

# PRINCIPALES PROBLEMAS AMBIENTALES EN MINERÍA Y SUS SOLUCIONES TECNICAS

Mario A. Sánchez M.  
(msanchez@udec.cl)

Depto. Ing. Metalúrgica - Universidad de Concepción

*Intervención realizada en el marco del X CONAMET realizado en Universidad de Atacama*

## RESUMEN

Entre nuestros recursos naturales, la minería sigue siendo la principal riqueza y por de pronto la principal fuente de exportación primaria. Chile es reconocido mundialmente por sus recursos mineros catalogados y por su capacidad de producción de concentrados y metales. Aún hoy día, si consideramos los efectos de crisis económicas externas y las variaciones normales a las cuales está sometida nuestra economía, las grandes inversiones de capitales en nuestro país se siguen haciendo en minería. El descubrimiento de nuevos recursos y la puesta en marcha de nuestras plantas procesadoras avalan estas afirmaciones y confirman nuestro carácter de país minero.

La globalización de las actividades del mundo de hoy y la inserción de nuestro país en los mercados internacionales exige, sin embargo, cumplir con reglamentaciones que aseguren el cumplimiento de estándares comunes de comportamiento ambiental.

La industria minero metalúrgica en todo el mundo, es una de las actividades más contaminantes, y por de pronto requiere de una es-

pecial atención en el inmediato, mediano y largo plazo. En el plazo inmediato, la atención debe centrarse en el tratamiento de efluentes contaminantes y en el largo plazo en el desarrollo de nuevas tecnologías no contaminantes o las llamadas "tecnologías limpias". Es sin duda en este último caso en que las inversiones intelectuales y económicas son mayores y requieren de una gran predisposición de personas e instituciones ligadas a la minería y la metalurgia.

En el presente trabajo, de carácter de revisión, se muestran los principales contaminantes asociados a esta industria, sus efectos y algunas de las soluciones técnicas propuestas.

## INTRODUCCION

La minería constituye un sector que ha evolucionado rápidamente estos últimos años, particularmente por efecto de los fenómenos de globalización en los negocios mineros. Para nadie es desconocido las notables innovaciones tecnológicas en esta área, que permiten aprovechar hoy día minerales de muy baja ley. Sin embargo, este hecho ha tenido efectos importantes en el manejo y disposición de resi-

## Contribuciones Científicas

duos asociados a las nuevas explotaciones (1). Solamente en Chile, se estima que para producir una tonelada de cobre metálico como producto final, se producen alrededor de 350 toneladas de estéril, 140 toneladas de mineral de baja ley, 66 toneladas de colas, 57 toneladas de residuos de lixiviación y 0.8 toneladas de escorias (2).

El desarrollo sustentable exige hoy el alcanzar tres mínimos y un máximo: minimización del uso de la energía, del consumo de materiales y del impacto ambiental; y maximización de la satisfacción social (3). Ello significa definir claramente las fuentes energéticas a utilizar, teniendo en cuenta su impacto ambiental, su uso y distribución. Planificar en forma adecuada la extracción, procesamiento y manufactura de los materiales, recuperar los subproductos, reciclar cuando sea factible y diseñar sistemas alternativos de sustitución de materiales. No debemos olvidar que toda producción industrial tiene un impacto ambiental y por de pronto éste es inherente al ser humano. Sin embargo la sociedad necesita asegurarse una producción de minerales y metales de la industria minero-metalúrgica, el desafío es entonces mayor al incrementar los niveles de producción de estos materiales.

Hacemos corrientemente una diferencia entre Tecnologías Limpias y Tecnologías de Limpieza. La última ataca fundamentalmente los efluentes para disminuir los efectos finales (tecnología "end-of-pipe"), mientras que la primera ataca las causa y es por ellos una tecnología innovadora que significa muchas veces repensar completamente un proceso de producción.

La Tabla N° 1 muestra una comparación de impactos de diferentes efluentes, de acuerdo a la etapa de producción.

De esta Tabla podemos ver que los mayores impactos se producen en las primeras etapas de extracción (movimientos de tierra, erosión de suelos, filtraciones de aguas de minas, disposición de relaves, etc.) y procesamiento (generación de ácidos, efluentes conteniendo metales pesados, disposición de sólidos, generación de gases contaminantes, etc.).

Un concepto de Prevención de la Polución (P2), debe considerar la reducción máxima de efluentes durante el proceso, privilegiando la reducción en las fuentes, como se muestra en la Tabla 2. Sin embargo estas acciones son las de más alto costo intelectual (repensar el proceso) y económico (rehacer el proceso). Le siguen como menos prioritarias el reciclaje, el tratamiento y finalmente la disposición. Esta última corresponde a asumir un efluente como subproducto final no recuperable, al menos en la etapa en que se desarrolle el proceso de extracción.

### PRINCIPALES PROBLEMAS AMBIENTALES EN MINERIA

Los contaminantes potenciales en minería pueden clasificarse en contaminantes del agua y contaminantes atmosféricos (4).

Los contaminantes asociados al agua pueden incluir ácidos, mercurio, metales como iones o complejos de cobre, plomo, zinc, níquel, hierro, arsénico, cadmio, tiosulfatos, compuestos politionatos (también resultantes del agua

Tabla 1. Diferentes etapas de producción: Efluentes e Impactos

ETAPA	TIERRA	AGUA	AIRE
Extracción	Alto	Alto	Medio-Alto
Procesamiento	Mediano-Alto	Medio-Alto	Alto
Fabricación	Bajo	Bajo	Alto
Manufactura	Bajo	Bajo	Bajo

## Contribuciones Científicas

**Tabla 2.** Diferentes Opciones para la Prevención de la Polución

OPCION ADMINISTRATIVA	EJEMPLO ACTIVIDADES	EJEMPLO APLICACIONES
Reducciones en Fuentes	Modificaciones en proceso cambios tecnológicos cambios en material de entrada cambio en producto  mejora en procedimientos operativos	Modificaciones en equipo/tecnología aumento eficiencia del uso de energía y agua aumento recuperaciones  minería in situ uso de materiales no tóxicos
Reciclaje	Reutilización Reciclaje en circuito cerrado	reciclaje de solventes reprocesamiento de colas recuperación de aguas de proceso
Tratamiento	Estabilización Neutralización Precipitación- evaporación Incineración	destrucción de cianuros tratamiento aguas desechos
Disposición	Disposición en sitios permitidos	disposición en relaves

ácida de mina), cianuro de sodio (de recuperación de oro), reactivos de procesos (orgánicos espumantes y colectores de flotación, entre otros), aceites utilizados en máquinas y lubricación, sólidos en suspensión (desde coloides hasta sedimentables).

Los contaminantes asociados a la atmósfera pueden incluir polvos de suspensión, gases producidos durante procesos de combustión u oxidación a altas temperaturas con contaminantes como monóxido y dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, entre otros.

La descripción anterior se resume en la Figura N° 1 siguiente donde se muestran los principales efluentes contaminantes asociados a las distintas etapas de la industria minero-metalúrgica.

Los efluentes gaseosos están asociados

a las fundiciones y al día de hoy existen tecnologías conocidas para el tratamiento del anhídrido sulfuroso contenido (plantas de ácido sulfúrico). Las soluciones acuosas tienen fundamentalmente contaminación por sustancias ácidas y reactivos orgánicos, dependiendo la etapa de proceso en cuestión. Particular atención se hace al drenaje ácido de mina, uno de los principales agentes de contaminación en la actualidad (5).

## Contribuciones Científicas

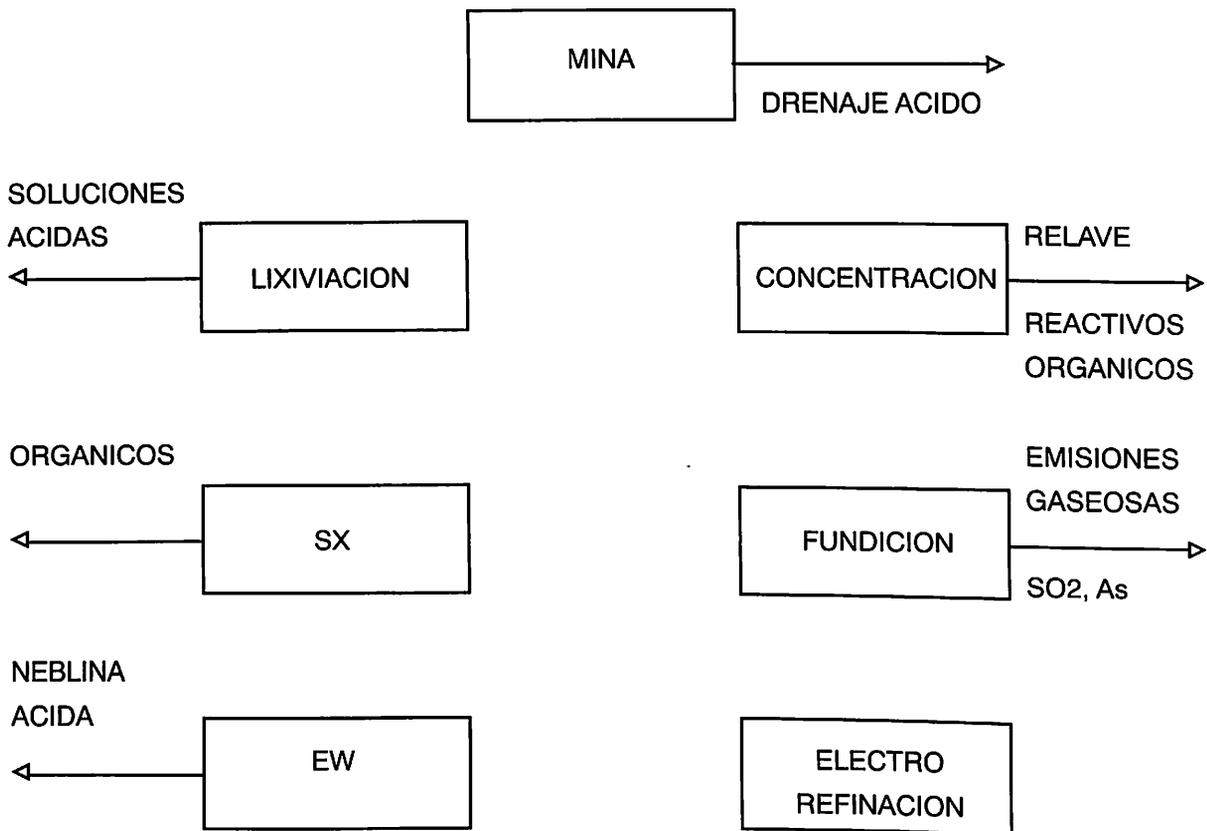


Fig. N 1. Principales efluentes contaminantes de la industria minero-metalúrgica.

### SOLUCIONES TECNICAS A LA CONTAMINACION MINERO-METALURGICA

Desde un punto de vista práctico, las soluciones a los problemas de contaminación en la industria minero-metalúrgica se pueden dividir en el tratamiento de emisiones gaseosas, tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos y tratamiento de lodos.

El tratamiento de emisiones gaseosas sigue, en términos generales, la pauta mostrada en la Figura N° 2.

El anhídrido sulfuroso se trata a la forma clásica, en una planta de ácido, lo que permite también, mantener asociada a una fundición, una producción de ácido sulfúrico que, a la larga cumple dos objetivos: descontaminar los efluentes gaseosos y disponer volúmenes im-

portantes de ácido para ser utilizado en la extracción hidrometalúrgica de diferentes especies de minerales (óxidos, sulfatos y algunos sulfuros sensibles a esta técnica).

Probablemente las soluciones pendientes importantes en los efluentes gaseosos son la neutralización de compuestos arsenicales y la retención de material particulado altamente contaminante.

En la actualidad existen numerosos desarrollos que apuntan a estos problemas, particularmente a la neutralización de arsénico en los minerales y o concentrados (1,3). Básicamente la técnica consiste en neutralizar el arsénico como arsenatos de hierro o de calcio, de acuerdo a las reacciones (1) y (2) que se muestran a continuación:

## Contribuciones Científicas

### TRATAMIENTO DE EMISIONES GASEOSA DE FUNDICIONES

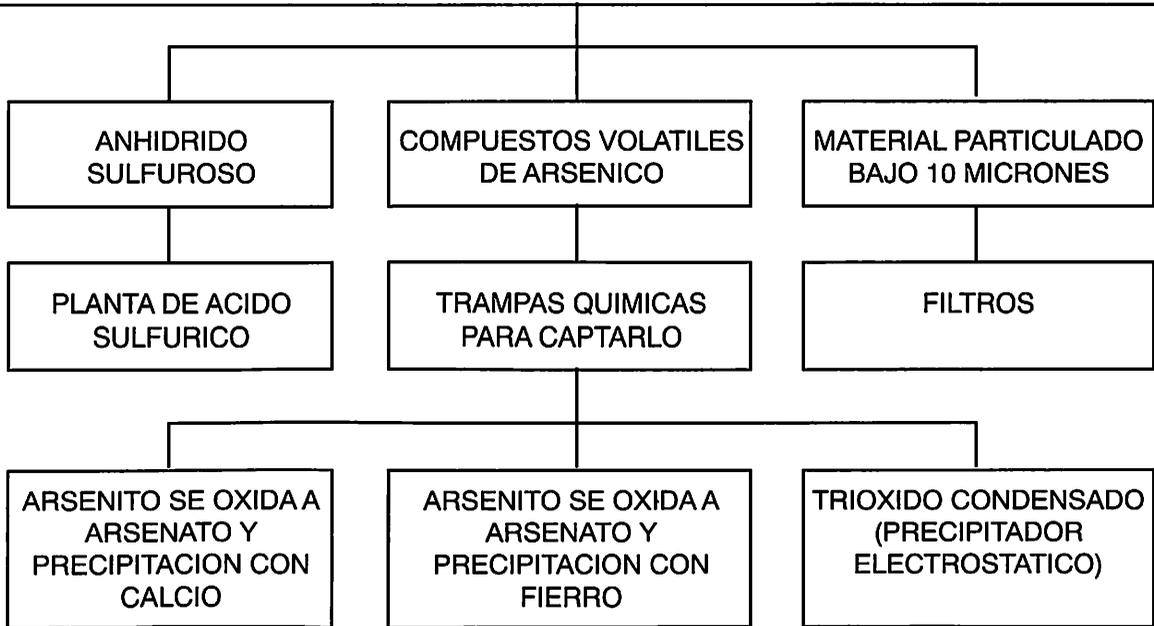
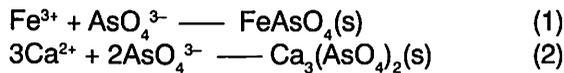


Figura Nº 2. Tratamiento de Emisiones gaseosas de Fundiciones.



Como puede apreciarse, se requiere que el arsénico sea oxidado previamente de  $\text{As}^{3+}$  a  $\text{As}^{5+}$ . Para ello debe utilizarse algunos oxidantes energéticos, además del precipitante, como agua oxigenada, nitrato u ozono.

Sin embargo, ninguno de los dos precipitados es lo suficiente estable, y tienden a descomponerse o a formar nuevos compuestos, liberando especies solubles de  $\text{As}^{5+}$ .

La situación de los contaminantes contenidos en efluentes líquidos se puede resumir en las Tablas 3 a 8 siguientes, de acuerdo a los constituyentes contaminantes que aparecen con mayor frecuencia.

## Contribuciones Científicas

**Tabla 3.** Tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos (cobre)

EFLUENTE	TRATAMIENTO
Riles Industriales	Electrodeposición catódica Complejación
Residuos hidrometalúrgicos	Extracción por solventes Extracción por intercambio iónico
Aguas claras	Intercambio iónico
Aguas de descarte	Evaporación solar
Desagües de minas	Biosorción por biomasa
Soluciones acuosas	Biosorción en plantas acuáticas Adsorción en biopolímeros Adsorción bacteriana Electroobtención y recuperación de polvo de cobre desde soluciones diluidas Optimización de operación de planta de tratamiento
Riles de procesos de niquelado	Ósmosis inversa, evaporación
Aguas de Lodos	Extracción ácida de iones
Drenaje ácido de mina (DAM)	Predicción de formación de DAM para ubicar botaderos de colas.

**Tabla 4.** Tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos (Arsénico)

EFLUENTE	TRATAMIENTO
Drenaje Alcalino	Evapoconcentración, adsorción en óxido de hierro
Aguas de Ríos	Flotación FAD
Riles industriales	Precipitación con SX-44 Adsorción en polvos de Fe Sedimentación, adsorción en oxihidróxido de Fe
Aguas contaminadas	Adición de polímeros, membrana de ultrafiltración
Solución ácida	Recuperación de ácido y precipitación de arsénico a pH neutro
Efluentes hidrometalúrgicos líquidos	Adsorción con hidróxido férrico Inmovilización como escorodita Biooxidación del mineral previo tratamiento Oxidación con ozono y coprecipitación con manganeso

## Contribuciones Científicas

**Tabla 5.** Tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos (cianuros)

EFLUENTE	TRATAMIENTO
Aguas claras de relaves	Neutralización con NaClO, precipitación alcalina
Riles industriales	Acidificación, filtración, reneutralización
Soluciones de descarte	Oxidación con O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , radiación UV
Aguas residuales	Adsorción en membrana saturada en gas y neutralización con NaOH Neutralización por hidrólisis alcalina
Riles de níquelado	Osmosis inversa, evaporación
Colas de flotación de oro	Reemplazar el cianuro por tiurea como agente complejante

**Tabla 6.** Tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos (molibdeno)

EFLUENTE	TRATAMIENTO
Drenaje alcalino	Evapoconcentración, adsorción en óxido de hierro
Agua clara de relave	Intercambio iónico

**Tabla 7.** Tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos (sulfatos)

EFLUENTE	TRATAMIENTO
Aguas de descarte	Evaporación solar
Riles industriales	Adición de leche de cal y precipitación con SX-44. Precipitación biológica en ambiente anaeróbico
Solución ácida	Intercambio iónico

**Tabla 8.** Tratamiento de contaminantes en efluentes líquidos (metales pesados)

EFLUENTE	TRATAMIENTO
Riles industriales	Biosorción con plantas Adición de leche de cal y precipitación con SX-44
Drenaje ácido de minas (DAM)	Adsorción en turbas
Aguas claras de relave	Precipitación con yeso
Aguas residuales mineras	Biosorción, flotación no convencional. Membrana líquida, Biosorción Precipitación hidróxido-sulfuro

## Contribuciones Científicas

De acuerdo a estas Tablas se puede observar que la mayor parte de los efluentes está constituido por riles industriales, soluciones hidrometalúrgicas, aguas residuales y colas de flotación, y las técnicas empleadas van desde las clásicas precipitaciones químicas hasta el uso de biomasa.

Para el tratamiento de lodos, particularmente los relativos a relaves de flotación conteniendo metales pesados, se puede utilizar técnicas de extracción por solventes, uso de revegetación, precipitación por alcalis y floculación. Como método tradicional se usa hacer un reciclado del relave para recuperar parte de los metales pesados. Para metales particulares como el cadmio, plomo y níquel, se utiliza hacer una biolixiviación o una adsorción sobre hidróxido de cromo y hierro.

### SITUACION CHILENA

La situación chilena se ha venido exponiendo desde hace algún tiempo en distintas presentaciones (1,2,3). En lo que se refiere a fundiciones, CODELCO ha venido realizando importantes inversiones relativas a la captación de anhídrido sulfuroso mediante la instalación de plantas de ácido sulfúrico, y a la neutralización de arsénico en los gases y concentrados

mediante el apoyo a nuevos desarrollos tecnológicos (3).

En lo relativo a líquidos y lodos, la situación fue presentada en informes anteriores (1), concluyéndose que, dependiendo del tamaño de las plantas, los principales desechos líquidos y lodos son los que se indican en la Tabla 9 adjunta. Se hace notar que el mayor volumen de efluentes líquidos corresponde a aguas claras de tranques de relaves.

El tratamiento de estos efluentes es convencional. En el caso de aguas ácidas se utiliza un ajuste de pH con cal, mediante un proceso de precipitación-decantación-filtrado. En las operaciones a menor escala, el secado solar reemplaza al filtrado, particularmente en las plantas ubicadas en la zona norte del país. Los residuos de plantas de molibdeno y de cianuración son tratados por oxidación química con agua oxigenada. Los lodos son dispuestos por lo general en tranques de relaves, sin embargo, este tipo de residuos son tratados mediante una combinación espesado/decantación-filtrado/secado solar. Los diferentes métodos de disposición de las aguas de desechos se muestran en la Tabla 10 a continuación, en función del tamaño de las instalaciones.

**Tabla 9.** Principales efluentes líquidos y lodos en plantas chilenas.

SECTOR MINERO	LIQUIDOS	LODOS
Grande	Aguas claras de tranques Aguas de plantas de filtros Overflow de espesadores Aguas ácidas de soluciones de refinación	Colas de concentrados Residuos de lixiviación de cobre Purgas de clasificadores SX Lodos arsenicales de electrorefinado Residuos de Plomo de E.W.
Mediana	Aguas ácidas de soluciones de refino Sx Aguas claras de tranques	Colas de concentrados Residuos de lixiviación de cobre Lodos electrolíticos
Pequeña	Aguas de procesos de precipitación Aguas claras de colas de flotación	Colas de concentrados Residuos de lixiviación

**Tabla 10.** Disposición de residuos líquidos

SECTOR MINERO	SISTEMA DE DISPOSICION
Grande	Agua reciclada Tranque Ríos y Océano Irrigación de áreas verdes y carreteras
Mediana	Corrientes fluviales Irrigación de bosques y carreteras
Pequeña	Pozos para reciclaje de aguas Tranques
Fundiciones y Plantas Electrolíticas	Ríos Pozos Canales de drenaje

La industria chilena reporta eficiencias en el tratamiento de efluentes del orden de 80 a 90%. Los costos de tratamiento varían de 0,1 a 2,0 US/m<sup>3</sup>.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Environment & Innovation in Mining and Mineral Technology, Vol I and II, M. Sánchez, F. Vergara, S. Castro (Eds.), Universidad de Concepción, 1998.
2. Reporte Ministerio de Minería "Catastros

- de Insumos Utilizados en la Minería y de Residuos Provenientes de las Actividades Mineras". SGA Ltda., 1997.
3. Clean Technology for the Mining Industry, M. Sánchez, F. Vergara, S. Castro (Eds), Universidad de Concepción, 1996.
4. Aspectos Ambientales en Minería de Metales No Ferrosos (Cu, Ni, Pb, Zn, Au), PNUMA, Informe Técnico N 5, 1994.
5. Effluent treatment in the Mining Industry, S. Castro, F. Vergara, M. Sánchez (Eds), Universidad de Concepción, 1998.