

MICROORGANISMOS EN PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN

- Inhibición de M.O. en presencia de compuestos inorgánicos
- Inhibición de M.O. en presencia de compuestos orgánicos

NIVELES DE TOLERANCIA DE *At. ferrooxidans* A DIVERSOS IONES METÁLICOS

Ion metálico	Concentración (M)
Cd (II)	0.75
Ni (II)	1
Zn (II)	1
Cu (II)	0.6
Co (II)	0.15
Cr (II)	0.075
Pb (II)	10^{-3}
Hg (I)	10^{-4}
Hg (II)	10^{-5}
Ag (I)	10^{-6}

NIVELES INHIBITORIOS MÍNIMOS PARA *At. ferrooxidans*

Ion metálico	Concentración ppm
Ag (I)	< 6.4
Al (III)	4800
As (V)	640
Cd (II)	30.4
Cr (III)	32
Hg (II)	4.6
Mg (II)	12000
Mn (II)	1200
Mo (VI)	50
Zn (II)	4800

INFLUENCIA DE VARIOS IONES SOBRE LA ACTIVIDAD OXIDATIVA DE *At. ferrooxidans*

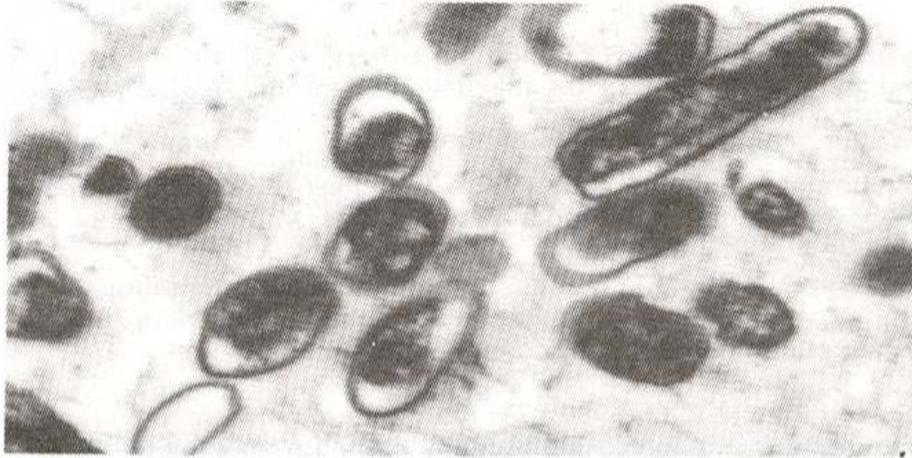
• Compuesto	concent.	% inhibición
• As(III)	200 ppm	70%
• As(V)	500ppm	70%
• Fluoruro	4.7 ppm	100%
• Cianuro	6.2 ppm	99%
• Molibdato	1mM	85%
• Nitrato	5.8g/l	100%
• Cloruro de sodio 5g/l		50%
• Cloruro de sodio 10g/l		90%

¿TOXICIDAD DEL NaCl?

- Iones cloruro serían tóxicos para *At. ferrooxidans*. Las bacterias serían inhibidas a bajas conc. y no es posible adaptarlas a más altas conc. Así el efecto perjudicial son de una gran consecuencia para las células.
- Ellas se debilitan cuando entran en contacto con 2.5 g/l de NaCl, pero 10 g/l de ion sodio no las afectan.

¿TOXICIDAD DEL NaCl?

- El cloruro causaría destrucción de la integridad de las capas más externas de las células.
- Se ha sugerido que *At. ferrooxidans* no tiene una bomba de cloruro, así este ión no puede ser removido desde el interior de la célula y la fuerza protón motriz sería destruída por daño a la membrana.



2: Electron micrograph of control cells after treatment with H₂SO₄ for 16 hours

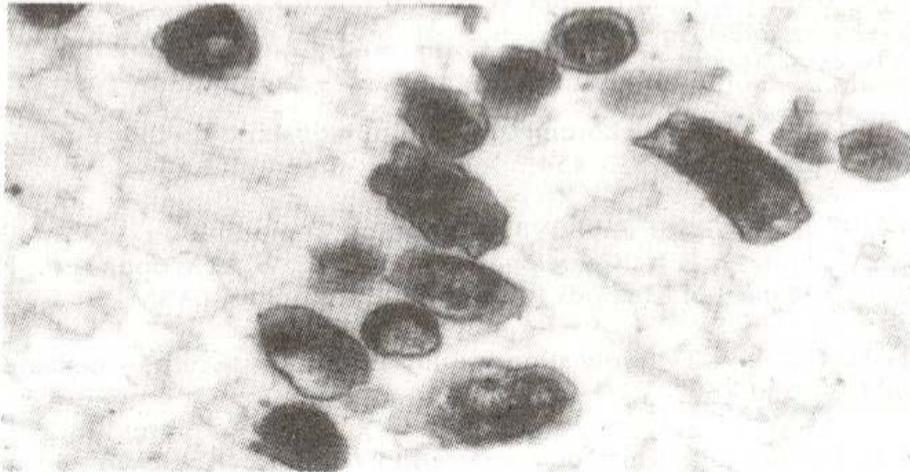
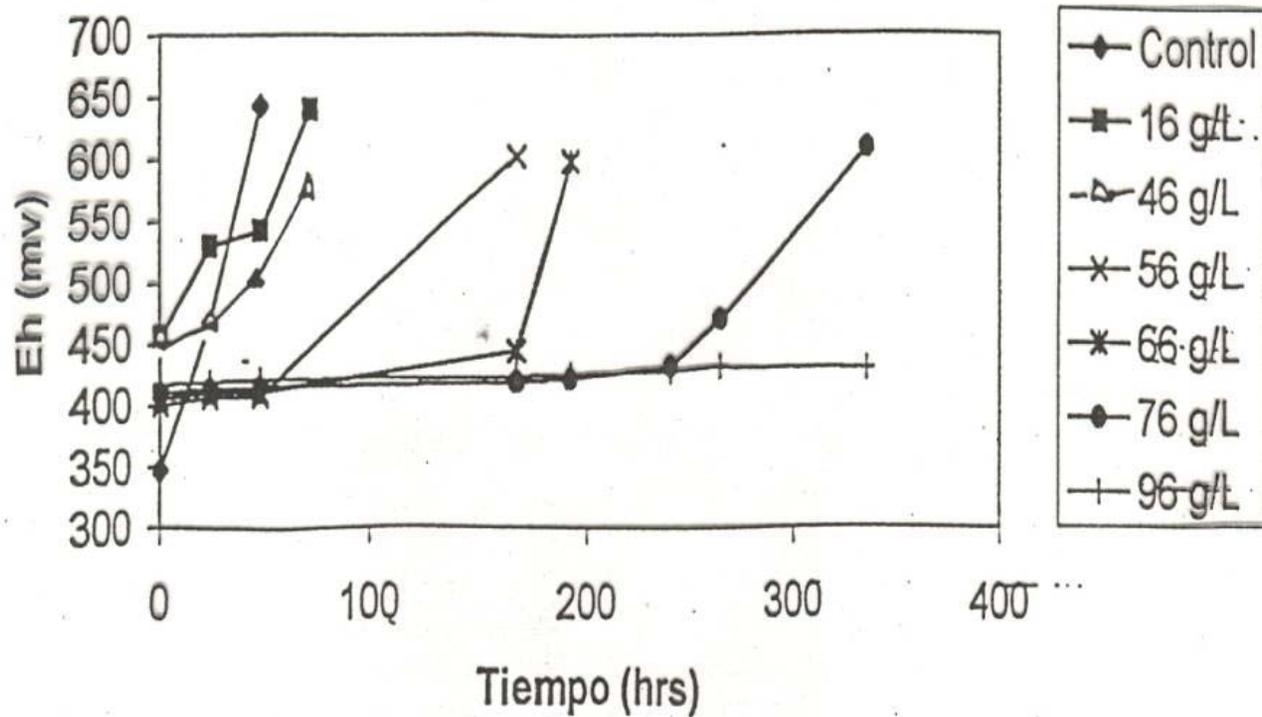


Figure 3: Electron micrograph of cells treated with HCl for 16 hours

EFECTO DEL ION SULFATO SOBRE LA OXIDACIÓN DE FE(II) POR *At. ferrooxidans*



INHIBICIÓN DE M.O. EN PRESENCIA DE COMPUESTOS ORGÁNICOS

- Los compuestos orgánicos en general resultan tóxicos para los M.O. autotróficos.
- Los ácidos orgánicos en general se encuentran no disociados en soluciones a pH bajos, por lo que pueden difundir a través de las membranas celulares. En el interior del citoplasma, a pH 7 se disocian, liberando protones, lo que acidifica el citoplasma destruyendo proteínas, etc.

INHIBICIÓN DE M.O. EN PRESENCIA DE COMPUESTOS ORGÁNICOS

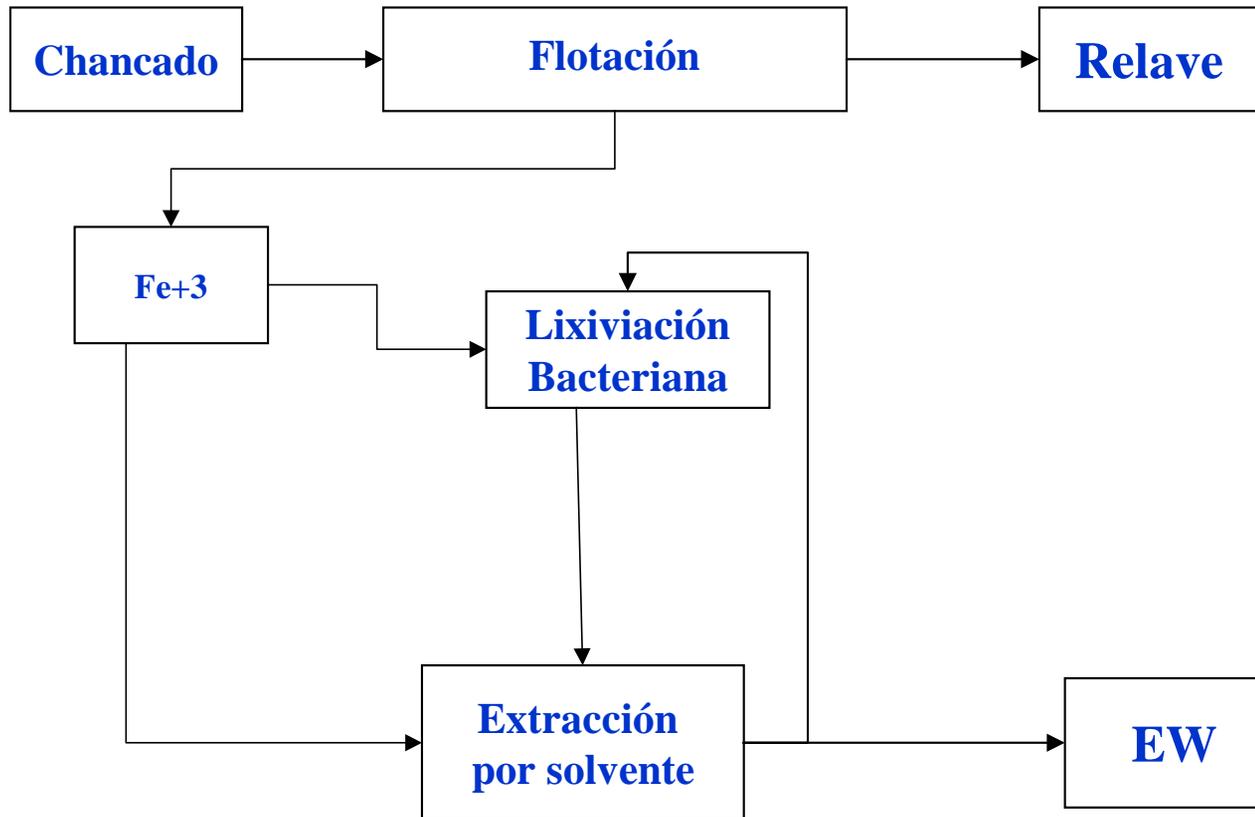
- En la literatura se presentan ejemplos de lisis celular por exposición a algunos orgánicos, con liberación de DNA, RNA, proteínas, etc.
- Algunos compuestos orgánicos pueden formar compuestos complejos con Fe(II) o con Fe(III)

Table 2-45 Inhibition of iron oxidation, sulfur oxidation and growth in ferrous iron medium by various organic compounds (iron oxidation was determined at 35°C, sulfur oxidation and growth at 25°C; after Tuttle and Dugan, Ref. 130)

Organic Inhibitor	% inhibition of iron oxidation at organic compound concentration of			Relative growth (%Fe ²⁺ oxidation) after 140h in presence of organic compounds at 10 ⁻² M	Lag period (days) before onset of sulfur oxidation in growth medium
	10 ⁻¹ M	10 ⁻² M	10 ⁻³ M		
None	0	0	0	100	1
Formic acid	ND	100	98	3	- (2 x 10 ⁻³ M)
Acetic acid	86	74	35	7	- (1.7 x 10 ⁻² M)
Propionic acid	73	58	33	5	- (1.4 x 10 ⁻² M)
Butyric acid	77	56	32	11	ND
Valeric acid	ND	61	35	4	- (1 x 10 ⁻³ M)
Hexanoic acid	ND	78	43	9	ND
Malic acid	ND	39	25	0	5
Succinic acid	ND	62	45	0	5
Fumaric acid	ND	69	69	0	6
Sodium pyruvate	ND	72	52	3	ND
Oxalacetic acid	ND	92	44	0	-
α-Ketoglutaric acid	ND	72	46	ND	-
Acetone	0	16	15	94	ND
Lactic acid	82	59	24	ND	ND
Urea	0	0	0	98	ND
α-Alanine	0	0	0	103	ND
β-Alanine	100	15	0	16	ND
Aspartic acid	ND	4	12	2	ND
Glutamic acid	ND	22	22	2	ND
Cysteine	98	46	0	ND	ND
Methionine	ND	2	9	ND	ND
Oxalic acid	100	100	10	ND	ND
Trichloroacetic acid	93	68	0	ND	ND

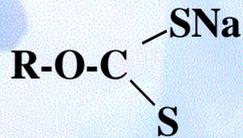
ND= not determined

Diagrama del proceso

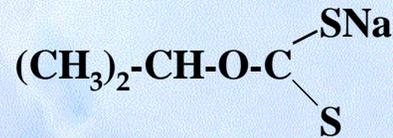


MATERIALES

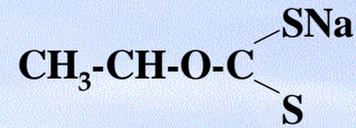
.- Reactivos de Flotación:



Estructura General
de los xantatos

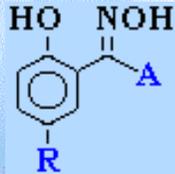


Isopropilxantato



Etilxantato

-. Reactivos de Extracción por solvente:



Estructura General
de los salicilaloximas

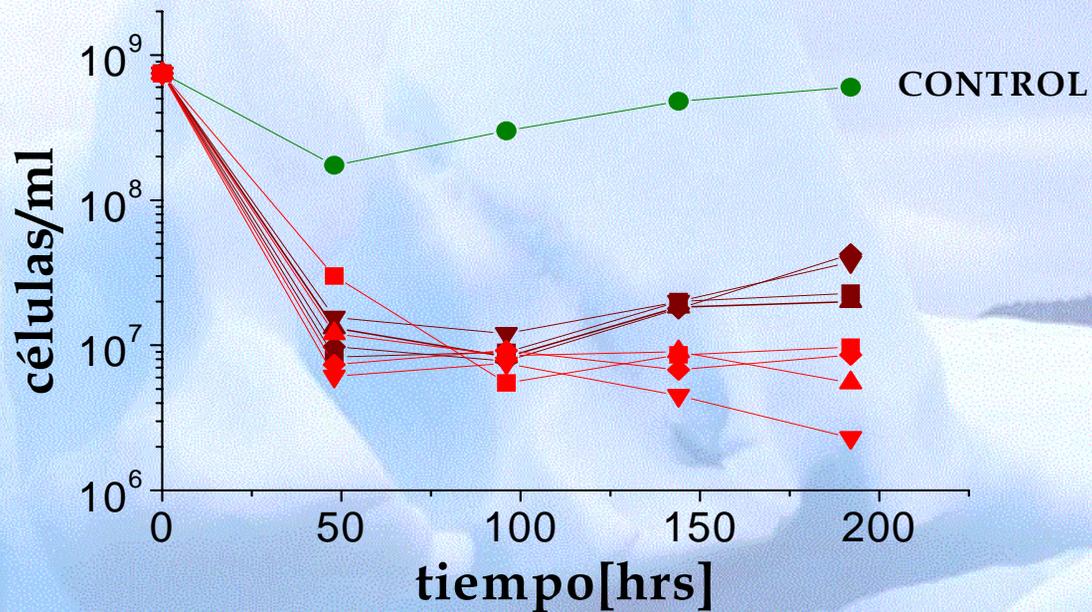
Lix984

Lix860IC

EFECTO DE LOS REACTIVOS DE FLOTACIÓN

- Los reactivos de flotación pueden adherirse a los minerales, lo que impediría la adherencia de los microorganismos, impidiendo su desarrollo (crecimiento) y actividad oxidativa sobre los minerales.

Desarrollo de *S. metallicus* en soluciones de biolixiviación en presencia de reactivos de flotación

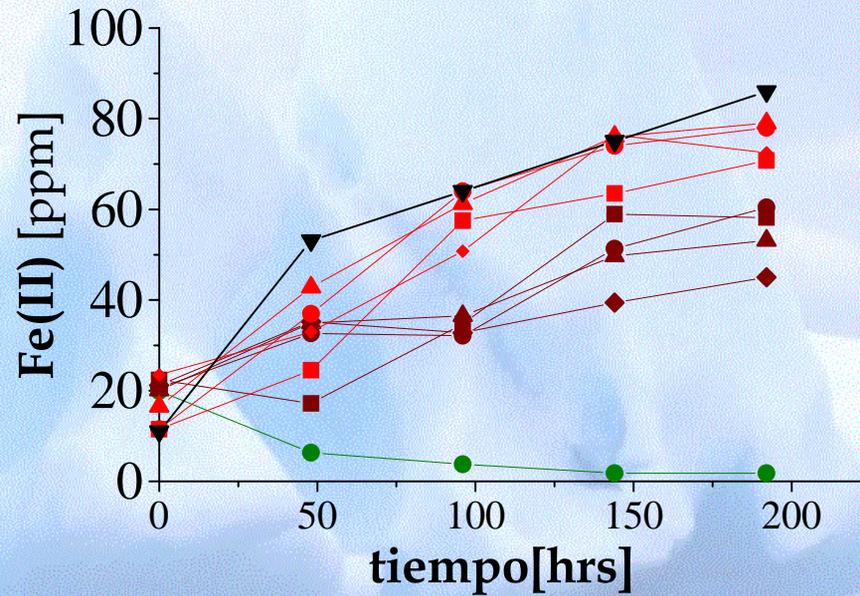


? control

ISOPROPILXANTATO : ? 0,05g/L; ? 0,5g/L; ? 1g/L ; ? 2g/L

ETILXANTATO : ? 0,05g/L; ? 0,5g/L; ? 1g/L ; ? 2g/L

Efecto de los reactivos de flotación sobre la actividad oxidativa de Fe(II) por *S. metallicus*



? control; ? ácida

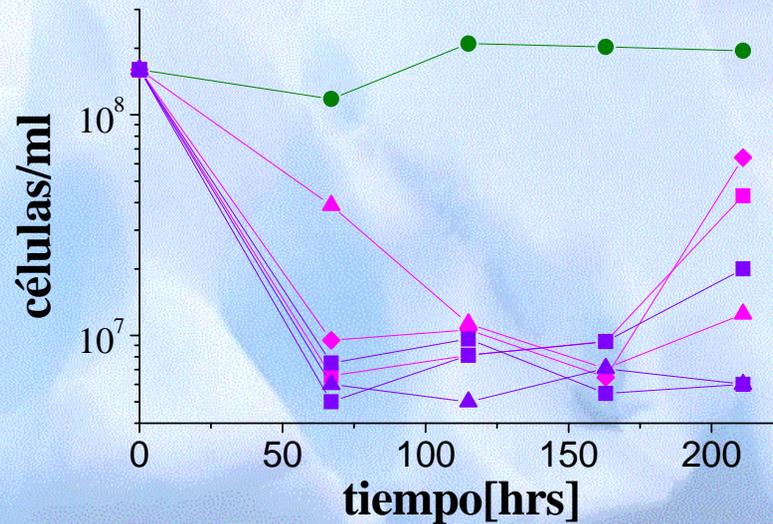
ISOPROPILXANTATO : ? 0,05g/L; ? 0,5g/L; ? 1g/L ; ? 2g/L

ETILXANTATO : ? 0,05g/L; ? 0,5g/L; ? 1g/L ; ? 2g/L

EFECTO DE REACTIVOS DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

- El efecto de estos reactivos sobre los microorganismos sería similar pero menos intensos. También serían inhibidores del crecimiento y de la generación de iones Fe(III).

Desarrollo de *S. metallicus* en soluciones de biolixiviación en presencia de reactivos de extracción por solvente

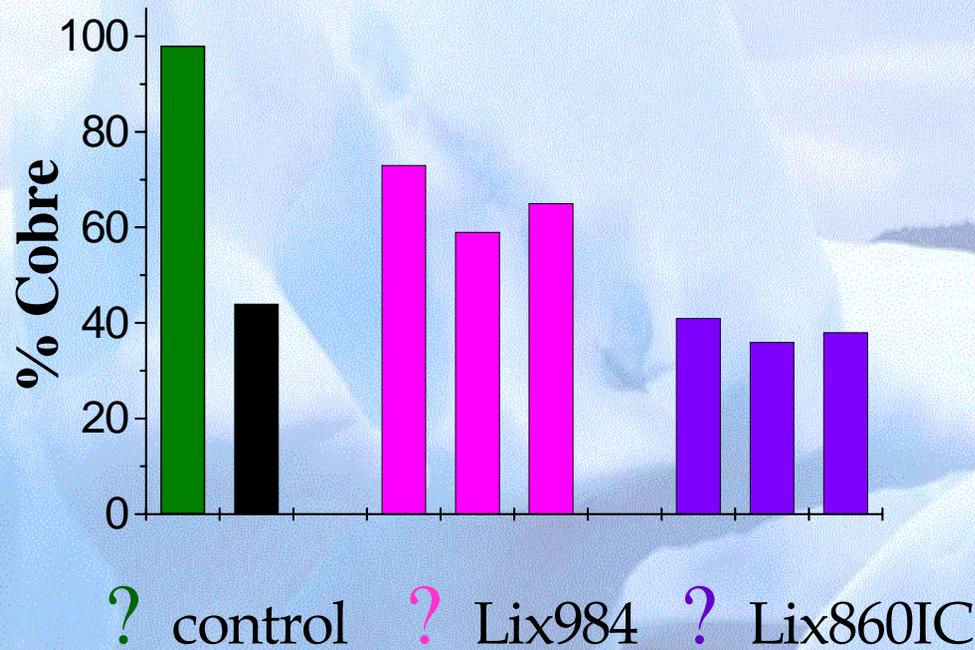


? Control

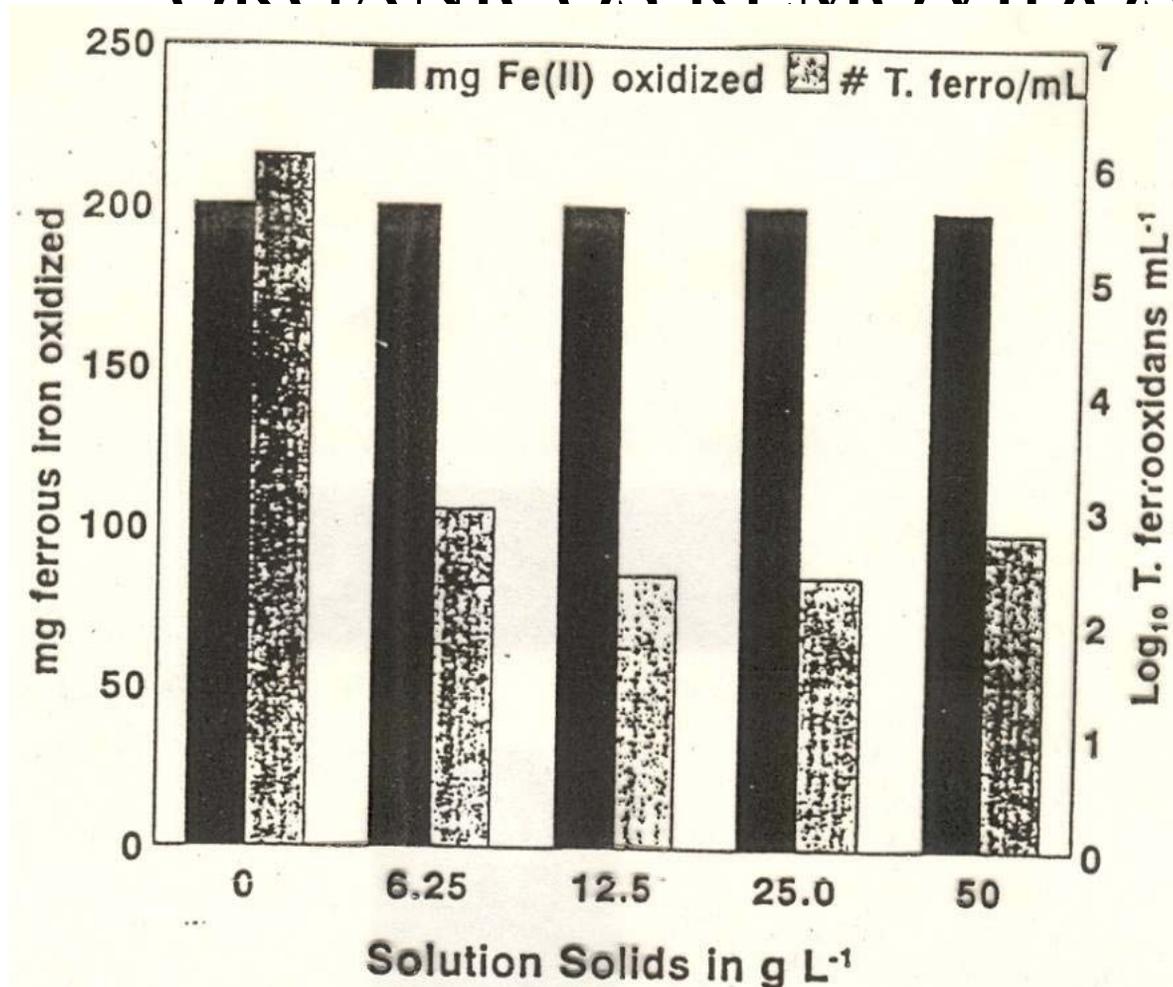
LIX984 : ? 0,01g/L; ? 0,1g/L; ? 0,2g/L

LIX860IC : ? 0,01g/L; ? 0,1g/L; ? 0,2g/L

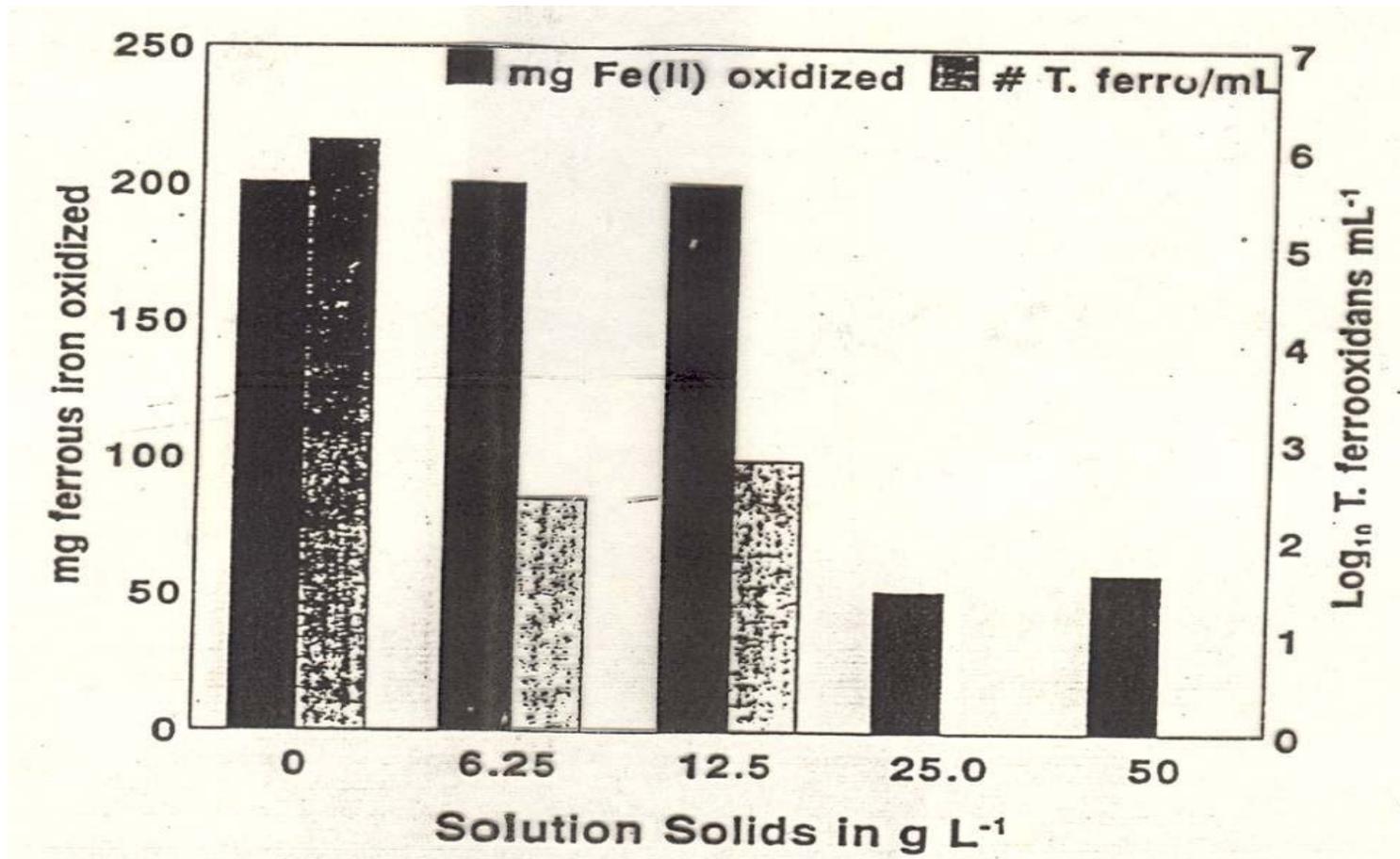
Efecto de los reactivos de extracción sobre la Biolixiviación del concentrado de cobre por *S. metallicus*



TOXICIDAD DE UNA SOLUCIÓN DE LIXIVIACIÓN CONTENIENDO IONES Y ORGÁNICOS REMOVIDOS



TOXICIDAD DE UNA SOLUCIÓN DE LIXIVIACIÓN CONTENIENDO IONES Y ORGÁNICOS



PARÁMETROS PARA CONTROLAR LOS PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN

- **Oxidación del Mineral**
- $MS + 2 O_2 \rightarrow [Fe^{+2}]$
- Número de bacterias (células)
- pH, Eh
- Fe(II)/ Fe total, Fe(III)
- Sulfato
- Cu^{+2} , As^{+3} , As^{+5} , etc

LIXIVIACIÓN DE SULFUROS Y SUS PRODUCTOS

Sulfuros Secundarios

Calcosina Cu_2S



Covelina CuS



Bornita Cu_5FeS_4



Sulfuros Primarios

Pirita FeS_2



Calcopirita CuFeS_2



Enargita Cu_3AsS_4



**APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA LIXIVIACIÓN BACTERIANA
DE MINERALES SULFURADOS DE COBRE (BIOLIXIVIACIÓN)**

**LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE BAJA LEY EN BOTADEROS
(CALCOPIRITA)**

**LIXIVIACIÓN DE SULFUROS SECUNDARIOS EN PILAS
(CALCOSINA, COVELINA Y BORNITA)**

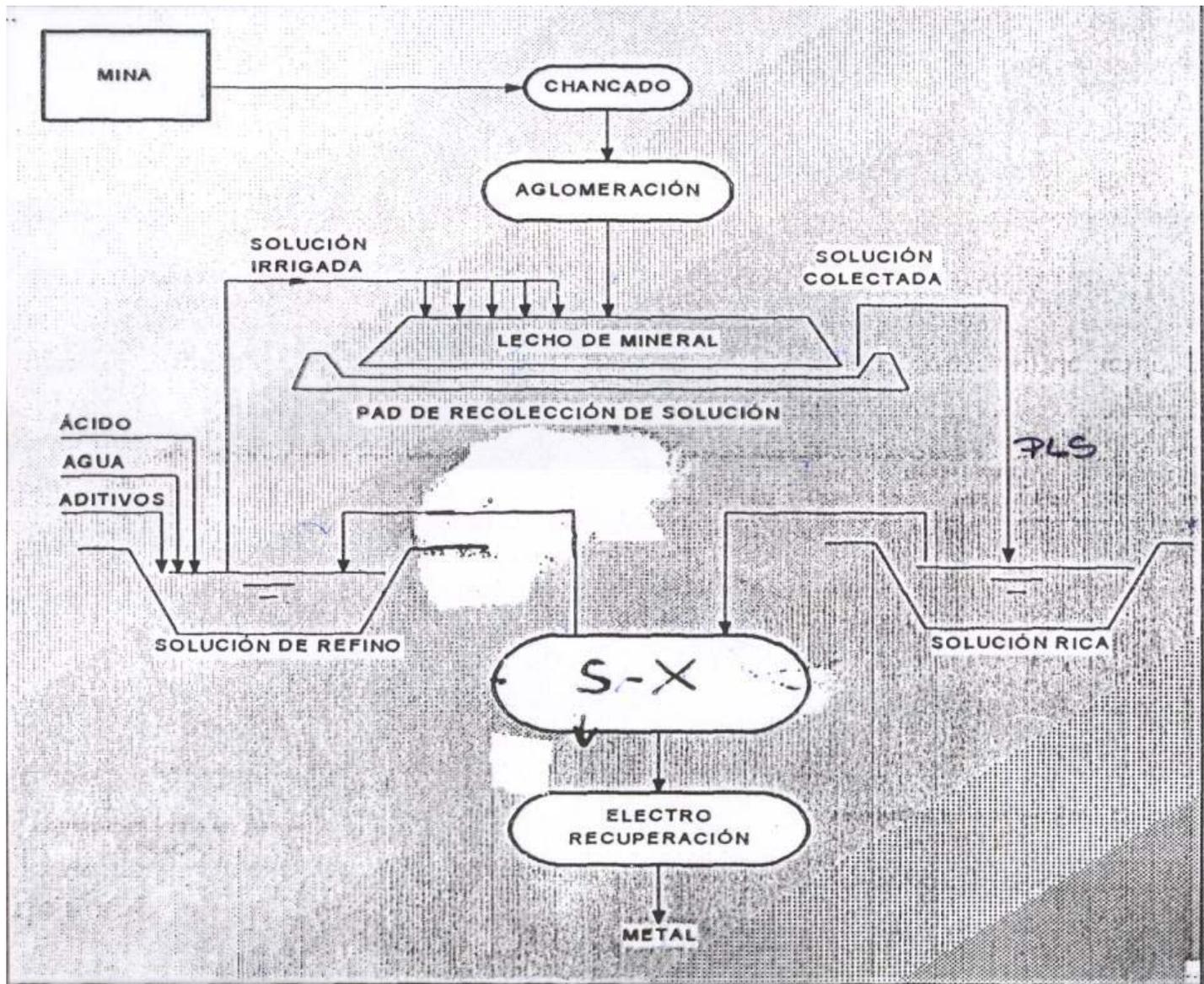
**LIXIVIACIÓN IN SITU
(CALCOPIRITA)**

**LIXIVIACIÓN DE CONCENTRADOS DE SULFUROS PRIMARIOS
EN REACTORES
(CALCOPIRITA, ENARGITA)**

**APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA LIXIVIACIÓN BACTERIANA
DE MINERALES SULFURADOS DE ORO (BIOOXIDACIÓN)**

**LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE BAJA LEY EN PILAS
(PIRITAS Y ARSENOPIRITAS)**

**LIXIVIACIÓN DE CONCENTRADOS DE ORO EN REACTORES
(PIRITAS Y ARSENOPIRITAS)**



PILA DE BIOLIXIVIACIÓN



INTEGRACION PROCESOS HIDRO/ELECTRO EN PROCESO EXPLOTACION-CONCENTRACION-FUNDICION

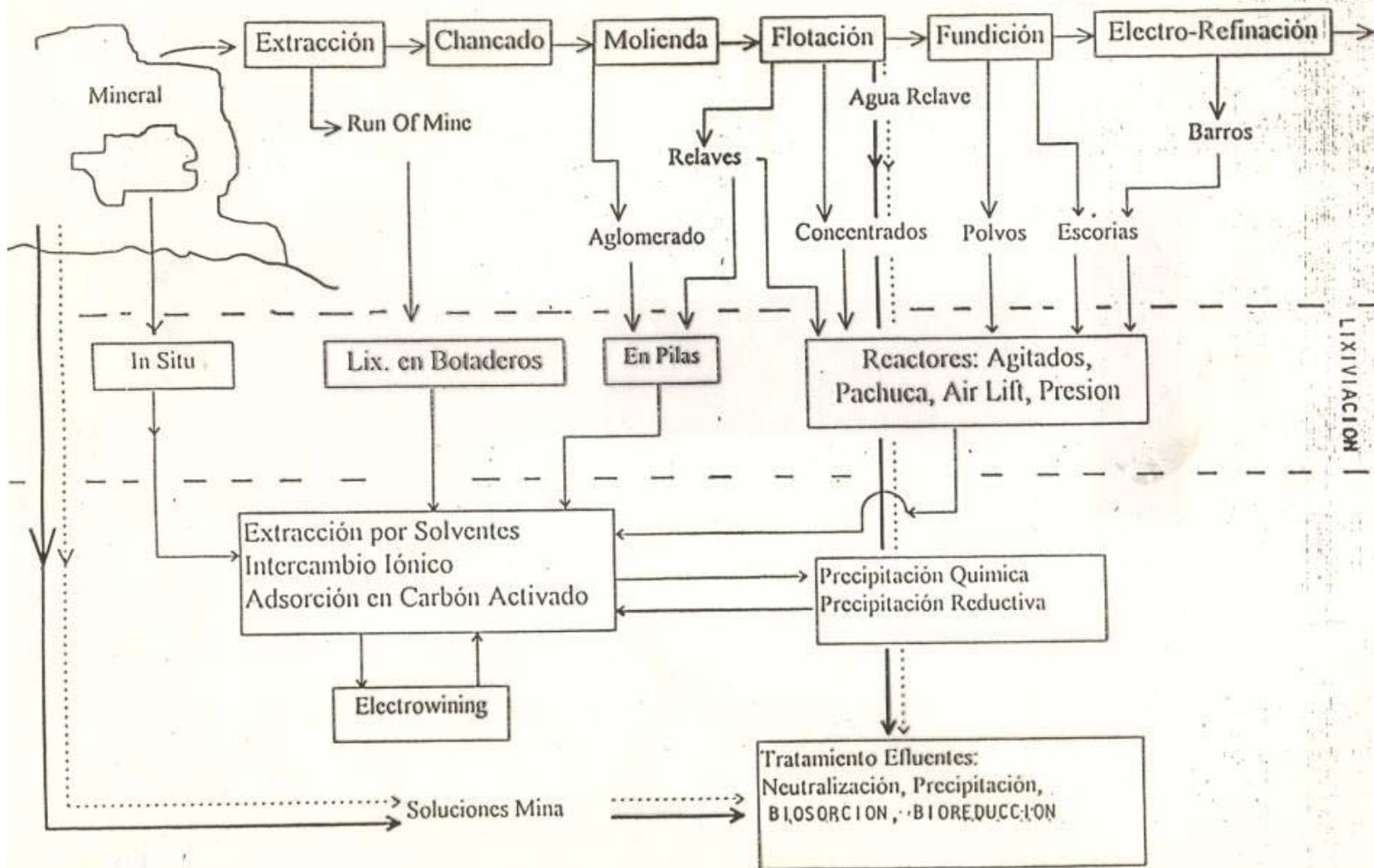


Table 1

Commercial bioheap leach operations

Operation	Location	Ore processed/ product	Size (t of ore/day)	Status
Lo Aguirre	Chile	Chalcocite/Cu	16,000	In closure
Quebrada Blanca	Chile	Chalcocite/Cu	17,300	In operation
Cerro Colorado	Chile	Chalcocite/Cu	16,000	In operation
Ivan-Zar	Chile	Chalcocite/Cu	2,000	In operation
Andacollo	Chile	Chalcocite/Cu	10,000	In operation
Dos Amigos	Chile	Chalcocite/Cu	3,000	In operation
Zaldivar	Chile	Chalcocite/Cu	~20,000	In operation
Mt. Leyshon	Australia	Transitional supergene/ Cu, Au	1,370	Ceased operation
Girilambone	Australia	Chalcocite/Cu	16,000	In operation

Table 1
Commercial copper bioheap leach plants.

Plant	Size Tonnes/day	Years in Operation
Lo Aguirre, Chile	16,000	1980 – 1996
Gundpowder's Mammoth Mine, Australia	<i>in-situ</i> ^a	1991 – Present
Mt. Leyshon, Australia	1,370	1992 – in closure (1997?)
Cerro Colorado, Chile	16,000	1993 – Present
Girilambone, Australia	2,000	1993 – Present
Ivan-Zar, Chile	1,500	1994 – Present
Quebrada Blanca, Chile	17,300	1994 – Present
Andacollo, Chile	10,000	1996 – Present
Dos Amigos, Chile	3,000	1996 – Present
Zaldivar, Chile	≈20,000	1998 – Present

^a≈1.2 million tonne ore body

Table 1
Commercial copper bioheap leach plants.

Plant	Size Tonnes/day	Years in Operation
Lo Aguirre, Chile	16,000	1980 – 1996
Gundpowder's Mammoth Mine, Australia	<i>in-situ</i> ^a	1991 – Present
Mt. Leyshon, Australia	1,370	1992 – in closure (1997?)
Cerro Colorado, Chile	16,000	1993 – Present
Girilambone, Australia	2,000	1993 – Present
Ivan-Zar, Chile	1,500	1994 – Present
Quebrada Blanca, Chile	17,300	1994 – Present
Andacollo, Chile	10,000	1996 – Present
Dos Amigos, Chile	3,000	1996 – Present
Zaldivar, Chile	≈20,000	1998 – Present

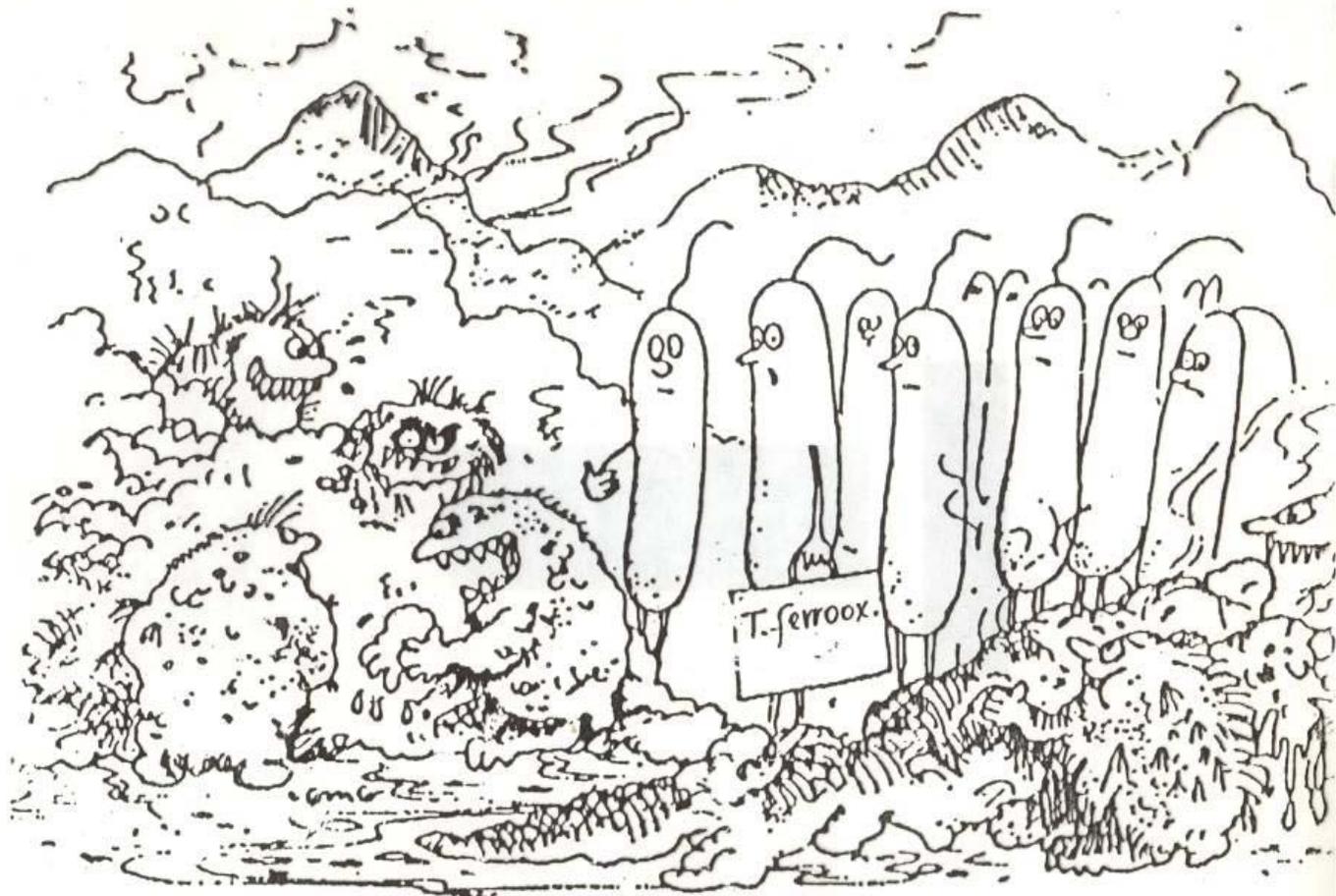
^a≈1.2 million tonne ore body

PARÁMETROS PARA CONTROLAR LOS PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN

- Fe total : $\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$
- Eh
- $E_h = E_o + RT/nF \ln [\text{Fe}^{+3}] / [\text{Fe}^{+2}]$
- $E_h = 0.771 + 0.06 \log a [\text{Fe}^{+3}] / a[\text{Fe}^{+2}]$

¿DÓNDE SE REQUIERE MAS CONOCIMIENTO?

- **BÁSICO**
- QUÍMICO → REACCIONES QUÍMICAS
- BIOLÓGICO →
- ¿NUEVAS ESPECIES?
- ¿ADAPTACIONES?
- **PROCESOS:** HACERLOS MAS EFICIENTES ¿CATÁLISIS?



"Oh dear! I didn't realize 'in the field' would be like this! We should have stayed in the laboratory."

OTROS PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN DIRECTA

- Lixiviación de óxidos de Mn(IV)
- Algunas bacterias pueden disolver directamente algunos óxidos mediante reducción enzimática de un compuesto insoluble, como el MnO₂.
Reducción producida por el crecimiento anaeróbico sobre glucosa u otro orgánico:
- $\text{MnO}_4^- + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{Mn}^{+2} + \text{Comp. Orgánicos}$
(bacterias anaeróbicas)

OTROS PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN INDIRECTA

- Lixiviación de minerales por ácidos orgánicos.
- Algunos M.O. heterotróficos generan ácidos orgánicos de su metabolismo: ác. Cítrico, oxálico, tartárico, producidos por algunos hongos: Penicillium y Aspergillus y también por bacterias del género Bacillus. Estos ácidos se producen en el medio en el cuál ellos se desarrollan:
- **$C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{Ac. Orgánicos}$**
- Estos ác. pueden solubilizar silicatos, óxidos, etc.

OTROS PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN INDIRECTA

- Lixiviación de minerales por ácidos orgánicos.
- Estos ácidos orgánicos también pueden formar complejos_solubles con los iones metálicos (quelatos).
- Ej. Oxalato de Fe(II)
- Son procesos conocidos la disolución de Al desde bauxitas y desde rocas conteniendo Al.
- Mn desde rocas que los contienen.
-

OTROS PROCESOS DE BIOLIXIVIACIÓN INDIRECTA

- Lixiviación de minerales por ácidos orgánicos.
- A través de un proceso similar se pueden solubilizar Ti desde leucitas y rocas graníticas.
- Cobre y Zn desde varios minerales oxidados.
- Ni desde lateritas
- No se ha demostrado procesos de actividad directa sobre minerales en hongos.