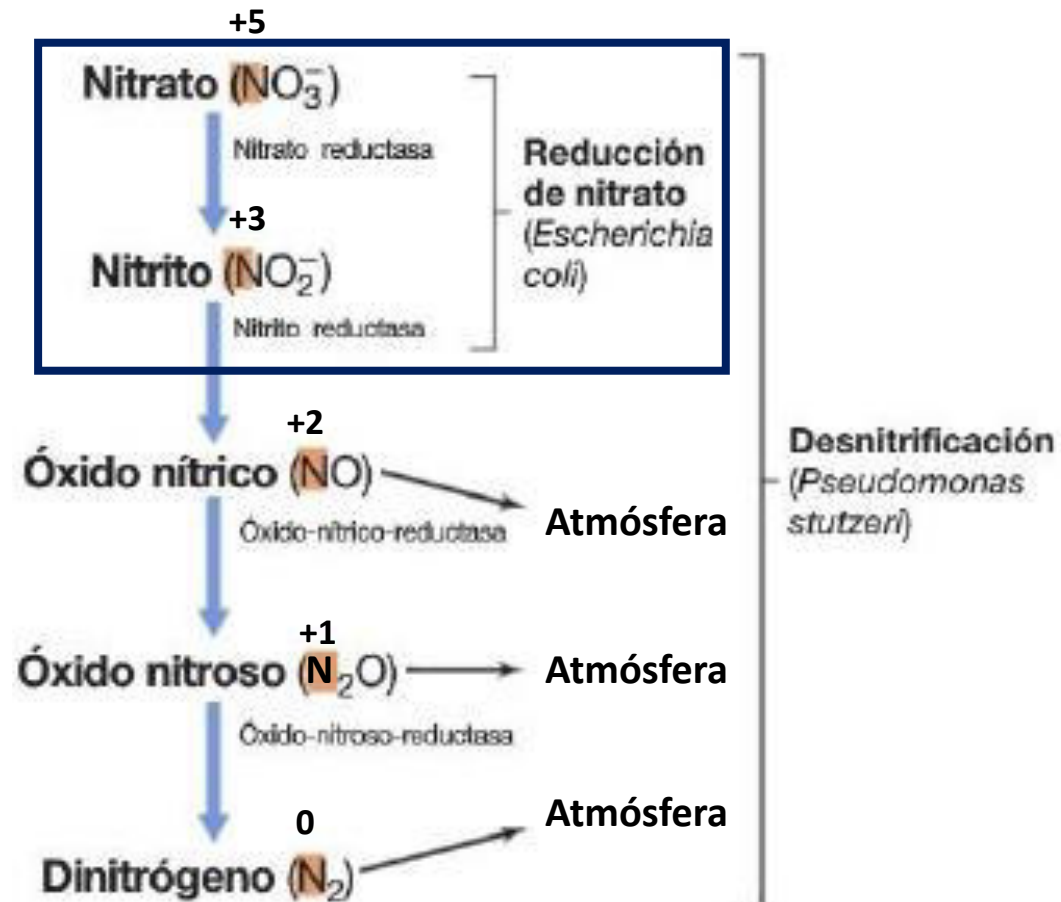
**Se REDUCE una gran cantidad del aceptor de  $e^-$  y el PRODUCTO reducido se EXCRETA al ambiente.**

- ❖ **Sólo unos POCOS organismos, principalmente procariotas, realizan el metabolismo DESASIMILADOR.**

# REDUCCIÓN DESASIMILADORA DE NITRATO



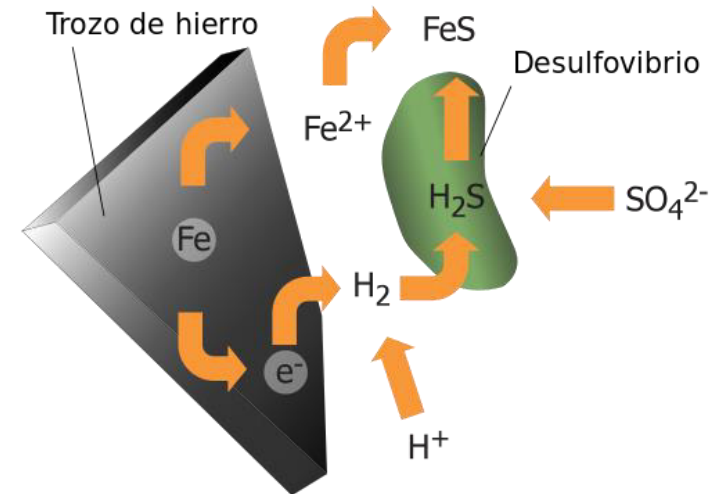
- ❖ Algunos organismos realizan sólo la primera etapa.
- ❖ Todas las enzimas implicadas se **ACTIVAN** en condiciones **ANÓXICAS**.
- ❖ También algunos procariontas reducen  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NH}_4^+$  en el metabolismo desasimilador.





# REDUCCIÓN DEL SULFATO Y DEL AZUFRE

- ❖ Varios compuestos azufrados inorgánicos son aceptores de  $e^-$  importantes en la respiración anaerobia.
- ❖ El  $\text{SO}_4^{2-}$ , la forma más oxidada del azufre (+6), es uno de los aniones mayoritarios en el agua del mar y lo reducen las bacterias reductoras de  $\text{SO}_4^{2-}$ , un grupo ampliamente distribuido en la naturaleza.
- ❖ El producto final de la reducción del  $\text{SO}_4^{2-}$  es el sulfuro de hidrógeno:  $\text{H}_2\text{S}$  (-2), un compuesto natural importante que participa en muchos procesos bioquímicos.
- ❖ La reducción del  $\text{SO}_4^{2-}$  se ha estudiado profundamente en el género *Desulfovibrio*.

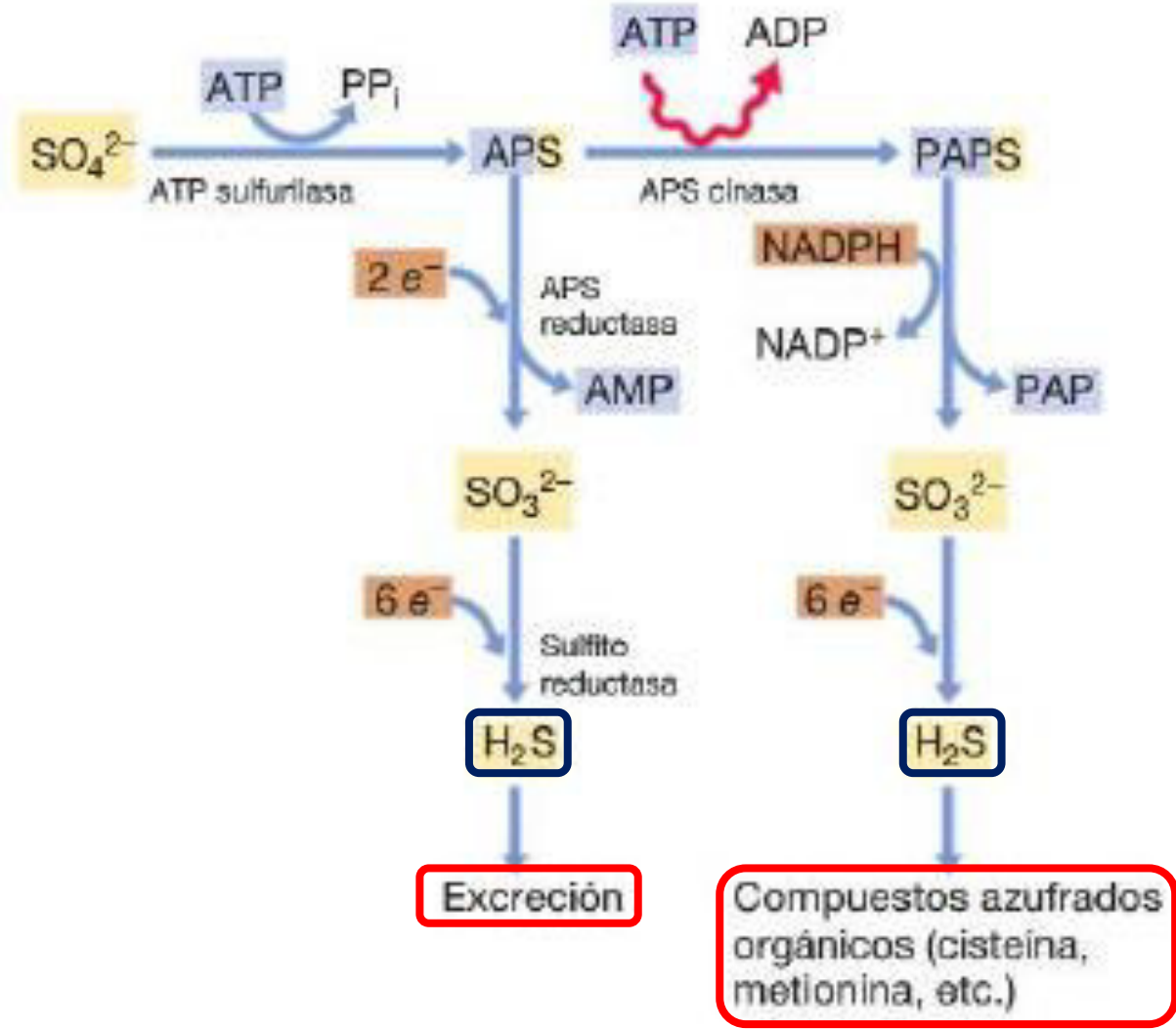




# REDUCCIÓN ASIMILADORA Y DESASIMILADORA

- ❖ Al igual que con el nitrógeno, hay que distinguir entre el metabolismo asimilador y el desasimilador.
- ❖ Muchos organismos (plantas, algas, hongos, y la mayor parte de los procariotas) utilizan el sulfato como fuente de azufre para las necesidades biosintéticas.
- ❖ Sin embargo, la capacidad de utilizar el sulfato como aceptor de  $e^-$  para los procesos que generan de energía implica la REDUCCIÓN A GRAN ESCALA del  $SO_4^{2-}$  y se limita a las BACTERIAS REDUCTORAS DE SULFATO.
- ❖ En la REDUCCIÓN ASIMILADORA de sulfato, el  $H_2S$  formado se convierte inmediatamente en azufre orgánico en forma de aminoácidos y otros compuestos azufrados orgánicos.
- ❖ Pero en la REDUCCIÓN DESASIMILADORA del sulfato SE EXCRETA  $H_2S$ .

# REDUCCIÓN DEL SULFATO



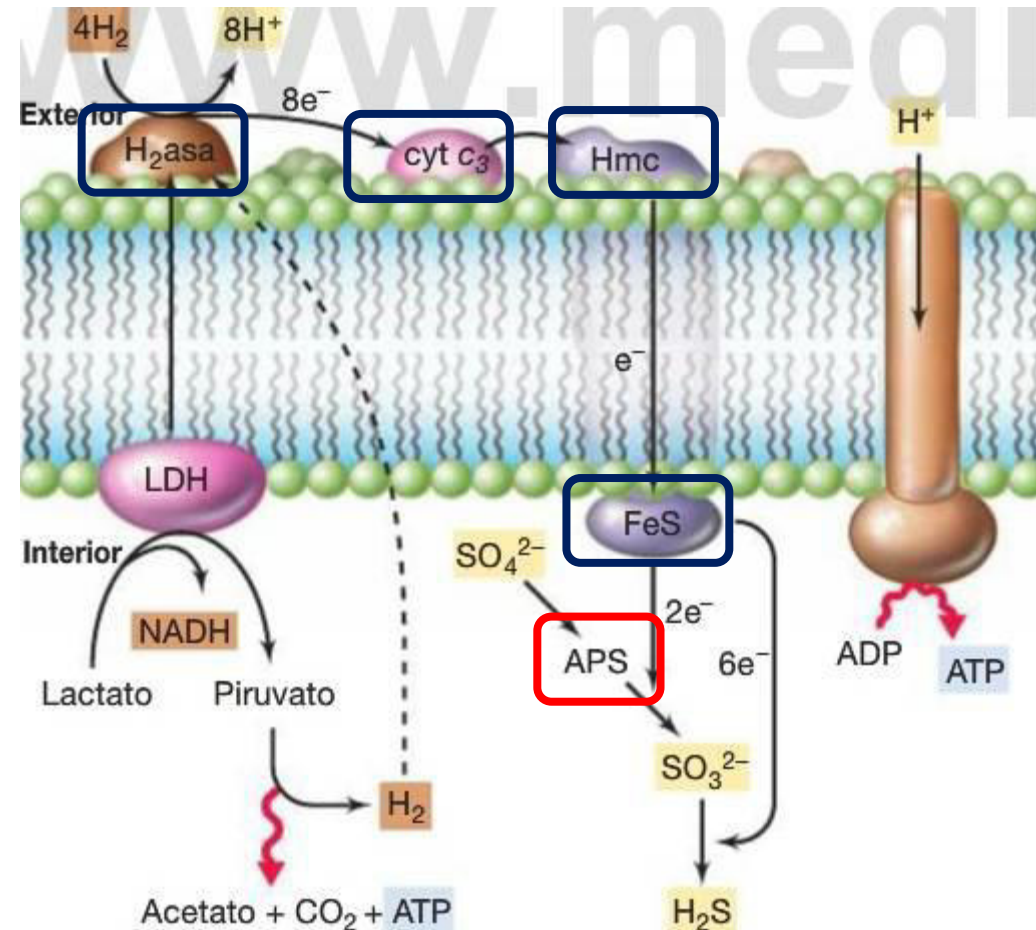
**DESASIMILADORA**

**ASIMILADORA**

# TRANSPORTE DE $e^-$ y CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN LAS BACTERIAS REDUCTORAS DE $SO_4^{2-}$



- ❖ Además del hidrógeno externo ( $H_2$ ), el  $H_2$  procedente del catabolismo de compuestos orgánicos como lactato y piruvato pueden alimentar la hidrogenasa.
- ❖ Las enzimas hidrogenasa ( $H_2asa$ ), citocromo (cyt)  $c_3$  y un complejo de citocromo (Hmc) son proteínas periféricas.
- ❖ Los  $e^-$  pasan a través de la membrana citoplasmática desde el Hmc a una ferrosulfoproteína citoplasmática (FeS) que suministra  $e^-$  a la APS-reductasa (que forma  $SO_3^{2-}$ ) y a la sulfito-reductasa (que forma  $H_2S$ ).



**ETAPA 1**

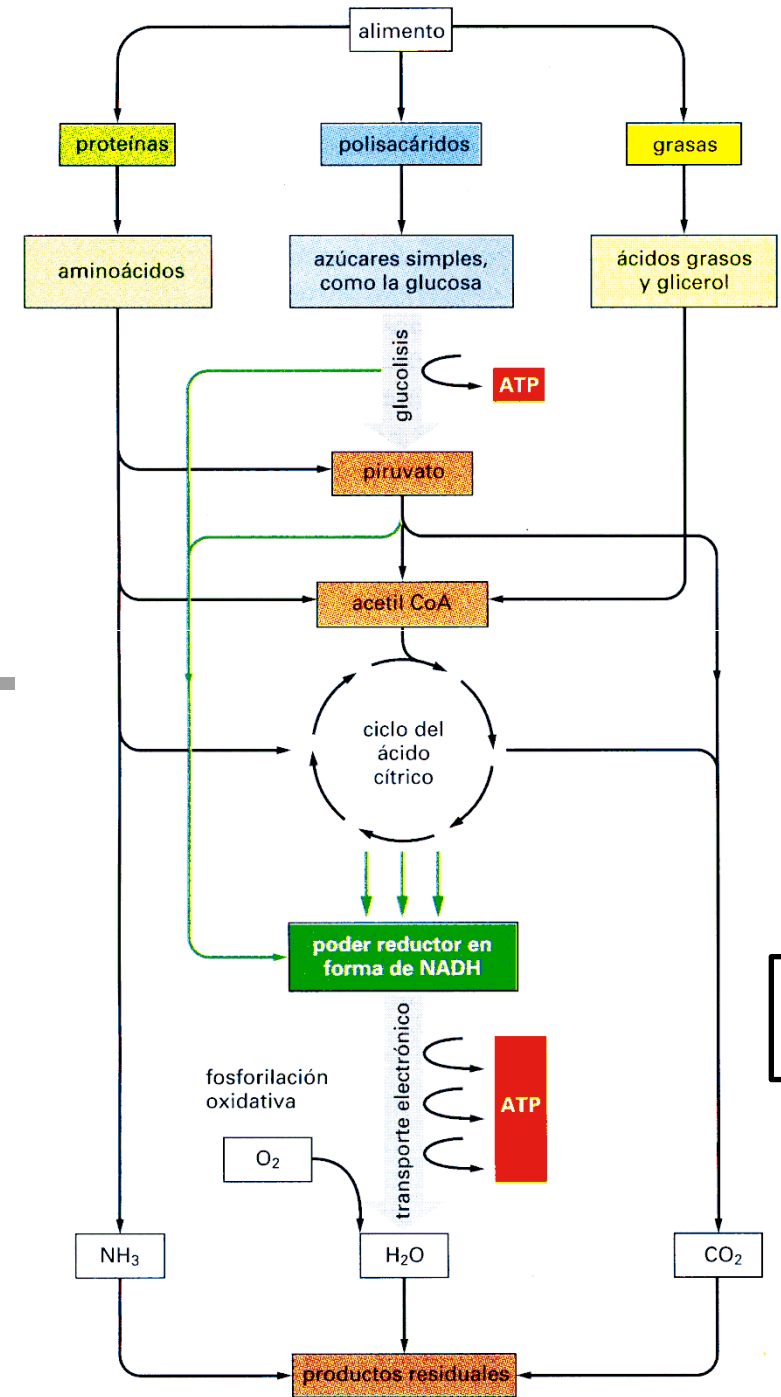
**Transformación de las grandes moléculas en subunidades simples**

**ETAPA 2**

**Degradación de las subunidades simples hasta acetyl CoA**

**ETAPA 3**

**Oxidación completa del acetyl CoA hasta H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>**



**Produce poco ATP y NADH**

**Produce gran cantidad de ATP y NADH**

**GRACIAS**



**POR SU ATENCION**

