



# Hidrometalurgia Moderna: Desafíos y Tecnología

Jorge M. Menacho, De Re Metallica Ingenieria SpA, [drm@drm.cl](mailto:drm@drm.cl)  
Presentación Minería Ética, Junio 19, 2020.

# Contenido



- Marco General
- Descripción Proceso Lixiviación Clorurada
- Patentes de Invención Relevantes
- Ingeniería de Procesos Lixiviación Clorurada
- Adopción de la Lixiviación Clorurada
- Comentario Final

# Introducción

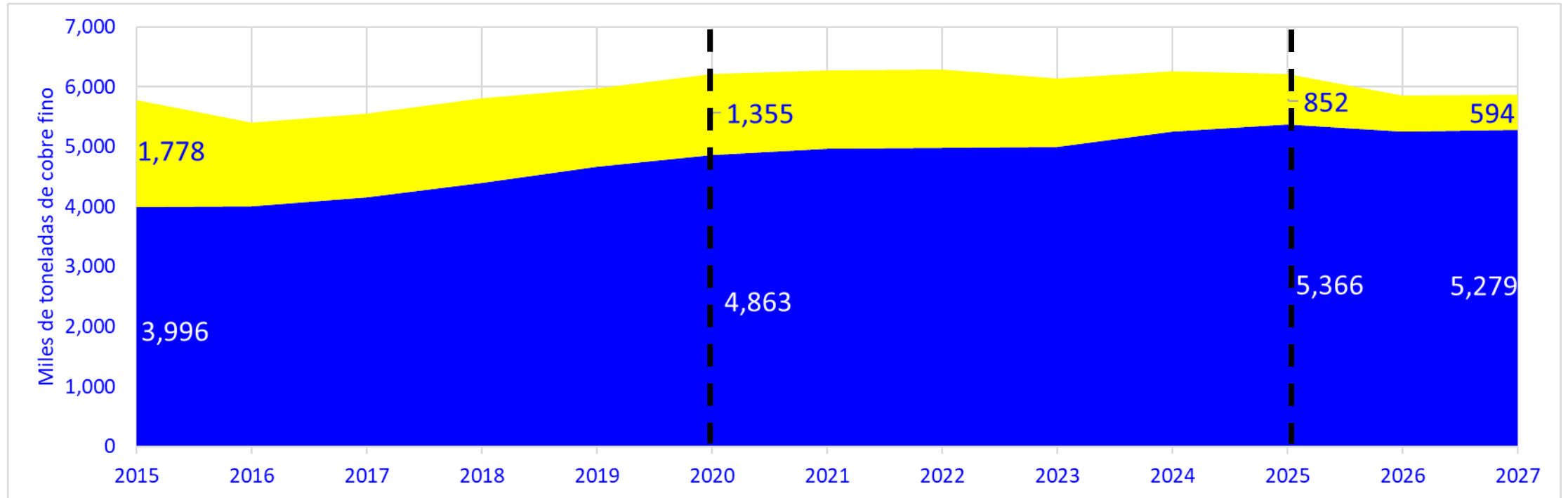


Los sulfuros de cobre son cada vez más abundantes, mientras los óxidos de cobre, son cada vez más escasos, pasando de 31% del cobre producido en el 2015 a solo 12% en el 2027.

El tratamiento tradicional que se les da a los sulfuros de cobre es el de flotación y pirometalurgia. Esta situación podría llevar a una sub-utilización de las instalaciones de hidrometalurgia, que representan el 38% de la capacidad instalada de procesamiento de minerales de cobre, lo que motiva a encontrar maneras de tratar sulfuros de cobre, para aprovechar las instalaciones existentes.

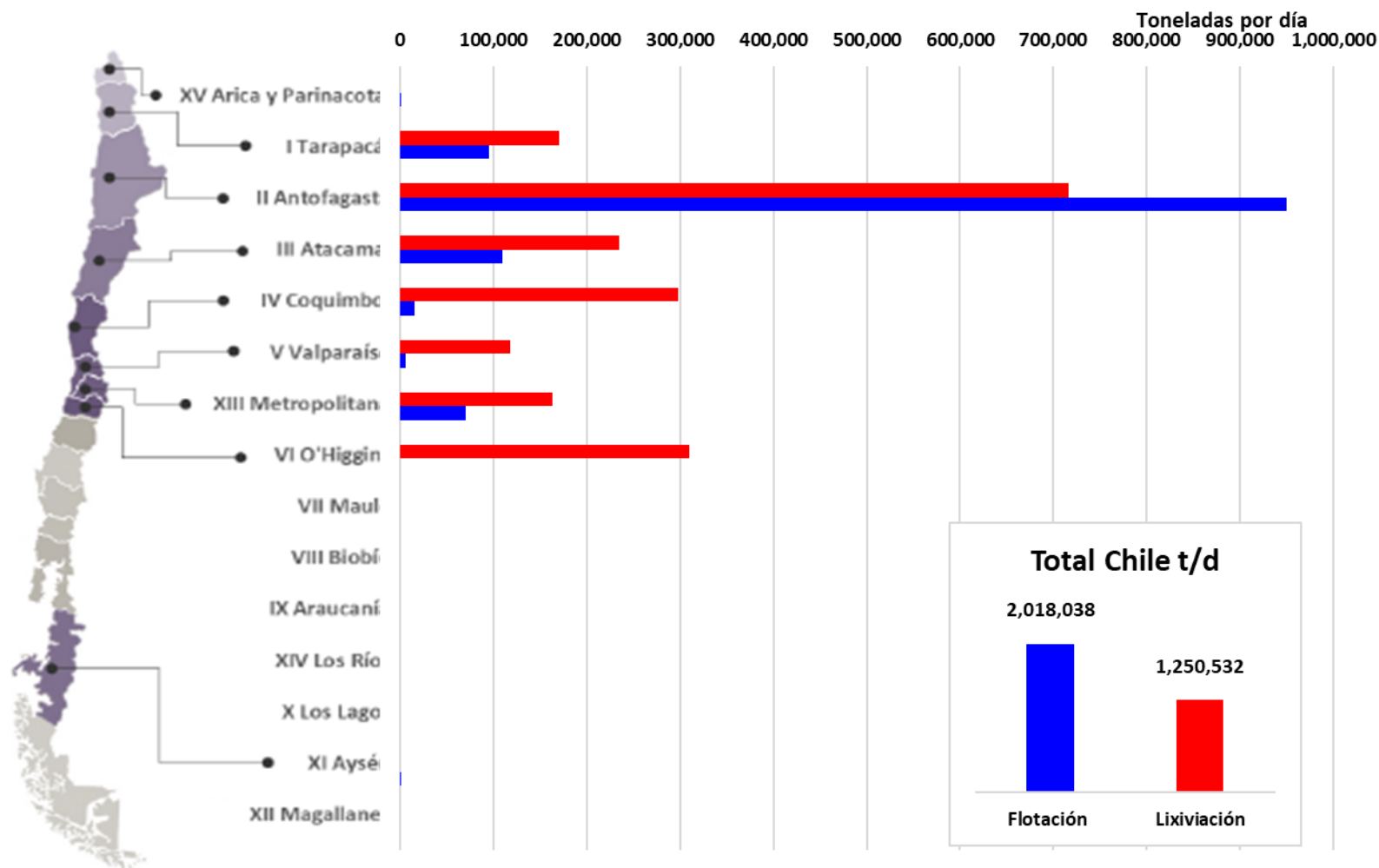
Por otro lado, la vía concentradora - piro tiene sus propias dificultades, como el alto consumo de energía, la generación de relaves de flotación, la generación de gases de  $\text{SO}_2$  y arsénico y difícil manejo de sub-productos.

# Producción de Cobre



*Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades, DEPP 17/2017, Cochilco, Registro Propiedad Intelectual N° 283439*

# Capacidad Instalada Flotación/Lixiviación



*Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades, DEPP 17/2017, Cochilco, Registro Propiedad Intelectual N° 283439*

# Hoja de Ruta 2.0: Alta Ley (2019)



- La energía es el insumo más relevante como costo, representa, según el precio de compra, entre el 25% y el 30% del total, siendo entre 80% y 90% de este costo de EW.
- El consumo de agua es relativamente bajo (0.11 m<sup>3</sup>/t mineral), en comparación con la molienda y flotación, con 0.45 m<sup>3</sup>/t mineral.
- Mejoras significativas de productividad podrían hacer rentable la explotación de recursos marginales no considerados como inventarios de recursos. El desarrollo de quiebres tecnológicos podría permitir la conversión de una cantidad de pasivos en activos.
- La hidrometalurgia es una vía factible para el tratamiento de concentrados de cobre, especialmente complejos. Existen instalaciones industriales que verifican tal posibilidad, pero normalmente asociadas a características particulares de un yacimiento.
- Hoy se reconoce que la hidrometalurgia de concentrados es una alternativa tecnológica de menor madurez que la piro, pero que sigue avanzando en su consolidación.
- El destino de residuos y la recuperación de otros elementos valiosos son temas de interés.

# Hoja de Ruta 2.0: Alta Ley (2019)

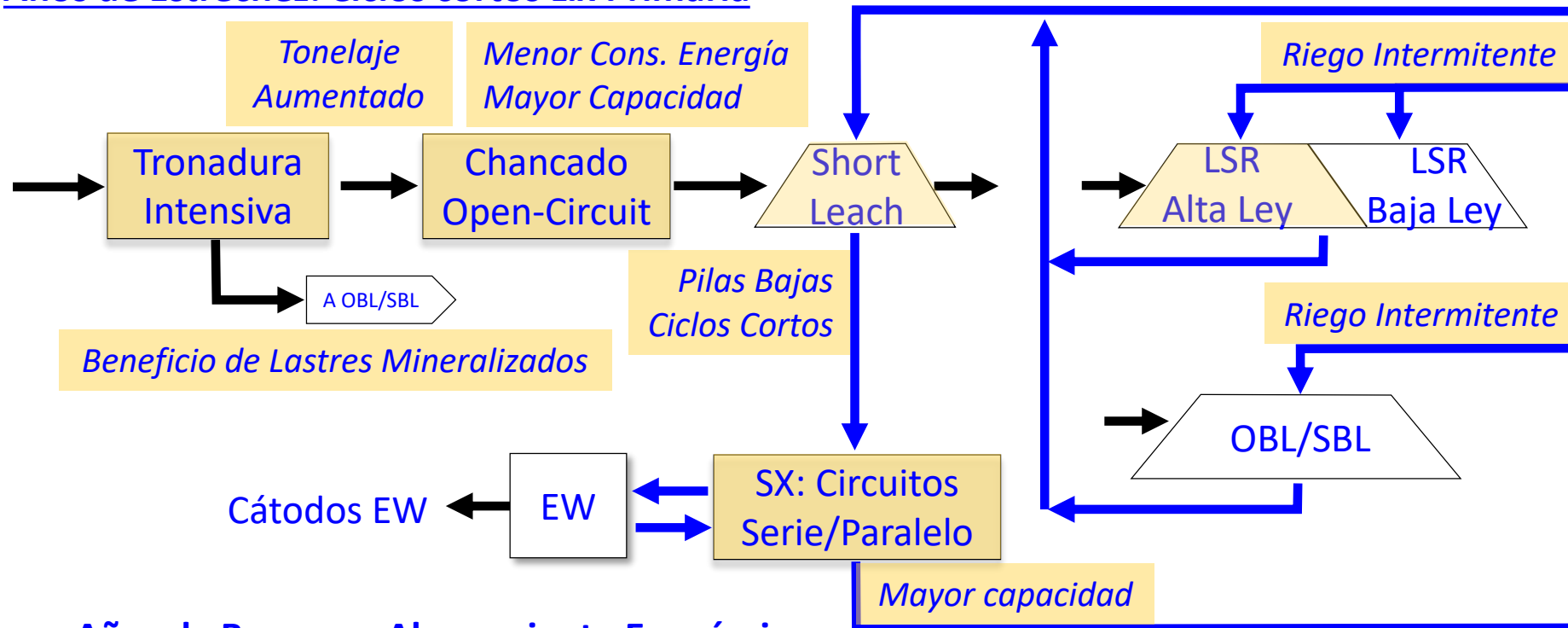


Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	Manejo de residuos industriales sólidos, líquidos y gaseosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo sustentable de residuos</li> <li>• Utilización de bioprocesos</li> </ul>
Aumento de la productividad	Disminución del consumo de energía y agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción del consumo de energía en electro obtención y agua en el proceso global</li> </ul>
	Desarrollo de nuevas tecnologías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuevos procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención</li> <li>• Control de la temperatura de los procesos hidrometalúrgicos</li> </ul>
Incremento de los recursos y reservas minerales	Uso de futura capacidad ociosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lixiviación de minerales de baja ley y ripios</li> <li>• Lixiviación de concentrados</li> <li>• Lixiviación de metal blanco y polvos de fundición</li> <li>• Lixiviación de minerales alterados, arcillosos, generadores de finos</li> <li>• Lixiviación In situ</li> </ul>
	Recuperación de cobre y metales preciosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperación de metales preciosos</li> </ul>
	Desarrollo de nuevas tecnologías	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuevos procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención</li> </ul>

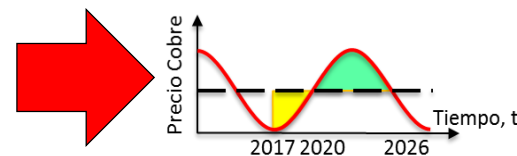
# Metalurgistas: Se Requieren Procesos Más Flexibles...



## Años de Estrechez: Ciclos cortos Lix Primaria



## Años de Bonanza: Alargamiento Económico de Ciclos de Lixiviación Primaria







# **Paradigma Tecnológico Siglo XXI:** ***The Way We Do Things...***

# Connectivity is Accelerating Convergence of Industries, Products and Technologies



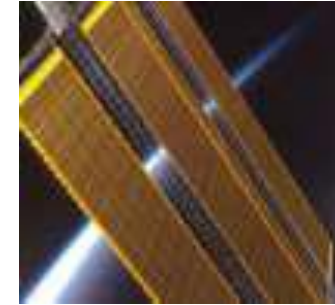
Space Industry

+



Solar Industry

=



Space Based Solar Power



Cars

+



Sensing and Communications

=

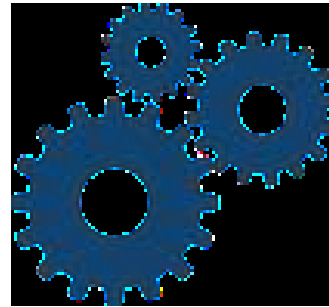


Autonomous Cars



Building Technology

+



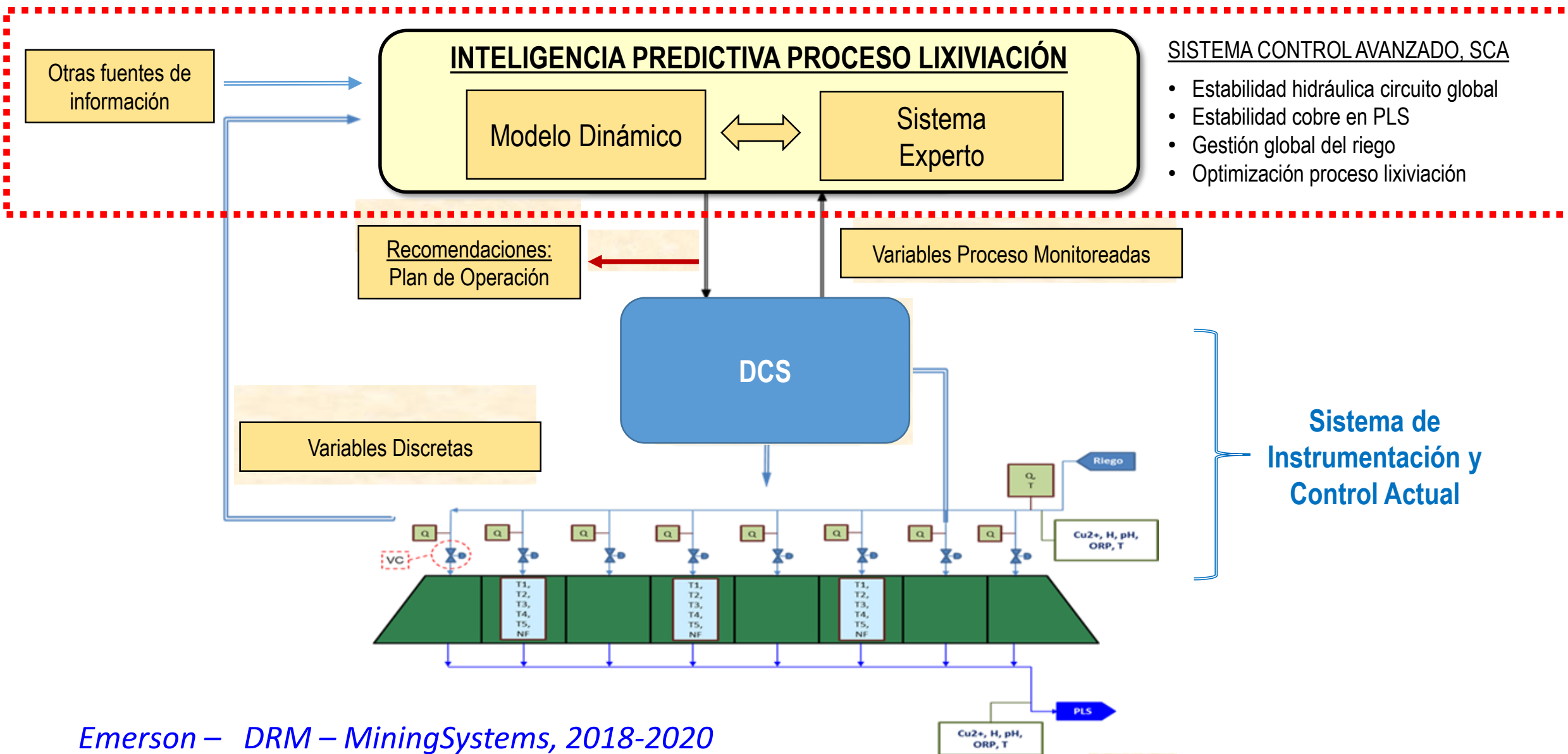
Smart Automation

=



Smart Home Hubs

# Ejemplo Hidro: Smart Leach System®





# **Innovaciones Tecnológicas**

# **Hidrometalurgia de Minerales**

# Innovaciones en Hidrometalurgia Minerales

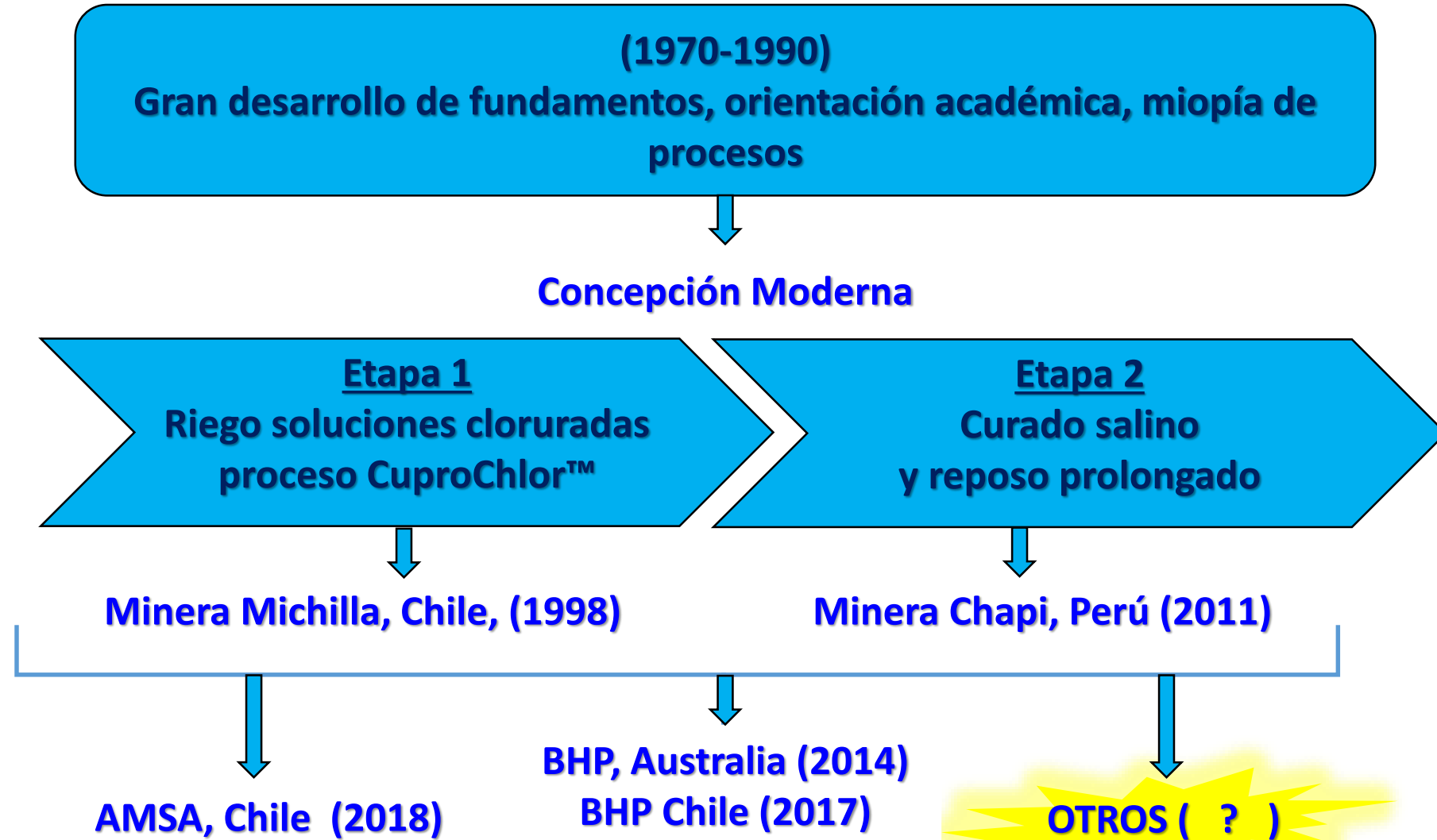


<ul style="list-style-type: none"><li>✓ <b>Proceso de lixiviación clorurada de minerales baja ley</b></li><li>✓ Plantas SX modulares</li><li>✓ Tecnología SELE, Smart Cell</li><li>✓ Nuevos extractantes y modificadores de SX</li></ul>	Empresas Proveedoras de Equipos y Servicios Industriales
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Riego automático inteligente de pilas industriales</li><li>✓ Simuladores integrados mina-planta asistidos por modelos fenomenológicos</li><li>✓ Incorporación de inteligencia artificial en la simulación y control de procesos</li><li>✓ Modelos hidrodinámicos y metalúrgicos para tareas de diseño, optimización y control de procesos industriales</li></ul>	Empresas Proveedoras de Equipos y Servicios Industriales y Empresas Ingeniería
<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Nueva metodología pruebas lixiviación a tasa reducida</li><li>✓ Nuevos dispositivos de caracterización hidráulica de plantas industriales de SX y metodologías de interpretación</li></ul>	Empresas de Ingeniería



# Lixiviación Clorurada

# Road Map Tecnológico





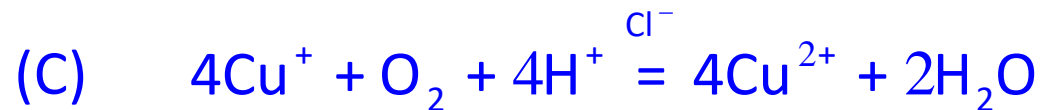
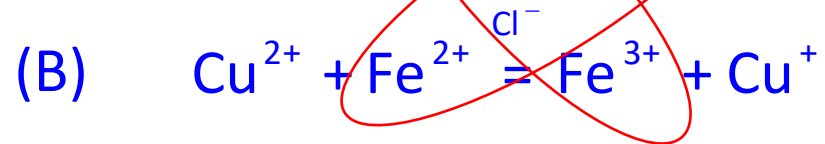
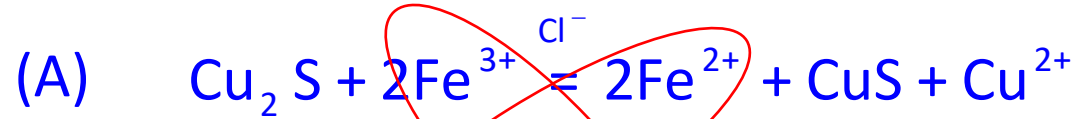
# Proceso de Lixiviación Clorurada



# Lix Clorurada: Mecanismo Rx Complejo



- La máquina virtuosa para generar férrico es posible porque en medio cloruro el ion cuproso es estable. Existe una “ventana óptima” de proceso (Jaime Rauld, Proceso CuproChlor®)



La reacción (B) ocurre en la interfase de reacción, inducida por las reacciones de transferencia de carga al interior del sólido, en fase líquida es termodinámicamente no factible (A. Reghezza, comunicación personal, 28 de mayo, 2020).

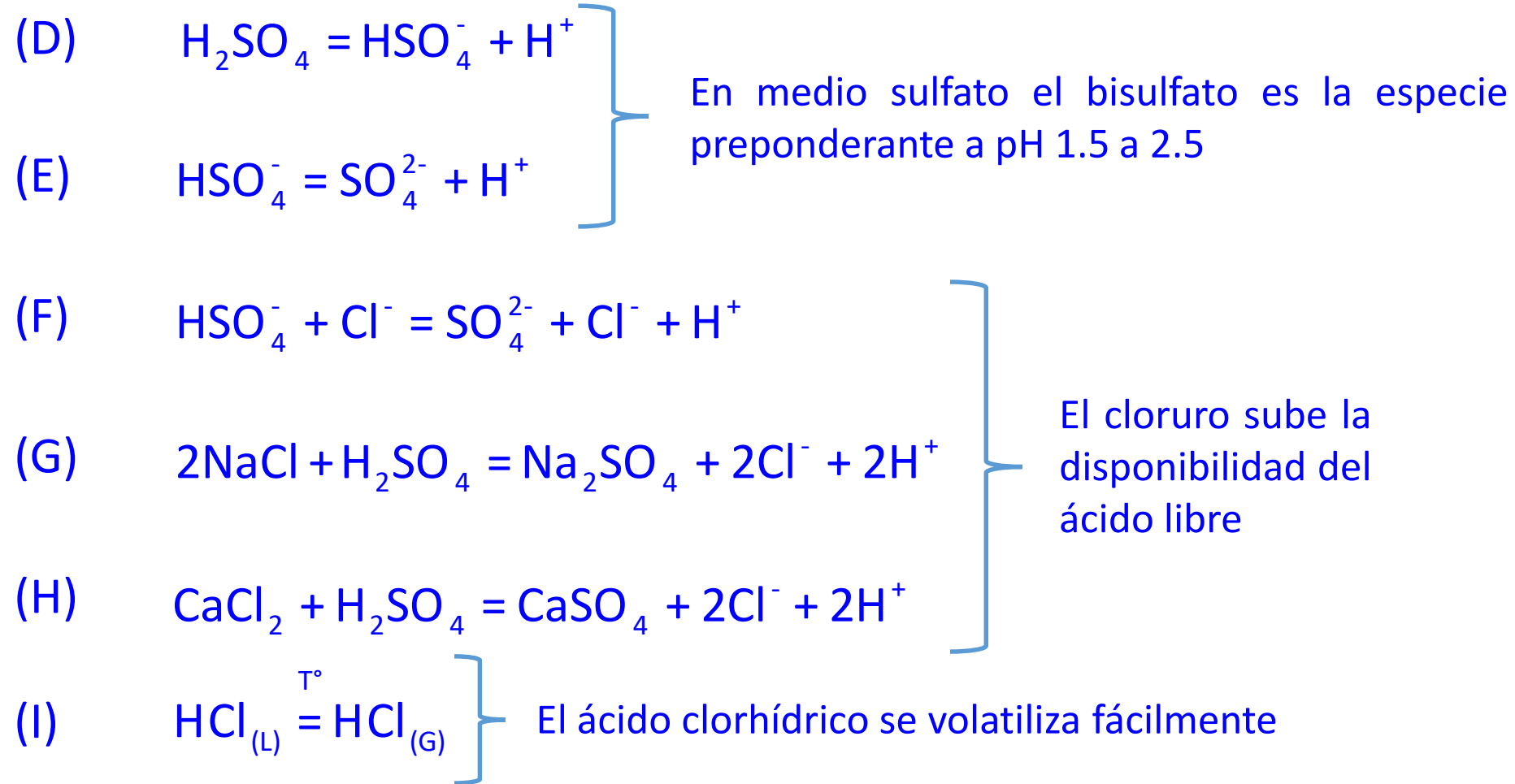


- Disolución de impurezas
- Chancado químico de la roca



# RX de Interés de Proceso

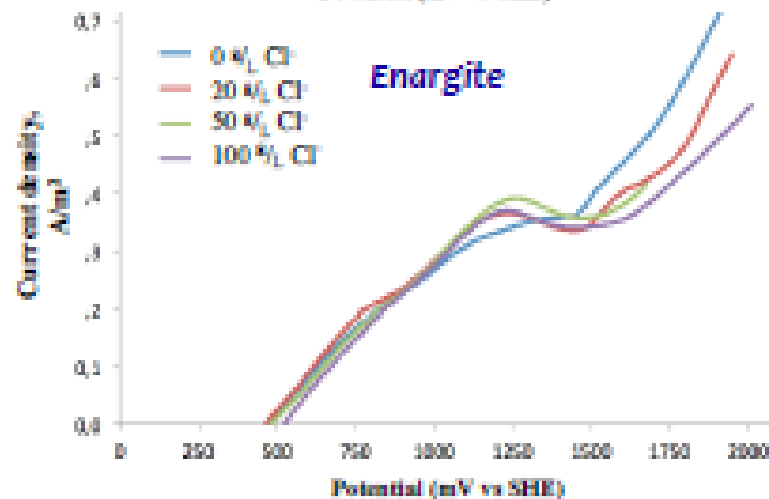
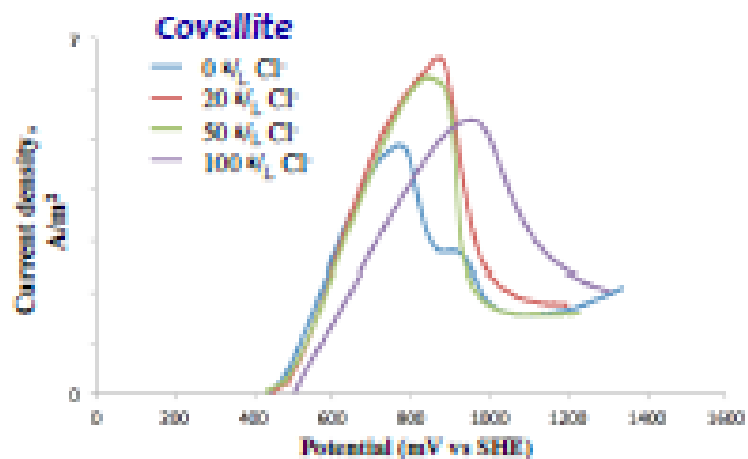
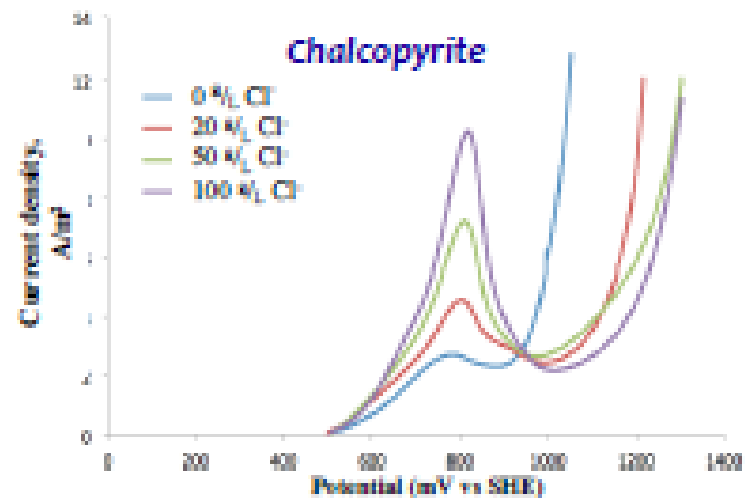
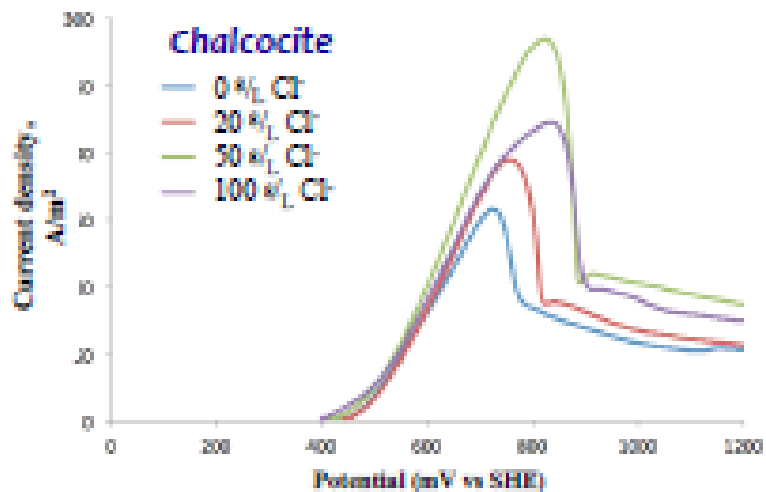
- La actividad de los protones aumenta en medio cloruro



# Proceso Lixiviación Clorurada: Pasivación



1.0 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

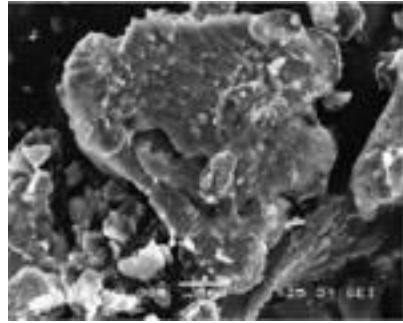


Lilián Velásquez Yévenes, Disolución de minerales sulfurados en medios ácido clorurados, Webinar IMET Chile, Lixiviación de Minerales de Cobre con Sales de Cloruro, 29 mayo del 2020.

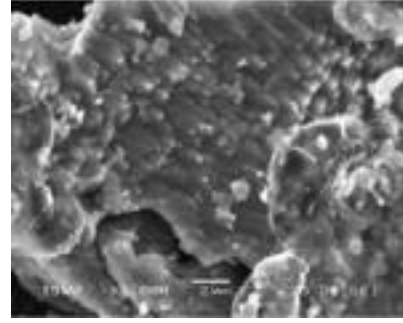
# Productos de Reacción Lix Clorurada



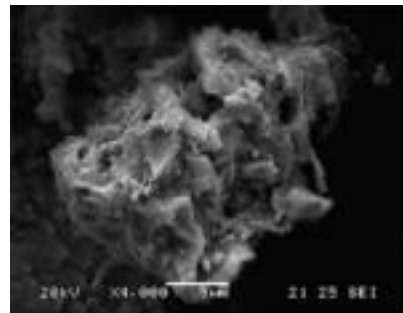
- El producto final sigue siendo  $S^\circ$ , pero de morfología porosa



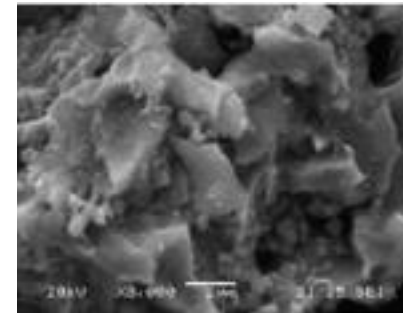
(a)



(b)



(c)



(d)

Microfotografía electrónica (SEM) ripio Lix. de Cpy

(a) Ripio en ausencia de NaCl (3000X)

(b) Ripio en ausencia de NaCl (6000X)

(c) Ripio en presencia de NaCl (4000X)

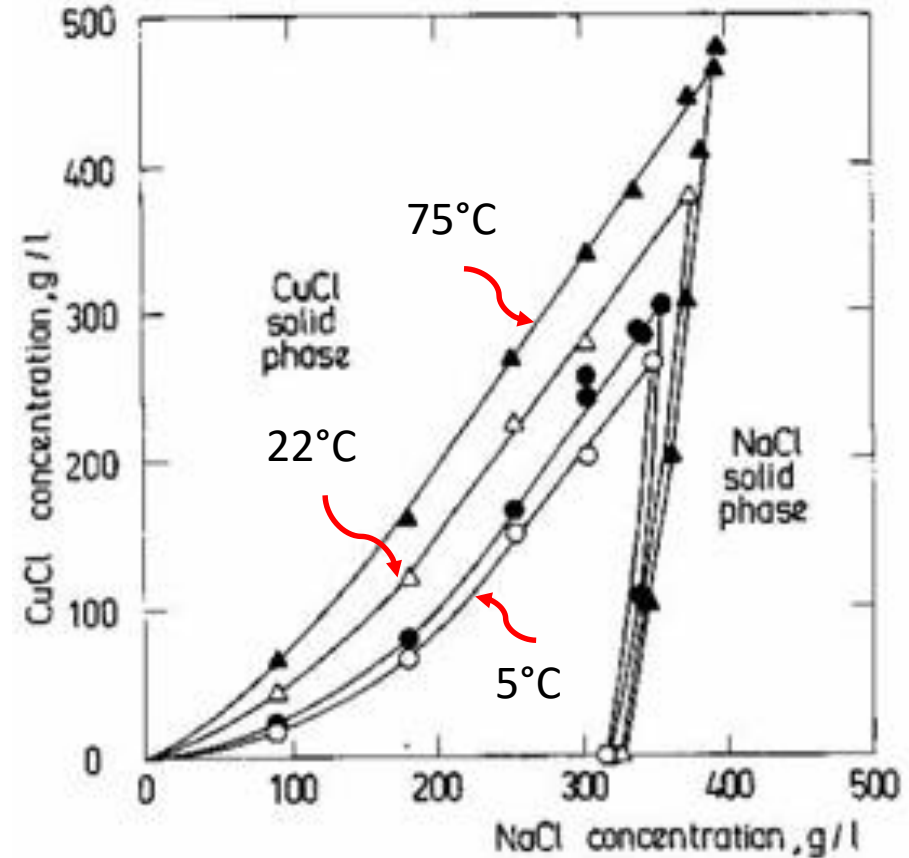
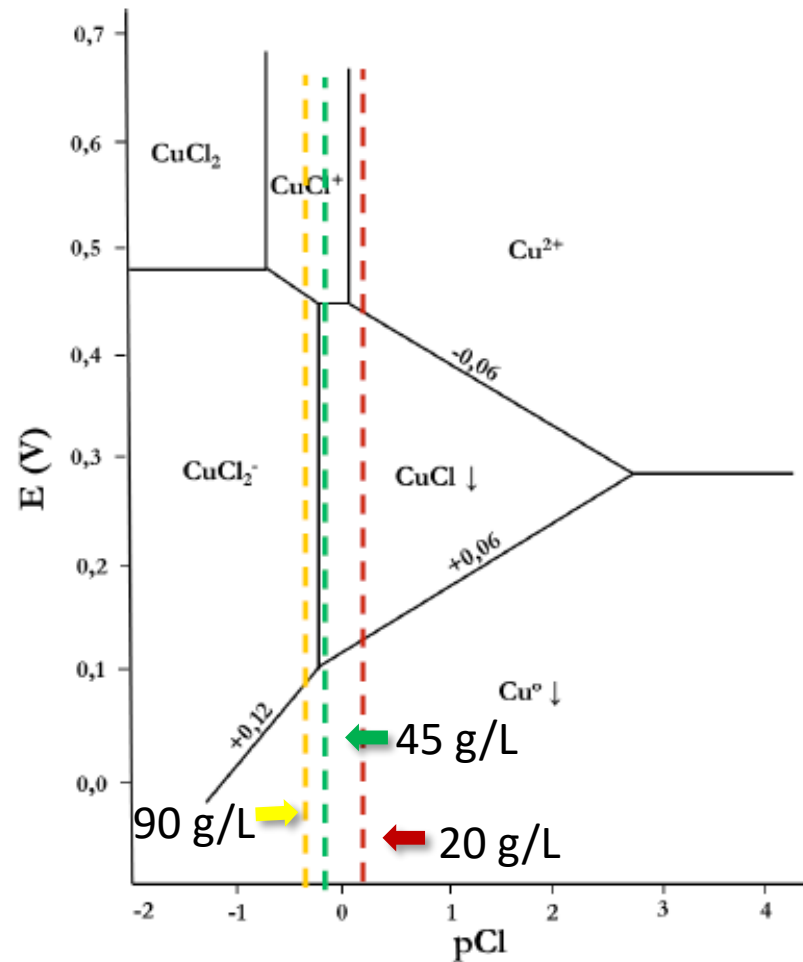
(d) Ripio en presencia de NaCl (8000X)

*Jorge Ipinza, Recorrido Histórico de la Lixiviación de Minerales de Cobre, Webinar IMET Chile, Lixiviación de Minerales de Cobre con Sales de Cloruro, 29 de mayo del 2020.*

# Proceso de Lixiviación Clorurada



- Cuánto cloruro agregar

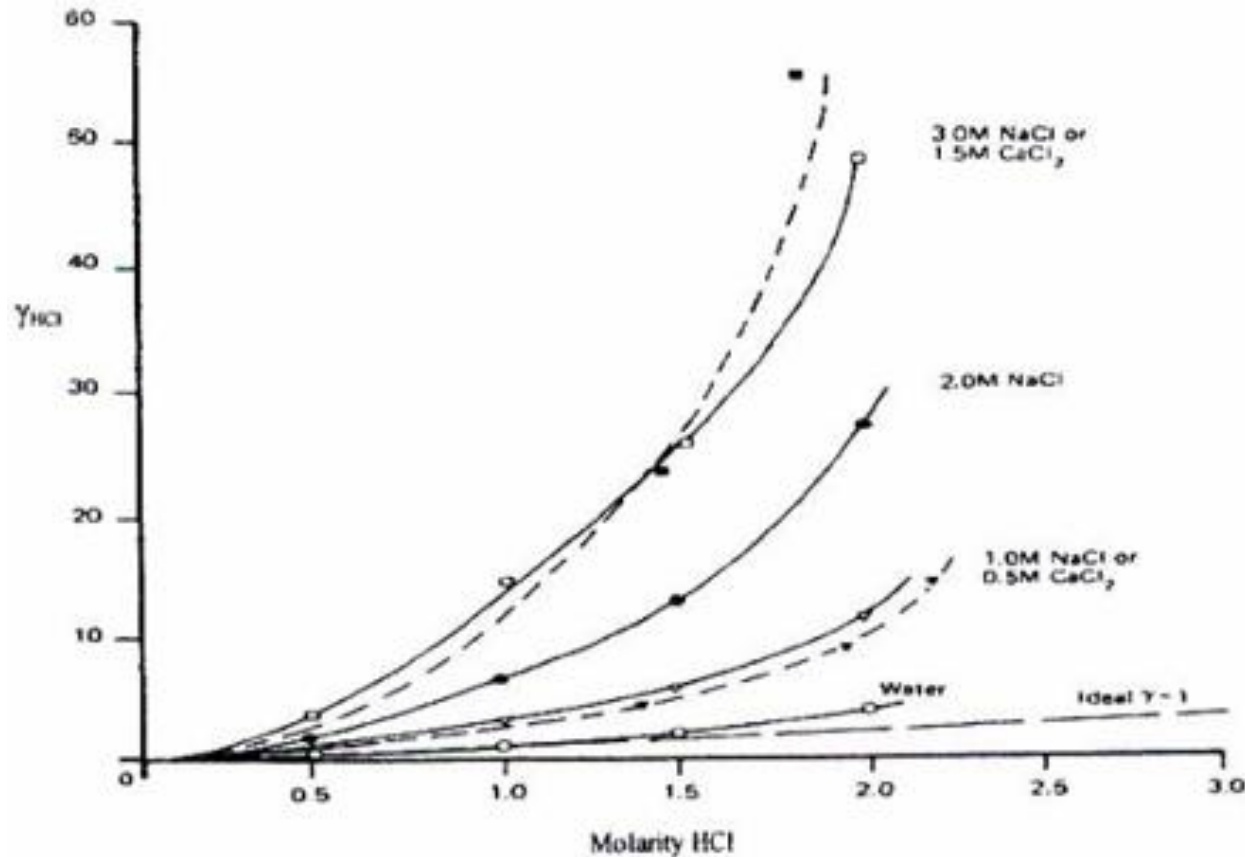


*Berger and Winard, 1984*

# Proceso de Lixiviación Clorurada



- La actividad del ácido libre aumenta en medio cloruro



0.05 M de  $H_2SO_4$  (4.9 g/L)

pH	NaCl	KCl	$CaCl_2$	$MgCl_2$
20 g/L $Cl^-$	1.16	1.16	1.15	1.15
150 g/L $Cl^-$	0.42	0.80	0.15	0.15

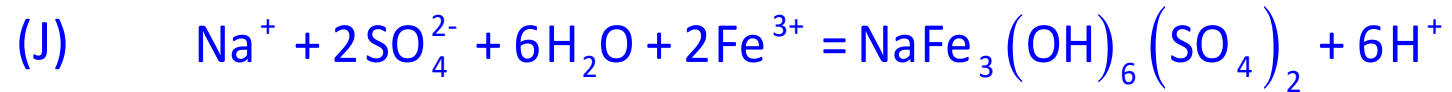
*Lilián Velásquez Yévenes, Disolución de minerales sulfurados en medios ácido clorurados, Webinar IMET Chile, Lixiviación de Minerales de Cobre con Sales de Cloruro, 29 mayo del 2020.*

*Mean activity coefficient of HCl in solutions of NaCl or  $CaCl_2$   
(Majima and Awakura, 1981)*

# Disponibilidad Operacional de Hierro Férrico



- El sulfato compite con los sulfuros de cobre, por el  $\text{Fe}^{3+}$



- Hay gran número de sulfatos dobles estables de  $\text{Fe}^{3+}$ , tales como

Argento jarosita	$\text{AgFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Hydronio jarosita	$(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Natro jarosita	$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Beaverita-(Cu)	$\text{Pb}(\text{Fe}_2\text{Cu}^{2+})(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Beaverita-(Zn)	$\text{Pb}(\text{Fe}_2\text{Zn})(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Doralcharita	$\text{TlFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$



# Patentes de Invención Relevantes



# Patentes de Invención Relevantes



- El precursor de la lixiviación clorurada con enfoque de procesos es CuproChlor™ en uso industrial desde 1998, Minera Michilla, hoy AMSA
- El segundo impulso fue el curado salino y reposo prolongado, aplicado por Minera Chapi en Perú. Trabajo poco sistemático, patentes rechazadas
- En 2011 BHP Billiton obtiene la US Patent 8,070,851 B2, 2011, Chloride Heap Leaching, combinando la lixiviación a bajo potencial descubierta para bioleaching, con lixiviación clorurada conocida
- En 2016 Minera Zaldívar del grupo AMSA patenta un proceso de lixiviación clorurada con bacterias resistentes al cloruro (WO 2016/026062 A1 , J.C. Álvarez, Feb., 2016)
- En 2017 BHP Billiton obtiene la US Patent 9,816,155 que considera curado salino, reposo prolongado y riego con soluciones ricas en cloruro, o sea, integra todo el estado del arte, lo aplica en Minera Spence
- En 2017, Minera Zaldívar comienza a agregar sal a su proceso industrial bajo el paraguas de CuproChlor, con curado salino y reposo prolongado.

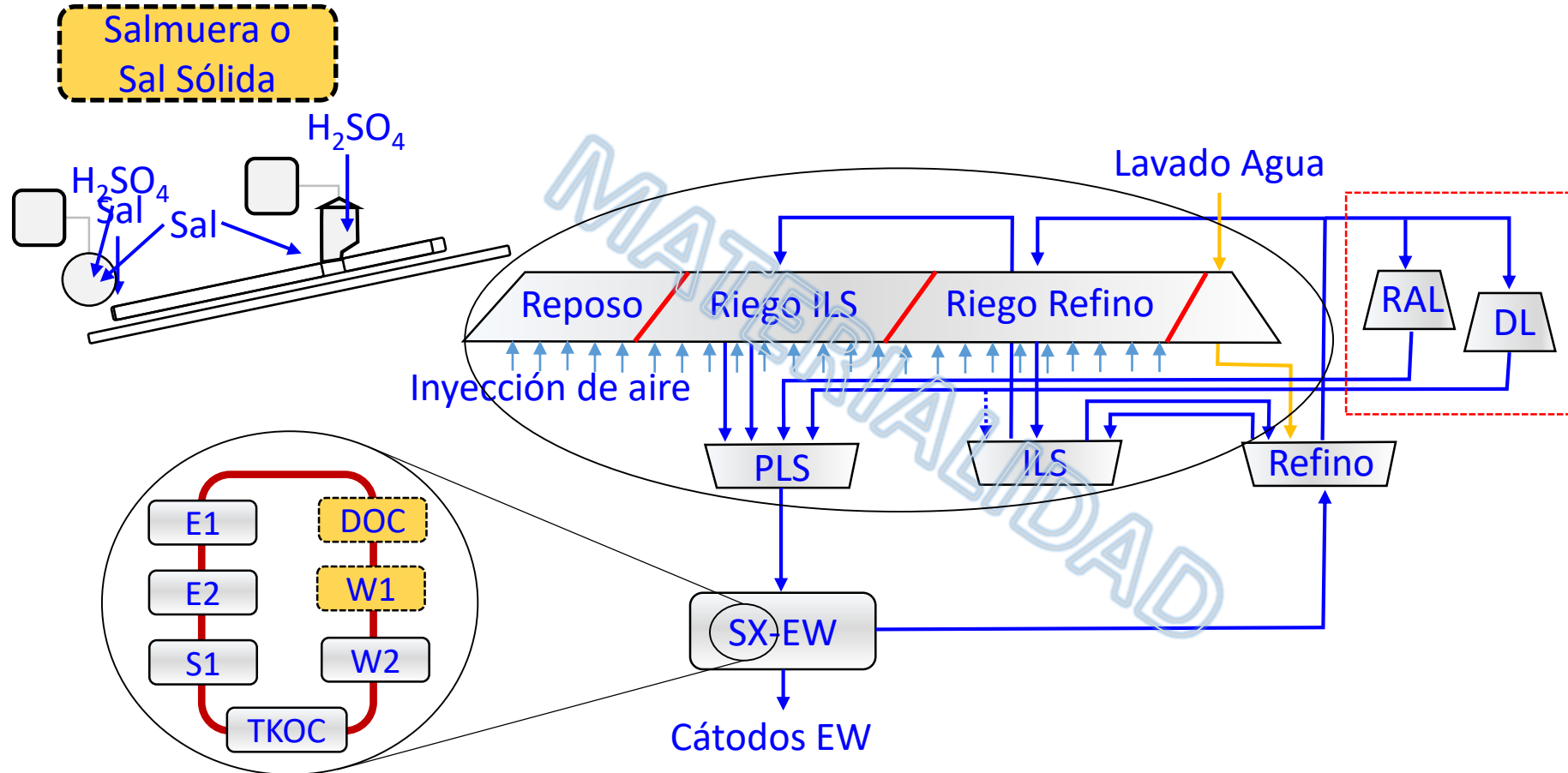


# **Ingeniería de Procesos Adopción Lix Clorurada Minerales**

# Definición Conceptual Proceso Heap Leaching



La lixiviación clorurada Heap Leaching, está orientada “hoy” principalmente al beneficio de sulfuros secundarios; para un recurso identificado, se procede a la definición inicial del proceso a desarrollar

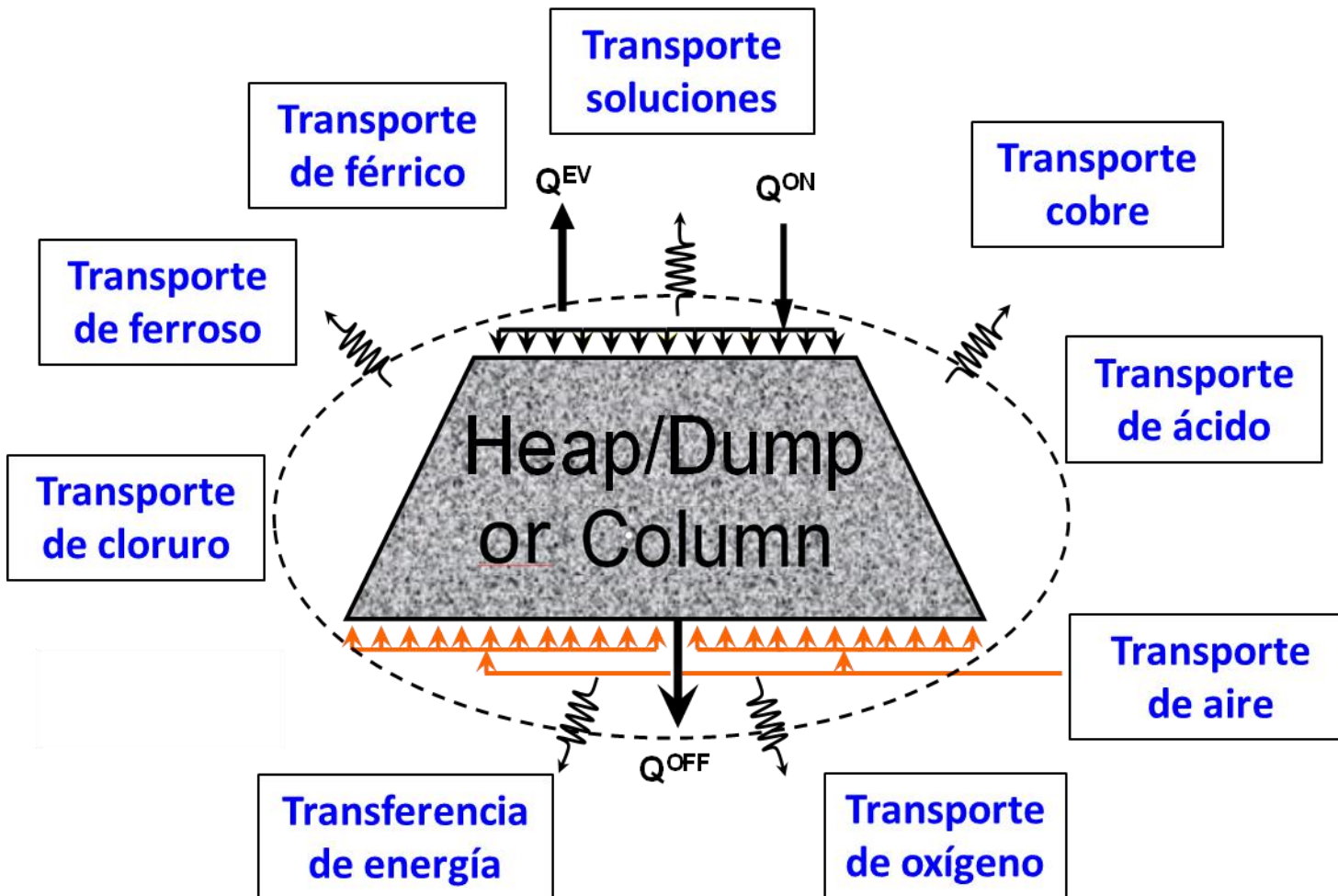




# **Modelación Moderna**

## **Lixiviación**

# Modelo Fenomenológico Lix Clorurada



## Ecuaciones Básicas Modelo Lix Clorurada:

- Continuidad
- Momentum
- Cinética química

C.B. según proceso industrial



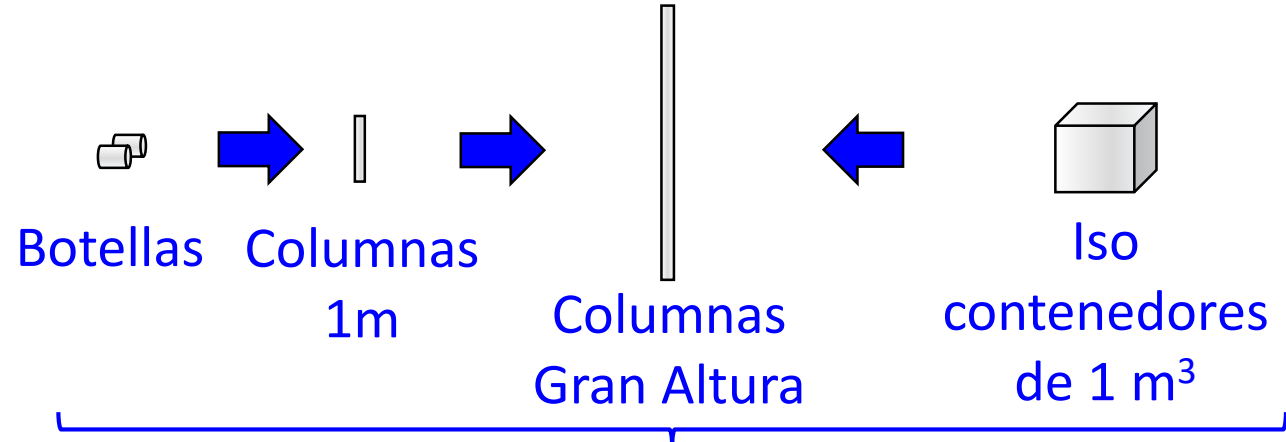
## Utilidad

- ✓ Escalamiento de la recuperación y el consumo de lixiviantes
- ✓ Ramp up de implementación gradual lix clorurada
- ✓ Simulación de programas de mina y estimación de programas de producción
- ✓ Diseño, optimización y control de procesos industriales

# Escalamiento Lix Clorurada



Los modelos fenomenológicos permiten escalar resultados y simular la respuesta industrial bajo diferentes escenarios



Resultados

*Reconocidos en la Guía Corporativa Geometalurgia de Codelco Chile*

**MODELOS FENOMENOLÓGICOS**

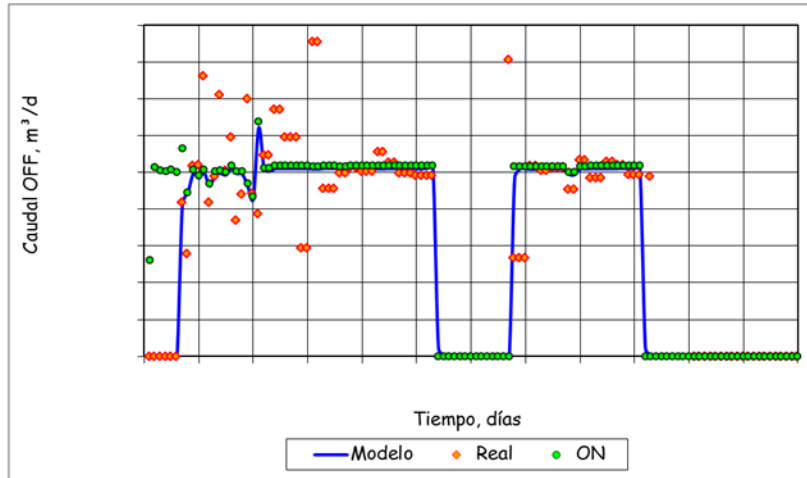
*Reconocidos en las Guías ADS de AMSA*

**PILA INDUSTRIAL**

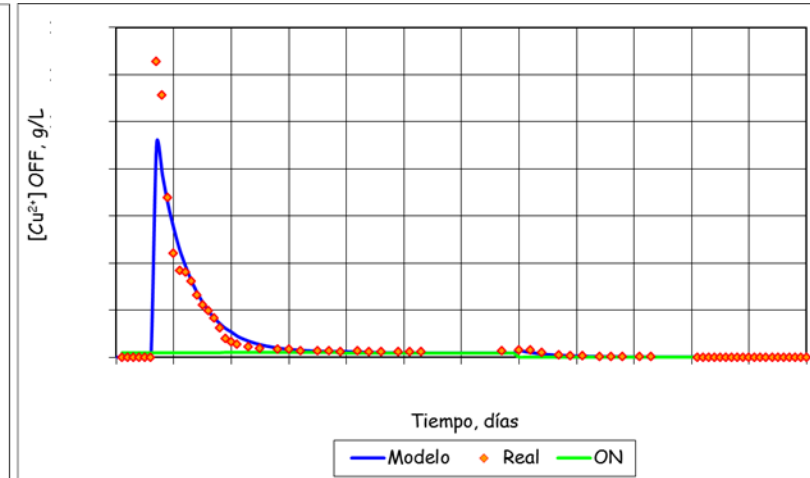
# Modelación Fenomenológica



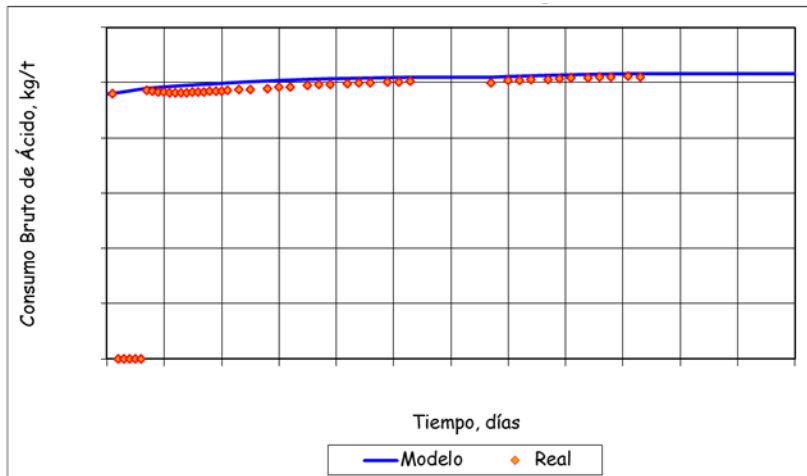
## Modelación hidro-metalúrgica columnas lixiviación clorurada



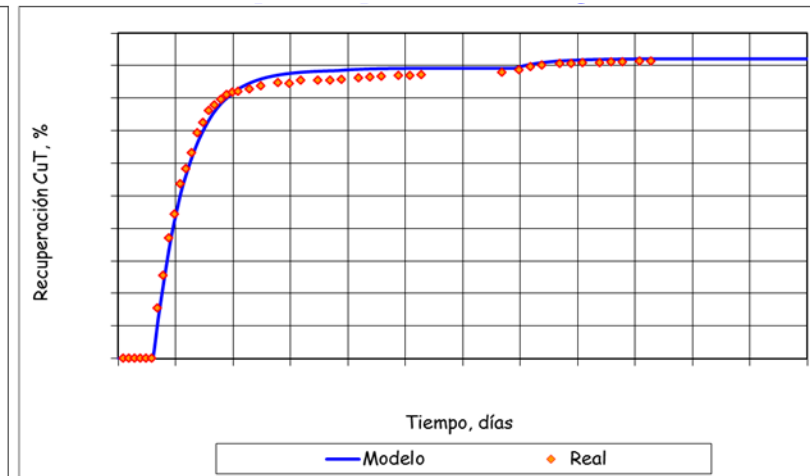
Caudal de drenaje



Cobre en drenaje



Consumo bruto ácido

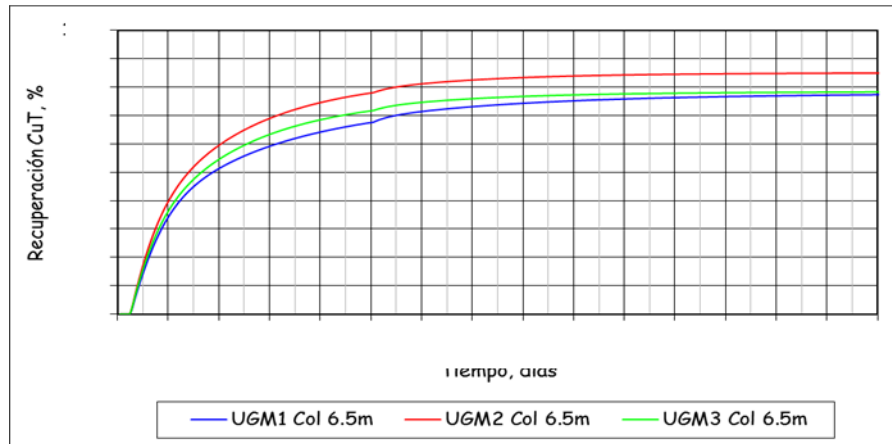


Recuperación CuT

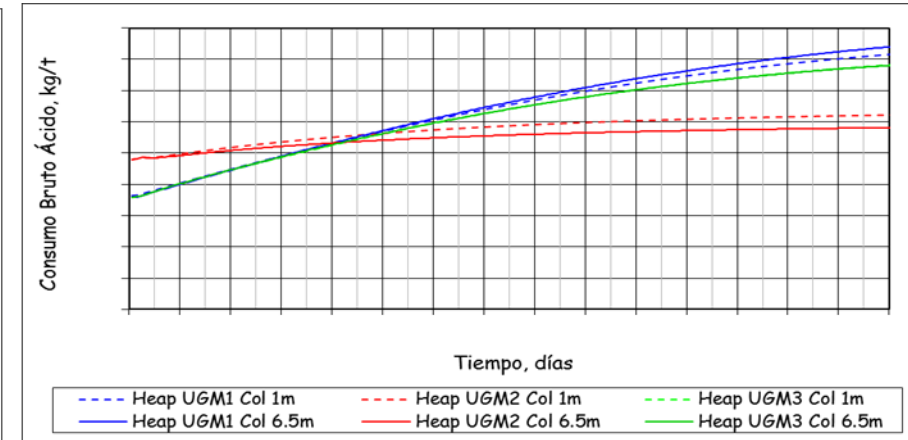
# Scale Up Hidrodinámico y Metalúrgico



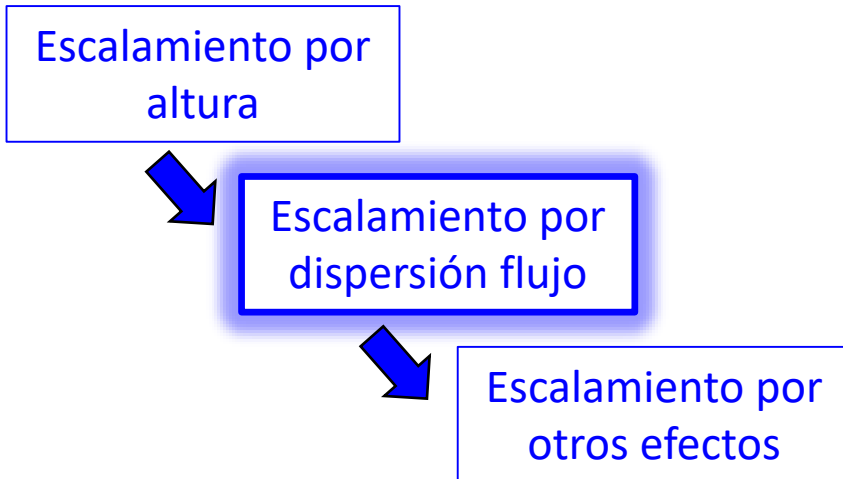
## Escalamiento recuperación y consumo de ácido industrial



Recuperación CuT industrial vs tiempo



Consumo bruto ácido industrial vs tiempo



### Flow Dispersion Scale Up (Menacho, 1999)

$$R_{\text{Column}}(p_i, t) = \int_0^{\infty} \phi_{\text{Column}}(t^*) R_{\text{PF}}(p_i, t, t^*) dt^*$$

$$R_{\text{PF}}(p_i, t) = R_{\text{PF}}(p_j, t)$$

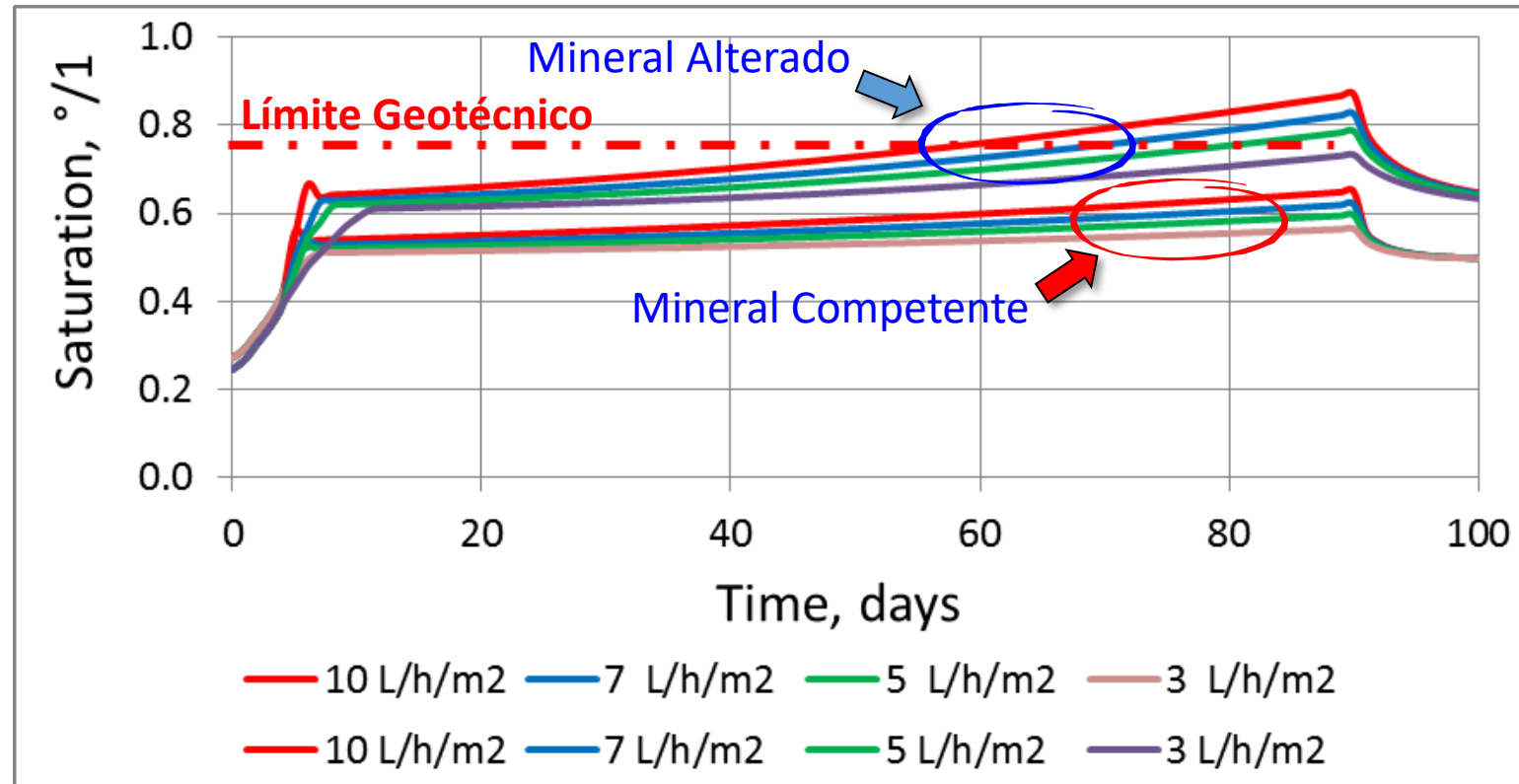
$$R_{\text{Pad}}(p_j, t) = \int_0^{\infty} \phi_{\text{Pad}}(t^*) R_{\text{PF}}(p_j, t, t^*) dt^*$$



# Scale Up Hidrodinámico y Geotécnico



## Escalamiento hidrodinámico-geotécnico escurrimiento de soluciones en pila industrial

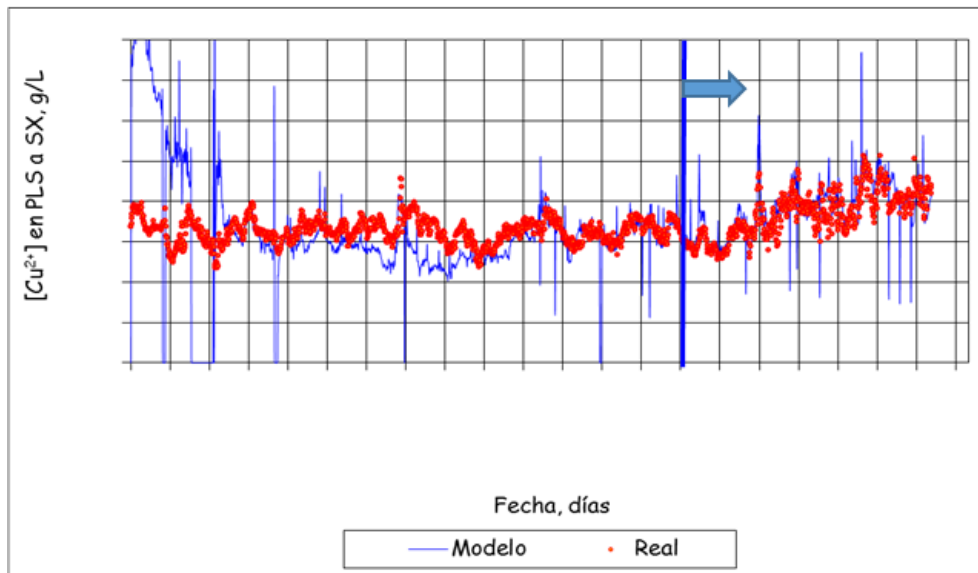
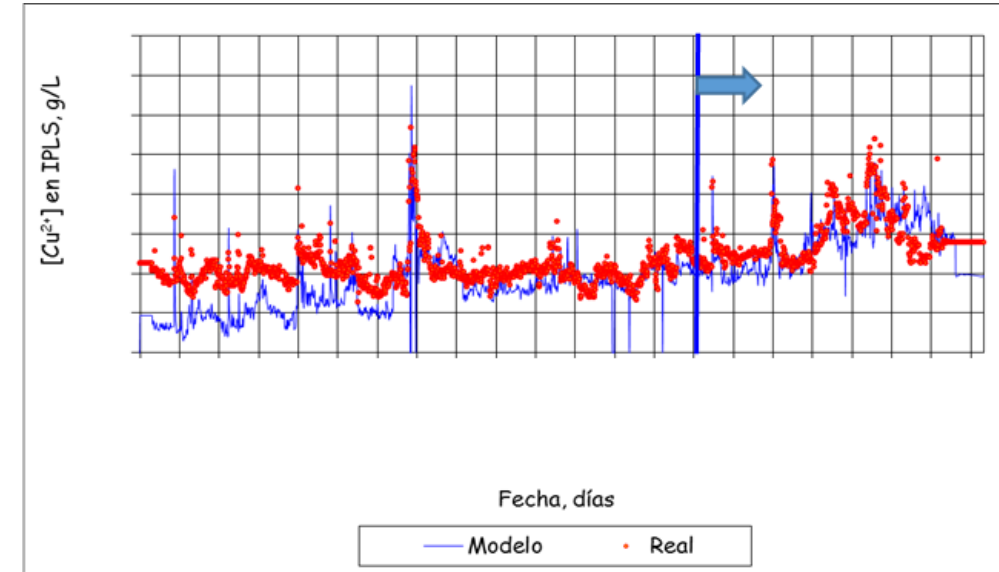
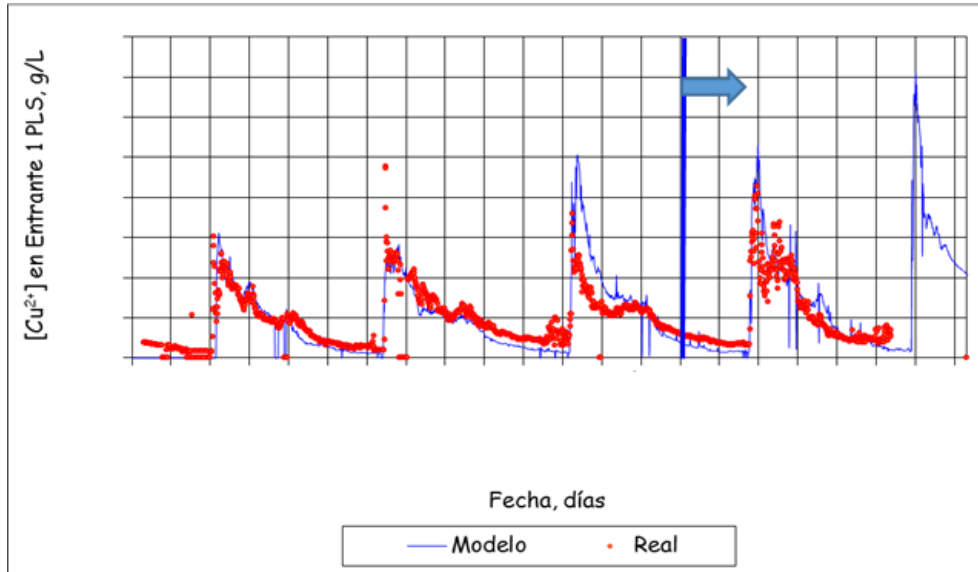


Perfil probable de saturación hidrodinámica vs. tiempo de riego, mineral competente y mineral alterado por chancado químico

# Desempeño Modelo Industrial Lix Clorurada



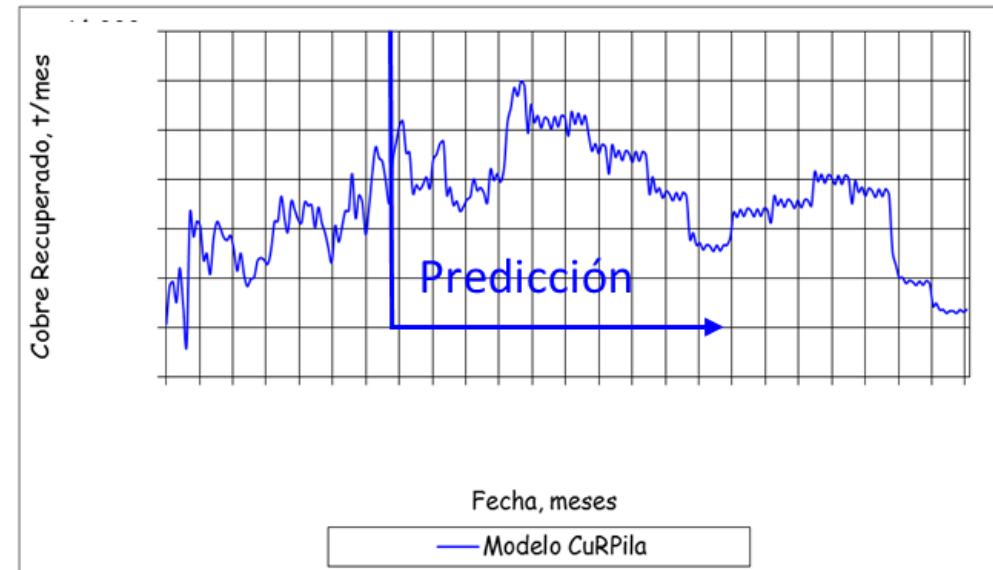
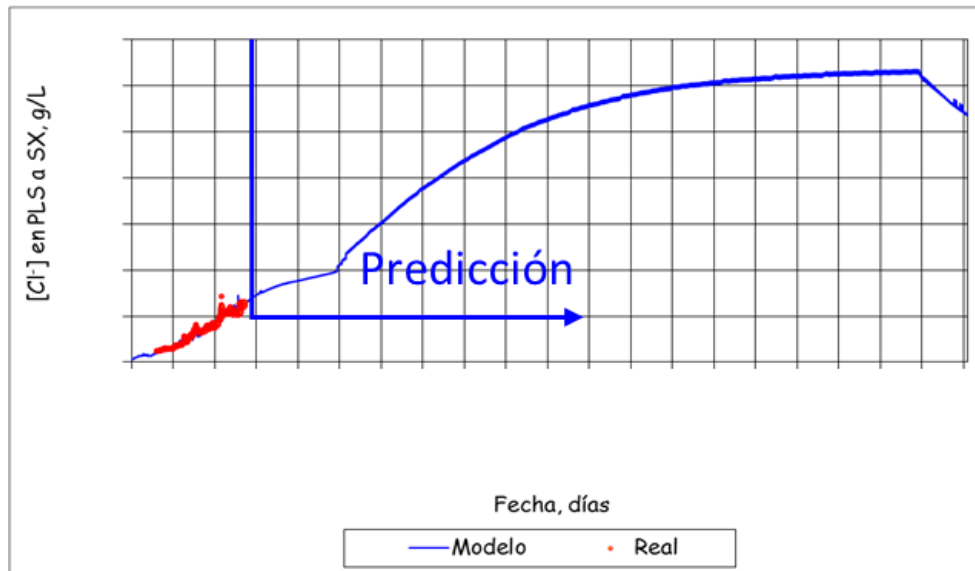
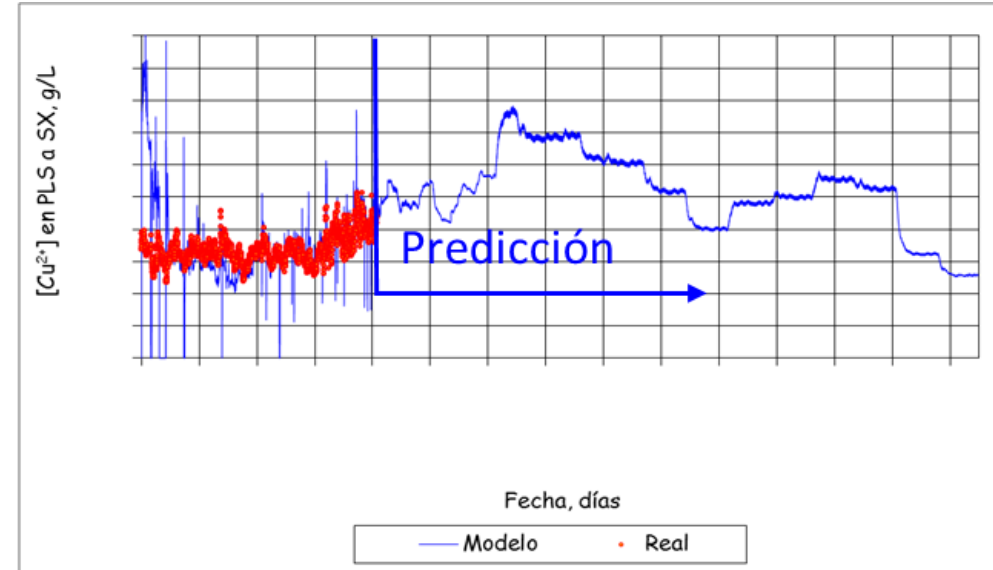
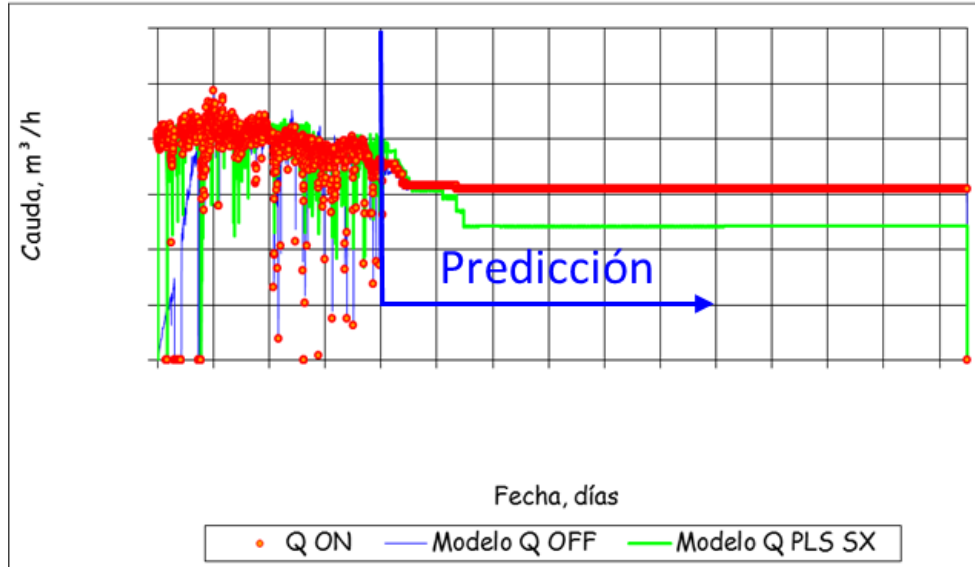
## Sintonización Modelo/Operación Industrial Existente, modelación transiente adición sal



# Simulación Plan Mina Modelo Lix Clorurada



## Simulación Lix Clorurada Futura: Ramp Up y estimación de Programa de Producción



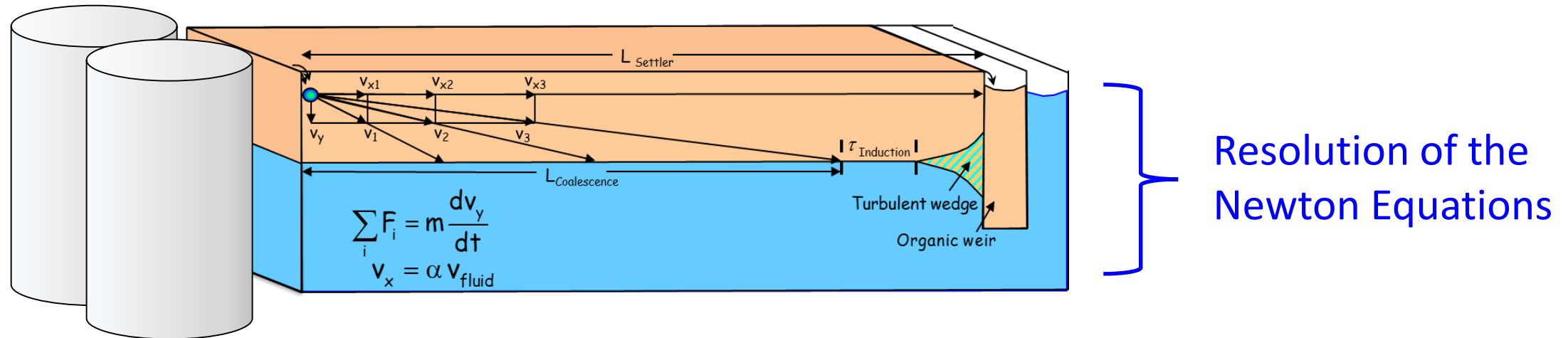


# Modelación Moderna SX-EW

# Modelo Arrastres y Purgas

## Modelación dinámica arrastres y cloruro SX – EW

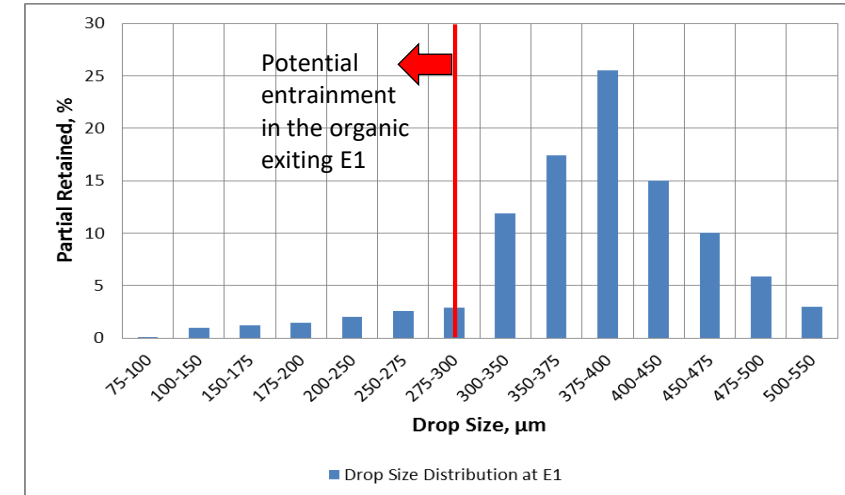
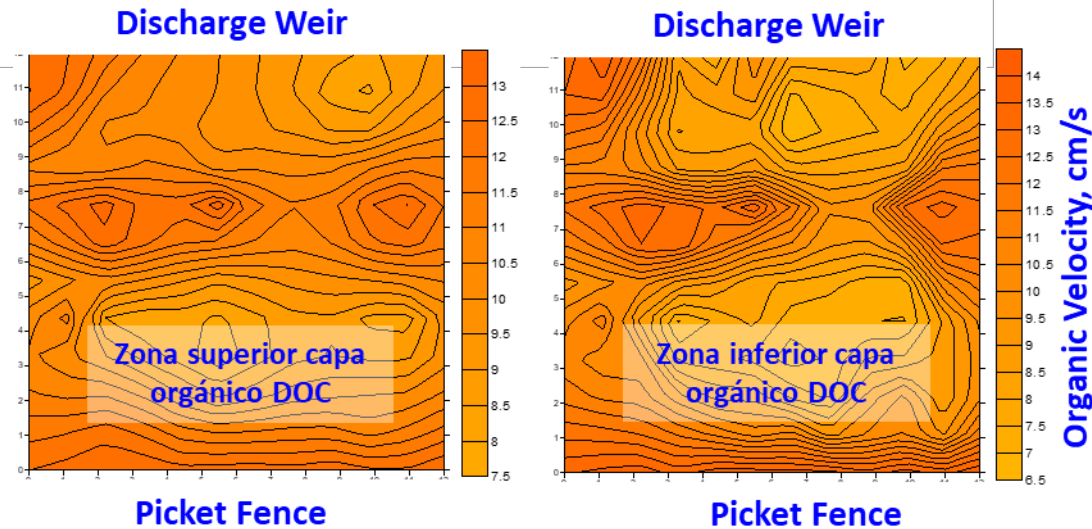
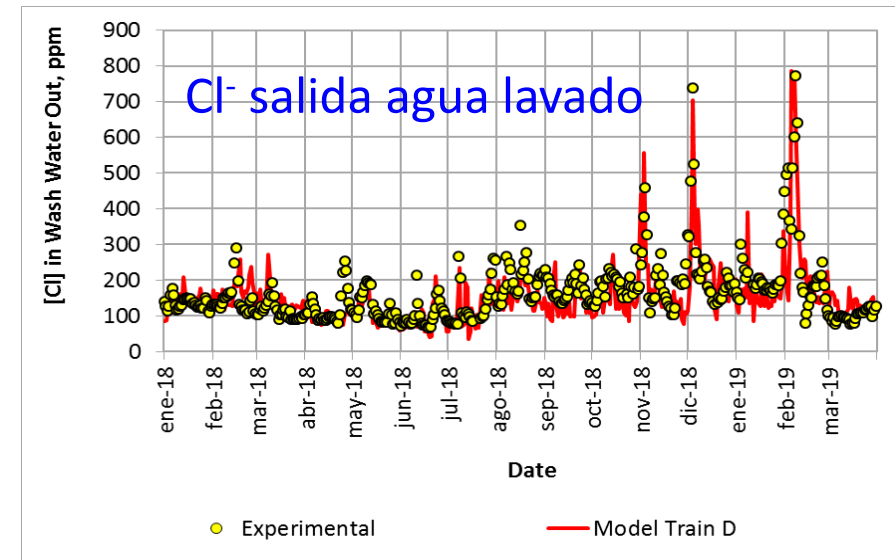
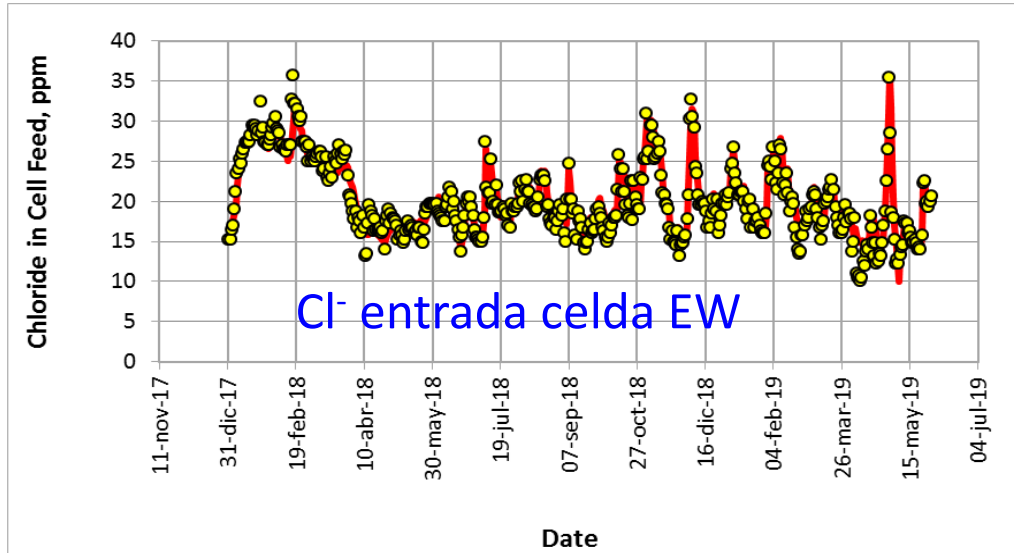
- Aspectos químicos modelables desde las isotermas y pruebas piloto a pequeña escala
- Aspectos físicos según medición de perfiles de velocidad y distribución de tamaño de gotas





# Modelo Arrastres y Purgas

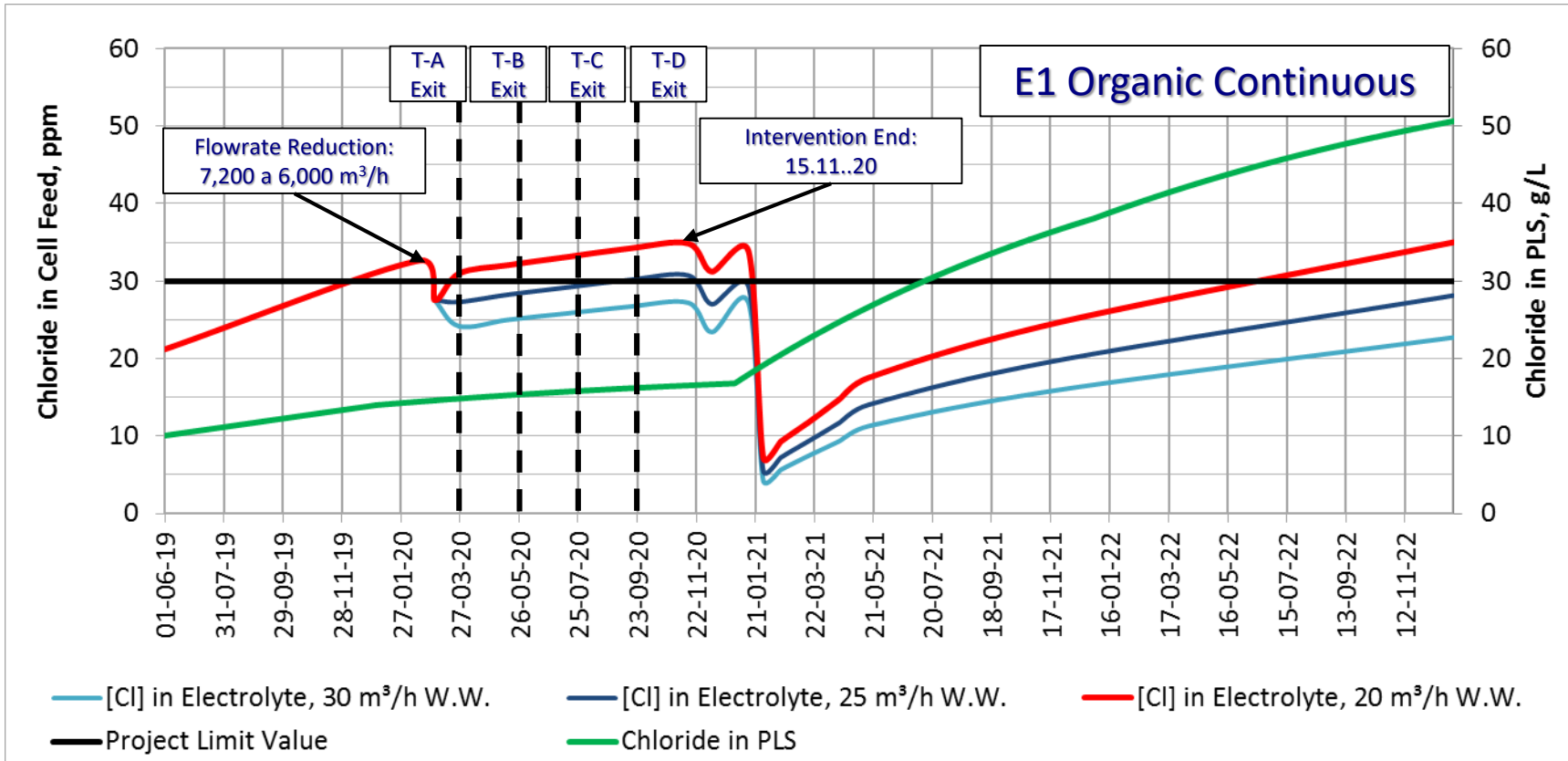
## Simulación dinámica arrastres y cloruro SX – EW (Experimental versus Modelo)



# Ramp Up SX Proyecto Lix Clorurada

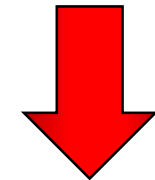


## Proyección situación esperada en ramp up y posterior cloruro SX - EW



### Planta SX-EW Antes/Después

- Campañas Medición
- Proyección Modelos



Cumplimiento metas del proyecto Lix Clorurada en SX-EW

*J.M, Menacho (DRM), J.S. Manríquez (DRM), S. Rojas (AMSA) and A. Olea (AMSA), "Methodology to Control Chloride in SX-EW Electrolyte from Chloride Leach Operations", HydroProcess 2019, Santiago-Chile, June 19<sup>th</sup>, 2019.*



# Comentario Final



# Comentario Final



- ❑ Estamos entrando en una revolución industrial de inmensas proporciones, la Minería es muy conservadora, el nuevo lema es *“the way we do things”*
- ❑ La Metalurgia está en deuda, no sólo faltan quiebres, sino más imaginación en usar lo que tenemos, faltan voces de lineamientos más robustos para la Innovación
- ❑ La lixiviación clorurada se enfocará en: (i) Minerales mixtos y sulfuros de baja ley, (ii) Concentrados de cobre y moly, metal blanco, escorias de fundición, polvos de fundición, y (iii) Minerales complejos de oro y relaves de cobre y de oro
- ❑ El cloruro es un lixivante universal, no sólo para los metales valiosos, también para las impurezas, incluso puede atacar la matriz de la roca, las consecuencias ambientales de la lixiviación clorurada aun no se han manifestado en plenitud...
- ❑ Finalmente, la lixiviación clorurada moderna no sería posible sin el esfuerzo y dedicación de muchas personas, algunos ilustres chilenos son Jaime Rauld, Raúl Montealegre, Esteban Domic, Abraham Backit, Fredy Aroca, Andrés Reghezza, Marcelo Jo, Reinaldo Mendoza, Lilian Velásquez y Jorge Ipinza, entre otros.