

# ANÁLISIS DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES EN LA LIXIVIACIÓN CLORURADA DE SULFUROS DE COBRE DE BAJA LEY

**Jorge Ipinza Abarca, Dr. Sc.**

**Ingeniero Civil Metalúrgico**

Gerente de Desarrollo y Nuevas Tecnologías

Foster Ingenieros Consultores ([jipinza@fostering.cl](mailto:jipinza@fostering.cl))

# CONTENIDOS

- 1 Introducción
- 2 Proyección extracción de cobre por especies mineralógicas
- 3 Lixiviación de minerales marginales de cobre
- 4 Lixiviación de estéril en botaderos
- 5 Métodos de adición de sal de cloruro
- 6 Preparación de salmuera ácida
- 7 Formación y envejecimiento de la natrojarosita
- 8 Rol del oxígeno en el reposo y lixiviación del mineral
- 9 Reacciones de Fenton
- 10 Conclusiones

## MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

2012 Abre una alternativa para la lixiviación de sulfuros de cobre secundario bajo condiciones mejoradas frente a la biolixiviación.

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

2020 Abre la posibilidad de integración entre planta concentradora y planta hidrometalúrgica con un objetivo de negocio sostenible.

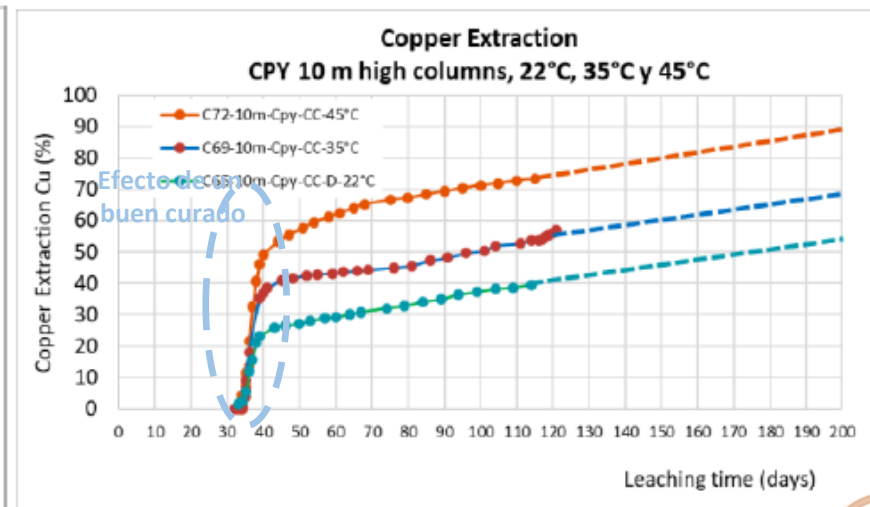
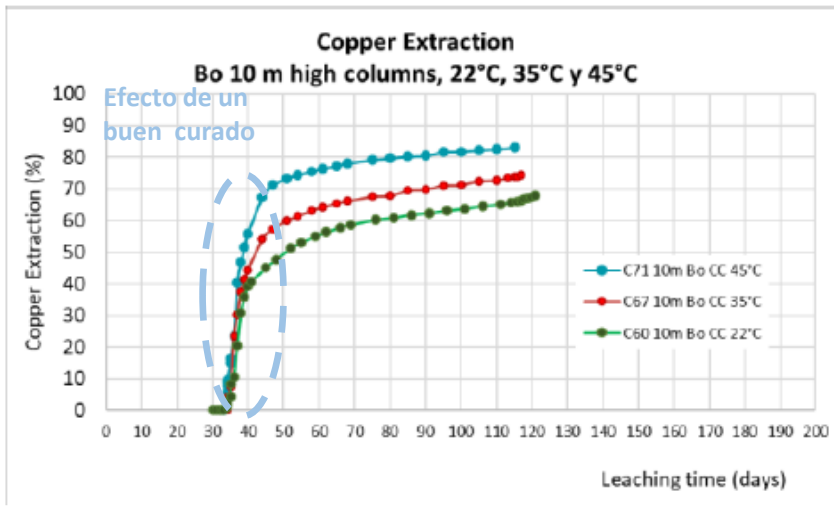


# Proyección de extracción de Cu por especies (Lixiviación en Pilas)

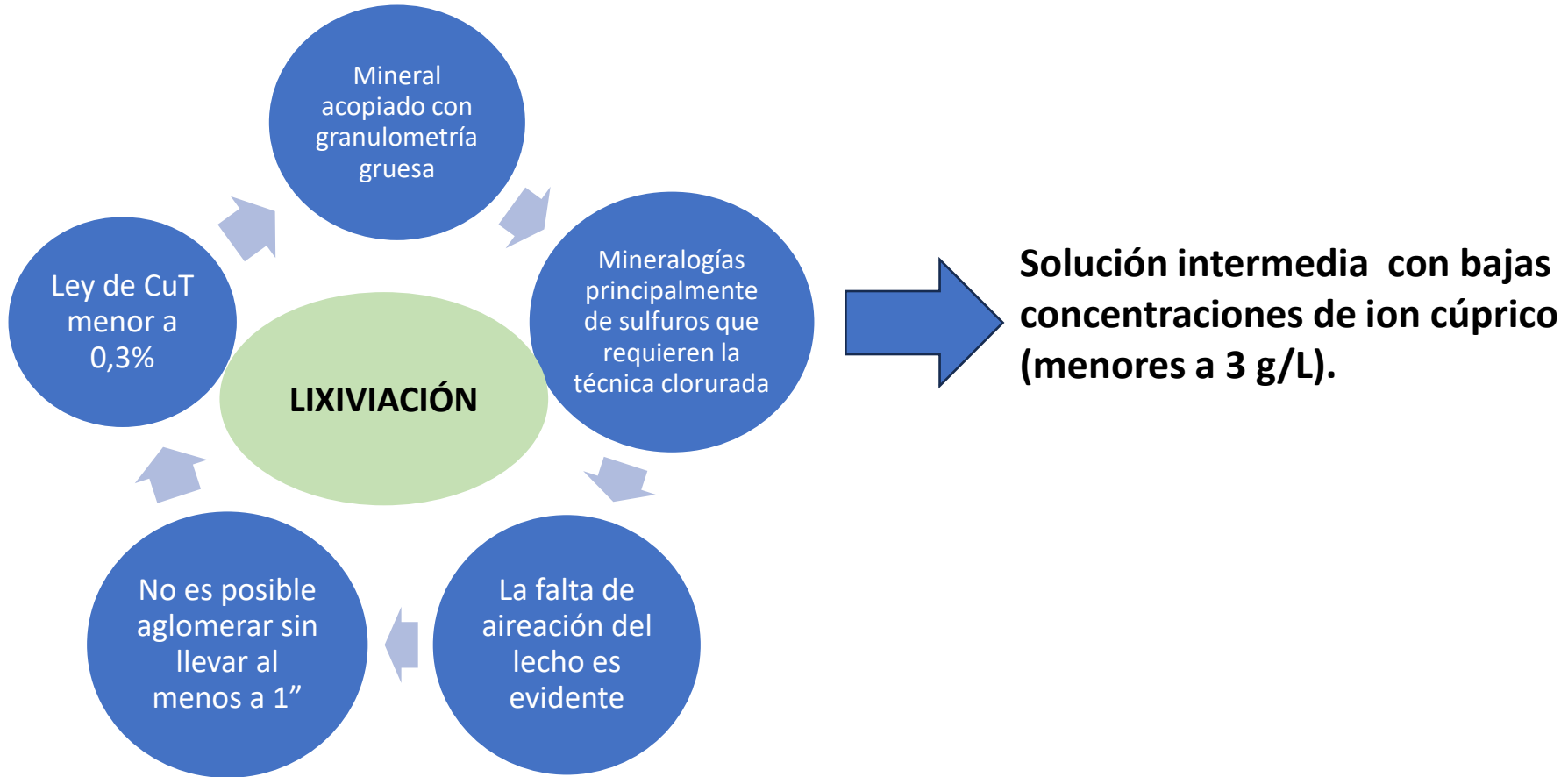
## Consideraciones:

- ✓ Promedios estimados a partir de resultados de pilotajes de los proyectos y operaciones en curso de terceros (Spence, Cerro Colorado, Amalia, Codelco, entre otros).
- ✓ Basados en resultados de lixiviación en columnas de 10 m de altura, aireadas y con mantas calefactoras (Codelco-DRT).
- ✓ 70% del consumo estándar de ácido sulfúrico del mineral usado en el pretratamiento químico (Mineras operando).
- ✓ Ley de CuT entre 0,3 y 0,5% (sulfuros de baja ley) consideran la técnica clorurada.

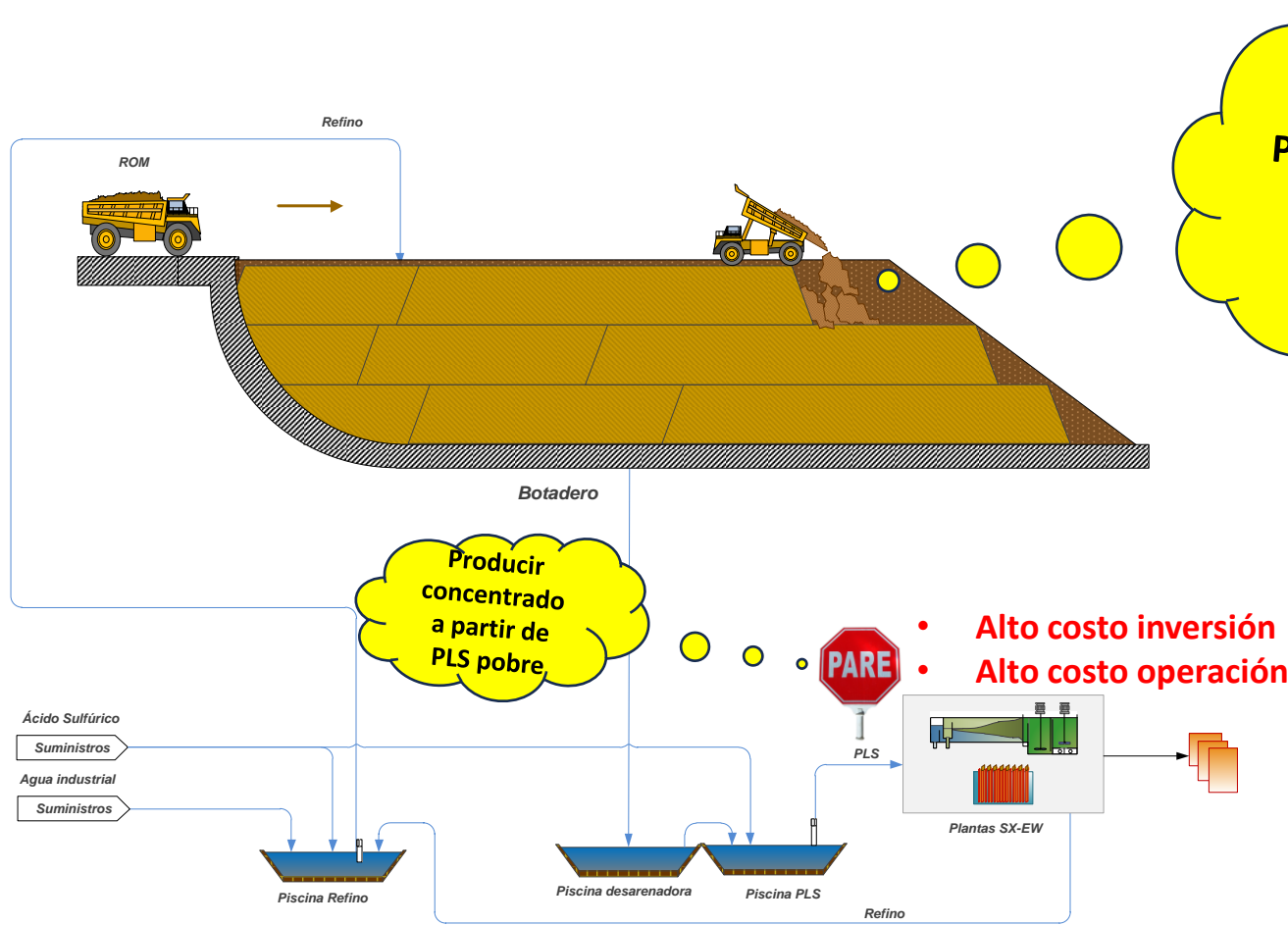
Especie	Extracción (%)			Reposo (d)	Ciclo (d)
	22 °C	35 °C	45 °C		
$\text{CuFeS}_2$	48	68	87	30	200
$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	68	72	85	30	130
$\text{Cu}_2\text{S}$	85	90	94	15	120
$\text{CuS}$	80	87	90	15	120
$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	10	25	35	30	250



# LIXIVIACIÓN DE MINERALES MARGINALES DE COBRE



# Lixiviación de estéril en botadero



Pre trituración a 2" o 4"

Producir concentrado a partir de PLS pobre



- Alto costo inversión
- Alto costo operación

Faena	Procesamiento (kt/d)
OXE ROM	27
Lomas Bayas	60
Mantos blancos	28
Mantoverde	17
Quebrada Blanca	22
Caserones	30 – 50

Referencia: Caserones



# Lixiviación de estéril en botaderos



**Botadero Minera Caserones**



**Botadero Quebrada Blanca**

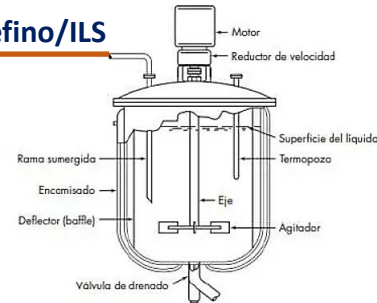
**OXIMETAL PROCESS**  
Pilotaje Industrial (Chile)

**CONLIX SOLUTION**  
Estudio experimental (Goldfields Perú)

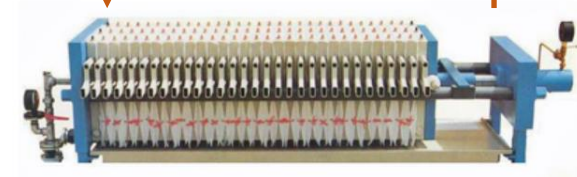


Solución refino/ILS

Solución refino/ILS



Pulpa de  $\text{Cu}_2\text{S-CuS}$



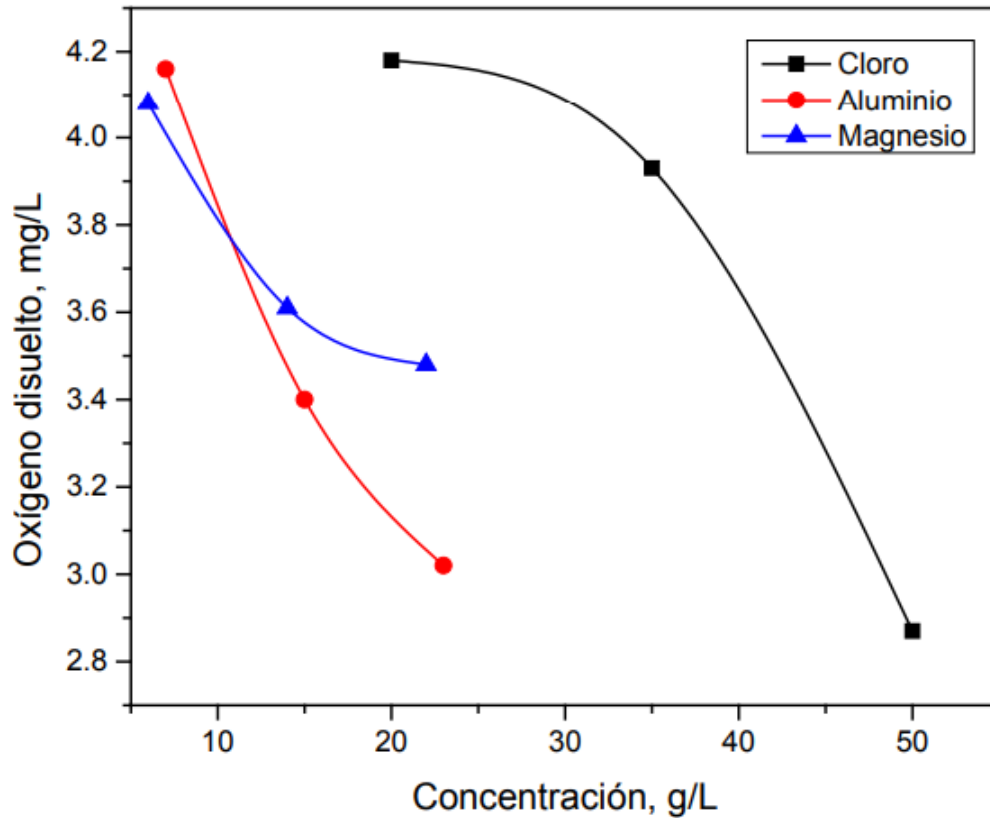
Concentrado de Cu  
( $\text{Cu}_2\text{S} - \text{CuS}$ )

Alternativas para el  
tratamiento de  
soluciones de baja  
concentración en  
 $\text{Cu}^{2+}$

Planta existente  
Hidrometalúrgica

Cátodos de Cu

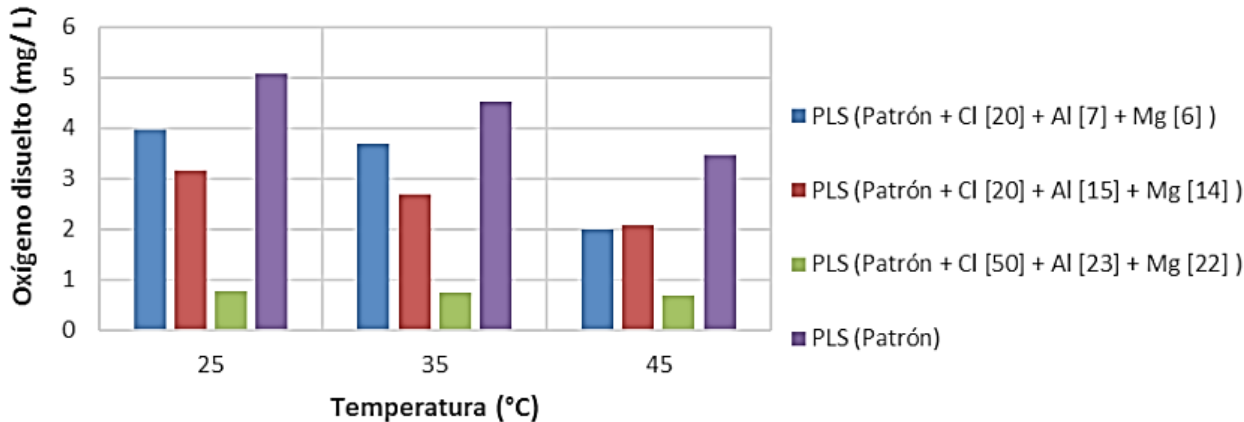
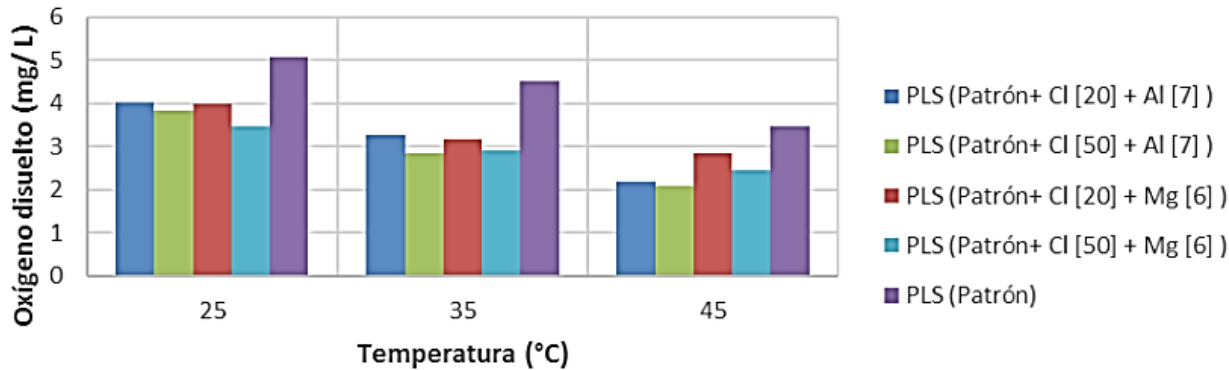




**OXIMETAL PROCESS** permite aumentar el oxígeno disuelto aún bajo condiciones extremas de viscosidad. Inhibición de la formación de natrojarositas.

El incremento del del Al, Mg y Cl, producen un aumento significativo de la viscosidad mostrando una conducta inversa a la concentración de OD.

Efecto del cloro, aluminio y magnesio en la concentración de oxígeno disuelto en el PLS a 25 °C. **Navarro P., Vargas C., Ramírez C. (2016). Efecto de las Impurezas en las Propiedades Físicoquímicas de una Solución de Lixiviación de Minerales de Cobre. Fac. Ing., vol. 25 (41), pp. 75-84.**

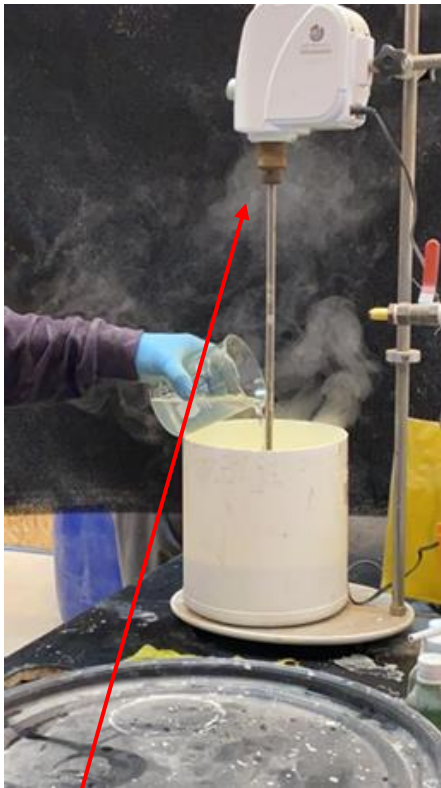


Efecto del cloro, aluminio y magnesio en la concentración de oxígeno disuelto en el PLS bajo diferentes temperaturas.

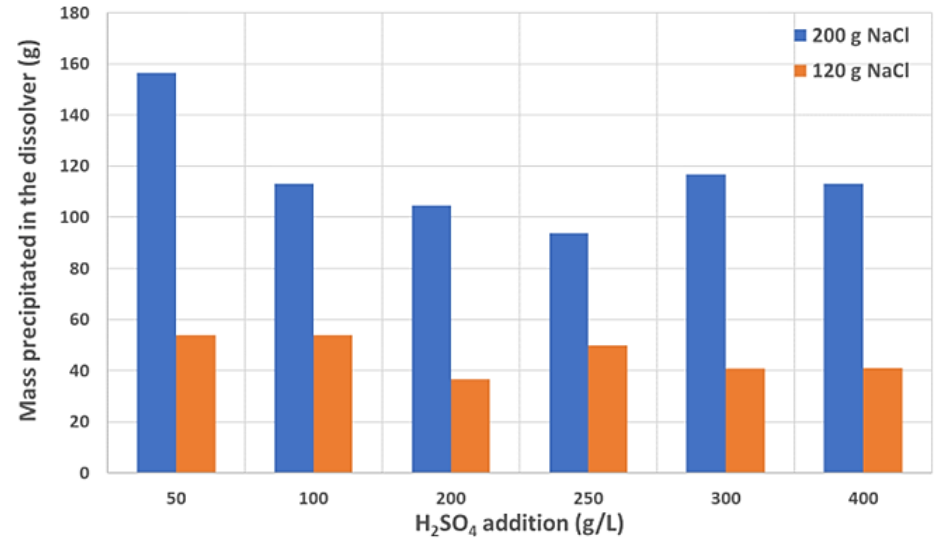
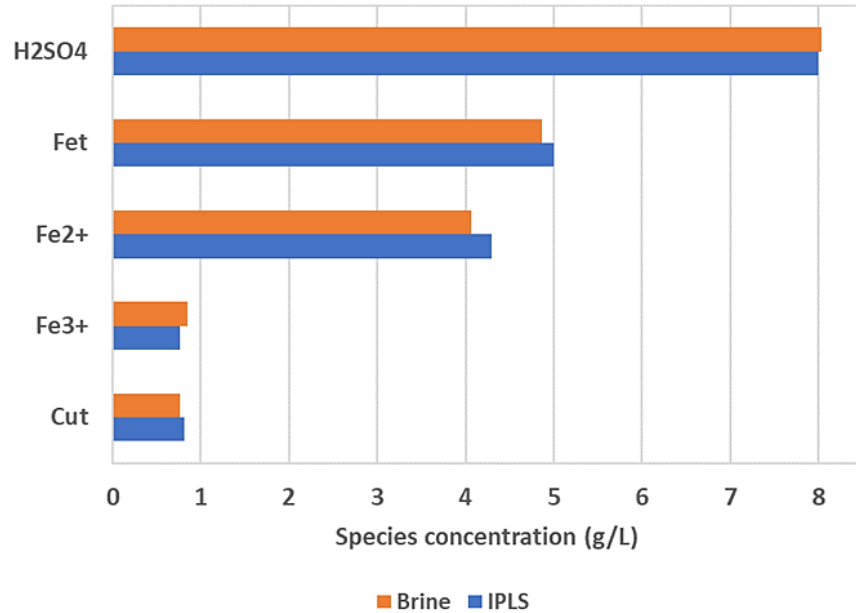
**Navarro P., Vargas C., Ramírez C. (2016).** Efecto de las Impurezas en las Propiedades Físicoquímicas de una Solución de Lixiviación de Minerales de Cobre. *Fac. Ing., vol. 25 (41), pp. 75-84.*

**OXIMETAL PROCESS** a través de su componente químico estabilizador de oxígeno revierte esta situación desfavorable para la lixiviación agitada o en pilas de minerales de Cu, Au/Ag, entre otros.

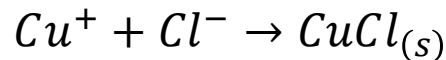
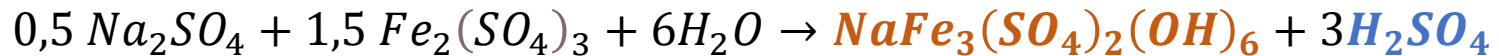
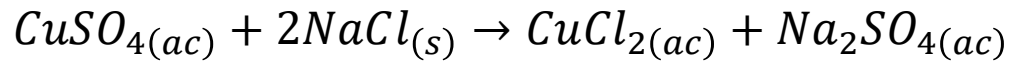
# Preparación de salmuera ácida



HCl gas



Precipitación durante la formación de salmueras con diferentes concentraciones de ácido sulfúrico usando una solución IPLS a temperatura ambiente.





# Formación y envejecimiento de la natrojarosita

S: solubilidad del sulfato de sodio en la salmuera

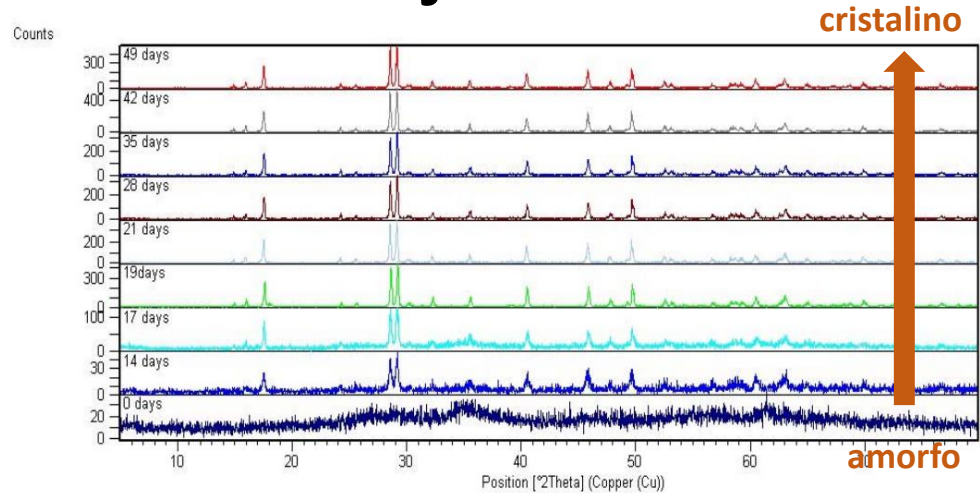
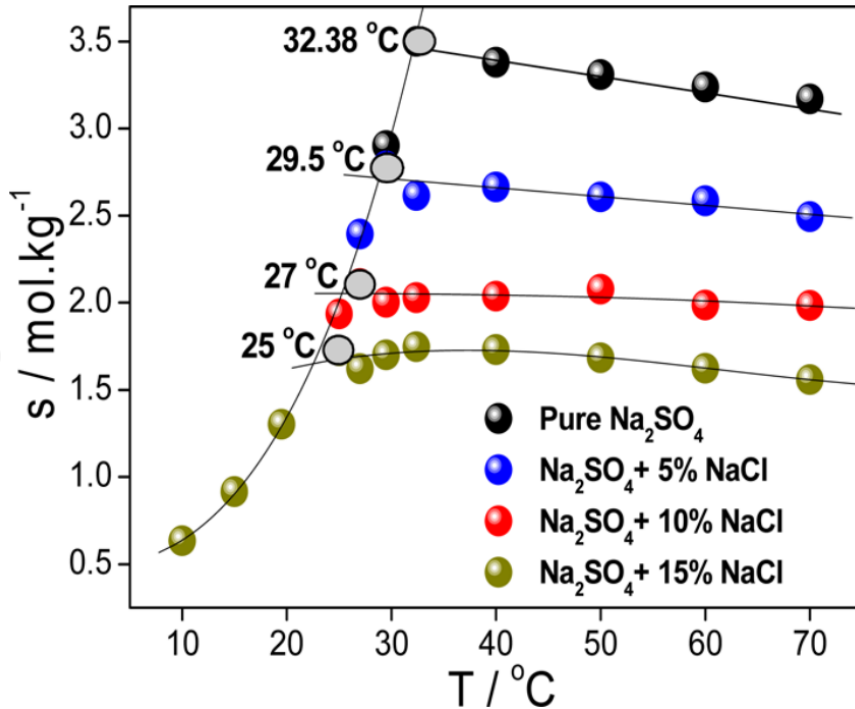
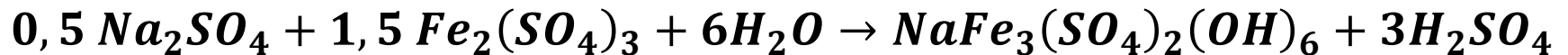
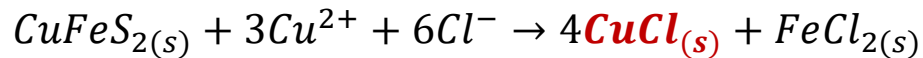
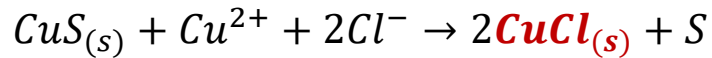
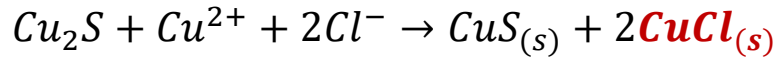


Diagrama de DRX de los precipitados obtenidos durante el proceso de envejecimiento 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 25 °C.

Hernández A. (2011). Conducta de cristalización de minerales del grupo de la jarosita. Tesis de Master de Geotecnia y Recursos Geológicos, Universidad de Oviedo, España.



# Rol del oxígeno en el reposo y lixiviación del mineral



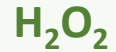
Control de OD



Incrementar entre  
30 -50 ppm

Fenton

Oximetal  
Process



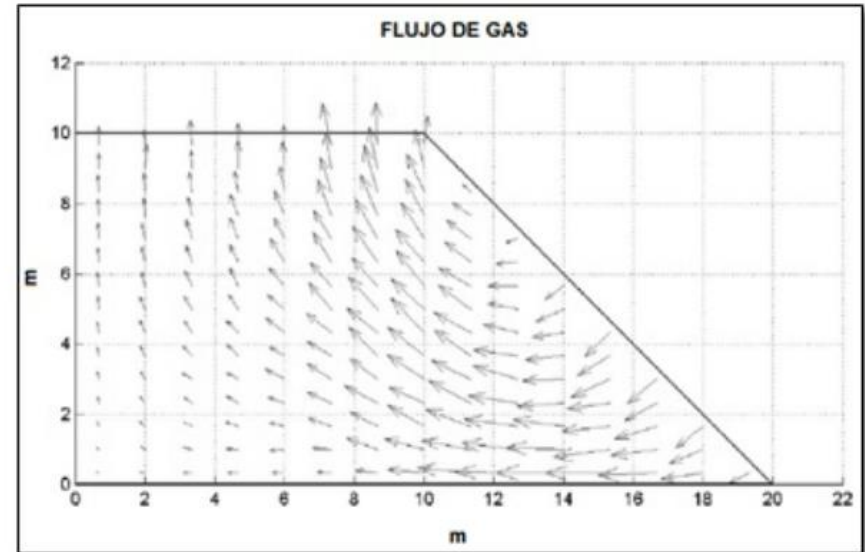
Estabilizador  
de oxígeno

Solubilidad del oxígeno a 20 °C, 1 atm (ppm)	
Agua dulce	9,14
Agua de mar	7,50
Solución intermedia	6,70



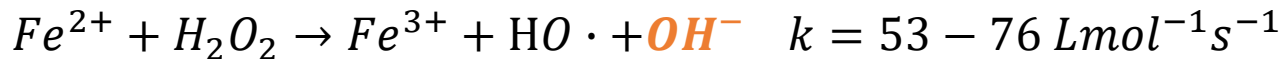
## Distribución del O<sub>2</sub> en el lecho de mineral

- Es necesario suministrar a la pila una adecuada aireación, ya que la lixiviación de sulfuros requiere la presencia de agentes oxidantes, tales como el oxígeno.
- Esto se logra por medio de tuberías plásticas perforadas, colocadas aproximadamente 1 m sobre la base de la pila e introduciendo aire por medio de aireadores a baja presión (blower).
- Para pilas de gran tamaño, no es posible utilizar sopladores, por lo que se espera que el aire movido por la convección natural proporcione el oxígeno necesario (Davenport, Schlesinger, King, & Sole, 2011).

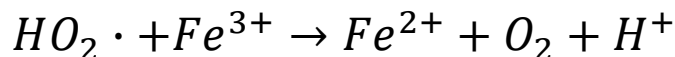
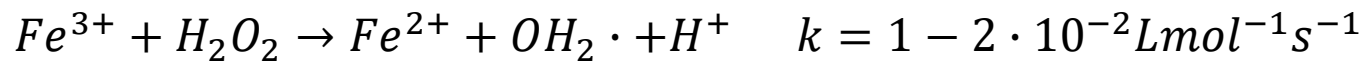


# Reacciones de Fenton

- El mecanismo involucrado en la descomposición oxidativa de minerales sulfurados es un proceso electroquímico complejo. Sin embargo, las investigaciones previas coinciden en la participación de especies intermediarias características de estos procesos, tales como el  $H_2O_2$ , los radicales libres  $S^{\cdot-}$ ,  $SO_2^{\cdot-}$ ,  $HO\cdot$ , que promueven la descomposición del mineral y la consecuente lixiviación de los metales.
- La reacción de Fenton clásica establece que la descomposición del  $H_2O_2$  catalizada por Fe(II) o por Cu(I), promueve la creación de los radicales hidroxilo  $HO\cdot$  altamente oxidantes.
- Simultáneamente, el Fe(III) resultante puede reaccionar con el anión superóxido, regenerando el Fe(II) que mantiene el proceso.



cinética rápida  
reacción exotérmica



cinética lenta

- Este mecanismo propuesto para  $FeS_2$ , también aplica para  $CuFeS_2$ ,  $PbS$ ,  $ZnS$  y  $FeAsS$ , entre otros.

# Conclusiones

- Los resultados experimentales muestran que la adición controlada de este reactivo oxidante llamado **Oximetal Process**, en el rango de 150 a 400 ppm, permite un incremento de 10 a 15 puntos porcentuales en la extracción de oro.
- Un incremento similar se puede lograr en la extracción de cobre, evitando con esto, la necesidad del uso de sopladores en la lixiviación clorurada en pilas y abre una posibilidad para el tratamiento de botaderos de estéril.
- Las soluciones de botaderos de estéril se pueden precipitar selectivamente para su mezcla con el concentrado de cobre, evitando la necesidad de SX-EW.
- En ambos casos, se logra un incremento de la solubilidad del oxígeno en la solución de riego desde cerca de 30 ppm hasta 50 ppm.
- La temperatura juega un rol relevante en la lixiviación clorurada de la calcopirita y dependiente del OD en la solución de riego.
- La formación de salmuera ácida puede inducir la formación de natrojarositas que afectan la concentración de hierro férrico, disminuyendo la extracción de cobre desde el mineral de sulfuro.

# ANÁLISIS DE LAS VARIABLES FUNDAMENTALES EN LA LIXIVIACIÓN CLORURADA DE SULFUROS DE COBRE DE BAJA LEY

**Jorge Ipinza Abarca, Dr. Sc.**

**Ingeniero Civil Metalúrgico**

Gerente de Desarrollo y Nuevas Tecnologías

Foster Ingenieros Consultores ([jipinza@fostering.cl](mailto:jipinza@fostering.cl))