



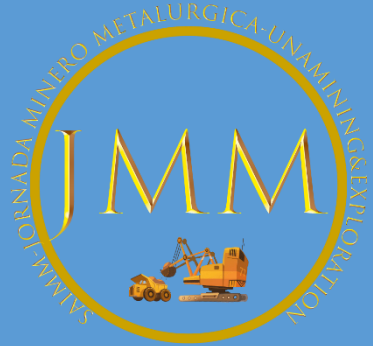
**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES**



**LA LIXIVIACIÓN DE SULFUROS METÁLICOS: UN  
PUNTO DE CONVERGENCIA ENTRE LAS PLANTAS  
CONCENTRADORAS E HIDROMETALÚRGICAS**

**Jorge Ipinza Abarca, Dr. Sc.**  
**Ingeniero Civil Metalúrgico**

# CONTENIDOS



<b>1</b>	ESTUDIOS DE LA LIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA
<b>2</b>	EL PRETRATAMIENTO QUÍMICO: LA CLAVE DEL PROCESO
<b>3</b>	ROL DEL TAMBOR AGLOMERADOR
<b>4</b>	INTEGRACIÓN PLANTAS HIDROMETALÚRGICA Y CONCENTRADORA
<b>5</b>	CONCLUSIONES



# ESTUDIOS DE LA LIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA



## PROYECTOS Y OPERACIONES DE LIXIVIACIÓN CON NaCl

**2012** Abre una alternativa para la lixiviación de sulfuros de cobre secundario bajo condiciones mejoradas frente a la biolixiviación: mayor extracción de cobre y menor ciclo de lixiviación .

**2019** La única vía para lixiviar sulfuros de cobre primarios de baja ley con CAPEX/OPEX competitivo.

No se afecta con impurezas como As, Hg, entre otras.

**2020** Abre la posibilidad de integración entre planta concentradora y planta hidrometalúrgica con un objetivo de negocio sostenible: procesar minerales que no puede tratar la concentradora.





# LIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA EN MEDIO SULFATO ÁCIDO

- Rápida transición desde dominios de sulfuros secundarios ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuS}$ ) a primarios ( $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ,  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ).
- Acopio desde 200 mil millones de toneladas de materiales de baja ley (menor a 0,3% Cu) en varios botaderos de estériles de mina.
- Oportunidad de retratamiento de ripios de lixiviación con cobre asociado a insolubles y fracciones no lixiviadas de sulfuros de cobre secundario durante la biolixiviación y lixiviación de óxidos (ley entre 0,5 y 0,8%  $\text{Cu}_T$ ).
- Disponibilidad de plantas de SX-EW sobre 40 % y en aumento hacia el 2030 (Cochilco, 2019).



**Calcopirita)**



**Enargita (CMDIC, Rajo Rosario)**



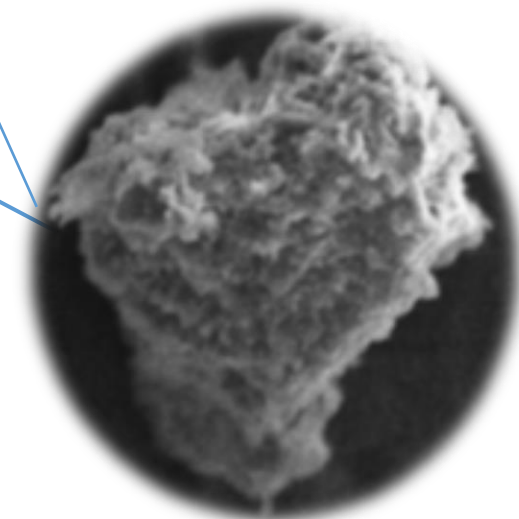
# LIXIVIACIÓN EN MEDIO SULFATO ÁCIDO

## Reacciones en medio sulfato

- La disolución de la calcopirita en un medio oxigenado en soluciones ácidas se puede representar por la ecuación (1).

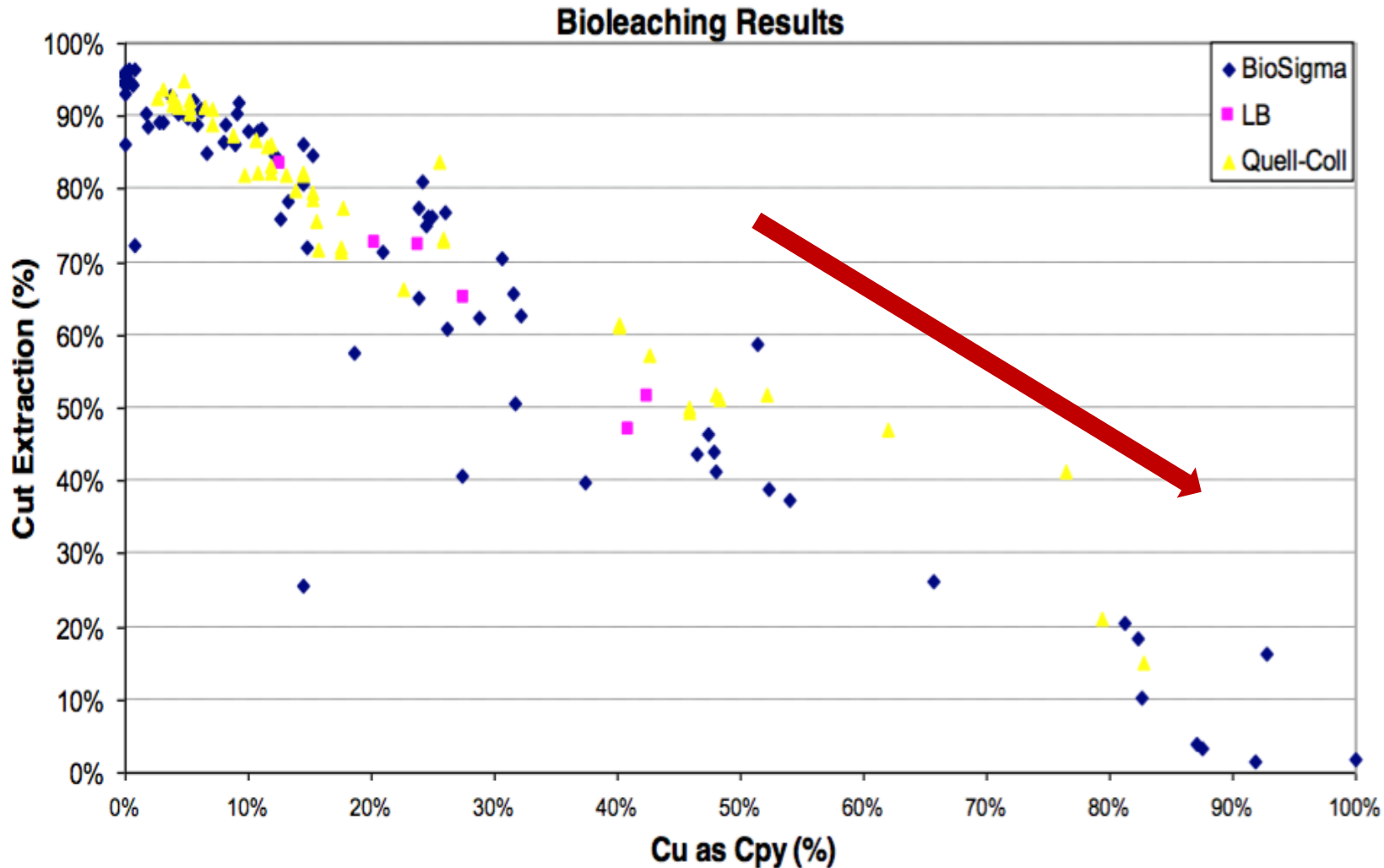


- Cuando ocurre la lixiviación, puede ocurrir una oxidación férrica de la calcopirita por las ecuaciones (2) y (3), siendo disuelta por los iones férricos, produciendo iones ferrosos los que se reoxidan por el oxígeno en las soluciones ácidas:





# BIOLIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA



¿Qué diferencia existe entre disolución de la calcosina y la calcopirita?

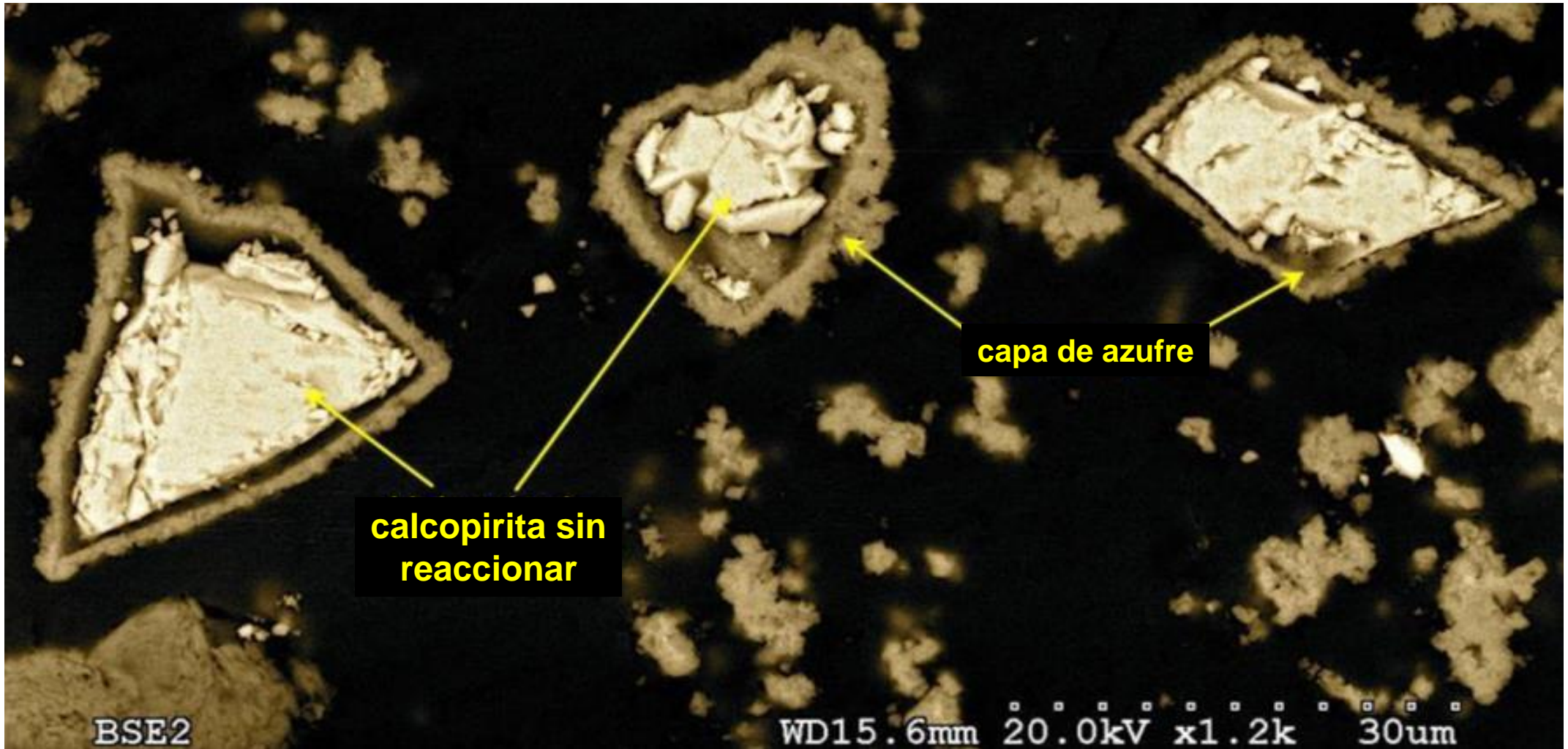
¿Será posible lixiviar con bacterias termófilas?

¿Existen bacterias halófilas que mejoren la extracción de cobre?





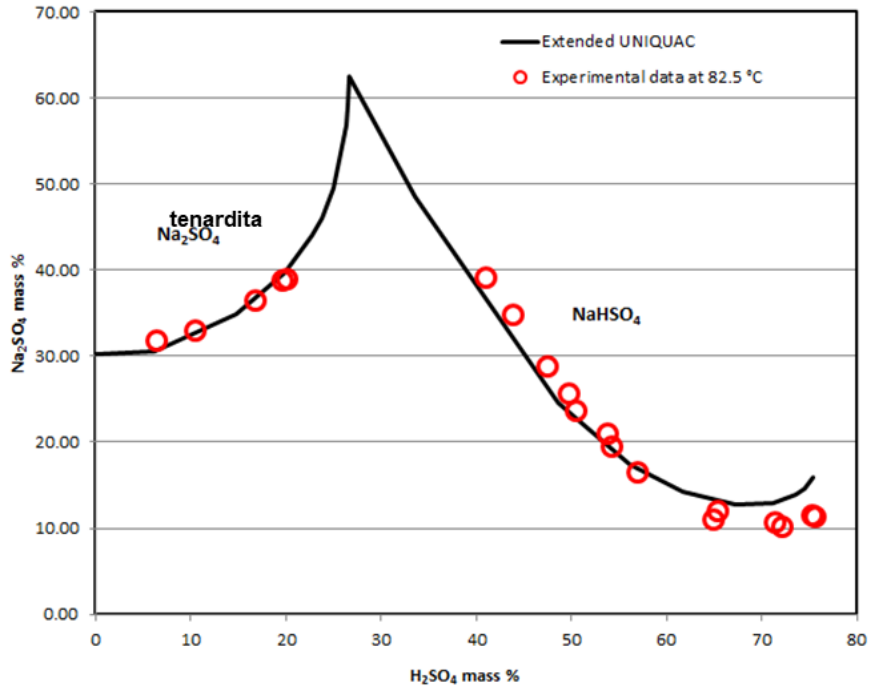
# CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN EN MEDIO CLORURO



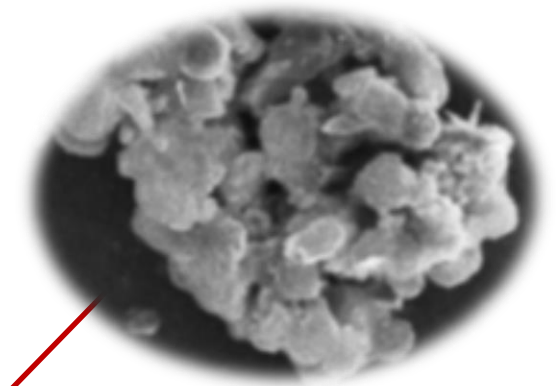
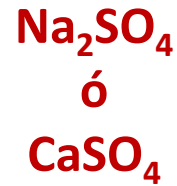




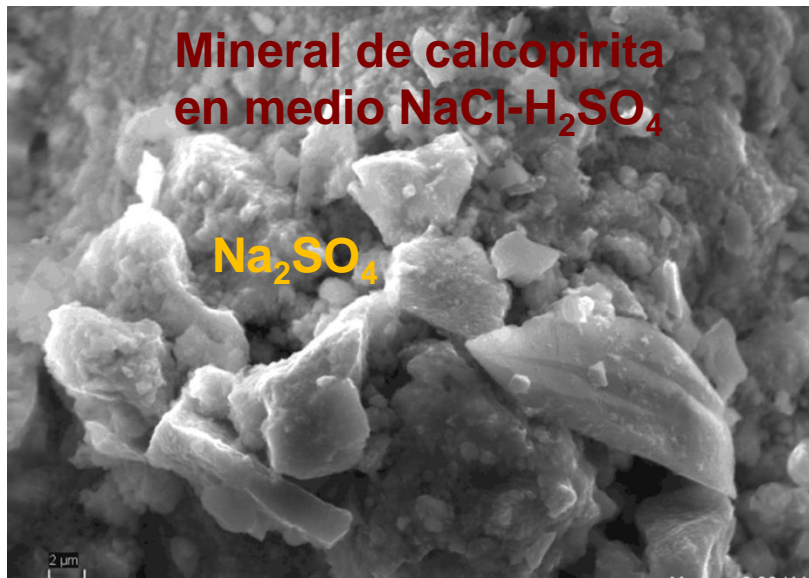
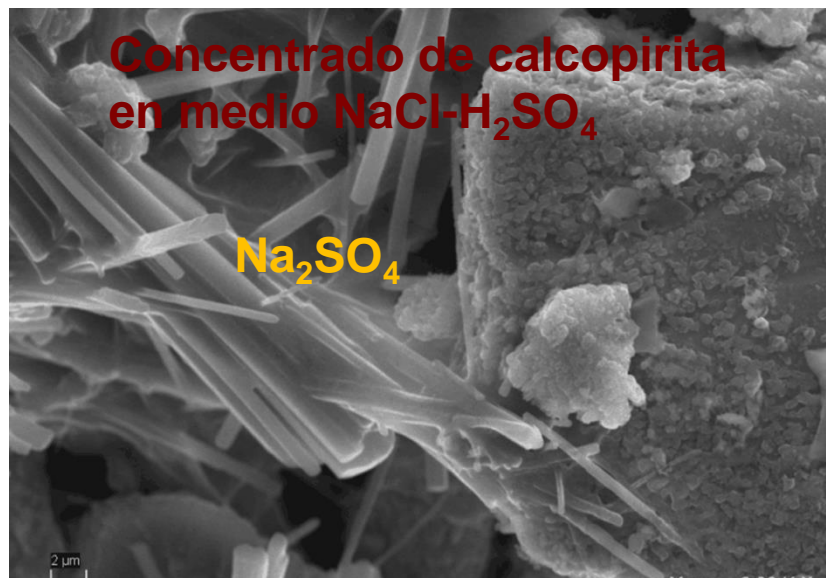
# LIXIVIACIÓN EN MEDIO CLORURO ÁCIDO



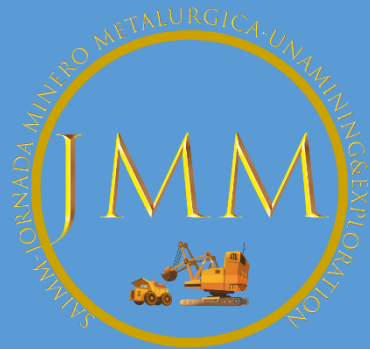
Mayor afinidad del sulfato por sodio y calcio en el pretratamiento químico (aglomerado/curado/reposo)



Reacción	$\Delta G^\circ$ (kJmol <sup>-1</sup> )
$\text{CuFeS}_2 + 3 \text{Cu}^{2+} + 6 \text{Cl}^- = 4 \text{CuCl} + \text{FeCl}_2 + 2 \text{S}$	-73.4
$\text{CuFeS}_2 + 3 \text{CuCl}^+ + 3 \text{Cl}^- = 4 \text{CuCl} + \text{FeCl}_2 + 2 \text{S}$	-65.3



*[Quispe, 2017]*



# EL PRETRATAMIENTO QUÍMICO: LA CLAVE DEL PROCESO



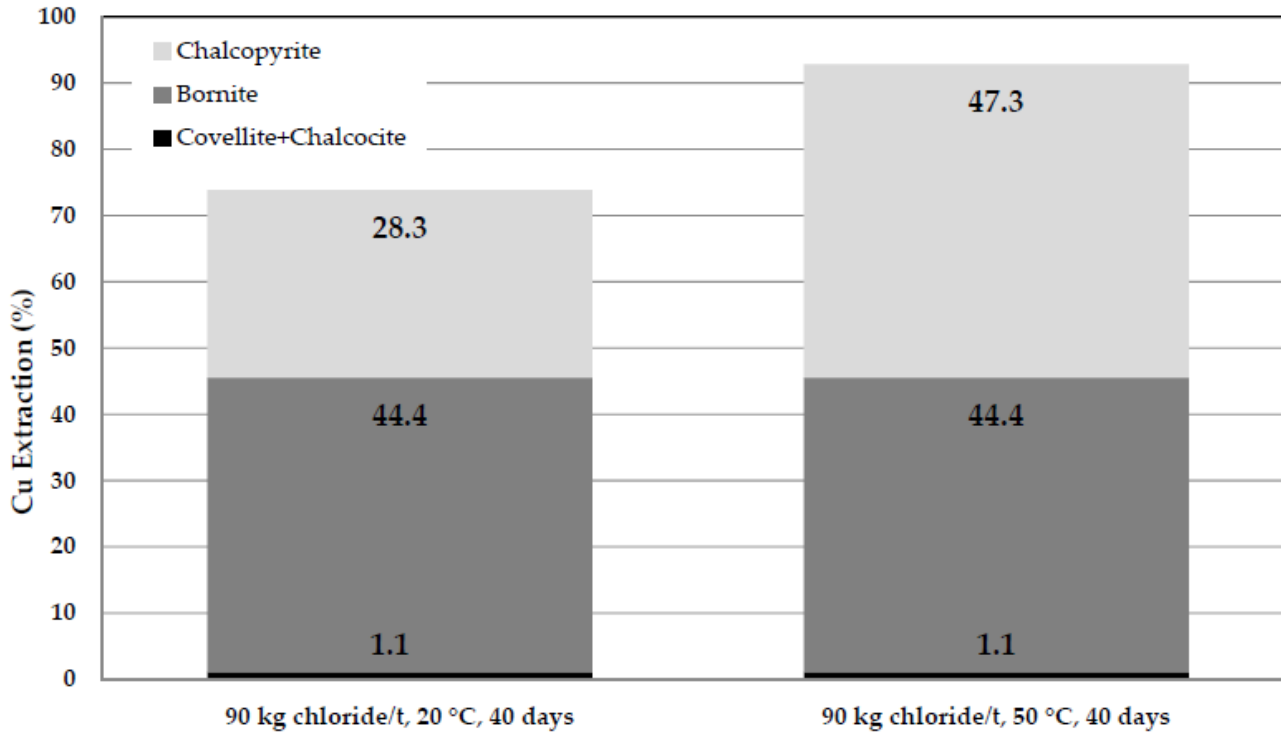
# LIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA EN MEDIO CLORURO ÁCIDO

## Pretratamiento químico con lixiviación en shaker



0,77% Cu<sub>T</sub>, 0,09 Cu<sub>S</sub>  
CEA: 41 Kg/t

Mineral	Chemical Formula	Amount (wt %)	Cu (wt %)
Chalcopyrite	CuFeS <sub>2</sub>	1.21	0.42
Bornite	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	0.54	0.34
Covellite	CuS	0.01	<0.01
Chalcocite	Cu <sub>2</sub> S	<0.01	<0.01
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0.73	-
Pyrite	FeS <sub>2</sub>	0.50	-
Gangues	-	97.00	-
Total Cu			0.77



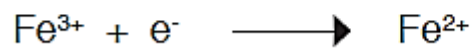
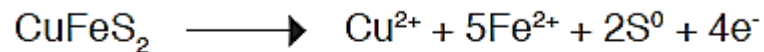
-150 μm con un P<sub>80</sub> = 94,01 μm, 10 g mineral/65 kg agua de mar, 3 días de lixiviación en shaker.

[Cerde et al, 2017]



## REACCIONES MÁS PROBABLES

N°	Equation	$\Delta G_{25^\circ\text{C}}$ (kcal/mol)	$\Delta G_{50^\circ\text{C}}$ (kcal/mol)
(1)	$2\text{Cu}_2\text{S} + 4\text{H}^+ + \text{O}_2 = 2\text{CuS} + 2\text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-68.1	-65.9
(2)	$2\text{CuS} + 4\text{H}^+ + \text{O}_2 = 2\text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$	-55.2	-53.2
(3)	$2\text{CuS} + 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 2\text{Cl}^- = 2\text{CuCl}^+ + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{S}$	-56.3	-54.6
(4)	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4 + 7\text{Cu}^{2+} + 12\text{Cl}^- \rightarrow 12\text{CuCl} + \text{Fe}^{2+} + 4\text{S}$	-4.6	-9.4
(5)	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4 + 7\text{CuCl}^+ + 5\text{Cl}^- \rightarrow 12\text{CuCl} + \text{Fe}^{2+} + 4\text{S}$	-1.0	-4.7
(6)	$\text{CuFeS}_2 + 2\text{Cu}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow 2\text{CuCl} + \text{CuS} + \text{Fe}^{2+} + \text{S}$	-15.6	-16.4
(7)	$\text{CuFeS}_2 + 3\text{CuCl}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow 4\text{CuCl} + \text{Fe}^{2+} + 2\text{S}$	-10.7	-11.9



(8)



Como cloro-hierro se produce una disminución del potencial redox

A causa del pretratamiento químico disminuye su formación durante el ataque.

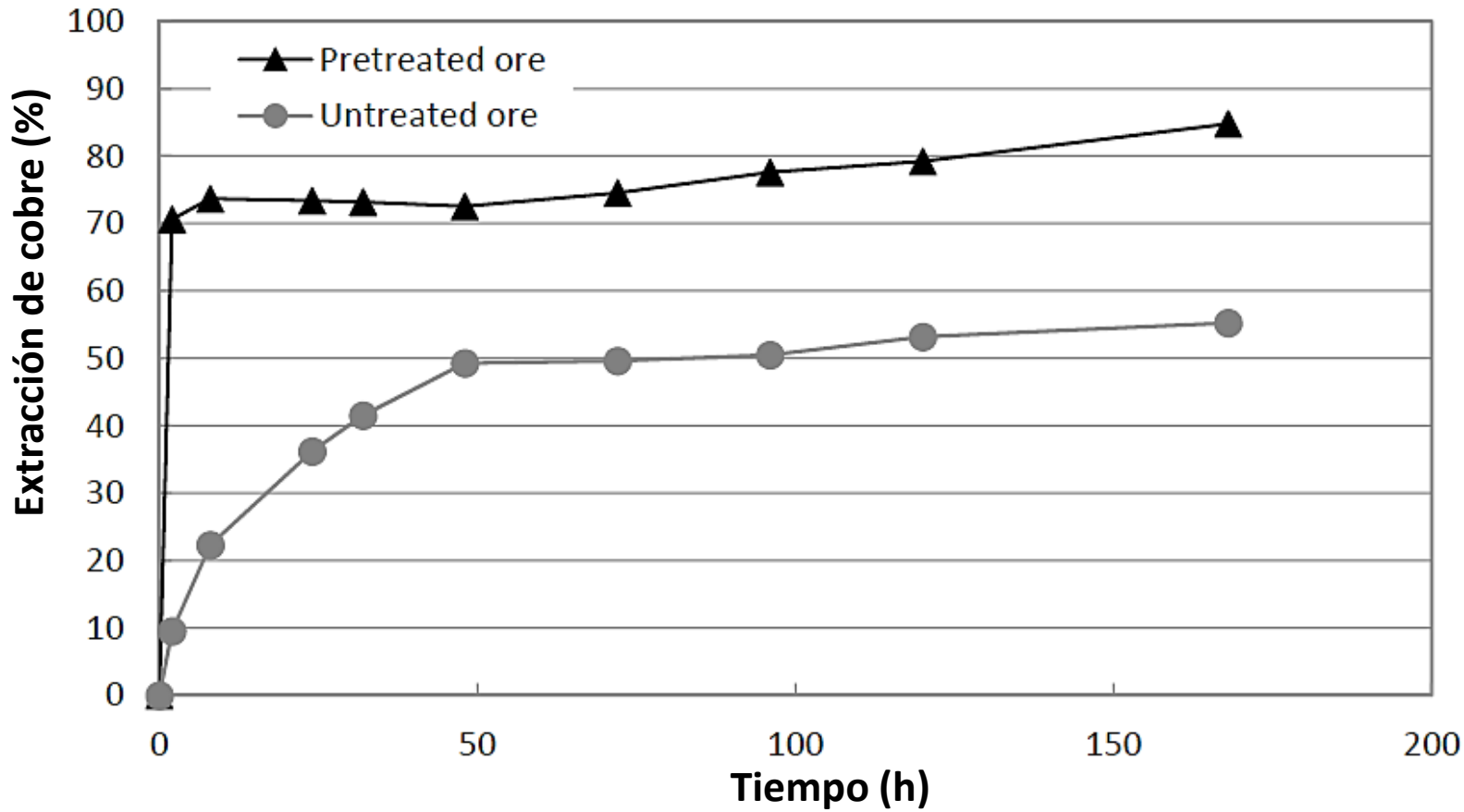




# LIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA EN MEDIO CLORURO ÁCIDO



## Pretratamiento químico con lixiviación agitada



- 100 g mineral
  - 65 kg agua de mar/t mineral
  - 20 Kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t mineral
  - 90 kg Cl<sup>-</sup>/t mineral
  - 40 d de reposo
  - 20 °C
  - 400 rpm
- Solución acuosa
- [Cu<sup>2+</sup>]= 2 g/L
  - [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]= 20 g/L
  - [Cl<sup>-</sup>]= 60 g/L (20 desde agua de mar)

[Cerde et al, 2017]

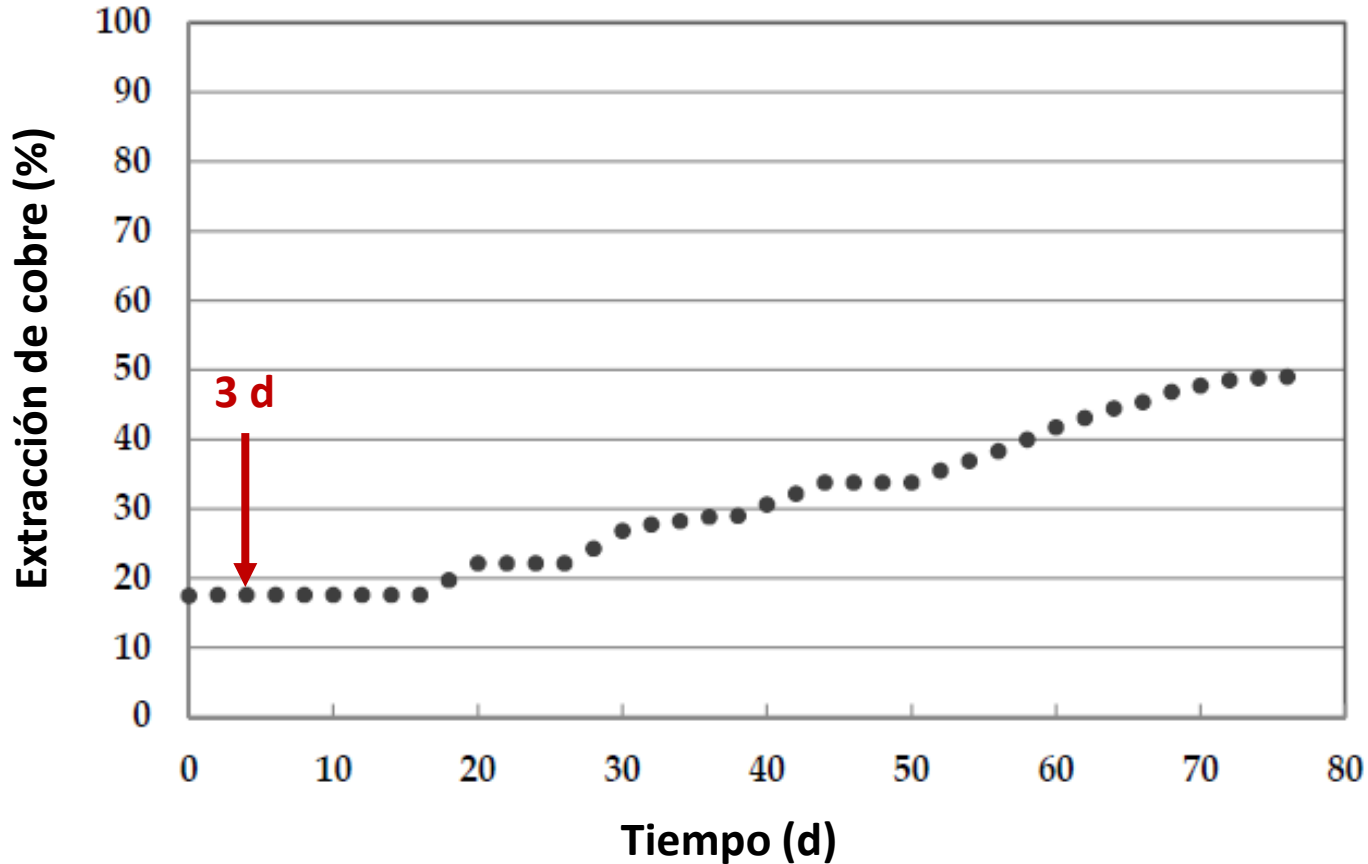




# LIXIVIACIÓN DE LA CALCOPIRITA EN MEDIO CLORURO ÁCIDO



## Pretratamiento químico con lixiviación en mini columna



- 100 g mineral ( $P_{80} = 94,01 \mu\text{m}$ )
- 500 g  $\text{SiO}_2$  (-2 mm)
- 65 kg agua de mar/t mineral
- 20 Kg  $\text{H}_2\text{SO}_4$ /t mineral
- 90 kg  $\text{Cl}^-$ /t mineral
- 40 d de reposo
- 20 °C
- 400 rpm

### Solución acuosa

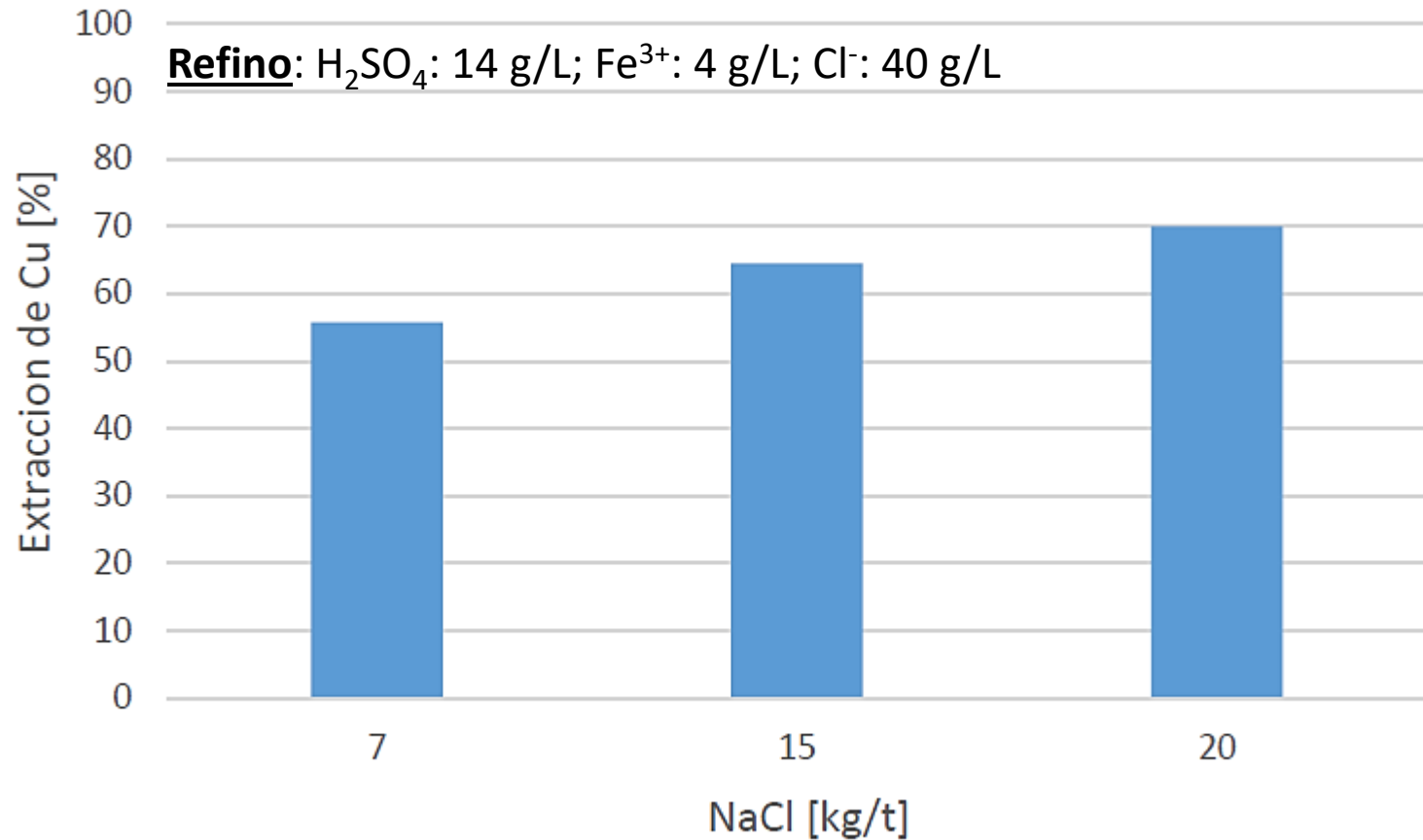
- $[\text{Cu}^{2+}] = 2 \text{ g/L}$
- $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 20 \text{ g/L}$
- $[\text{Cl}^-] = 60 \text{ g/L}$  (20 desde agua de mar)

[Cerde et al, 2017]



# TEST EMELA<sup>®</sup> LIXIVIACIÓN DE MINERAL DE CMDIC

## Pretratamiento químico con lixiviación agitada



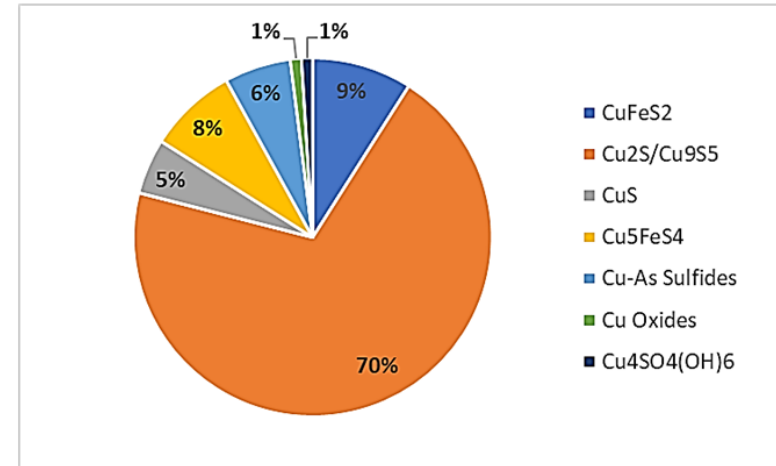
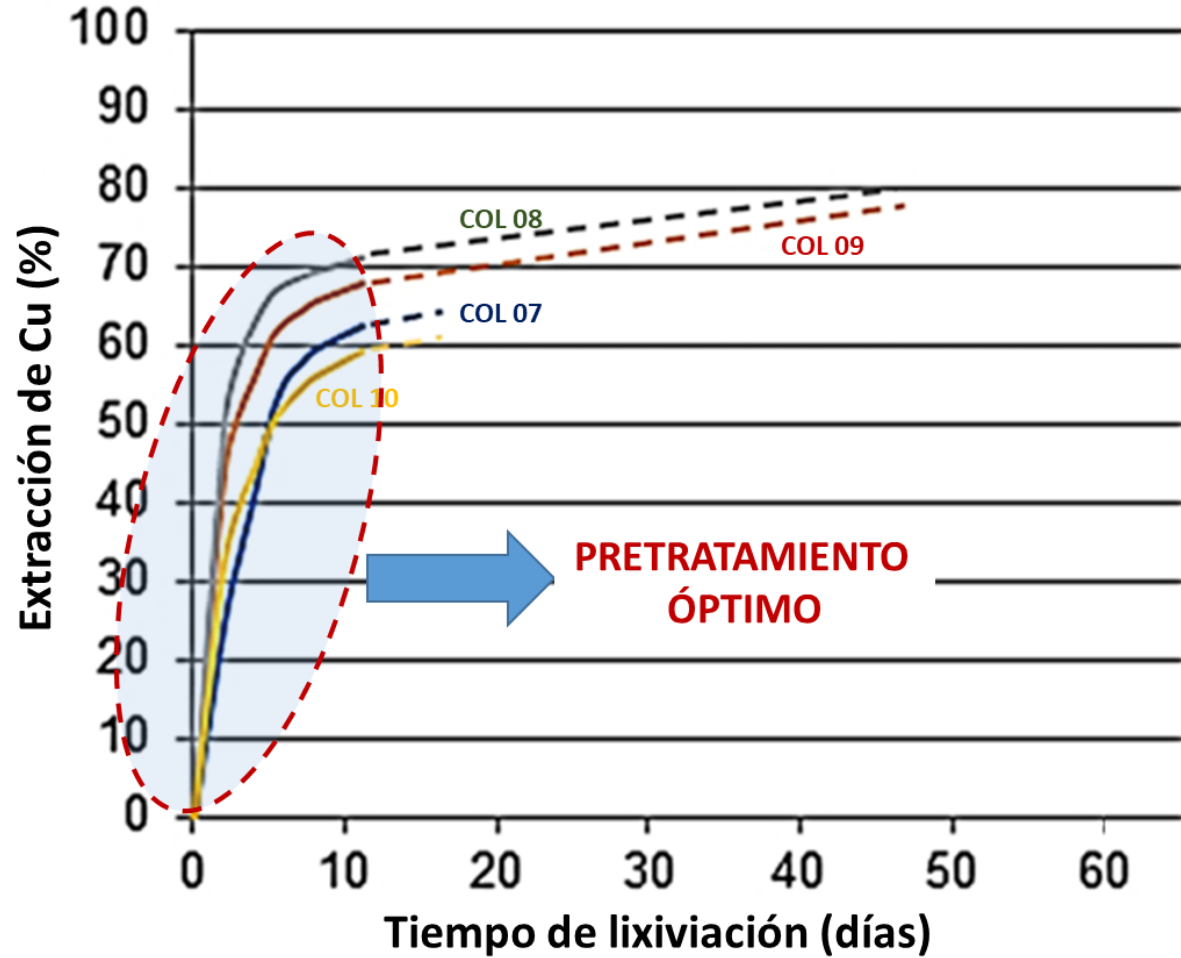
- 100% - 214 μm
- 70% CEA
- 20 Kg NaCl/t mineral
- 30 d reposo
- Humedad de impregnación: 39%
- CEA: 4 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/t
- 6 h lixiviación
- 400 rpm
- Temperatura ambiente

Ley de Cabeza (%)				
CuT	Cu(H+)	Cu(CN)	Cu(Res)	FeT
0,93	0,093	0,686	0,08	2,92

[Ipinza, 2019]



# ROL DEL PRETRATAMIENTO QUÍMICO



- 100% -1/2"
- 70% CEA
- 20 kg NaCl/t
- 30 d reposo
- Columna 1,2 m



[Ipinza, 2019]



## CAMBIOS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

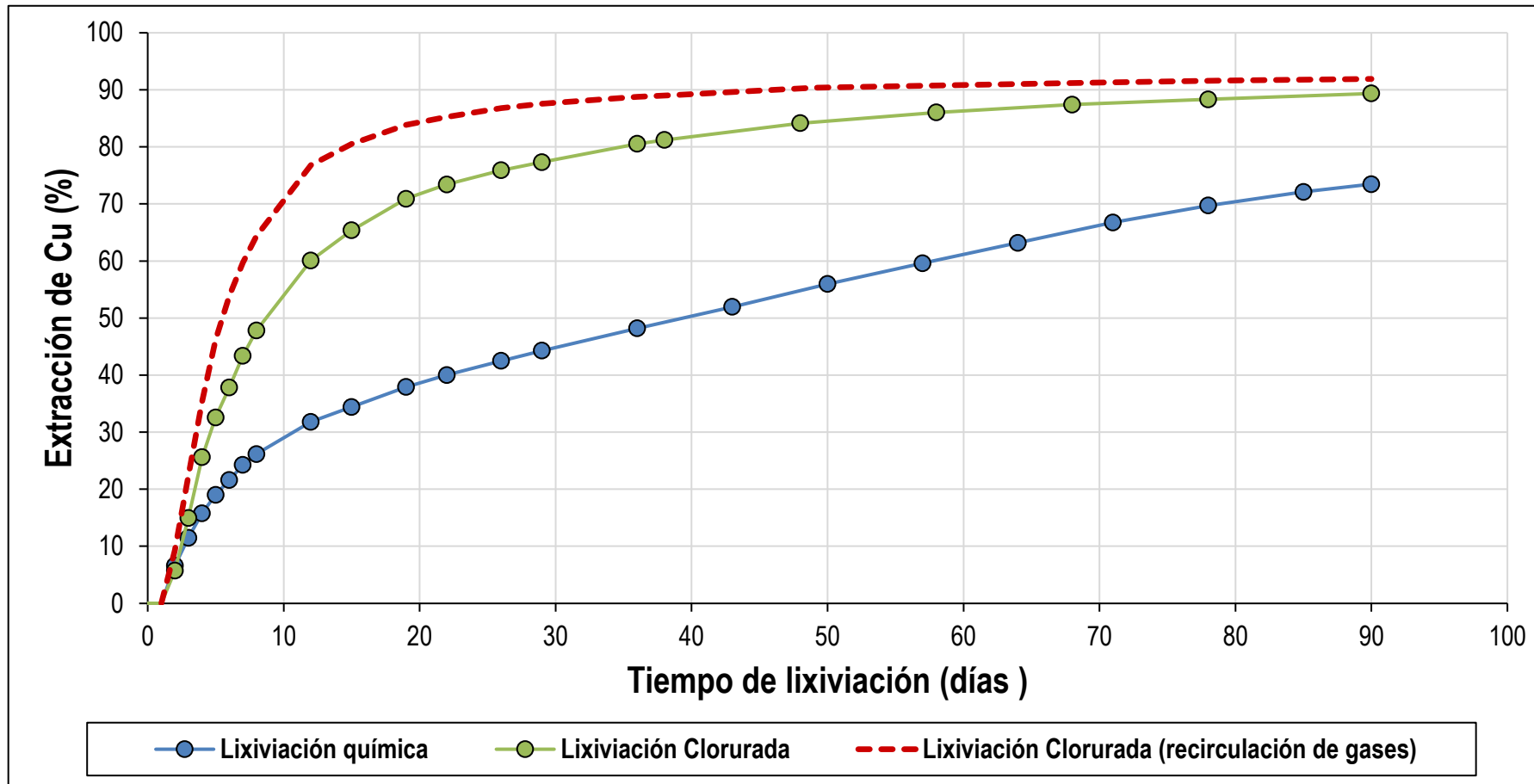
Parámetro	Unidad	Concentrado de calcopirita	Ripio lixiviación con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{NaCl}$	Ripio lixiviación con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
Área superficial	$\text{m}^2/\text{g}$	$1,51 \pm 0,23$	$1,14 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,02$
Volumen de microporos	$\text{m}^3/\text{g}$	$(6,60 \pm 0,84) \times 10^{-4}$	$(6,28 \pm 0,05) \times 10^{-4}$	$(4,48 \pm 0,06) \times 10^{-4}$
Área de microporos	$\text{m}^2/\text{g}$	$1,86 \pm 0,23$	$1,78 \pm 0,01$	$1,27 \pm 0,02$



# ROL DEL TAMBOR AGLOMERADOR



# EFECTO RECIRCULACIÓN DE GASES EN AGLOMERACIÓN RMT<sup>®</sup> SOBRE EXTRACCIÓN DE COBRE



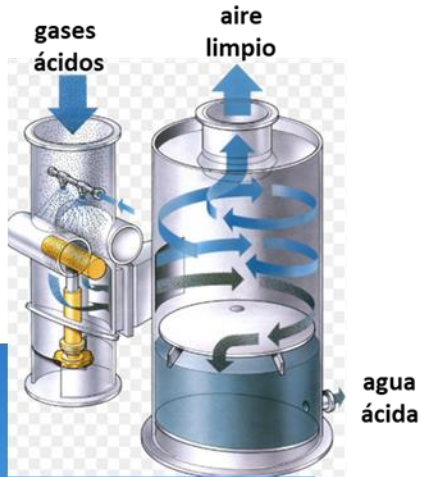


# AGLOMERADOR CONVENCIONAL VERSUS RMT®



1

**Tambor aglomerador + scrubbers**



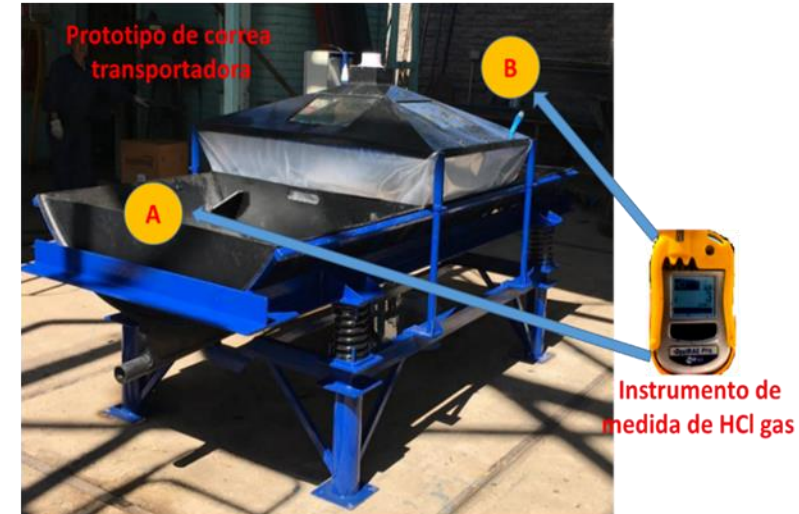
2

**Prototipo RMT:** Unifica los principios de aglomeración, curado y recirculación de los gases



3

**Prototipo correa:** Cierre parcial de correa transportadora + scrubbers



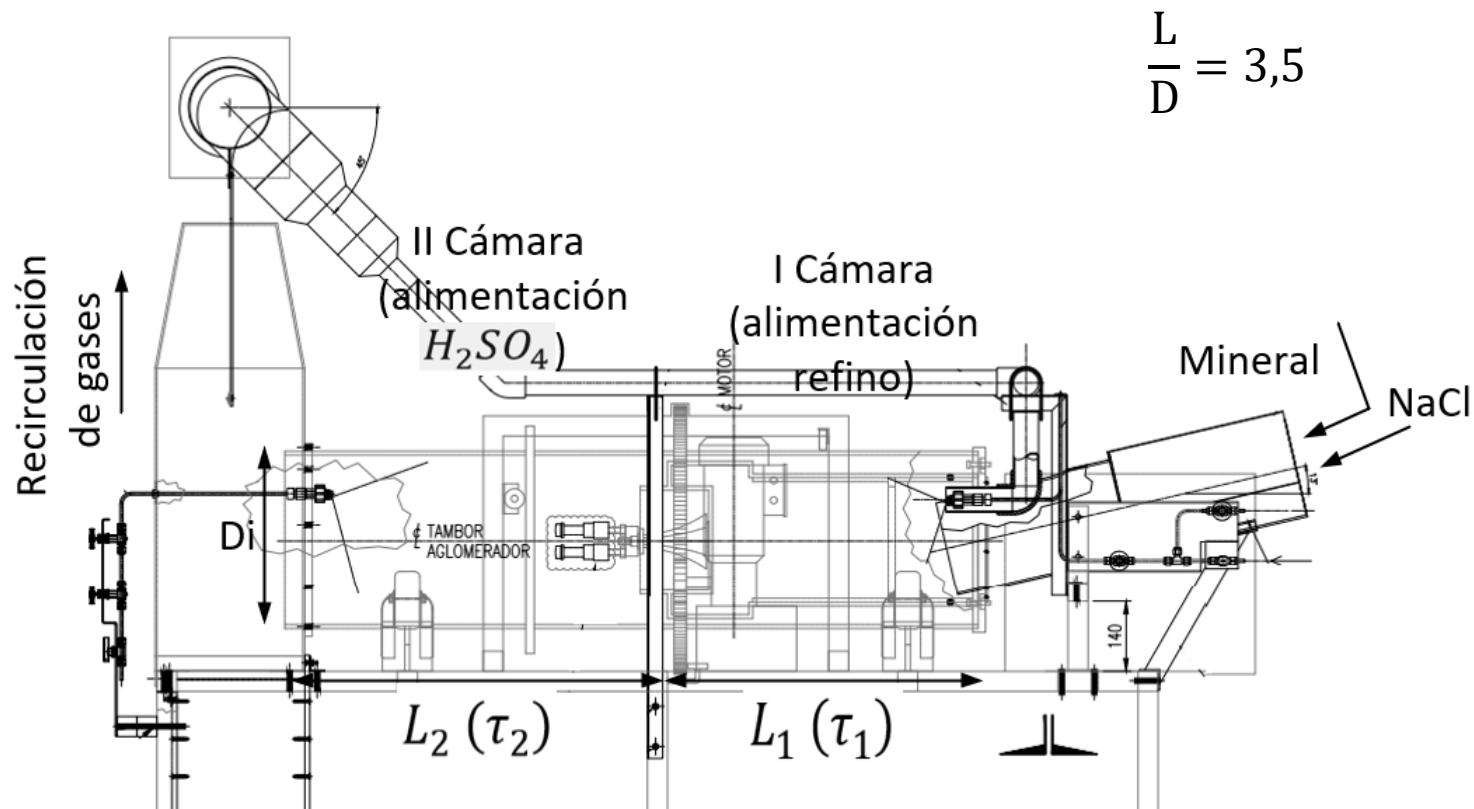
Patente: SPL Chile & Universidad Técnica Federico Santa María



# REACTOR DE MEZCLA TRIFÁSICA (RMT®) [PATENTE K+S CHILE & UTFSM]

Parámetro	Valor (ppm)
Límite permisible absoluto en el ambiente (DS-594)	6
Emisión en tambor aglomerador convencional	7
Emisión en correa abierta	14
Emisión en correa cubierta + Scrubber	3
Emisión en RMT®	1

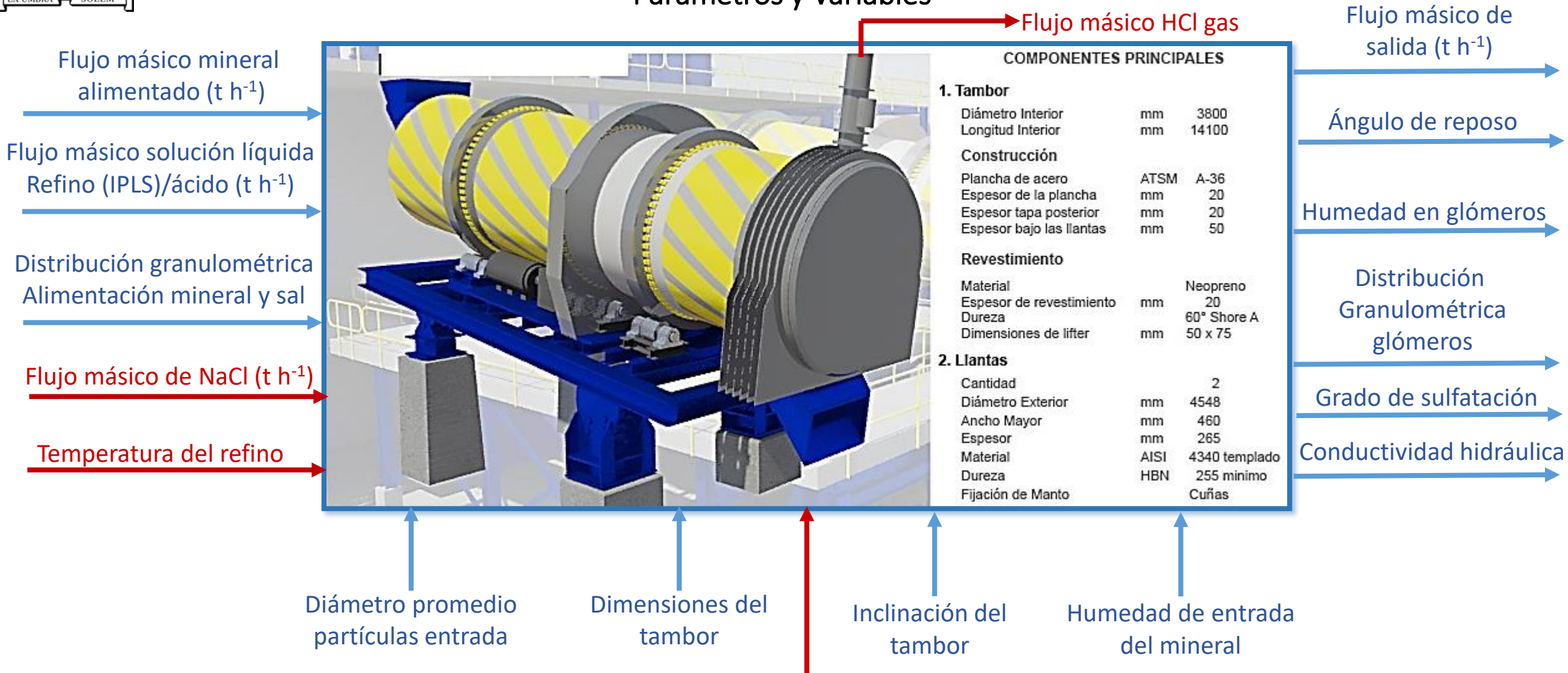
$$F.C. = \frac{\text{Presión atmosférica local}}{\text{Presión atmosférica nivel del mar}}$$





# VARIABLES ASOCIADAS AL PROCESO DE AGLOMERACIÓN/CURADO

## Parámetros y Variables



■ Variables asociadas al uso de NaCl

Temperatura del lecho

[Ipinza, 2020]





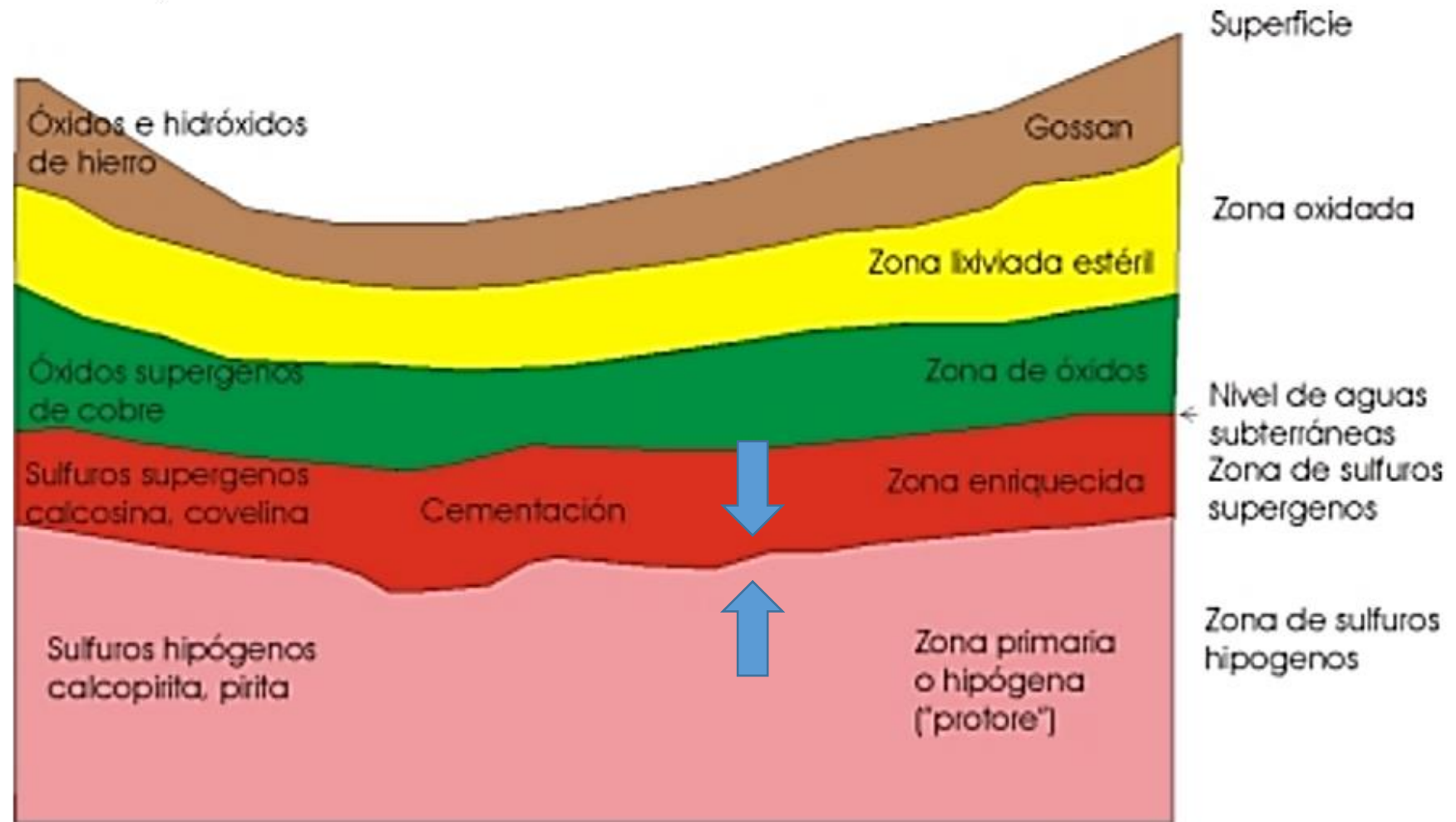
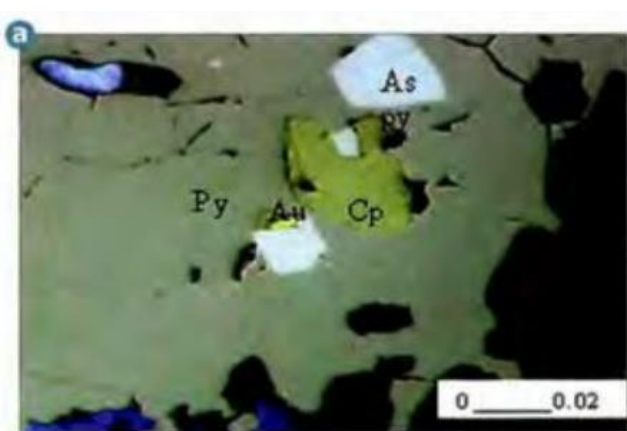
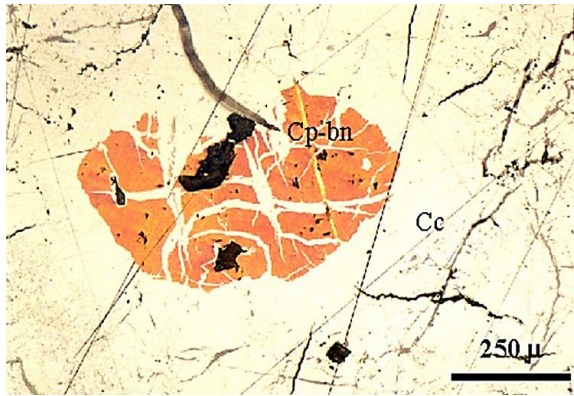


# INTEGRACIÓN PLANTAS HIDROMETALÚRGICA Y CONCENTRADORA



# INTEGRACIÓN DE PLANTAS

- El futuro de los sulfuros

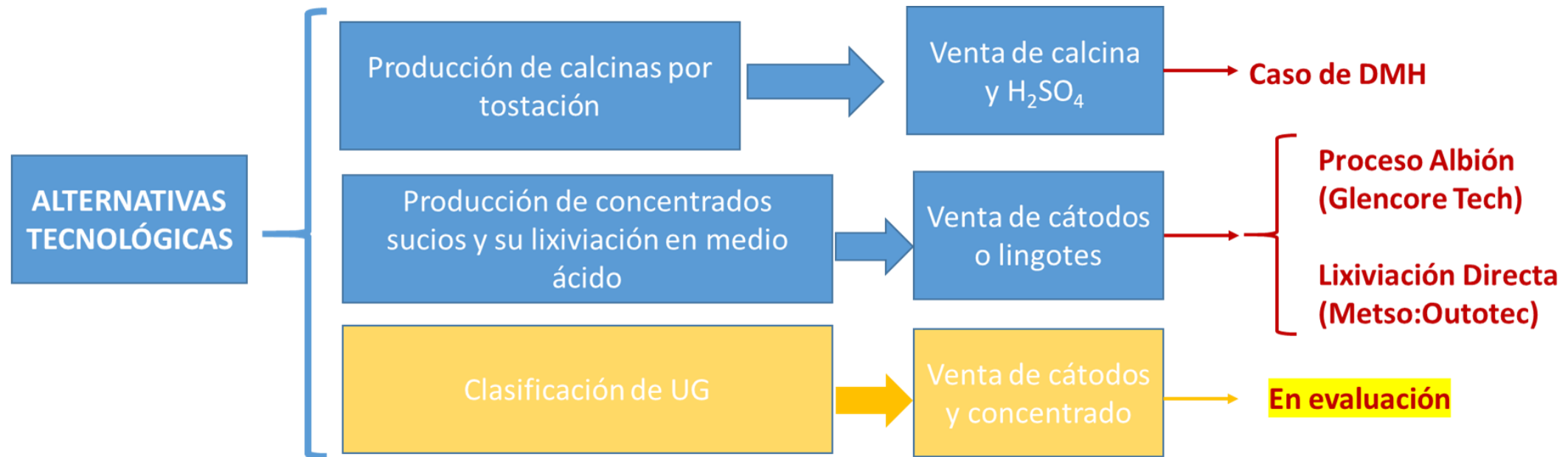






# INTEGRACIÓN DE PLANTAS

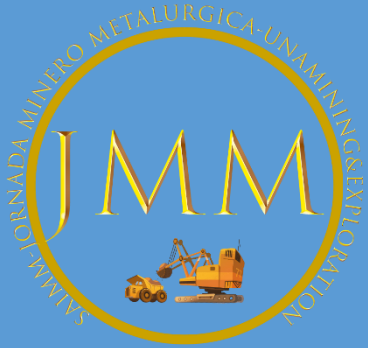
- Los concentrados sucios es un tema netamente local. Contenidos de arsénico (DMH está diseñado para 6%), antimonio, bismuto, zinc, plomo y mercurio, son catalogados como concentrados sucios.
- La mayoría de las fundiciones no procesará material que contenga más de 0,5% de arsénico.
- En DMH existen solo 100 kt de concentrados sucios de 4% de arsénico en bodega, de 160 kt que hubo en algún momento.





## INTEGRACIÓN DE PLANTAS

- El precio de los concentrados varía y se obtiene a partir del porcentaje de cobre que contienen y que se paga al mismo precio de los cátodos, pero descontando un cargo por los dos procesos que no ha recibido (fundición y refinación) y además castigos o premios por las impurezas o metales nobles que contiene.
- Concentrados sucios que contienen elementos deletéreos responsables de multas en fundiciones o de impacto medioambiental (As, Sb, Bi y Hg).
- Concentrados que contienen altos niveles de cromo y magnesio.



# CONCLUSIONES



# CONCLUSIONES

- La lixiviación usando sales de cloruro en medio ácido sulfúrico es una alternativa de procesos hidrometalúrgico que aplica tanto a minerales sulfurados de metales base como a concentrados “sucios”.
- Es una oportunidad de negocio para complementar la coexistencia de la planta hidrometalúrgica con la concentradora, distribuyendo el mineral en función de la ley del metal de valor, incrementando el beneficio económico, con menores consumos de reactivos, agua y energía.
- Las plantas hidrometalúrgicas existentes deben modificarse para responder a los requerimientos impuestos por la circulación de soluciones altas en cloruro, mediante ajustes criteriosos para compensar CAPEX y OPEX.



**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES**



**LA LIXIVIACIÓN DE SULFUROS METÁLICOS: UN  
PUNTO DE CONVERGENCIA ENTRE LAS PLANTAS  
CONCENTRADORAS E HIDROMETALÚRGICAS**

**Jorge Ipinza Abarca, Dr. Sc.**  
**Ingeniero Civil Metalúrgico**