



COBRE 2023

I CONFERENCIA MUNDIAL DEL COBRE + EXPO

Casos Industriales en la Aplicación del Pretratamiento Químico en la Lixiviación de Minerales Sulfurados de Cobre en Medio $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$

- **Autores:** Jorge Ipinza¹, Juan Carlos Flaquer
- **Empresa:** Sociedad Punta de Lobos S.A.

(1) Gerente de Desarrollo y Nuevas Tecnologías, Foster Ingenieros Consultores, jipinza@fostering.cl, cel. +56 9 98888530

(2) Head of Mining & Chemical Bulk • Mining & Chemical Bulk, jflaquer@spl.cl, cel. +56 9 94890975



SOCIEDAD PUNTA DE LOBOS S.A.



TEMARIO

- Antecedentes de la lixiviación clorurada
- Objetivos de la presentación
- Resultados del análisis de la información
- Conclusiones
- Recomendaciones

ANTECEDENTES

SOCIEDAD PUNTA DE LOBOS S.A. - CHILE



- **Sociedad Punta de Lobos S.A. (SPL)** forma parte del grupo **Stone Canyon Industries Holdings**.
- **SPL** explota un depósito de alta pureza de NaCl a cielo abierto, en el Salar Grande de Tarapacá en el norte de Chile.
- Es uno de los mayores productores y comercializadores de NaCl en el mundo.
- Divisiones en Chile – Brasil – Perú
Bahamas – Estados Unidos – Canadá.

SOCIEDAD PUNTA DE LOBOS S.A. - CHILE

- **SPL** explota dos minas; Kainita y Lobera, ubicadas en el Salar Grande de Tarapacá, Región de Tarapacá, Chile.
- Actualmente extrae más de 10 millones de toneladas por año.
- La mina se encuentra a 27 km del puerto de carga propio.



SOCIEDAD PUNTA DE LOBOS S.A. EN LA MINERÍA DEL COBRE

Desarrollando tecnología para la minería mundial

- En 2019 SPL junto a la Universidad Técnica Federico Santa María desarrollaron una patente de un **Reactor de Mezcla Trifásica (RMT®)**. Sus pruebas a escala piloto, se llevaron a cabo en Minera Amalia Catemu (Cemin Holding Minero-Chile).
- **SPL** además de ofrecer un producto de buena calidad y un respaldo en logística, presta consultorías especializadas, previo y durante el proceso de lixiviación clorurada junto a su equipo de asesores expertos.



OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar el estado del arte de la lixiviación clorurada en Chile y otros países.

Objetivo específicos

Presentar la secuencia histórica de la investigación de la lixiviación clorurada

Mostrar la situación actual de las operaciones y nuevos proyectos.

Plantear los mecanismos físico y químicos involucrados en las diferentes etapas del proceso

RESULTADOS

OPERACIONES DE LIXIVIACIÓN CLORURADA EN CHILE Y OTROS PAÍSES

Período de estudios científicos de la lixiviación clorurada de minerales de cobre (1960-2000)

Minera Michilla
(Chile, 1998)

Minera Pampa Cobre
Unidad Minera Chapi
(Perú, 2010-2012)

Desarrollo de Patentes
Internacionales

BHP
(Australia, 2014)
(Chile, 2017)

AMSA
(Chile, 2018)

Nombre empresa	Año inicio Clorurada	Capacidad de tratamiento (ktpd)	Tipo de mezclado	Consumo de ácido (kg/t)	Tipo sal	Insumos críticos curado (kg/t)			Humedad aglomerado (%) b.s.	Tiempo reposo (d)	Tasa de riego (L/h/m ²)	Ciclo de lixiviación (d)	Extracción de Cu Proyecto (%)	Extracción de cobre actual (%)	Secuencia riego
						Sal	Refino [ILS]	H ₂ SO ₄							
Minera Cerro Colorado	2015	60	Aglomerador	20	NaCl	7	60	20	9,5	15	12	150	87	85	Refino
Minera Spence	2011	60	Aglomerador	10	NaCl	15	50	10	9	15	10	270	85	82	Refino (90)-ILS (90)-Refino
Minera Zaldivar	2019	60	Disolvedor	22	NaCl y CaCl ₂	12 y 0,1	[50]	18	8	14	9	220	85	65	ILS (30)-Refino
Minera Tres Valles	2014	2	Aglomerador	25	NaCl	21	40	10	8,5	20	10	130	70	80	Refino
Minera Amalia Catemu	2015	0,5	Aglomerador	19	NaCl y CaCl ₂	12 y 5	65	30	8,6	15	12	90	80	85	Refino

SPL

SOCIEDAD PUNTA DE LOBOS S.A.

Minerales secundarios o mixtos de sulfuros con dominio de secundarios

 **InterMet**

PROYECTOS DE LIXIVIACIÓN CLORURADA EN CHILE

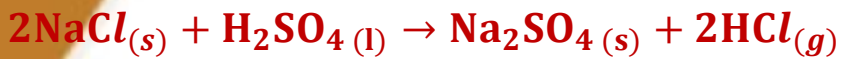
- Resultados exitosos de pilotajes de lixiviación clorurada de sulfuros de cobre primario (CuFeS_2 , Cu_5FeS_4).
- Agotamiento de los sulfuros secundarios (Cu_2S y CuS) motiva a las empresas a explorar esta nueva técnica de lixiviación.
- Agotamiento de los óxidos de cobre promueve estudios de trade off de biolixiviación versus lixiviación clorurada y de uso de salmuera versus sal sólida.
- Hasta ahora resultados de extracción bajos en su aplicación a minerales de enargita (Cu_3AsS_4) y similares.

Proyectos	Año	Capacidad (ktpd)	Mineralización	Temperatura (°C)	Nivel de ingeniería	Cl en refino (g/L)	Insumos críticos curado (kg/t)			Humedad glómeros b.s.(%)	Altura pila (m)	Tasa de riego (L/h m ²)	Forma de riego	Aire (Nm ³ /h m ²)	Consumo ácido (kg/t)	Reposo (d)	Ciclo (d)	Extracción Cu (%)
							Sal	refino	H ₂ SO ₄									
Collahuasi	2030	35	Sulfuros secundarios	ambiente	FEL 2	90	15	50	5	8	8	6	refino(76 d)/ILS(107 d)	0,26	12	30	300	80
Codelco-DRT temprano	2013	62	Sulfuros secundarios	ambiente	FEL 3	90												
Codelco-DRT Futuro	2025	120	Sulfuros primarios	40	FEL 3	90												
Mínera Escondida	2024	150	Sulfuros secundarios	ambiente	FEL 2	90												
Mínera Biocobre	2013	1,7	Sulfuros secundarios	ambiente	Conceptual	90												
Pelambres	2035	40	Sulfuros secundarios	20	Perfil	90												
Lomas Bayas	2024	180	Sulfuros secundarios	ambiente	Conceptual	90												
Franke	2023		Sulfuros secundarios	ambiente	Conceptual	90												
Los Bronces					Conceptual													
Spence (Full Sal Optimizado)	2024	70	Sulfuros primarios	45	Operación	70 - 90	12	50	12 a 22	7 a 9	8	4,5	12 h riego/12 h reposo	0,47	45	475	85	
El Abra	2029	115	Sulfuros mixtos	ambiente	Conceptual													

Con etapa experimental en desarrollo

ETAPAS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CLORURADA

1 PRETRATAMIENTO QUÍMICO



1
Tambor aglomerador + scrubbers

gases ácidos
aire limpio
agua ácida

2
Prototipo RMT: Unifica los principios de aglomeración, curado y recirculación de los gases

3
Prototipo correa: Cierre parcial de correa transportadora + scrubbers

Prototipo de correa transportadora
Instrumento de medida de HCl gas

Reacción	ΔG° (kJmol ⁻¹)
$\text{CuFeS}_2 + 3 \text{Cu}^{2+} + 6 \text{Cl}^- = 4 \text{CuCl} + \text{FeCl}_2 + 2 \text{S}$	-73.4
$\text{CuFeS}_2 + 3 \text{CuCl}^+ + 3 \text{Cl}^- = 4 \text{CuCl} + \text{FeCl}_2 + 2 \text{S}$	-65.3

3 LIXIVIACIÓN EN PILAS



2 REPOSO DEL MINERAL AGLOMERADO/CURADO



CALIDAD QUÍMICA DEL PRODUCTO NaCl

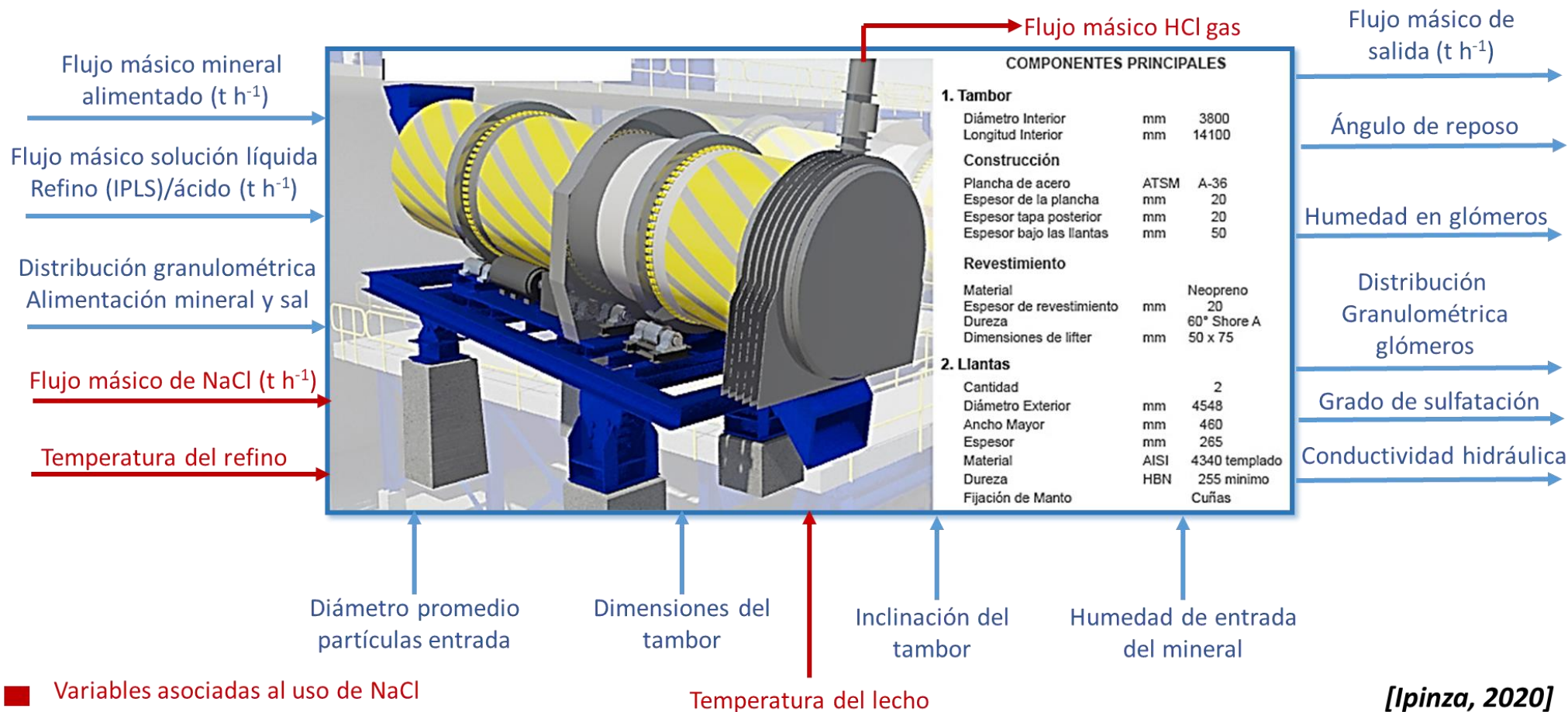
Sal LIXIVIACIÓN, NOC 001-H

Determinación	Unidad	Especificación		Típico
Cloruro de Sodio (c/ NaCl)	(%)	97.0	Min	98.90
Calcio (c/ Ca ²⁺)	(%)	< 0.05	Max	0.032
Magnesio (c/Mg ²⁺)	(%)	< 0.01	Max	0.004
Mercurio (c/ Hg)	(mg/kg)	< 0.1	Max	< 0.04
Arsénico (c/ As)	(mg/kg)	< 0.2	Max	< 0.2
Cadmio (c/Cd)	(mg/kg)	< 0.1	Min	< 0.1
Cobre (c/ Cu)	(mg/kg)	< 0.1	Max	< 0.1
Plomo (c/ Pb)	(mg/kg)	< 0.2	Max	< 0.2
Hierro (c/ Fe)	(mg/kg)	< 0.1	Max	< 0.08
Aluminio (c/Al)	(mg/kg)	< 0.1	Max	< 0.1
YPS	(mg/kg)	70 - 100		—
Humedad	(%)	0.4	Max	0.1

Buscar mínimos de Mg y Al para controlar la viscosidad de la solución rica (PLS)



TAMBOR AGLOMERADOR VERSUS DISOLVEDOR



■ Variables asociadas al uso de NaCl

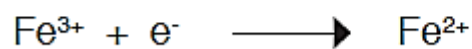
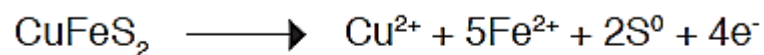
CICLO DE SEMINARIOS DIMM

Mayo 31 del 2021

[Ipinza, 2020]

REACCIONES DE DISOLUCIÓN DE SULFUROS DE COBRE

Nº	Equation	$\Delta G_{25\text{ }^\circ\text{C}}$ (kcal/mol)	$\Delta G_{50\text{ }^\circ\text{C}}$ (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)



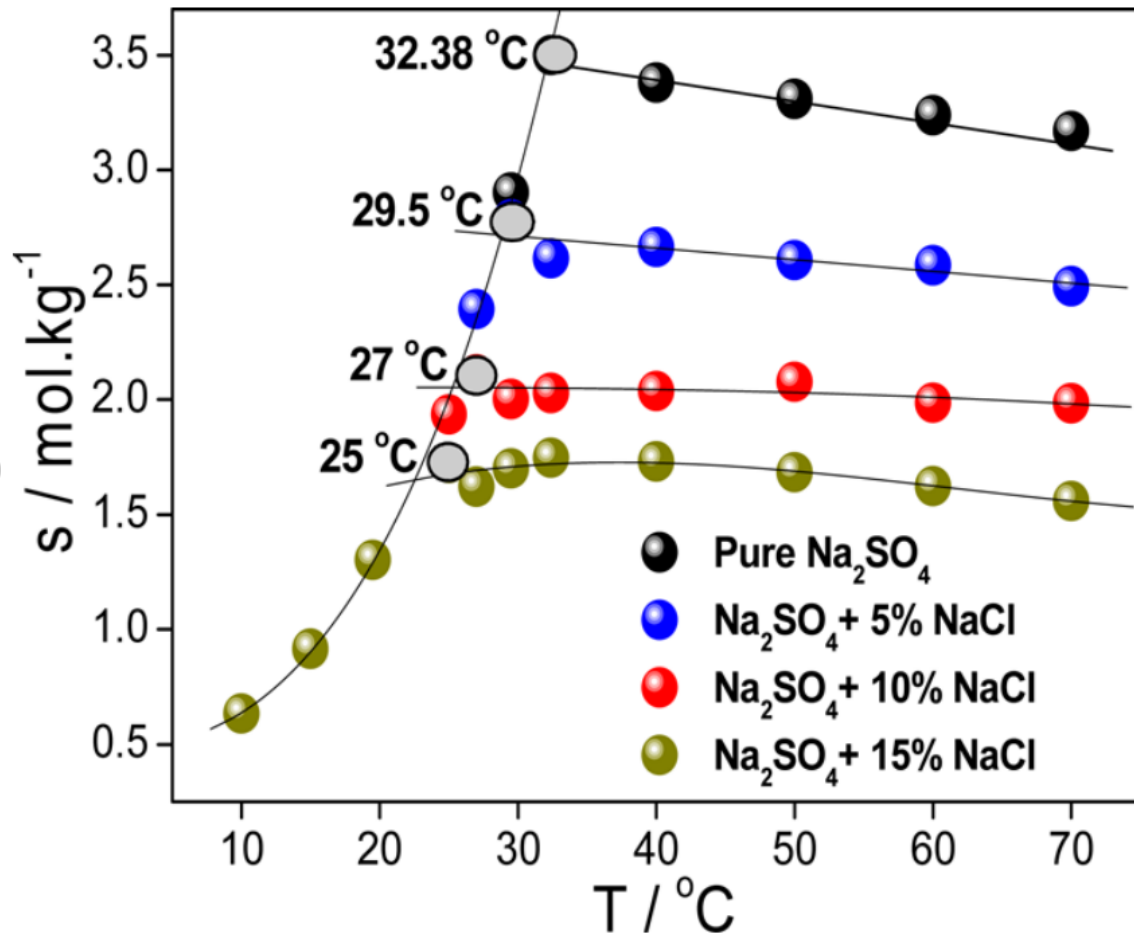
Como cloro-hierro se produce una disminución del potencial redox

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

FORMACIÓN DE PRECIPITADOS



S: solubilidad del sulfato de sodio en la salmuera



↑
Aumento de la [Cl⁻] aumenta la cantidad de coloide

↑
Formación de natrojarosita de sodio coloidal

Disminución de la concentración De Fe³⁺

Disminución de la extracción de Cu y de Fe.

Afecta las propiedades físicas del equilibrio solución-orgánico en SX

↑
Disminuye el pH



ENVEJECIMIENTO DE LA NATROJAROSITA

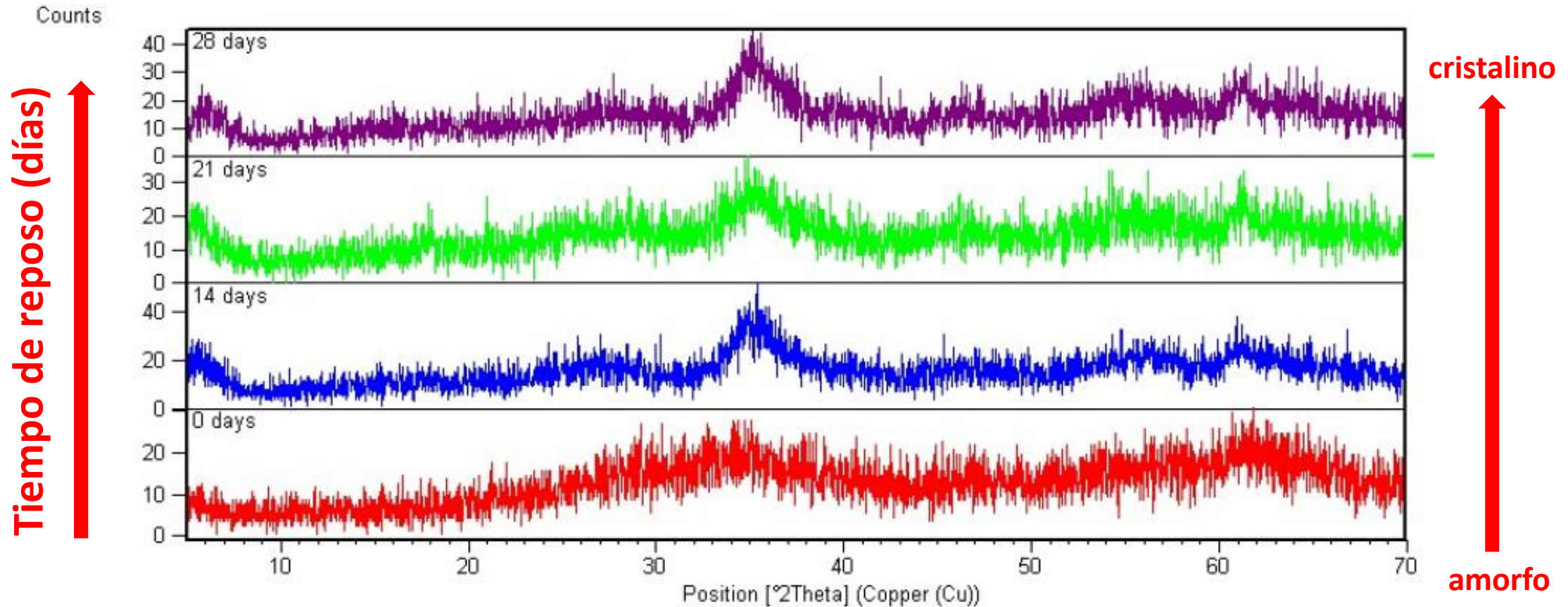


Diagrama de DRX de los precipitados obtenidos durante el proceso de envejecimiento 1 N H₂SO₄, 25 °C.

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.

RIPIO LIXIVIACIÓN CLORURADA CON SALMUERA PREPARADA CON IPLS (COLUMNAS DE LABORATORIO)

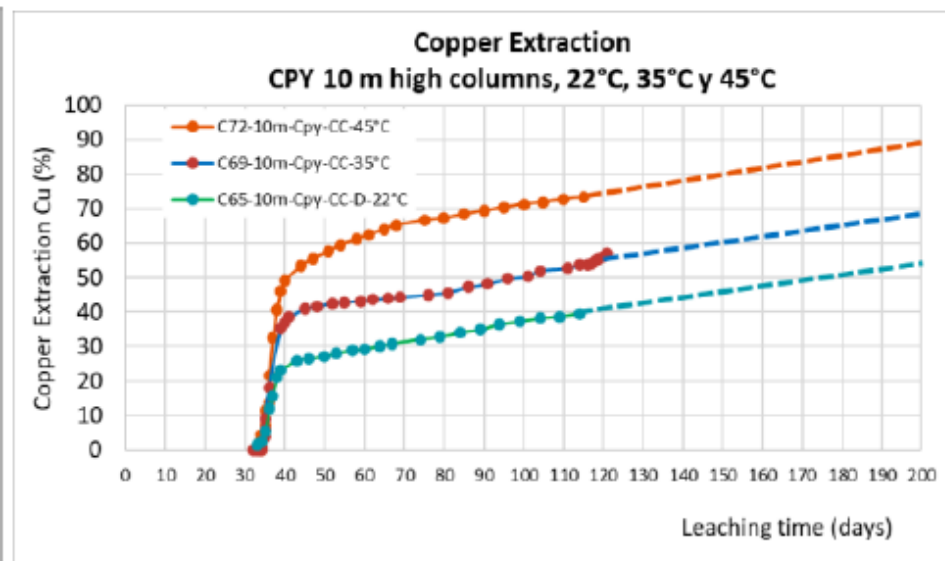
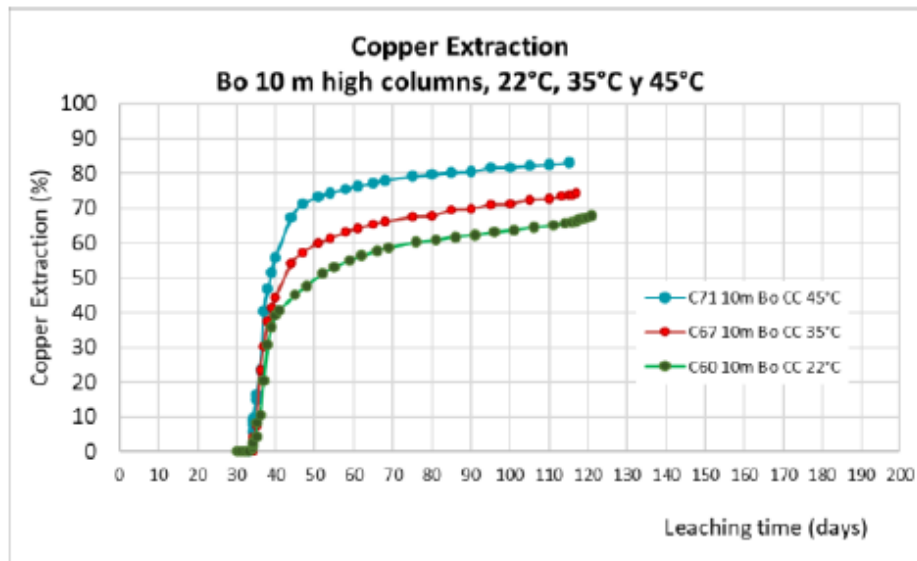


Precipitado de natrojarosita en aguas ácidas de Río Tinto.

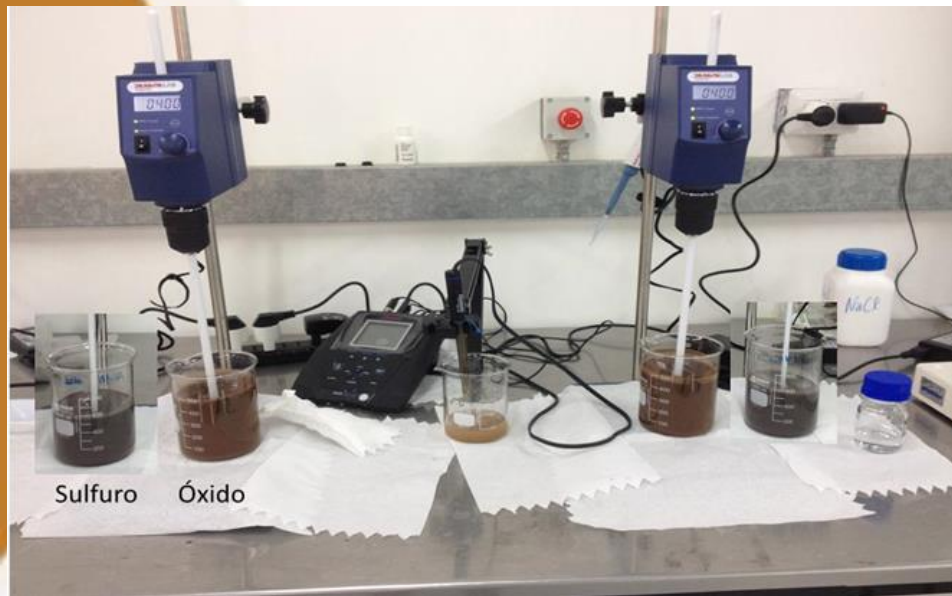
PROYECCIONES DE CINÉTICA DE EXTRACCIÓN DE COBRE PARA DIFERENTES ESPECIES MINERALÓGICAS

- Promedios estimados a partir de resultados de pilotajes de los proyectos y operaciones en curso.
- Basados en resultados de lixiviación en columnas de 10 m de altura.
- 70% del consumo estándar de ácido sulfúrico del mineral usado en el pretratamiento químico.
- Ley de CuT entre 0,3 y 0,5%.

Especie	Extracción (%)			Reposo (d)	Ciclo (d)
	22 °C	35 °C	45 °C		
CuFeS_2	48	68	87	30	200
Cu_5FeS_4	68	72	85	30	130
Cu_2S	85	90	94	15	120
CuS	80	87	90	15	120
Cu_3AsS_4	10	25	35	30	250

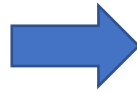


ESCALAMIENTO DE LA LIXIVIACIÓN CLORURADA EN PILAS/BOTADEROS



Aplicación del Test Emela® a las diferentes muestras o UG para estudios de variabilidad.

1



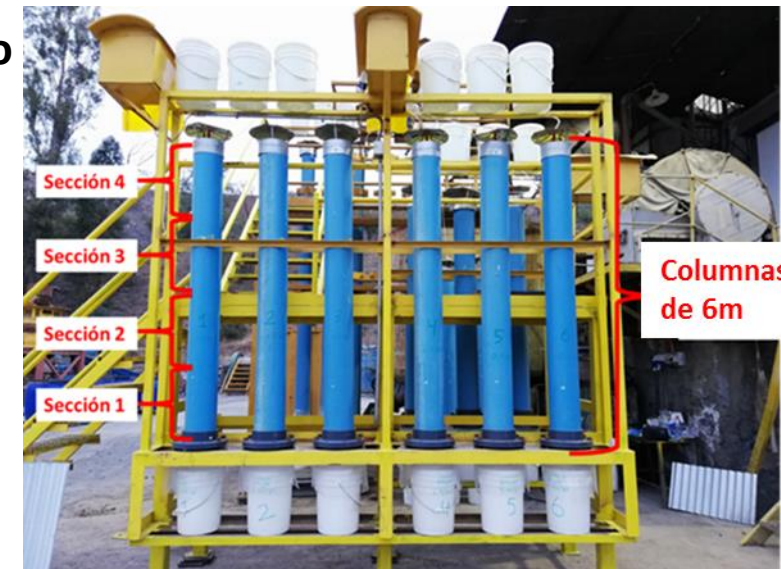
2



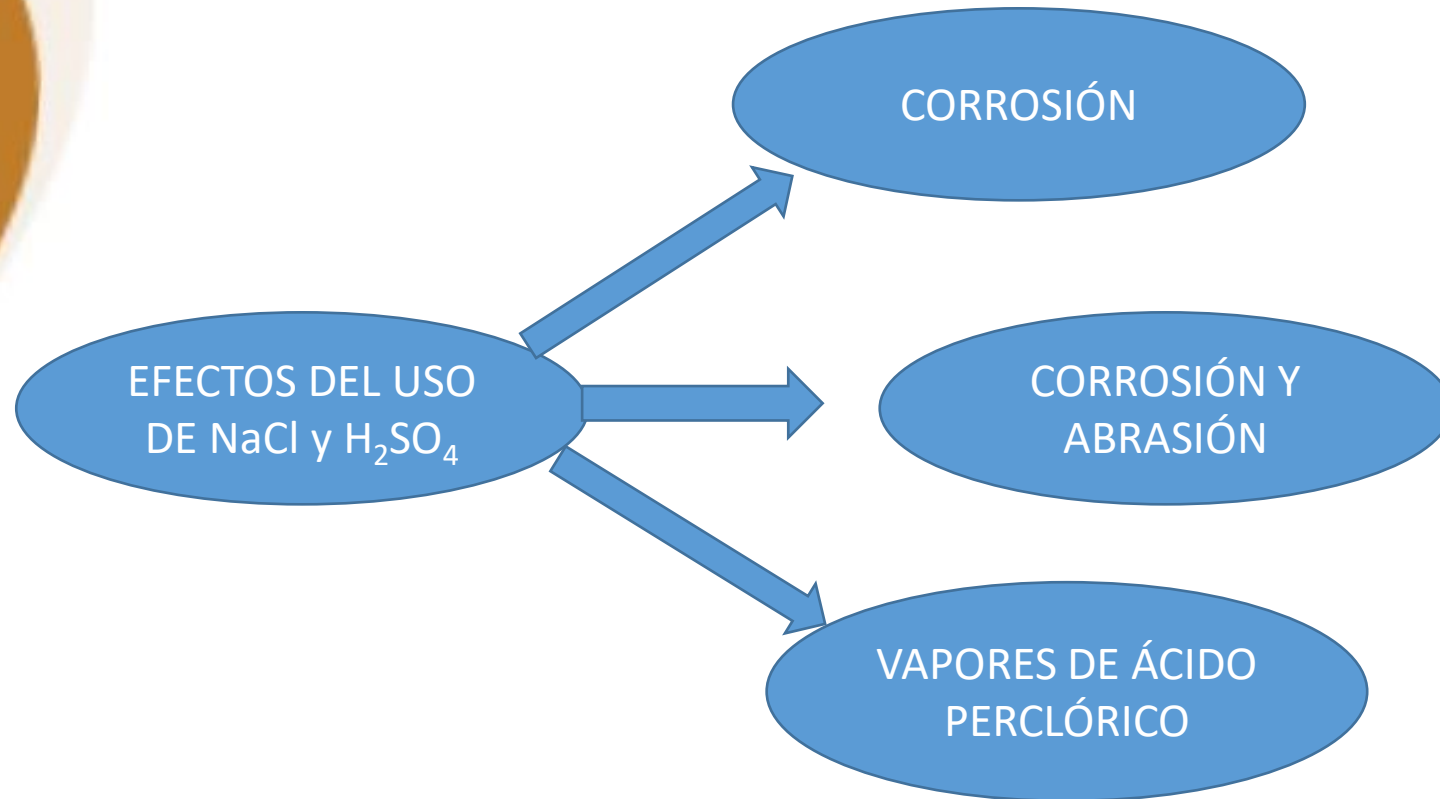
Usando los resultados de (1) evaluar granulometría y tasa de riego

3

Usando los resultados de (1) y (2) evaluar la altura óptima, aireación y programa de riego



LA MATERIALIDAD EN PLANTAS DE LIXIVIACIÓN CLORURADA



- Cambios de materialidad o recubrimientos de piezas
- Definición de esquemas de pintados en función de puntos críticos

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- **SPL** provee actualmente de NaCl de alta pureza con instalaciones en el Perú y Chile, con una disponibilidad del recurso mineral extremadamente alto y una alta calidad química requerida para la lixiviación clorurada, con un servicio de consultoría y asistencia técnica de pre y post venta.
- Las condiciones de lixiviación de las diferentes especies mineralógicas de cobre están bien identificada y con ello se ha estimado la extracción de cobre más probable de cada una de ellas, conociendo la ley secuencial de cobre en dicho mineral.
- Esto permite escalar a partir de una mineralogía dada la extracción de cobre teórica que se esperaría lograr en un cierto tiempo de lixiviación para un proyecto determinado.

CONCLUSIONES

- Lo anterior se debe factorizar teniendo en cuenta la composición de la ganga metálica y no metálica, así como las propiedades físicas del mineral a través de la conductividad hidráulica, determinante de mayor altura de pila de lixiviación o del tratamiento del botadero de ripios o estéril.
- Para disminuir el riesgo de un proyecto, se requieren ciertas etapas de escalamiento de la tecnología: i) un test EMELA[®] de laboratorio para encontrar la fórmula de reactivos inequívoca para el mineral o minerales en estudio, que define la dosis de NaCl, H₂SO₄ y el tiempo de reposo, es decir, define las principales condiciones del pretratamiento químico del mineral; ii) ensayo de laboratorio en columnas de 1,2 m para estudiar la tasa de riego, condición de riego/reposo y las soluciones de riego (refino, ILS, IPLS) y iii) lixiviación en columnas de planta piloto, para estudiar la altura de la pila, efectos de asentamiento y eventualmente reevaluar el sistema de riego y aireación.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

- El calentamiento de soluciones, ya sea en el pretratamiento químico o para el riego debe estudiarse considerando alternativas de energía no convencionales.
- El balance de energía de la pila de lixiviación considerando las condiciones climáticas de la ubicación de la faena minera resultan claves para el éxito del proyecto.
- La lixiviación de los sulfuros de cobre primarios requiere evaluar nuevas tecnologías de equipos y propuestas de investigación desafiantes para abordar minerales de baja ley para su tratamiento en los botaderos de estériles.



COBRE 2023

I CONFERENCIA MUNDIAL DEL COBRE + EXPO

Casos Industriales en la Aplicación del Pretratamiento Químico en la Lixiviación de Minerales Sulfurados de Cobre en Medio $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$

- **Autores:** Jorge Ipinza¹, Juan Carlos Flaquer
- **Empresa:** Sociedad Punta de Lobos S.A.

(1) Gerente de Desarrollo y Nuevas Tecnologías, Foster Ingenieros Consultores, jipinza@fostering.cl, cel. +56 9 98888530