

# **FUNDAMENTOS BIOLÓGICOS DE LA BIOHIDROMETALURGIA**

# **LA BIOHIDROMETALURGIA COMPRENDE:**

- **LIXIVIACIÓN DE MINERALES:**
  - **SULFUROS**
  - **SILICATOS**
  -
- (BACTERIAS, ARQUEAS Y HONGOS)**

# **LA BIOHIDROMETALURGIA COMPRENDE:**

- **REACCIONES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS EN LOS PROCESOS DE GENERACIÓN Y CONTROL DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINAS**
- **(BACTERIAS Y ARQUEAS )**

# **LA BIOHIDROMETALURGIA COMPRENDE:**

- **BIOSORCIÓN O INMOBILIZACIÓN  
DE IONES DESDE SOLUCIONES  
CONTAMINADAS O NO.**
- **( BACTERIAS, HONGOS, ALGAS,  
PLANTAS SUPERIORES)**

# **LA BIOHIDROMETALURGIA COMPRENDE:**

- **BIOREMEDIACIÓN DE SUELOS Y AGUAS CONTAMINADAS**
- **(BACTERIAS Y PLANTAS)**

# CONDICIONES NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DE LOS ORGANISMOS VIVOS

- $H_2O$
- TEMPERATURA  $\pm$
- OXIGENO  $\pm$
- COMPUESTOS DE CARBONO PARA HACER  
BIOMASA  $\pm$
- ALGUNA FORMA DE ENERGIA: LUZ O  
COMPUESTOS QUÍMICOS.

# **LOS ORGANISMOS EN RELACION AL OXIGENO**

- AEROBICOS**
- ANAEROBIOS**
- ANAEROBIOS FACULTATIVO**
- MICROAEROFILICOS**

# MICROORGANISMOS Y TEMPERATURAS DE CRECIMIENTO

- MESOFILAS (10 – 45°C)

Muchos organismos: animales, bacterias, etc  
(todos los patógenos)

- PSICRÓFILAS (0°C) 15°C →  
(BACTERIAS DEL SUELO, DEL MAR)

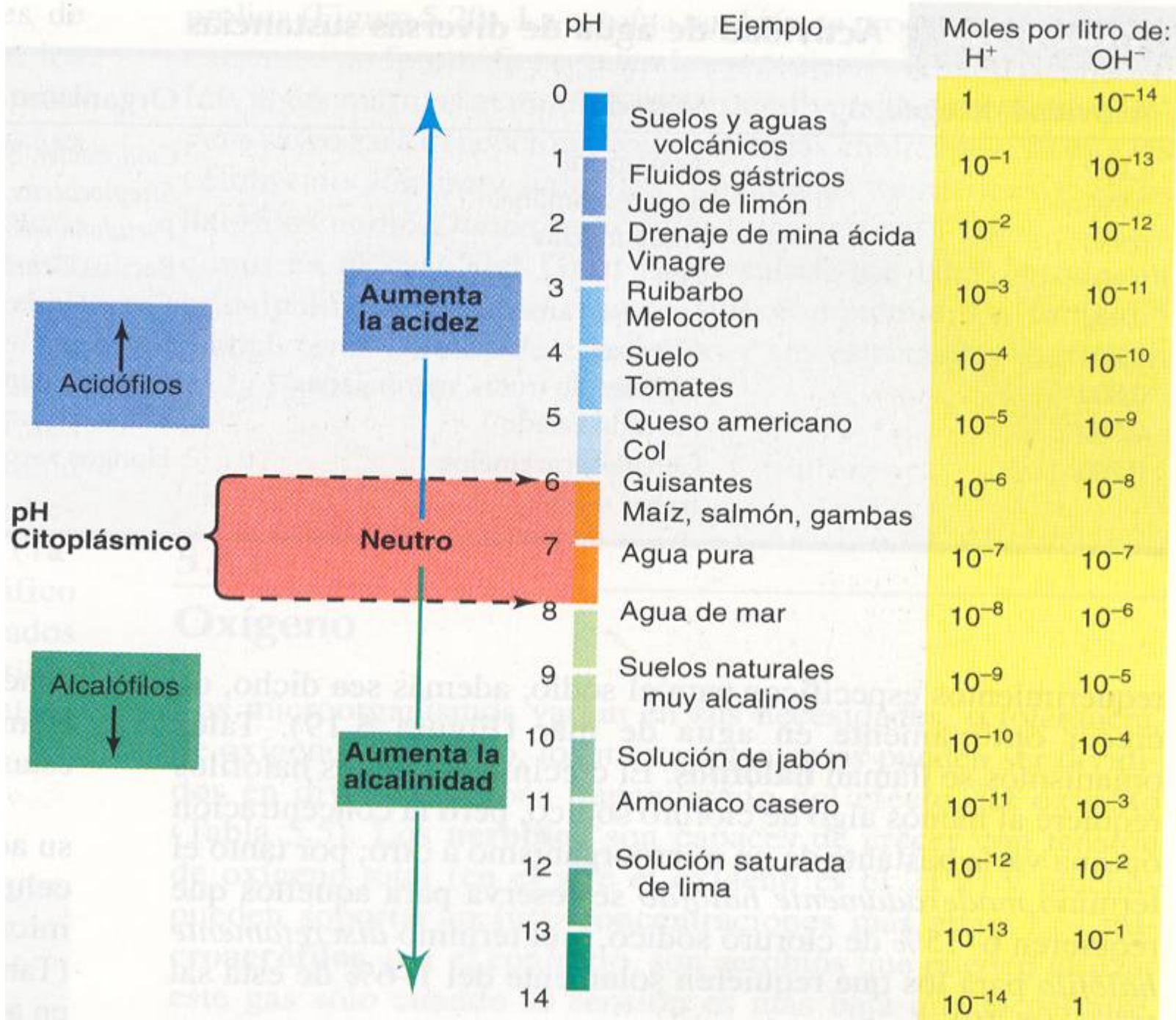
- TERMOFILAS (50 – 98 °C)  
110 °C



TABLA 5.1

## Límites superiores de temperaturas conocidos para organismos vivos

Grupo	Temperatura superior (°C)
<b>Animales</b>	
Peces y otros vertebrados acuáticos	38
Insectos	45–50
Ostrácodos (crustáceos)	49–50
<b>Plantas</b>	
Plantas vasculares	45
Musgos	50
<b>Microorganismos eucarióticos</b>	
Protozoos	56
Algas	55–60
Hongos	60–62
<b>Procariotas</b>	
Bacterias	
Cianobacterias	70–74
Bacterias fototróficas no oxigénicas	70–73
Bacterias quimiorganotrofas	90
Arqueas	
Metanógenos hipertermófilos	110
Hipertermófilos dependientes de azufre	113



# **Algunos Organismos requieren condiciones ambientales especiales:**

- **Acidófilos: Requieren pH ácido en su ambiente.**

**Ej.: Thiobacillus ferrooxidans**

**Leptos pirillum ferrooxidans**

- **Halófilos: Requieren altas concentraciones de sal en su ambiente.**

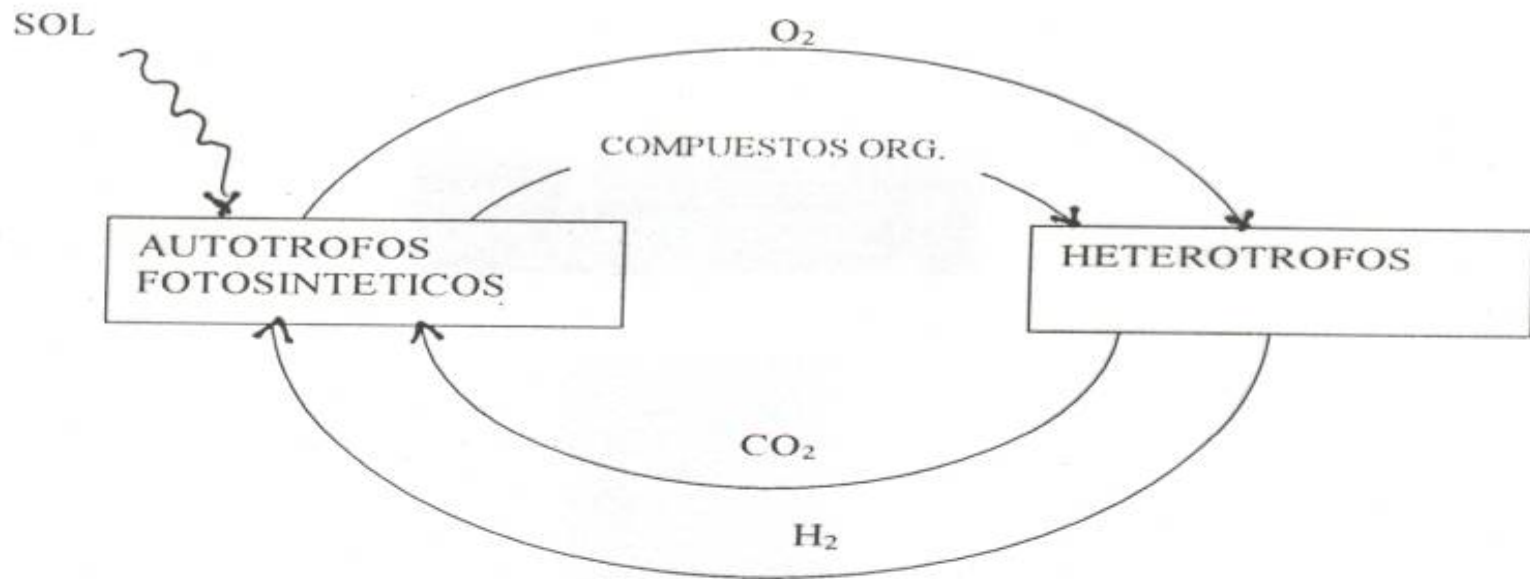
**Ej.: Bacterias, Archaea y Algas que viven en salares.**



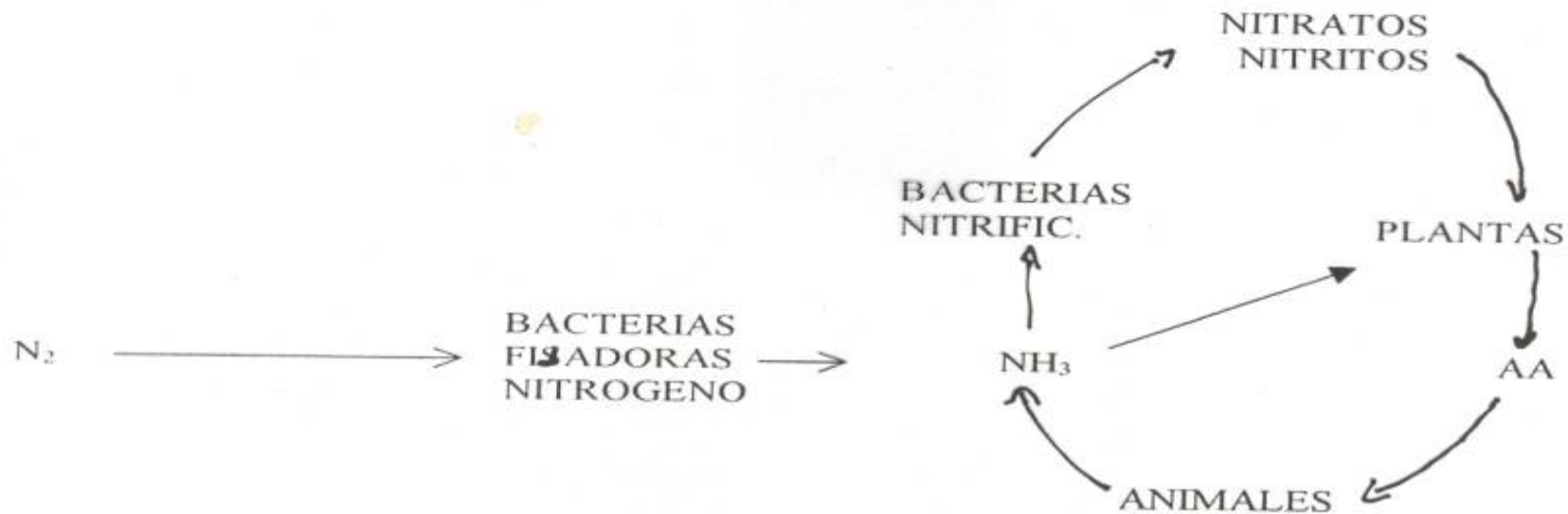
# LOS ORGANISMOS VIVOS Y LA FUENTE DE CARBONO UTILIZADA.

- AUTOTROFOS:  $\text{CO}_2$ 
  - PLANTAS
  - ALGAS
  - BACTERIAS / ARQUEAS
- HETEROTROFOS: C de compuestos Orgánicos
  - BACTERIAS / ARQUEAS
  - HONGOS
  - PROTOZOOS
  - ANIMALES
- FACULTATIVOS:  $\text{CO}_2$  o C de compuestos orgánicos.
  - BACTERIAS / ARQUEAS, LEVADURAS, PROTOZOOS

## CICLOS DE CARBONO Y OXIGENO

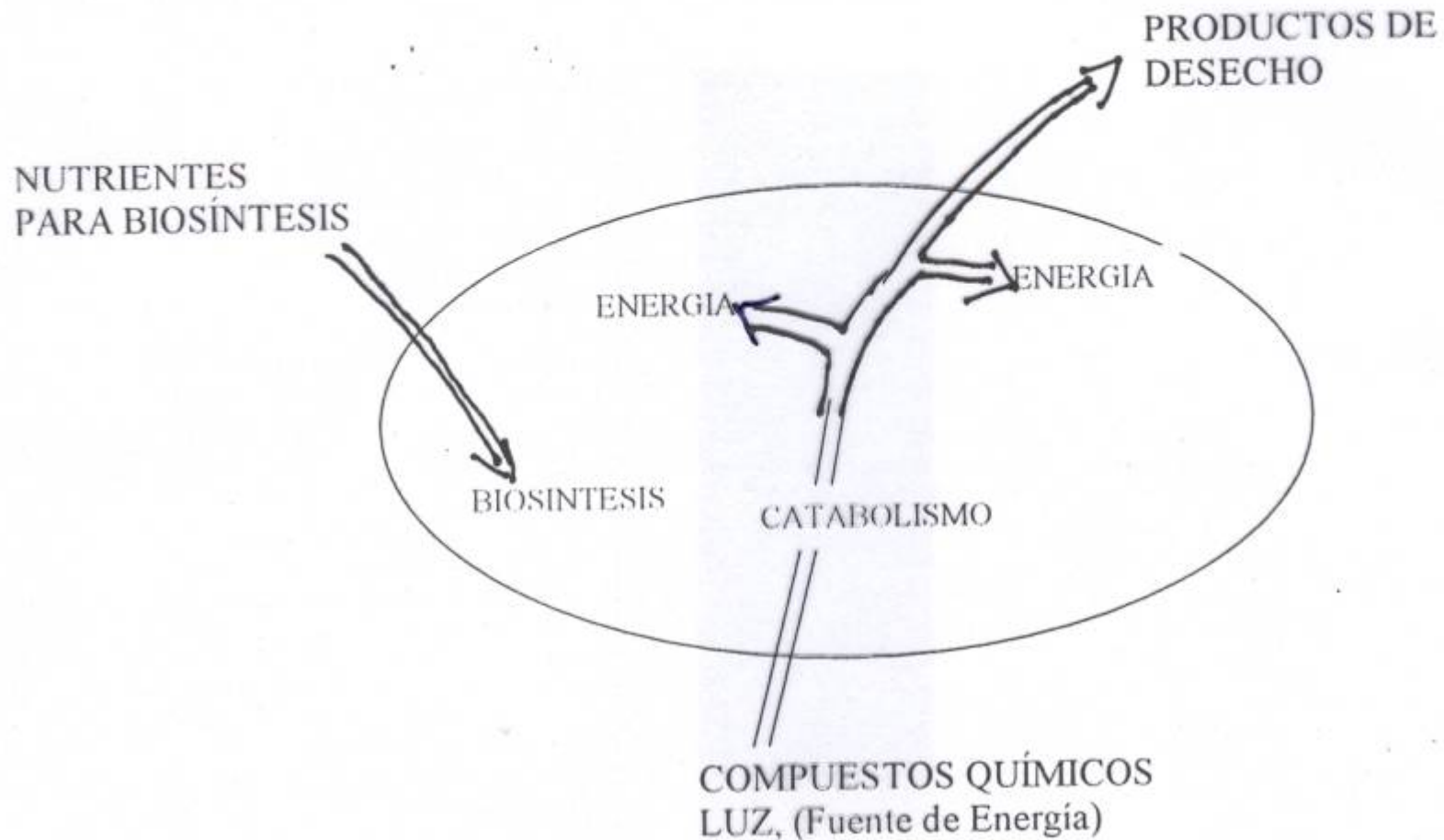


## CICLO DEL NITRÓGENO



# NUTRICION Y METABOLISMO

NUTRIENTES: COMPUESTOS QUÍMICOS DEL AMBIENTE QUE UNA CÉLULA UTILIZA PARA CONSTRUIR SUS MOLÉCULAS.



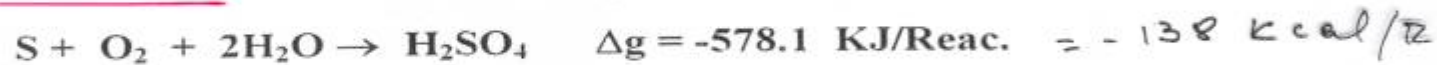
# Los Organismos vivos y La fuente de energía.

Fotosintéticos: Absorben energía luminosa y la transforman en ATP (Pigmentos)

Ej: Plantas, Algas, Bacterias.

Quimiosintéticos: Oxidan un compuesto químico y la energía liberada en la reacción se transforma en ATP.

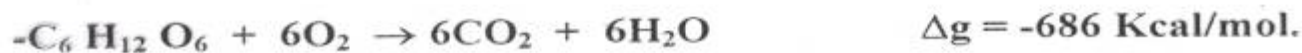
Quimiolitotrofos: Oxidan un compuesto inorgánico.



Reacción que realizan una serie de bacterias

- Ej. Thiobacillus ferrooxidans.

- Quimioorganótrofos: Oxidan un compuesto orgánico.



Reacción que realizan una serie de bacterias, hongos, animales, etc.

# MICROORGANISMOS EN PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN DE MINERALES SULFURADOS



# ¿En qué forma se presenta el cobre en la naturaleza?

- Como cobre nativo
- Como minerales oxidados
- Como minerales sulfurados
- Minerales oxidados se denomina a aquellos minerales que son solubles en ácidos: óxidos, sulfatos, cloruros, silicatos.
- Minerales sulfurados:  $\text{CuS}$ ,  $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$

# METALURGIA DEL COBRE

- Tratamiento Hidrometalúrgico
- Minerales oxidados +  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4$

$\text{CuSO}_4 \rightarrow$  Extracción por solventes (SX)  
 $\rightarrow$  Electro refinó (EW)  $\rightarrow$  Cu electrolítico

# METALURGIA DEL COBRE

- Tratamiento Pirometalúrgico
- Minerales sulfurados: Sulfuros, carbonatos, silicatos, etc.
- Minerales sulfurados + Reactivos de flotación → Concentrados de cobre y otros
- Mediante procesos pirometalúrgicos → Cu +
- $\text{SO}_2 + \text{As}_2\text{O}_3$ , etc.

# METALURGIA DEL COBRE

- Tratamiento Hidrometalúrgico
- Minerales sulfurados conteniendo óxidos
- $+ \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{CuS}$
- ¿Cómo tratar los sulfuros?
- $\text{CuS} + \text{oxidante} \rightarrow \text{CuSO}_4$
- ¿Qué oxidante?
- Bacterias o arqueas

# MICROORGANISMOS MESÓFILOS

## BACTERIAS

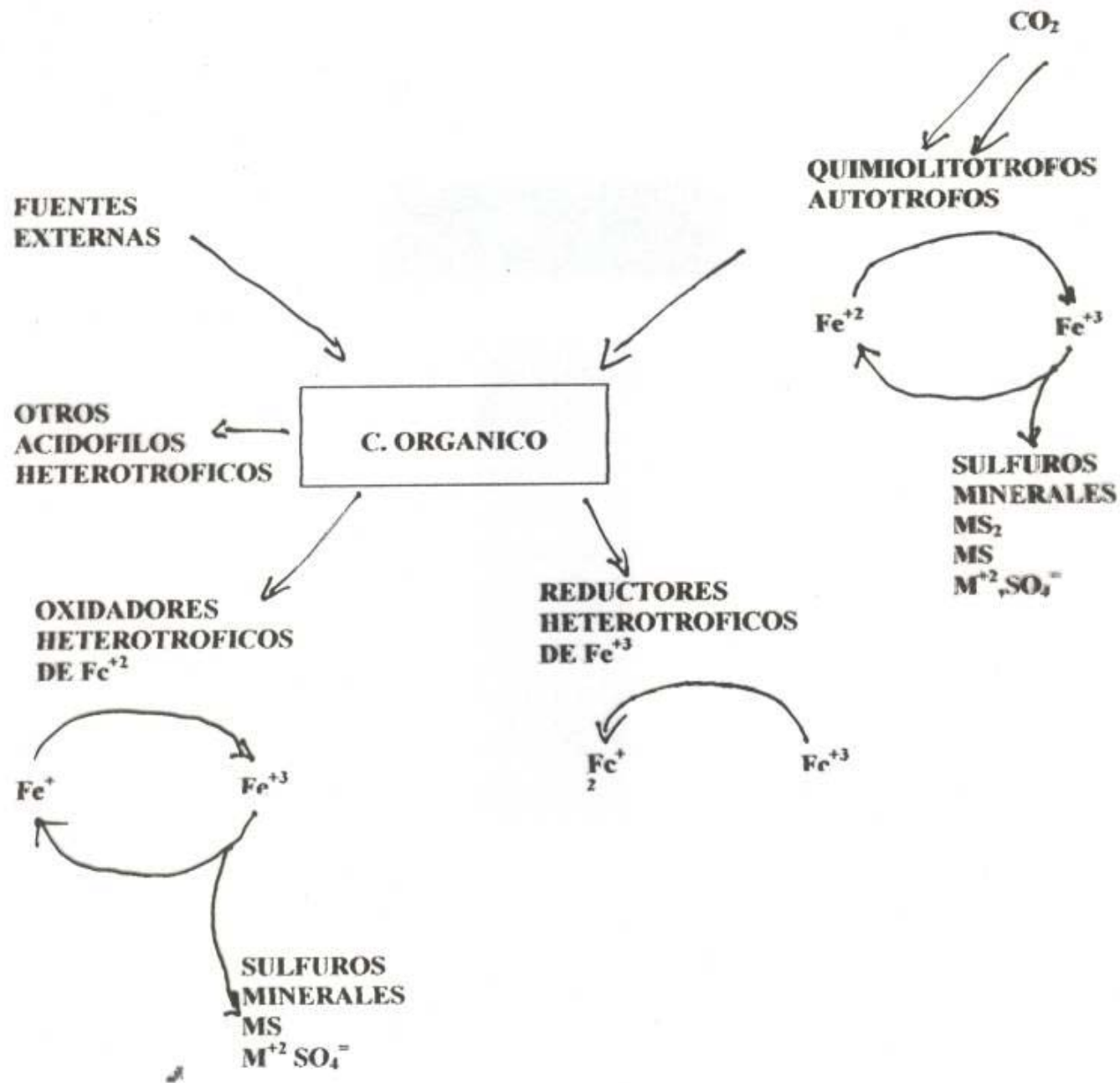
- *Thiobacillus* sp. 1900.
- Todas especies Gram negativas y acidófilos
- *Ferrobacillus ferrooxidans* 1950
- (oxidan Fe(II))
- *Thiobacillus ferrooxidans* 1960
- (oxidan Fe(II) y compuestos de azufre reducido)
- *Acidithiobacillus ferrooxidans* 2000

# MICROORGANISMOS MESÓFILOS

- *Leptospirillum ferrooxidans* 1972
- (oxidan sólo Fe(II))
- *Thiobacillus thiooxidans*
- (oxidan sólo compuestos de azufre reducido)
- *Acidithiobacillus thiooxidans* 2000
- *Thiobacillus thioparus*
- (oxidan sólo compuestos de azufre reducido, anaeróbico??)

# MICROORGANISMOS MESÓFILOS

- *Thiobacillus acidophilus*
- oxidan sólo compuestos de azufre reducido, autótrofo y heterótrofo facultativo)
- *Acidiphilium acidophilus* 2000
- *Acidiphilium cryptum*
- (heterótrofo, se desarrolla en bajas concentraciones de compuestos orgánicos)
- *Ferrimicrobium acidiphilum*, (sólo oxida Fe(II). No fijaría CO<sub>2</sub>.





# MICROORGANISMOS TERMÓFILOS MODERADOS

- Se desarrollan a temperaturas por sobre 40 a 45°C y hasta 55 a 60 °C
- *Thiobacillus caldus* 1997?
- *Acidithiobacillus caldus* 2000
- (oxidan sólo compuestos de azufre reducido), puede crecer mixotróficamente utilizando extracto de levadura o glucosa.
- *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* 1980?
- (oxidan Fe(II) y compuestos de azufre reducido)
- Gram positivo, formadores de esporas.

# MICROORGANISMOS TERMÓFILOS MODERADOS O TERMOTOLERANTES

- *Leptospirillum*- like bacteria 1992 (sólo oxida Fe(II) características similares a *Leptospirillum ferrooxidans* hoy denominado:
- *Leptospirillum thermoferrooxidans* 2000
- Temperatura entre 40 y 50°C, algunos con tiempos de doblamiento de 2 horas.
- *Acidimicrobium ferrooxidans* Gram positivo (sólo oxida Fe(II)).

# MICROORGANISMOS TERMÓFILOS EXTREMOS

- Son todas arqueas, que se desarrollan a temperaturas entre 65 y 90°C o más.
- La mayoría son autotróficas aunque se han descrito cepas heterotróficas.
- Han sido aisladas de aguas termales y geiseres
- *Sulfolobus* BC 1980 ?
- *Sulfolobus metallicus* 1999 ?
- (oxidan Fe(II) y compuestos de azufre reducido)

# MICROORGANISMOS TERMÓFILOS EXTREMOS

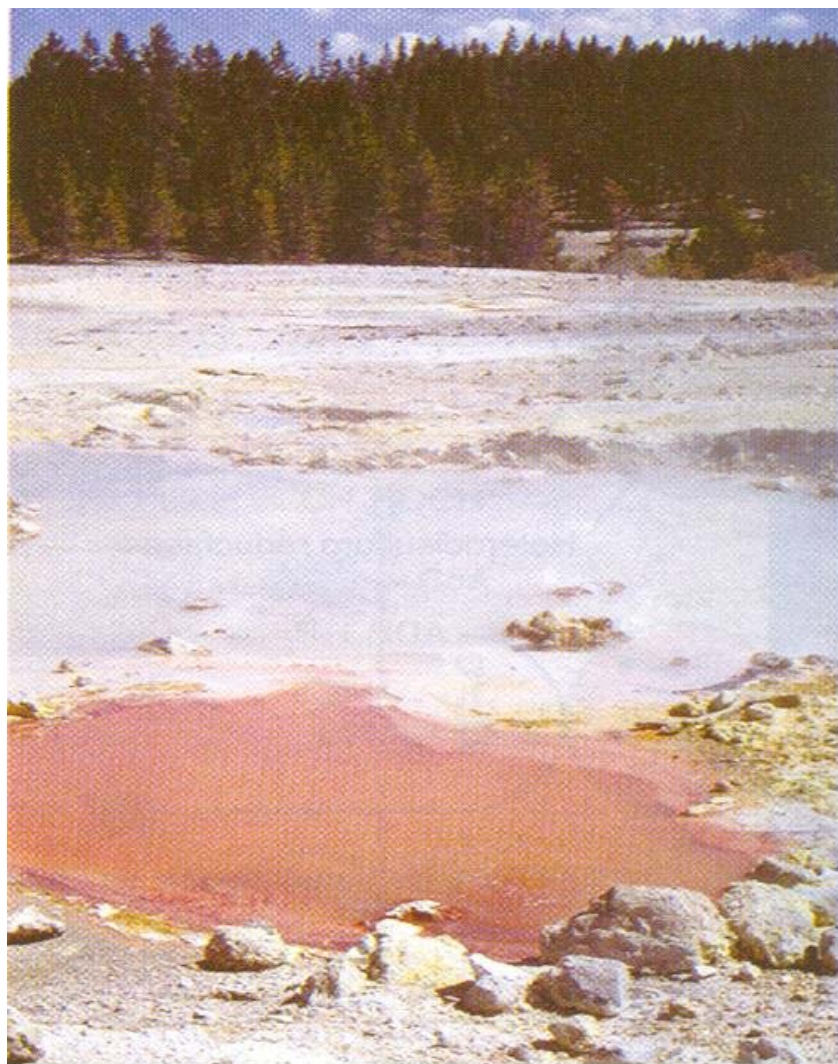
- *Sulfolobus acidocaldarius* el primero en ser reconocido, (sólo oxidaría S), heterótrofos obligados
- *Sulfolobus sulfataricus*, (sólo oxidaría S) heterótrofos obligados
- *Acidianus brierley* antes *Sulfolobus brierley*
- oxida compuestos de azufre reducido y reduce en condiciones anaeróbicas)
- *Metallosphaera sedula*
- (oxidan compuestos de azufre reducido,  $H_2$ , o crece sobre extracto de levaduras y otros orgánicos)







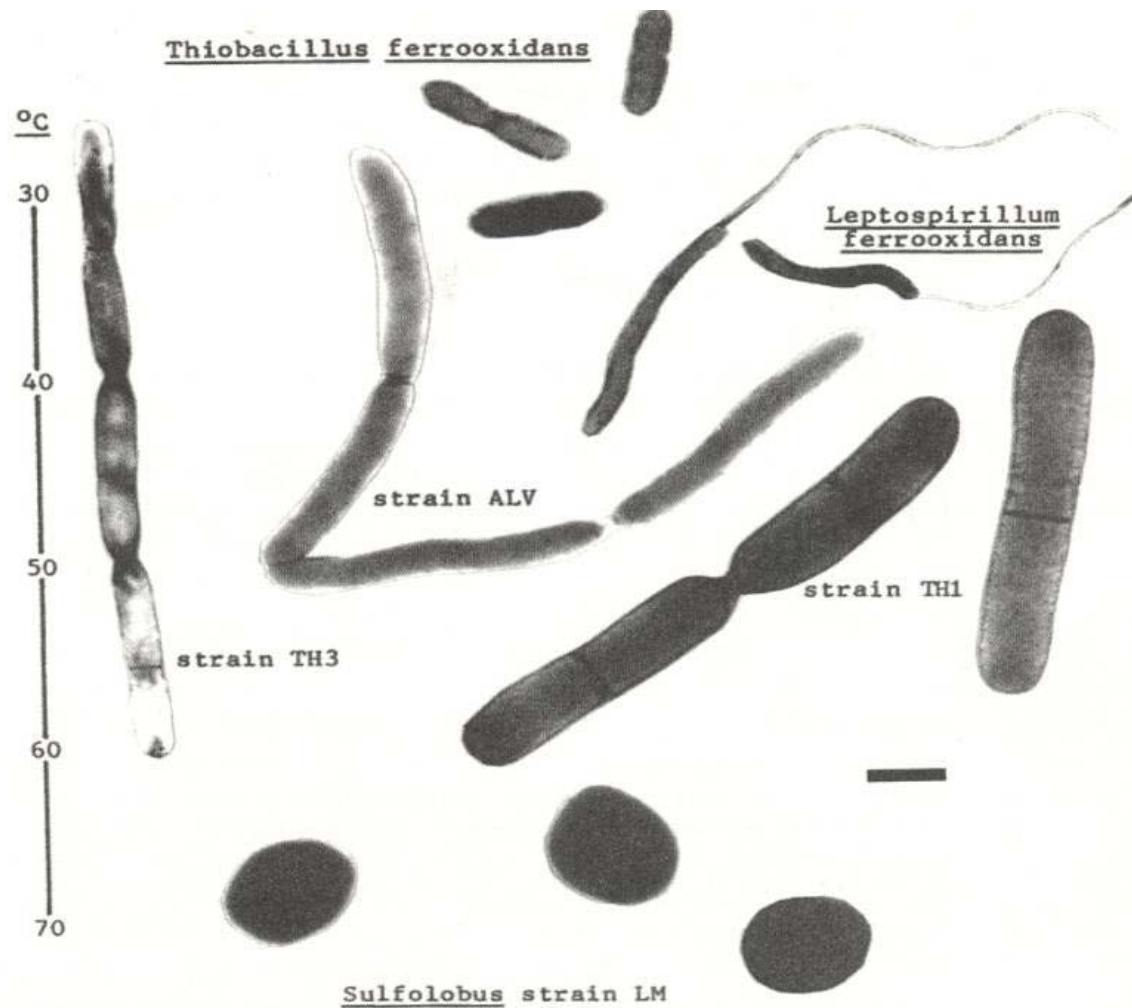






# OTROS MICROORGANISMOS

- Especies neutrófilas
- *Gallionella ferruginea*, 1936
- (oxida Fe(II) a bajas presiones parciales de oxígeno, de este modo se evita la oxidación espontánea de Fe(II) por el aire.
- Heterotrófica
- *Leptotrix* y otras



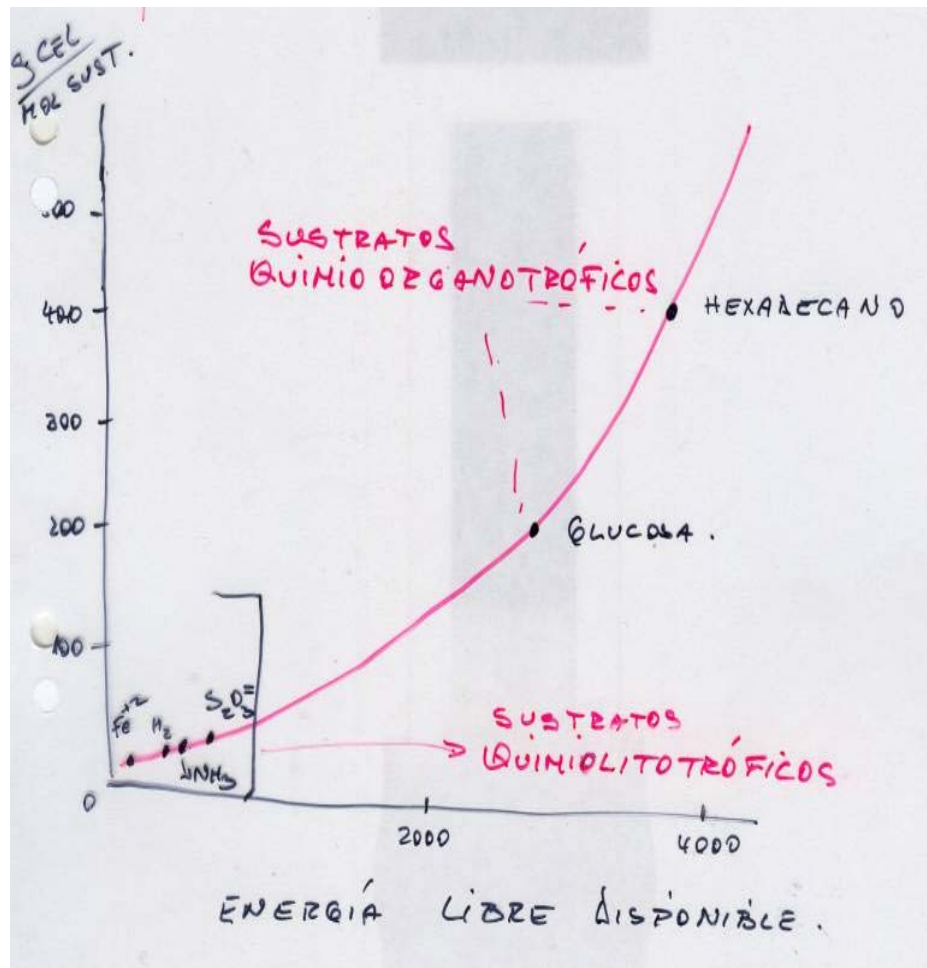
**Figure 1.1** Iron-oxidizing, acidophilic bacteria in approximate juxtaposition to their optimum growth temperatures. Bar marker equivalent to 1  $\mu\text{m}$ .

# ¿QUE CARACTERÍSTICAS TIENEN ESTOS MICROORGANISMOS?

- Tanto las bacterias como las arqueas nombradas a excepción de las neutrófilas son todas extremófilas:
- Ambientes minerales (quimiolitótrofas)
- Ambientes ácidos (acidófilas)
- Ambientes termales (termofílicas) (algunas)

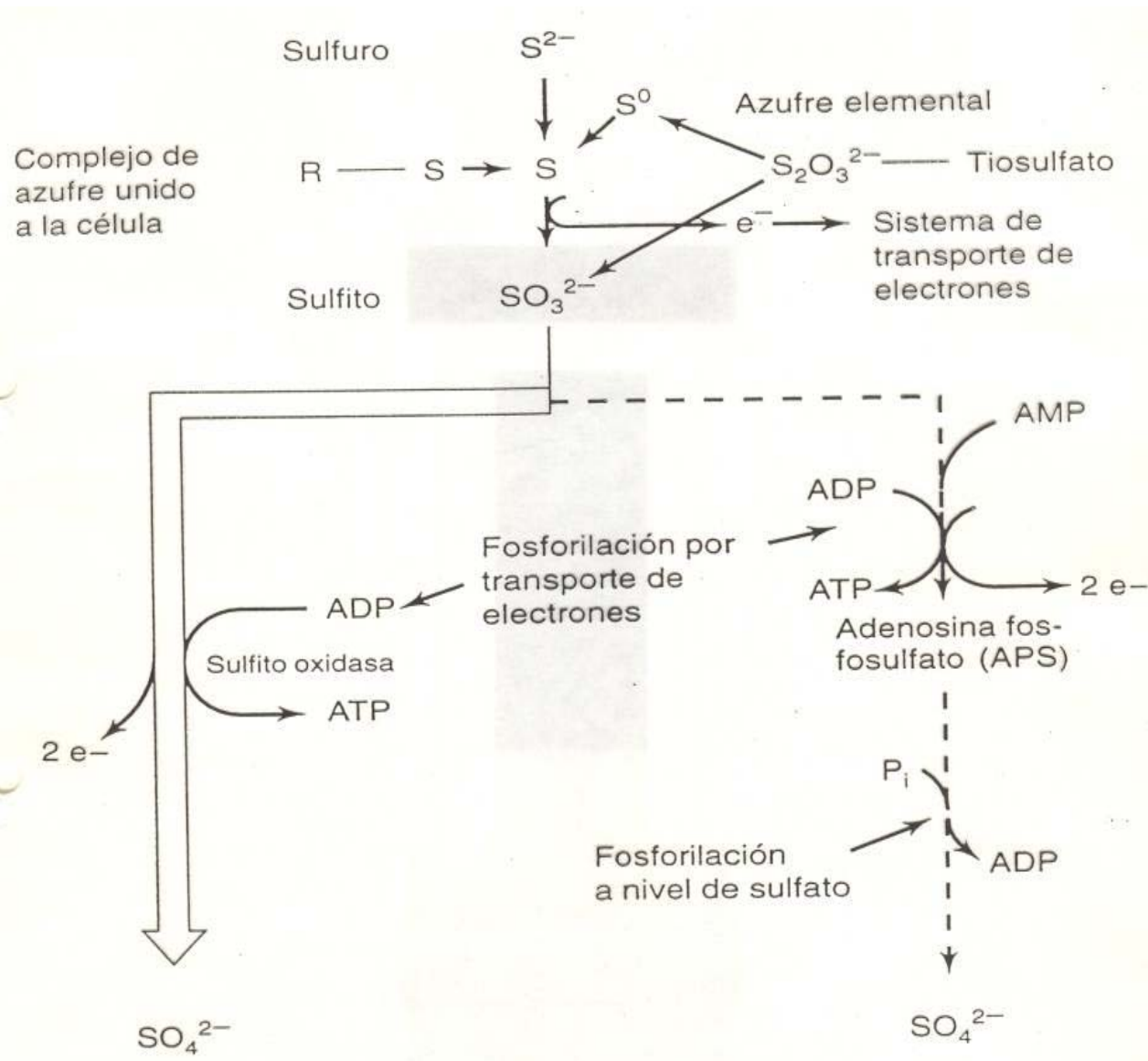
# SON MICROORGANISMOS QUIMIOLITÓTROFOS

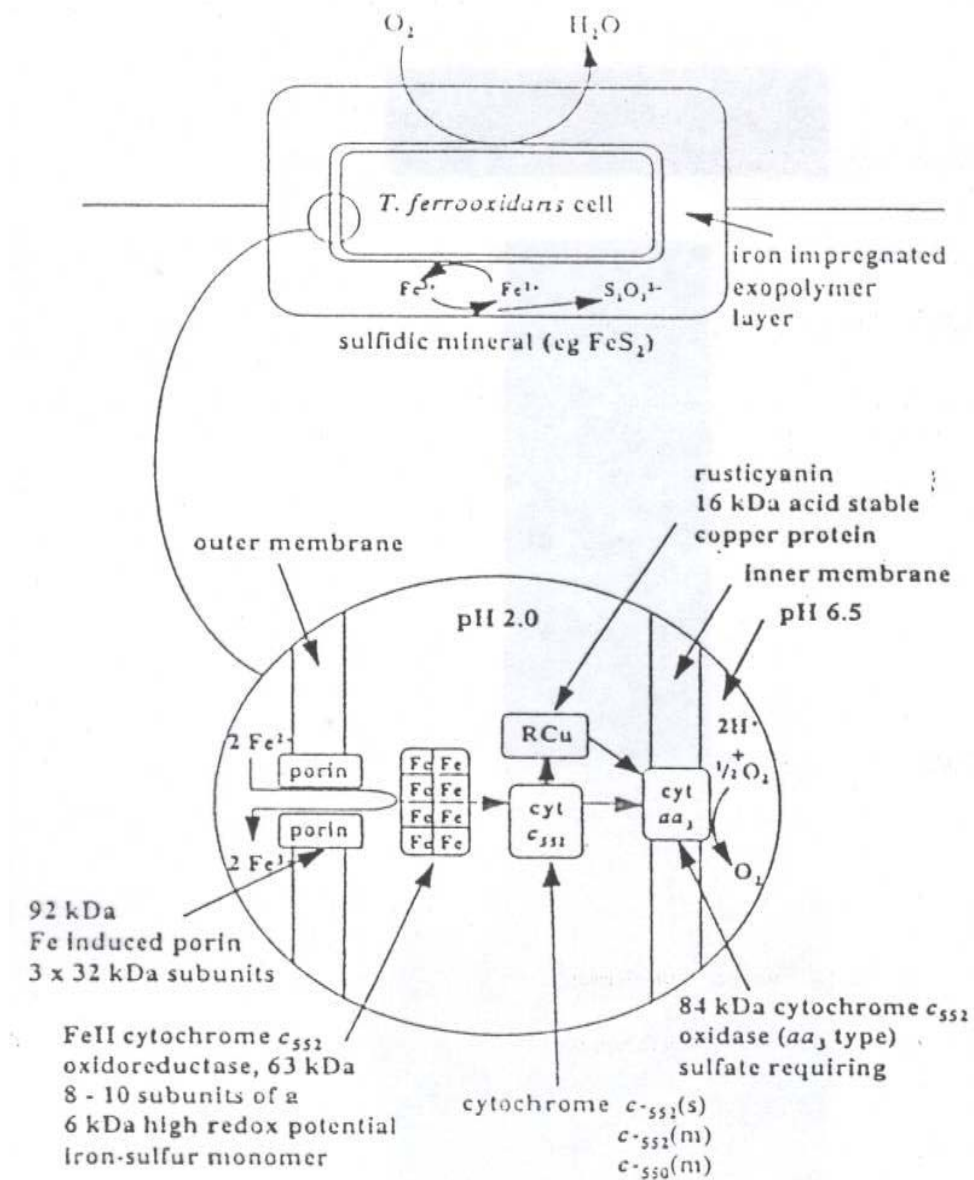
- **Oxidan Fe(II) a Fe(III) en medios ácidos y en presencia de oxígeno**
- $2\text{Fe} + 2 \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow 2 \text{Fe}^{+3} + \text{H}_2\text{O}$
- $\Delta G$  de esta reacción = - 8.1 Kcal/mol
- Para generar ATP mediante la fosforilación de ADP, se requiere
- $\text{ADP} + \text{P}_i \rightarrow \text{ATP} + \text{H}_2\text{O} \quad \Delta G = - 7.8 \text{ Kcal/mol}$
- Así por cada 2 Fe (II) que se oxidan se produce 1 ATP



# SON MICROORGANISMOS QUIMIOLITÓTROFOS

- **Oxidan compuestos reducidos de S en medios neutros o relativamente ácidos en presencia de oxígeno**
- $2S^0 + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4$
- $\Delta G$  de esta reacción = - 150 Kcal/mol (+18 ATP).
- $MS + 2O_2 \rightarrow MSO_4$
- Ambas reacciones generan un determinado  $\Delta G$  que es utilizado por la célula para transformarlo en ATP







# METABOLISMO GENERADOR DE BIOMASA

- La mayoría de las bacterias y arqueas que participan en procesos de biolixiviación de sulfuros, generan biomasa a partir del  $\text{CO}_2$ , es decir son autótrofos.
- Existen algunos heterótrofos que utilizan compuestos orgánicos.
- Entre los autótrofos, muchos utilizan el Ciclo de Calvin, otros el ciclo del ácido cítrico reverso, otros el ciclo del 1,3 hidroxipropionato.

# METABOLISMO AUTOTRÓFICO

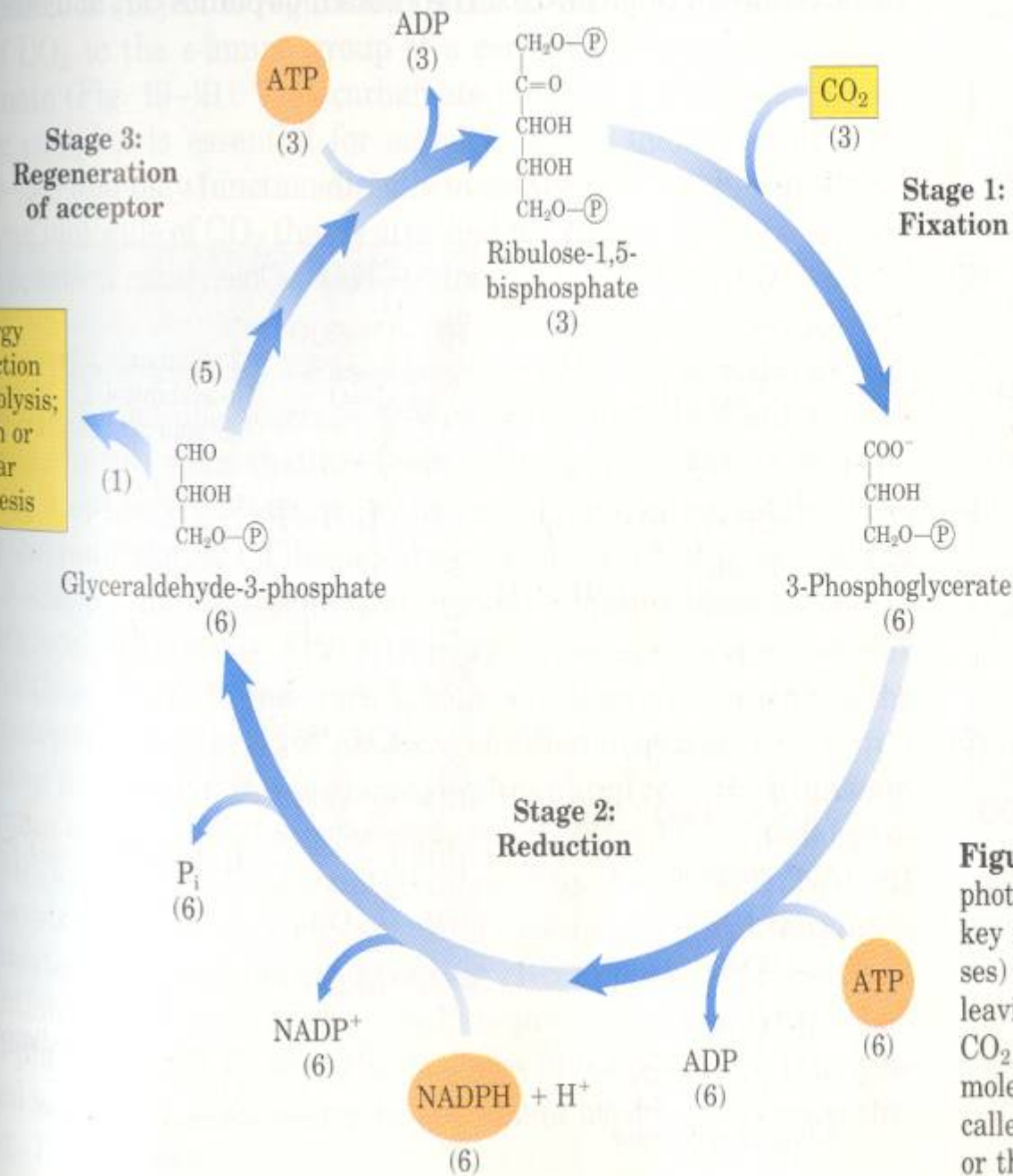
- Generación de biomasa a partir de CO<sub>2</sub> (Ciclo de Calvin)



ATP energía

NADPH poder reductor

- Por cada CO<sub>2</sub> fijado se requiere 3 ATP y 2 NADPH



**Figure 19-19** The three stages of CO<sub>2</sub> fixation in photosynthetic organisms. Stoichiometries of three key intermediates are shown (numbers in parentheses) so that the fate of carbon atoms entering and leaving the cycle is apparent. As shown here, three CO<sub>2</sub> are fixed to permit the net synthesis of one molecule of glyceraldehyde-3-phosphate. This is called the photosynthetic carbon reduction cycle or the Calvin cycle.

# METABOLISMO AUTOTRÓFICO

- En fotosintéticos a partir de la luz se genera ATP y NADPH,

¿Cómo hacen los autotróficos?

Generan ATP por transporte de electrones y fosforilación oxidativa y NADPH por transporte reverso.

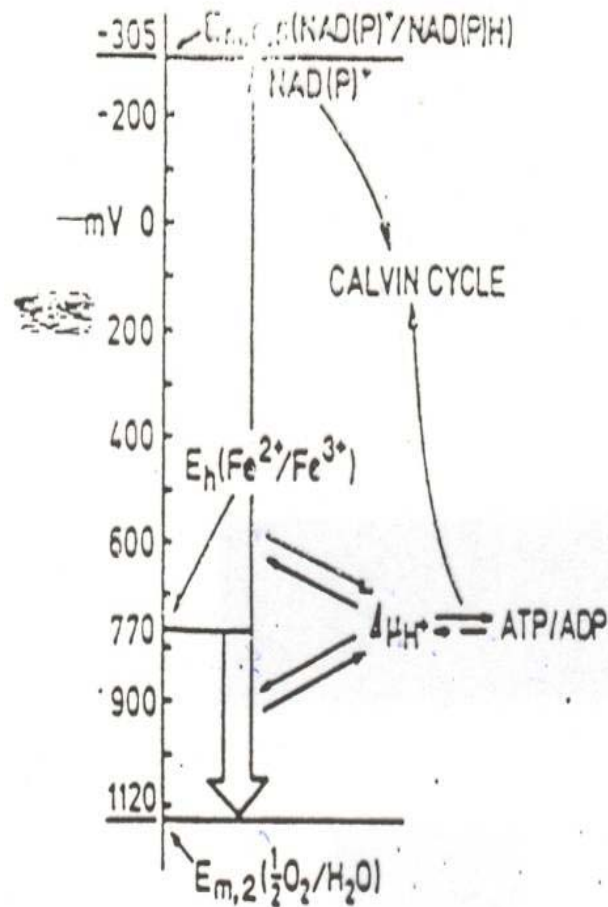


Fig. 2-28 Diagrammatic representation of the redox and metabolic relationships in *Thiobacillus ferrooxidans*. The "downhill" electron transport is shown as generating a  $\Delta\mu_{H^+}$  ( $H^+$  electrochemical gradient) which is used to drive ATP synthesis or reversed electron transport. The ordinate represents the redox scale relative to the standard hydrogen half-cell. The approximate  $E_h$  values for the  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  and oxygen/water couples under growth conditions (pH 2.0) are given, the  $E_{m,2}$  (approximate cytosolic pH) for the pyridine nucleotides is used (after Ingledew, Ref. 132).

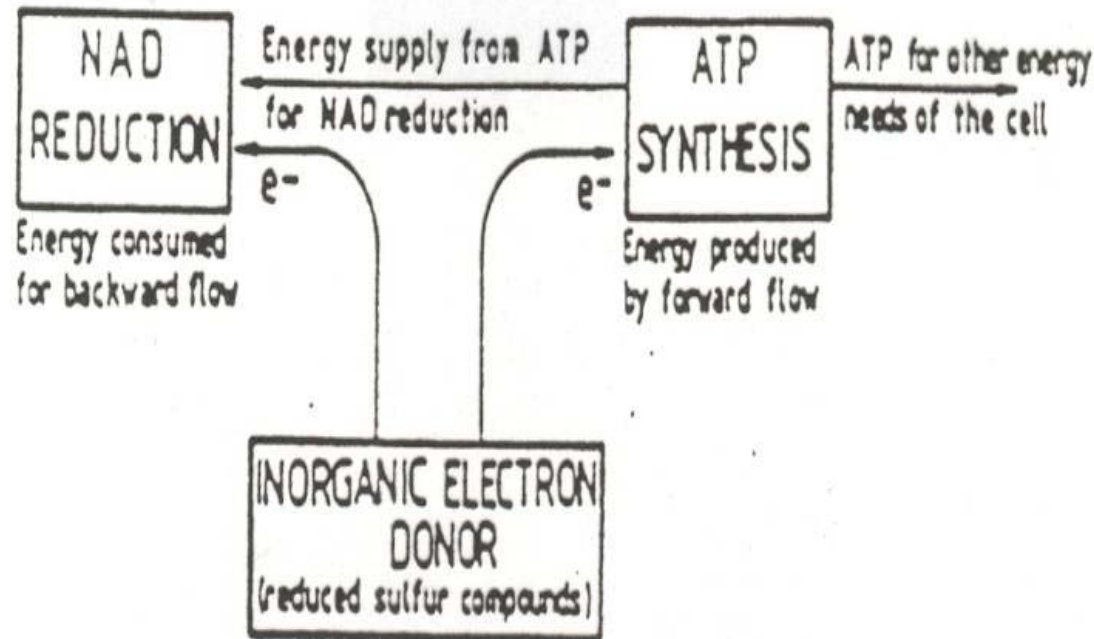


Fig. 2-26 Use of electron transport chain by chemolithoautotrophic bacteria, partially for energy generation and partially for NAD reduction (after Schlegel, Ref. 34).

# REACCIONES IMPORTANTES EN AMBIENTES DE MINERALES SULFURADOS

- $2\text{Fe}^{+2} + 1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow 2 \text{Fe}^{+3} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Fe}^{+3} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \text{ pp} + 3\text{H}^+$
- $\text{MS} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{MSO}_4$
- $\text{CuFeS}_2 + \text{Fe}^{+3} \rightarrow \text{Cu}^{+2} + \text{Fe}^{+2} + 2\text{S}$
- $2\text{S}^0 + 3\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$

# Los Organismos vivos y La fuente de energía.

Fotosintéticos: Absorben energía luminosa y la transforman en ATP (Pigmentos)

Ej: Plantas, Algas, Bacterias.

Quimiosintéticos: Oxidan un compuesto químico y la energía liberada en la reacción se transforma en ATP.

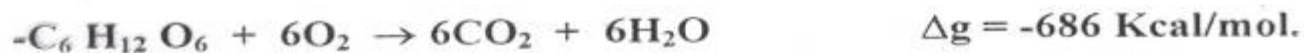
Quimiolitotrofos: Oxidan un compuesto inorgánico.



Reacción que realizan una serie de bacterias

- Ej. Thiobacillus ferrooxidans.

- Quimioorganótrofos: Oxidan un compuesto orgánico.



Reacción que realizan una serie de bacterias, hongos, animales, etc.