

ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS EN LA MINERÍA DEL COBRE EN ZONAS DESÉRTICAS: EL CASO DEL NORTE CHILENO

H. Schneider¹, J. L. Cortina², M. A. Bosse³

1- Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña
Oscar Tenhann 855, depto 222, Las Condes, Santiago, Chile.
E-mail: heloisa.schneider@cl.pwc.com

2- Ingeniería Ambiental del Departamento de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña.
E-mail: jose.luis.cortina@upc.edu

3- Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Católica del Norte.
E-mail: mbosse@ucn.cl

RESUMO

El proceso de obtención de metales no férricos como el cobre, genera diferentes tipos de efluentes, siendo las fuentes más importantes, las aguas utilizadas en la etapa de concentración que, o bien se reintegran al proceso o se almacenan en tranques; para el transporte a través de mineroductos, aguas de enfriamiento y lavado de gases en las fundiciones, el agua utilizada en el proceso de hidrometalurgia y el descarte de electrolitos en la refinería electrolítica. Dichas aguas pueden estar contaminadas con compuestos metálicos y no metálicos (As, Bi) derivados del proceso productivo en sí, lo que implica que su disposición, dado que los efectos tóxicos de algunos compuestos metálicos y no metálicos, bajo determinadas condiciones químicas, pueden solubilizarse en medios acuosos y así entrar, de forma rápida e irreversible, en el medio ambiente, sea una constante preocupación para las empresas.

Actualmente, para tratar este tipo de efluentes, se utilizan diversos métodos físico-químicos que permiten controlar los contaminantes que éstos puedan contener, siendo los más comúnmente empleados, para el caso de metales pesados como el Cu, la precipitación como hidróxidos, carbonatos o sulfuros, la sorción (adsorción, intercambio iónico), las membranas, la recuperación electrolítica, la extracción líquido-líquido y la flotación. Además de éstos existen métodos biológicos, como los biorreactores y los humedales artificialmente construidos, que usan materia orgánica como sustrato.

En este contexto, el objetivo del presente documento, es analizar las alternativas de tratamiento de efluentes líquidos existentes a escala comercial y su aplicabilidad en la minería del cobre que se desarrolla en el norte de Chile.

Palabras clave: minería del cobre, efluentes líquidos, tratamiento de efluentes

1. INTRODUCCIÓN

Hidrográficamente, el norte de Chile, se caracteriza por un aridismo completo, producto del clima desértico, la disposición del relieve y la alta salinidad de los suelos, siendo el río Loa la excepción. Es el principal recurso hídrico de la II Región¹ que concentra la gran minería del cobre, recurso del cual Chile es el mayor productor mundial. Presenta una cuenca de tipo exorreica, con una superficie 33.570 km² y un caudal de 2,7 m³/s. Su agua se caracteriza por una elevada concentración de As³ y salinidad, producto, principalmente de la alta evaporación, debida al clima desértico en el cual está inserto y de las aguas de uno de sus tributarios, el río Salado, que al nacer en las fuentes geotermales del Tatio, en la Cordillera de los Andes, acarrea consigo grandes cantidades de minerales. Por consiguiente, las aguas del Loa presentan un bajo potencial para el consumo humano, lo que implica que en esta zona del país, el agua proveniente de acuíferos subterráneos representen la principal fuente de abastecimiento de demandas domésticas y mineras, y a la vez, adquieren un elevado grado de importancia en el contexto del desarrollo general del país.

La elaboración de metales no ferrosos, en sus diversas etapas, genera diferentes tipos de efluentes, siendo las fuentes más importantes, sobre todo por la calidad de los efluentes que se generan, el proceso de concentración, las aguas de enfriamiento y lavado de gases en las fundiciones, el agua utilizada en hidrometalurgia y el descarte de electrolitos en la refinación electrolítica (Lagos, 1997; IPPC, 2000). En algunos casos debe considerarse además, el agua utilizada como medio de transporte a través de los minerodutos. Dichas aguas pueden estar contaminadas por compuestos metálicos como Zn, Cd, Fe y Mn y no metálicos como el As, Sb, Se y Bi, derivados del proceso productivo en sí, lo que hace que su deposición, dado que los efectos tóxicos de algunos de estos compuestos, bajo determinadas condiciones químicas, pueden solubilizarse en medios acuosos y así entrar, de forma rápida e irreversible, al medio ambiente, sea cada vez más considerado un tema de la mayor importancia y prioritario para la gran minería principalmente. En la Tabla I, se presentan las principales fuentes de emisión de agua y su potencial como contaminante.

Tabla I: Fuentes de emisión y potencial como contaminante

Fuente de emisión	Tipo		
	Sólidos suspendidos	Compuestos metálicos	Accites
Drenaje superficial	***	**	***
Agua de enfriamiento de uso directo	***	***	*
Agua de enfriamiento de uso indirecto	*	*	
Lixiviación en circuito abierto	***	***	*
Tanques de celdas electrolisis			
Sistema de lavado de gases	***	***	
*** más significativo			

Fuente: Elaborado en base a IPPC, 2000.

Con relación a la cantidad de agua consumida por mineral tratado, ésta puede variar, según mina y concentrado entre 0,4 y 1,2 m³/tonelada de mineral procesado (PROCEMIN², 2004), advirtiéndose un sostenido descenso en su consumo de acuerdo a Galáz (2004), que observó esta tendencia en el agua utilizada por la División Norte de CODELCO, a fines de la década de los 80, y que hoy sitúa su consumo en torno a los 0,6m³/t de mineral tratado.

En el caso de las grandes minas de cobre chilenas, las plantas concentradoras, consideradas las mayores consumidoras de agua dentro del proceso de elaboración del Cu, recuperan entre un 30 y 80% del agua, dependiendo de las características específicas de los procesos. De los datos disponibles y citados por Lagos (1997), el consumo de agua por tonelada de mineral tratado (mineral que ingresa a las plantas concentradoras) varía de 0,36 m³/t (por tonelada seca) para el caso de la mina Candelaria o 0,4 m³/t después de la ampliación proyectada de Pelambres³ a 0,68 m³/t en el caso de Minera Escondida⁴, y aproximadamente 1,0 m³/t en el caso de otras grandes instalaciones mineras (Lefort, 1996 en Lagos, 1997). En plantas concentradoras de tamaño mediano pequeño (>120 t/día) hay

¹ La II Región de Antofagasta se extiende por el Norte, desde los 21°28' hasta aproximadamente los 25°40' de latitud Sur.

² En aguas superficiales, fueron observadas concentraciones de As en un rango entre 1,4 y 2,5 mg/L. Romero *et al.* (2003)

³ PROCEMIN. III Taller sobre Procesamiento de Minerales. Depto. de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile.

⁴ Antofagasta Minerales

⁵ BHP Billiton

cifras que sitúan el consumo entre 1,3 a 1,4 m³/t de mineral, mientras que en plantas menores que 120 t/día en general no se recupera agua y el consumo puede llegar a 2,1m³/t (Luna, 1991, citado en Lagos, 1997).

Para tratar este tipo de aguas, aunque ya existan diversas tecnologías, éstas están disponibles en la mayoría de los casos, a una escala menor o como proyectos pilotos. Entre las existentes se mencionan las nombradas por Blöcher *et al.* (2003), que permiten controlar contaminantes como metales pesados, incluyendo el Cu basadas en métodos físico-químicos -precipitación de los contaminantes como hidróxidos, carbonatos o sulfuros, la sorción (adsorción, intercambio iónico), las membranas, la recuperación electrolítica, la extracción líquido-líquido y la flotación-. Además de estos existen métodos biológicos, como los biorreactores y los humedales artificialmente construidos, que usan materia orgánica como sustrato.

1.2. Alternativas de tratamiento de efluentes mineros y su uso en Chile

En el contexto de la diferentes etapas del proceso de elaboración del cobre y específicamente del modelo utilizado en Chile, la concentración, que es la base del proceso de recuperación de minerales sulfurados, consume, entre un 60 y un 80% del agua total a ser utilizada en todo el proceso, variando la cantidad, también de acuerdo a la ley del mineral a ser explotado (Lagos, 1997). En este marco, el presente documento se centrará en las aguas residuales generadas en esta etapa del proceso, por entenderse, que la cantidad y calidad de estos efluentes son las que producen mayor impacto y a la vez, permiten una visión del proceso en general.

En Chile, la gran minería, reutiliza hasta un 80% de estas aguas, conocidas como "aguas claras" que se caracterizan por contener una alta concentración de sulfatos, y que son almacenadas como relaves. La cantidad promedio de generación de relaves alcanza las 28 toneladas por cada tonelada de concentrado de cobre producido. (Andía y Lagos, 2000). La eliminación de los sulfatos existentes en estas aguas se realiza a través de procesos **químicos** vía precipitación de minerales de azufre, procesos **biológicos**, a través del uso de **membranas** y por **intercambio iónico**. (INAP, 2003).

Los tratamientos **químicos** de desulfatación que suponen precipitación, (precipitación, coagulación y sedimentación, etc.) consisten fundamentalmente en la reacción del sulfato presente en la solución y su transformación a otras formas minerales insolubles como el sulfato de calcio, por ejemplo (Herrera, 1992). Por lo general, este tipo de tratamiento es de bajo costo, pero tiene como principal desventaja, la producción de grandes cantidades de residuos sólidos. Entre dichos métodos se destacan, la adición a las aguas residuales, de Cal o caliza, método utilizado tradicionalmente en los procesos mineros desarrollados en Chile para neutralizar el agua ácida de mina, y de Sales de Bario que disuelven los sulfatos en todos los rangos de pH, el proceso SAVMIN[®], que se caracteriza por sucesivas etapas de precipitación, que empieza con la adición, al agua residual, de cal, un sembrado con cristales de yeso, adición de hidróxido de aluminio y finalmente un tratamiento con CO₂, y el proceso CESR (cost effective sulphate removal), similar al anterior difiriendo de aquél, por utilizar un reactivo especial, derivado del cemento, en lugar del hidróxido de aluminio. (INAP, 2003). De estos en Chile se utiliza la Cal y las sales de Bario, no existiendo información del uso, a escala industrial, de los demás.

Para la remoción del Arsénico del agua residual, CODELCO Chile⁷ ha patentado un proceso que oxida con O₂ las especies Fe+2 y As+3 a Fe+3 y As+5, y con la adición de Cal ajusta el pH, con lo que logra precipitar el Arsénico como Arseniato Férrico y posteriormente lo inmoviliza en una matriz de Yeso.

La eliminación **biológica** de sulfatos consiste en la reducción del sulfato de la solución, mediante el desarrollo anaeróbico de microorganismos (bacterias) reductores de sulfato (BRS), como los del género *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum*, *Desulfomonas*, *Desulfobacter*, *Desulfobulbus*, *Desulfococcus*, *Desulfonema*, *Desulfosarcina*, *Thermodesulfobacterium*, etc. cada uno con diversas especies. En observaciones experimentales, se demostró que esta operación llega, fácilmente, a una eliminación del 100% del sulfato, sin embargo, el producto de la reacción, ácido sulfhídrico, podría generar problemas ambientales más graves que el sulfato inicial, lo que reduce la efectividad del método. La operación de estas bacterias en sistemas de gran escala y con medios no controlados es escasa. (Lienqueo *et al.*, 1992). Este tipo de tecnología se utiliza en biorreactores y como humedales artificiales o construidos, pero todavía no está disponible comercialmente a gran escala. Es utilizada para el tratamiento y

⁶ Método desarrollado en Sudáfrica, por Savannah Mining, Mintek y Wren Group

⁷ Corporación Chilena del Cobre. Empresa estatal, junto a Escondida, las dos mayores productoras de cobre de Chile.

reciclado de efluentes. Se aplican a contaminantes de tipo inorgánicos (NO_3^- , PO_4^{3-} , CN^- , H_2S), orgánicos (DBO, DQO, VOCs, SVCOs), a disoluciones, suspensiones y contaminantes de tipo biológicos (Byers *et al.*, 1995).

De acuerdo a lo descrito por Lienqueo *et al.*, (1992), la factibilidad técnica del proceso quedó establecida como una posibilidad a ser implementada en Chile, cuando este fue utilizado para tratar aguas claras de relave de El Teniente (CODELCO) en estudios experimentales de larga duración (varias semanas). La evaluación del impacto ambiental del proyecto resultó positiva (con sólo un punto negativo: el riesgo de emanaciones de ácido sulfhídrico); pero, la factibilidad económica, basada en los substratos orgánicos utilizados en la investigación a escala laboratorio, aumentaban de forma considerable los costos y en este marco, reducían su aplicación.

Como procesos alternativos a los métodos tradicionales de precipitación y sorción mencionados, cada vez más se está considerando el uso de las técnicas del filtrado por medio de **membranas**, e incluso la combinación de ambos (Blöcher *et al.*, 2003), como forma de eliminar la concentración de metales pesados, aniones, sólidos en suspensión, aceites, conductividad y bacterias, entre otros, de los efluentes mineros (Byers *et al.*, 1995). Las membranas se utilizan, aunque de manera diferente en cada uno de ellos, en dos tipos de procedimientos comerciales de tratamiento de aguas: la osmosis inversa (OI) y la electrodiálisis (ED).

En la primera, el transporte del agua a través de la membrana de tipo semi permeable, permite solamente el paso del agua por medio de presión. Se usa tanto para reducir la concentración de contaminantes, como para el tratamiento y reciclado de efluentes líquidos. De este método se deriva, otro, el Proceso SPARRO (Slurry precipitation and recycle reverse osmosis), que corrige las fallas de aquél a fin de, principalmente prevenir la precipitación de los minerales en la membrana. (INAP, 2003). La osmosis inversa es utilizada en Chile, por la fundición Alto Norte⁸, localizada en la II Región, como método de tratamiento de las aguas del proceso, en una planta con una capacidad de 6,4 L/s. De los cerca de 270 mil m^3 de agua utilizada en la fundición de cobre, el 7% es tratado por medio de este sistema. La empresa fundió, al año 2004, 270 mil toneladas de cobre.

En el segundo caso, la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico es la fuerza impulsora que posibilita el transporte de iones disueltos de la solución a través de la membrana.

El mayor inconveniente de adoptar estas tecnologías se relaciona, por un lado, con la necesidad de mantenimiento de las membranas y por el otro, del acondicionamiento de la membrana en sí, cuando ésta deja de ser funcional. Sin embargo, pese a lo anterior, Into *et al.*, (2004) en un estudio en el cual se utilizó la osmosis inversa para tratar el agua de un parque industrial en Suecia, cuya composición era básicamente TPM (trimethylolpropano), ácido fórmico, metanol y formaldehídos concluyen que los costos finales se reducen toda vez que el costo operativo de la utilización de esta técnica, es menor.

El método GYP-CIX es una tecnología de **intercambio iónico**, de bajo costo, utilizada para la eliminación de sulfatos, calcio, magnesio y otros iones del agua residual y también de contaminantes orgánicos (Byers *et al.*, 1995). Como productos del proceso, se generan, además del agua, sólidos de yeso potencialmente comercializables. La empresa minera Angloamerican ha implementado una planta piloto utilizando el método GYP-CIX en Sudáfrica, según se informa en su Reporte de Salud y Medio Ambiente del año 2000, siendo este el único reporte de uso industrial del método.

En un estudio elaborado por McNeef (*s/f*), en el cual se compararon los tratamientos cuya aplicación a escala comercial ya han sido comprobados, de los ocho analizados y aquí mencionados, dos han sido implementados sólo a nivel de plantas piloto. Entre los demás, el uso de la cal sigue siendo el de menor costo, pero sin duda el menos eficiente en cuanto a la calidad final del agua y la cantidad de residuos que genera su uso. Entre los métodos que utilizan membranas, hay que considerar además como parte de los costos, la gestión de las membranas como residuo y del agua salada, que debe ser tratada antes de ser vertida en el ambiente.

Con relación al agua salada, Pilson *et al.*, (2000), que evaluaron técnica y económicamente diferentes opciones de tratamiento para fuentes de efluentes puntuales de la minería del oro, utilizando diferentes estrategias para controlar la salinidad del agua, sugieren que los métodos que actualmente existen a escala comercial, son más efectivos y resultan económicamente más atractivos, cuando son complementados con infraestructuras de apoyo a la gestión del efluente, como canales, lagunas de decantación y precipitación, etc.

⁸ Falconbridge

Por otro lado, el boletín N° 3, publicado por la empresa Geo-Enviro Pty Ltda. de Australia (2001), se refiere específicamente a la gestión de la salinidad del agua en la industria minera, y advierte que, independientemente de la eficiencia de la operación en sí, los efluentes generados a partir de este tipo de aguas siempre presentan altas concentraciones de sales disueltas, lo que exige técnicas de tratamiento que consideren este factor. Esta empresa sugiere que el agua salada sea tratada antes del final del proceso, en un punto intermedio, entre el reciclado y reuso, dado que, cada vez que retorna al proceso, la salinidad aumenta, lo que rompe este ciclo y permite emitir un efluente de mejor calidad.

1.3. Un ejemplo práctico

Como forma de ejemplificar la situación de Chile en materia de tratamientos de las aguas residuales de la minería, se presenta el caso de Minera Los Pelambres⁹.

Se localiza en la IV Región, a 31°43' de Latitud S y 70°29' Longitud W, a 3.200 m.s.n.m. El mineral se procesa por flotación en distintas instalaciones. La empresa produce concentrado de Cobre y Molibdeno. El proceso incluye etapas de chancado, molienda, flotación en celdas y filtrado seco. Los relaves generados son almacenados en un tranque, y el concentrado, es conducido por un minero de 120 Km, hasta la planta de filtración localizada a orillas del mar, a un terminal de acopio y las instalaciones del embarque. La producción de Cu al año 2004 alcanzó las 500 mil toneladas.

La calidad del agua residual sin tratamiento derivada del procesamiento del mineral de Cu, se presenta en la Tabla II.

Tabla II: Calidad del agua residual, Minera Los Pelambres

Parámetro Vigente	Fuente	Rangos (mg/L)	Límites de descarga según Norma			
			a río (SD)	a río (CD)	a mar	riego
Mo Disuelto	Disolución de óxidos de Mo durante concentración de Cu Lixiviación de molibdenita en descobricación de concentrados	0,5-30,0	1,0	2,5	0,1	0,01
Sólidos en suspensión	Producción de ultrafinos en molienda que no decantan en Sedimentadores.	30-200	80	300	100	
Cu en suspensión	Producción de ultrafinos e hidróxidos de residuos de lixiviación (idem fierro)	10-30	1	3	1	0,2
Sulfuro disuelto	Adición de NaHS como reactivo depresante de Cu en flotación de molibdenita	10-60	1	10	1	
Sulfato	Disolución de sales de sulfato de mineral o adición de H ₂ SO ₄ para ajuste de pH de flotación de Mo	100-2.100	1.000	2.000		250
Cloruro	Utilización de FeCl ₃ en lixiviación de concentrado de Mo	100-800	400	2.000		200
Sodio	Utilización de NaSH (depresante) y NaOH como neutralizante	100-600				35%
Sólidos disueltos	Iones disueltos muy solubles. Principalmente SO ₄ ⁻² , Na ⁺ , Cl ⁻	200-3.000				500
Conductividad	Disolución de cloruro, sulfato, pH alto o bajo	200-4.000				750
pH	Flotación pH alcalino	10-12	6,0-8,5	6,0-8,5	6,0-9,0	5,5-9,0

Fuente: Ministerio de Minería, 2002.

Con relación a los métodos de tratamiento de los RILES, minera Los Pelambres analizó diferentes métodos y optó, finalmente por el de coagulación/precipitación y de Flotación por Aire Disuelto o FAD. En la decisión se tomaron en cuenta factores como el costo de implementación, operación y de mantenimiento y la calidad del agua a ser tratada, que, de acuerdo a los datos de la Tabla II, superaban los límites normados de acuerdo a la legislación chilena (NCh 1333).

⁹ Antofagasta Minerals

En el año 2000, entró en marcha la planta de tratamiento de efluentes líquidos, que tiene por objetivo remover del agua sulfuros y Molibdeno disueltos y utiliza la metodología antes señalada. El proceso se desarrolla en dos etapas: en la primera se reduce el contenido de sulfuro del efluente desde 2,5 a ~1 mg/L, precipitando el sulfuro de hierro (FeS), el cual, luego de su coagulación y floculación, se separa del líquido a través de FAD. En la segunda, el agua tratada en la primera es captada, y se reduce el Molibdeno disuelto a valores menores de 0,01 mg/L. El agua flotada en esta etapa es filtrada para reducir el contenido de sólidos desde 10 a 5 mg/L, asegurando un contenido de Molibdeno total menor a 0,05 mg/L y un aspecto transparente e incoloro en el agua. En la tabla III se presenta de forma resumida, la calidad final del agua, medida entre los años 2000 y 2001.

Tabla III: Calidad del agua tratada en planta de RILES

Periodo	Elementos								
	Flujo L/s	Mod mg/L	Fed mg/L	Cud mg/L	Solidos mg/L	Ph mg/L	Cloruros mg/L	FeCl3 mg/L	Lodos Kg/día
Alimentación	19	2,54	2,1		15	7,4			
Efluente tratado	19	0,010	2,2	0,14	10	6,6	183	23	100
NCH 1333		0,01	5,0	0,2	500	5,5-9,0	200		

Fuente: Ministerio de Minería, 2002.

2. CONCLUSIÓN

Tomando como referencia otros documentos que respaldan la percepción de que en Chile se avanza en la adopción de métodos de tratamiento de efluentes mineros, se menciona que entre los objetivos del Acuerdo Marco de Producción Limpia firmado en el año 2000, por el sector minero chileno, se plantea el de identificar tecnologías aplicables a la optimización del consumo del agua. En este marco, al año 2004 se publicó un estudio cuyos resultados fueron presentados en el PROCEMIN (2004), que dan cuenta de que existirían once tecnologías aplicables al contexto minero chileno, estando entre ellas, sólo algunas listadas por el INAP (2003) y mencionadas anteriormente. El estudio supone que con la aplicación de estas tecnologías, el consumo de agua podría llegar a ser menor a 0,5 m³/t de mineral tratado en el proceso de concentración y 0,25 m³/t de mineral tratado por lixiviación.

Dichas tecnologías fueron clasificadas, según grado de aplicación, en alto, medio y bajo. Entre las primeras se menciona el control automático de sistema de espesaje, la recirculación de aguas desde depósitos de relaves lejanos, el filtrado de relaves y el espesaje extremo (deep thickening). Con un mediano grado de aplicabilidad, el tratamiento por biorremediación de efluentes contaminados, el monitoreo permanente de consumo y la molienda seca y centrifugado neumático. Como tecnologías de bajo grado de aplicación, el control de drenaje de las pilas de lixiviación, la optimización de consumos en mina, el soplado y extracción desde acuífero de tranques de relaves y el uso de tuberías porosas.

Las tecnologías consideradas con alto grado de aplicación, suponen un costo de inversión que varía desde los 20KUS\$ (control automático de espesaje) a los 800KUS\$ (L/s) (espesaje extremo, que requiere altas inversiones en infraestructura), y un costo de operación entre los 0,3cUS\$/m (recirculación de aguas desde depósito de relaves lejanos, sólo aplicable a faenas con diferencias de cotas y grandes distancias entre el tranque y el espesador) y los 5cUS\$/m (control automático de espesaje, que demanda una gran cantidad de insumos de alto costo como floculantes, energía y mantención).

Las demás tecnologías fueron catalogadas como de mediana o baja aplicabilidad debido, principalmente a los altos costos de implementación y operación involucrados, dificultad de aplicación relacionadas con las características de las faenas, especialmente su antigüedad o bien porque la tecnología respectiva sólo ha sido aplicada a escala piloto.

Con relación a los métodos de tratamiento en uso, en el mismo estudio señala que el 56% de las faenas de las 17 empresas miembros del Consejo Minero¹⁰, somete a algún tipo de tratamiento, los residuos líquidos generados en la

¹⁰ Consejo Minero. Asociación gremial que agrupa las mayores empresas productoras de Cobre de Chile.

operación, considerándose como tales, los provenientes de diferentes procesos minero-industriales y las aguas servidas de carácter doméstico de faenas y campamentos. Un 67% de los efluentes es tratado y depositado o recirculados al proceso. De los demás 33%, no se dispone información sobre su gestión; y entre los métodos de tratamientos utilizados se mencionan la Separación Gravitacional, la Neutralización y Decantación, la Separación y Disposición Controlada de aceites, la Filtración y Evaporación, la Remoción de Sólidos Suspendidos, el Abatimiento de Iones y la Flotación por Aire Disuelto.

De acuerdo a lo anterior y en el marco de la información y datos analizados, se concluye entonces, que en el contexto minero chileno aunque ya se detecta, a la fecha, un avance en la utilización de tecnologías dirigidas al tratamiento de los efluentes y a la reutilización del agua, estas serían más bien iniciativas aisladas entre las que se destacan Fundición Alto Norte y Minera Los Pelambres. Dichas iniciativas responden a la necesidad de ampliar la disponibilidad del recurso y a la dificultad o imposibilidad, especialmente en el caso de las localizadas en la zona norte del país, de incorporar nuevas fuentes a su proceso productivo, lo que impacta el proceso en sí y sus respectivas posibilidades de expansión, que dada la sostenida alza que el valor del cobre ha percibido en el último año, es una realidad cada vez más urgente, desde el punto de vista del negocio.

La mayoría de las empresas reusa el agua hasta que esta pierde sus características para finalmente depositarla en tranques, con reducidas posibilidad de utilización para otros fines como el riego. A modo de ejemplo, sólo en la División Norte CODELCO, el consumo de agua de los años 2003 y 2004, alcanzó, en ambos años cerca de 55 millones de m³ con una proporción mayor a un 80% de reuso y/o reciclado y un 6% de descarga (lo demás se pierde por evaporación y como humedad del producto, principalmente), cantidad que alcanza a más de 3 mil millones de m³ al año, y equivalen a un 15% de la demanda bruta anual de riego para la II Región, que para el año 2017, alcanzaría los 20 mil millones de m³, según estimaciones de la Dirección General de Aguas (2004). Es importante señalar que esta División de CODELCO ha alcanzado niveles por sobre el promedio de las empresas del sector en relación a la eficiencia del uso del agua.

La adopción de tecnologías de tratamiento, generalmente requiere obras de infraestructura, cambios en el proceso productivo respectivo y sistemas de gestión *ad hoc*, todos intensivos en recursos financieros y capital humano, situación que va en desmedro de su aplicación, por lo menos en el contexto minero chileno, que si bien es cierto percibe al recurso como escaso, no está todavía dispuesto a invertir en su tratamiento para su reutilización más allá que para el uso en su propio proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bartos, P.J. SX-EW Copper and the Technology Cycle. *Resources Policy* 28: 85-94, 2002.
- Byers, W., Doerr, W., Krishnan, Peters, D. How to implement industrial water reuse: a systematic approach. Center for Waste Reduction Technologies. American Institute of Chemical Engineers. USA, 1995.
- Blöcher, C., Dorda, J., Mavroy, V., Chmiel, H., Lazaridis, N.K., Matis, K.A. Hybrid flotation- membrane filtration process for the removal of heavy metal iron from wastewater. *Water Research* 37: 4018-4026, 2003.
- Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad Cuenca Río Loa. Santiago, Chile, 2004.
- European Commission, Joint Research Centre. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference document on best available techniques in the non ferrous metals industries. 2000.
- International Network for Acid Prevention, INAP. Treatment of Sulphate in Mine Effluents, 2003.
- Into, M., Jönsson, A., Lengdén, G. Reuse of industrial wastewater following treatment with reverse osmosis. *Journal of Membrane Science* 242: 21-25, 2004.
- Geo-Enviro Pty. Ltda.. Salinity management in mining industry meeting the challenge today. Boletín N° 3, 2001. En www.geo-processors.com.au consultada en enero, 2005.

Galáz, Juana. (2004). Efficient use of water in ore processing. III Taller de Procesamiento de Minerales. Departamento de Minería. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Herrera, Leandro. "Tratamiento de Residuos Mineros Líquidos y Sólidos". Laboratorio de Ingeniería de Procesos de Descantaminación. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 1992.

Lienqueo, M. E., J. Casas, B. Escobar, J. Hernández y L. Herrera. "Generación y remoción de sulfatos en la minería del cobre", presentado al I Taller de biotecnología ambiental. Concepción, Chile, octubre, 1992.

Lagos, Gustavo y Marcelo Andía. Análisis de sensibilidad del valor del EDRC. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile, 2000.

Lagos, Gustavo. Eficiencia del uso del agua en la minería del cobre. Centro de Estudios Públicos, Documentos de Trabajo N° 273. Santiago, Chile, 1997.

Lazardis, N.K., Peleka, E.N., Karapantsios, Th.D., Matis, K.A. (2004) Copper removal from effluents by various separation techniques. Hydrometallurgy 74: 149-156.

Ledim, M y K. Pedersen. The environmental impact of mine wastes. Roles of microorganisms and their significance in treatment of mine wastes, Earth-Science Reviews. 4:1 67-108, 1996.

Liu, W.X., Cobeney, R.M. Chen, J.L. Environmental quality assessment on a river system polluted by mining activities. Applied Geochemistry, 18: 749 -764, 2003.

López- Ramírez, J.A., Sahuquillo, S., Sales, D., Quiroga, J.M. Pre-treatment optimization studies for secondary effluent reclamation with reverse osmosis. Water Research 37: 1177-1184, 2003.

McNee, J. A review of sulphate treatment technologies for mine drainage and a heap leach facilities. Documento presentado en el Taller Heap Leaches Closure, Nevada. USA, s/f.

Ministerio de Minería, Consejo Minero, Subsecretaría de Economía, Consejo Nacional de Producción Limpia. "Gestión de Residuos Industriales Líquidos Mineros y Buenas Prácticas". Santiago, 2002.

Pilson, R., van Rensburg, H.L., Williams, C.J. An economic and technical evaluation of regional treatment options for point source gold mine effluents entering the Vaal Barrage Catchment., Final report, 2000. <http://www.fwr.org/index.htm> consultada en enero 2005.

PROCEMIN. III Taller sobre Procesamiento de Minerales. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile. Uso eficiente del agua en procesamiento de minerales. Santiago, Chile, 2004.