



Minería Sustentable en Zonas Áridas

Compendio de:
Aportes temáticos del Proyecto CAMINAR



Publicado en el 2009 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Documento Técnico del PHI-LAC, N° 15
ISBN 978-92-9089-133-8

© UNESCO 2009

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

Se autoriza la reproducción, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada, y se envíe copia a la dirección abajo citada. Este documento debe citarse como:

UNESCO, 2009. Minería sustentable en zonas áridas. Aportes temáticos del Proyecto CAMINAR. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 15.

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Programa Hidrológico Internacional para
América Latina y el Caribe (PHI-LAC)
Oficina Regional de Ciencia para América
Latina y el Caribe
UNESCO
Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: + 598 2 413 2075
Fax: + 598 2 413 2094
E-mail: phi@unesco.org.uy
<http://www.unesco.org.uy/phi>

Centro del Agua para Zonas Áridas y
Semiáridas para América Latina y el
Caribe (CAZALAC)
Benavente 980
La Serena, Chile
Tel.: 56 51 204 493
Fax: 56 51 204 493
E-mail: cazalac@cazalac.org
<http://www.cazalac.org>

Disclaimer: "El Proyecto CAMINAR es financiado por la Comisión Europea, Contrato N° INCO_CT2006-032539. La información en este documento es entregada desde su fuente original y ninguna garantía es dada para algún propósito específico. El usuario, por lo tanto, usa la información a su propio riesgo y responsabilidad. Este documento no representa la política o los puntos de vista oficiales de la Comisión, Parlamento o Consejo Europeo."

PRESENTACION

El proyecto CAMINAR de la Comisión Europea ha integrado el trabajo de científicos e ingenieros de tres países europeos, España, Portugal y el Reino Unido, y de tres sudamericanos, Bolivia, Chile y Perú, en materias relativas a la sustentabilidad ambiental de la minería en cuencas hidrográficas de zonas áridas. Ello ha implicado la realización de estudios científicos, tecnológicos, económicos y sociales y su incorporación a modelos físico-matemáticos y de gestión, que faciliten su aplicación efectiva en la toma de decisiones.

El equipo de trabajo en Chile está integrado en torno a CAZALAC, Centro del Agua para Zonas Áridas de Latinoamérica y el Caribe, en materias como hidroquímica, contaminación de aguas y sedimentos, usos del agua por la agricultura y la minería, y participación ambiental ciudadana. En él participan también investigadores del CEAZA, Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas y del Departamento Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena, así como un grupo de memoristas de la carrera Ingeniería Civil Ambiental de la misma universidad. Un segundo equipo de trabajo está constituido por profesionales de la empresa Water Management, cuya tarea se centra en el desarrollo de modelos de gestión de los recursos hídricos.

La presente publicación reúne un grupo de documentos que sintetizan los problemas y soluciones relativas a las materias tratadas por el primer grupo, así como algunos puntos de vista considerados en su enfoque. Incluye un primer artículo sobre agua y minería en Chile, y sigue con un documento relativo a la evaluación

de impactos ambientales, en particular de aquellos vinculados a la actividad minera. Continúa con el importante tema de los cierres de minas y su planificación, así como con un artículo relativo a la evaluación del riesgo de drenaje ácido y contaminación por metales pesados. Finalmente, se incluye un léxico sobre temas de geología económica y minería, que comprende sus connotaciones ambientales. Los artículos relativos a evaluación de impacto ambiental y a cierres mineros, así como el léxico de geología económica contaron con la edición de Paloma Cubas y Roberto Oyarzún y están disponibles en el sitio web <http://www.aulados.net>. Una versión abreviada editada por Silvia Riquelme del artículo sobre agua y minería en Chile será incluida en la Guía Minera de Chile 2009-2010. Finalmente, el artículo relativo a drenaje ácido fue expuesto en el Seminario GEOMIN 2009 y aparece en sus actas en su versión en inglés.

Un objetivo principal de la presente publicación es facilitar la comprensión de las materias científico-técnicas vinculadas a los impactos ambientales, especialmente en los temas relativos al agua, la geología y mineralogía, y el efecto de las operaciones minerometalúrgicas en la dispersión de los metales. Ello, con el fin de facilitar las decisiones en materia ambiental minera de los especialistas de otras áreas, así como la participación comunitaria responsable, la cual no es posible sin un entendimiento de los temas básicos.

Guido Soto
Coordinador de Proyecto CAMINAR
Director Ejecutivo CAZALAC

Ricardo Oyarzún
Investigador Proyecto CAMINAR
ULS-Depto. Minas y CEAZA



INDICE

Minería y Recursos Hídricos en Chile, Jorge Oyarzún M., Ricardo Oyarzún L.	05
Mining and Water Resources in Chile, Jorge Oyarzún M., Ricardo Oyarzún L.	16
Anexo	29
Evaluación de Impactos Ambientales, Jorge Oyarzún M.	33
Planes de Cierre Mineros-Curso Resumido, Jorge Oyarzún M.	81
El Potencial de Neutralización de Acidez de los Silicatos: Un Factor Subvalorado en la Evaluación de Drenaje Ácido de Yacimientos Metálico Sulfurados, Jorge Oyarzún M., Hugo Maturana C., Ricardo Oyarzún L.	136
Acidity Neutralization Potential of Silicate Minerals: A Neglected Factor in Acid Drainage Assessment of Sulphide Metallic Deposits, Jorge Oyarzún M., Hugo Maturana C., Ricardo Oyarzún L.	144
Léxico de Geología Económica, Jorge Oyarzún M.	159

Minería y Recursos Hídricos en Chile

Jorge Oyarzún¹, Ricardo Oyarzún^{1,2}

¹Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena,
Benavente 980, La Serena, Chile.

²Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA).

Emails. Jorge Oyarzún: joyarzun@userena.cl
Ricardo Oyarzún: royarzun@userena.cl

Resumen

Una convergencia de factores geológicos condujo a la formación a gran escala de depósitos de cobre-molibdeno en las regiones áridas a semiáridas de la mitad norte de Chile, que entregan cerca de un tercio del cobre de mina del mundo. Durante la última década, la producción de cobre de Chile se dobló, llegando a alcanzar 5,5 Mt (millones de toneladas) en 2008. El hecho de que su precio subiera de 1,3US\$/lb en 2004 a más de 3,5 en 2006, antes de la presente crisis económica. Esto impulsó varios proyectos de expansión y nuevas explotaciones mineras, y generó presiones en la competencia entre minería y agricultura por contar con los escasos y frágiles recursos hídricos disponibles. Los derechos de agua son libremente negociables en Chile, y su transferencia masiva a la industria minera puede tener consecuencias importantes a corto y largo plazo. Además, la minería genera otros impactos en la calidad de los escasos recursos hídricos, tanto por efecto de las operaciones mineras y metalúrgicas como por la acumulación de relaves y otros depósitos de desechos mineros en la superficie de las cuencas de drenaje, en particular en las proximidades de los ríos principales. Por otra parte, los recursos hídricos del norte de Chile son muy dependientes de fenómenos climáticos complejos y de difícil predicción, como las precipitaciones de "Invierno Altiplánico" (al norte de 26° S) y el Ciclo ENSO (entre 26° y 32° S). Ambos pueden ser afectados por procesos independientes del control nacional, como la deforestación de la cuenca amazónica y los efectos climáticos del Calentamiento Global. En el intertanto, la industria minera ha ensayado soluciones tecnológicas (reciclaje del agua usada en sus operaciones, uso directo del agua de mar o del agua de mar desalinizada), así como mejores prácticas de manejo ambiental y del agua, y un

mayor entendimiento con otros usuarios locales. Esto, junto con la continua exploración de cuerpos de aguas subterráneas profundas, formados durante épocas pasadas, cuyas mayores precipitaciones alcanzaron al Desierto de Atacama.

Esta contribución considera los siguientes aspectos: (1) la disponibilidad de agua en el norte de Chile, donde se sitúa la mayor parte de los recursos y operaciones mineras del país, (2) las interrelaciones entre las demandas de agua de la industria minera y las necesidades de agua para riego de la agricultura, (3) los requerimientos hídricos básicos de las comunidades indígenas del norte de Chile, (4) los potenciales conflictos ambientales o económicos resultantes de la concesión en exceso de derechos de agua y su efecto en la carencia del recurso, (5) las alteraciones climáticas de carácter global y continental que pueden afectar el frágil equilibrio hidrológico de esta parte del territorio chileno, y (6) las diferentes opciones que pueden adoptar las empresas mineras para enfrentar sus necesidades presentes y sus demandas de expansión.

Palabras Clave

Zonas áridas, gestión del agua, minería del cobre, impactos ambientales y cambio climático.

Introducción

La minería del cobre es la principal actividad económica de Chile, con ventas que alcanzaron US\$ 32.332 millones el año 2006, representando un 55% de las exportaciones totales del País y un 37% del cobre total "de mina" del mundo. Las actuales reservas del País alcanzan unos 250 Mt de cobre metálico, un 38% de las reservas totales mundiales (Minería Chilena, 2006a). Por otra parte, se invirtieron US\$ 1.160 millones en nuevos proyectos o expansiones en 2006, y otras inversiones por US\$ 14.300 esperaban su aprobación final en 2007. En consecuencia, la minería chilena (también la mayor fuente mundial de molibdeno, su principal subproducto) es una gran industria, pese a sus fluctuantes beneficios económicos.

La evolución geológico-metalogénica del territorio chileno determinó que una enorme proporción de sus depósitos metalíferos, incluidos sus pórfidos de Cu(Mo), se distribuyeran en la árida a extremadamente árida parte norte del país. Así, la falta de recursos hídricos ha limitado la factibilidad de nuevos proyectos y expansiones, y amenaza la sustentabilidad de las presentes operaciones, que entregan un 67% de la actual producción de cobre de Chile (Minería Chilena, 2005a).

La plena comprensión de las interacciones y competencias entre los distintos actores y sus necesidades (incluidas aquellas de carácter sociocultural y ambiental) es esencial, porque la escasez de agua y las tensiones derivadas de ello pueden incrementarse en los próximos años. En forma adicional, la comprensión de las presiones económicas de desarrollo y los conflictos resultantes en el norte de Chile puede entregar lecciones importantes para otras regiones del mundo, que enfrentan similares problemas respecto a la distribución de recursos hídricos progresivamente escasos y a una sociedad que plantea crecientes demandas.

Geología y Recursos Minerales en Chile

Chile continental presenta una especial geografía, al constituir una estrecha faja N-S de 4.500 km de largo, extendida entre las latitudes 17° 45` S y 56° S y flanqueada por la Cordillera de Los Andes y el Océano Pacífico. Los principales rasgos geomorfológicos del territorio comprenden, de O a E, una cordillera costera, una cuenca tectónica subsidente central, y la cordillera andina. Este esquema simple se altera entre 23° S y 25°30` S, donde se agrega la Cordillera de Domeyko, entre la cadena andina y la depresión central, así como entre 26° S y 33° S, donde la depresión central está ausente, como consecuencia de condiciones tectónicas compresivas E-O, expresadas también en las subducción "plana" de la placa oceánica en el mismo segmento (Ver Fig. 1, Anexo Figuras y Tabla)

La geología chilena exhibe una fuerte marca de los procesos relacionados a la subducción de placas oceánicas, tanto en términos de magmatismo como de tectónica. La subducción se inició durante el Paleozoico y se aceleró por la apertura del Océano Atlántico, hace unos 160 Ma (millones de años). Como consecuencia de ello, ocurrieron repetidos episodios de emplazamiento de magmas calcoalcalinos, desde los niveles plutónicos a los volcánicos, en forma casi continua, hasta la actualidad (Oyarzún, 2000). Durante este lapso geológico, la faja magmática, que mantuvo una dirección N-S, paralela al borde tectónico oceánico-continental, migró de O a E, desde una posición situada al oeste de la presente Cordillera de la Costa (Triásico superior, unos 220 Ma atrás) a otra ubicada en el actual territorio argentino (25-10 Ma atrás). Después, retrocedió a su actual posición, coincidente con el eje de la Cordillera de los Andes. Esta importante actividad magmática y tectónica ha sido acompañada por abundante generación de yacimientos metalíferos, especialmente de cobre-molibdeno, oro, hierro y plata, en su mayor parte asociada a intrusivos porfíricos, emplazados en niveles hipabisales a subvolcánicos.

Aunque los yacimientos metalíferos están distribuidos a través de todo el territorio de Chile, la mayoría de ellos, incluidos los yacimientos cupríferos con más de mil Mt (millones de toneladas) de mena y leyes enriquecidas por los procesos supérgenos, se sitúan al norte de $34^{\circ}10' S$, donde los recursos de agua son escasos o muy escasos. Este hecho responde tanto a razones geológicas como fisiográficas, puesto que la aridez o semiaridez de ese territorio favoreció el proceso de enriquecimiento secundario en el Terciario superior. Entre el relativamente limitado número de metales que forman yacimientos importantes en Chile, el cobre, y en particular sus grandes yacimientos porfíricos de Cu(Mo) son claramente dominantes, alcanzando una producción de 5 Mt de cobre metálico más 43.000 t como subproducto. Los principales pórfidos cupríferos se distribuyen en fajas N-S de edad cretácica a pliocena (Ver Fig.1, Anexo Figuras y Tabla). Algunas de esas fajas, en particular las de 45-30 Ma y la de 12-5 Ma son especialmente ricas, y dentro de ellas, algunos segmentos lo son de modo excepcional. La faja de 45-30 Ma, situada entre las latitudes $21^{\circ} S$ y $26^{\circ}30' S$, incluye los pórfidos gigantes del distrito Collahuasi (Tarapacá), y los de Chuquicamata y de La Escondida (Antofagasta), de ubicación precordillerana. La segunda, situada en la Cordillera de los Andes entre $31^{\circ}40' S$ y $34^{\circ}06' S$, comprende también tres pórfidos gigantes, los de Los Pelambres, Andina-Los Bronces y El Teniente, todos con reservas de miles de Mt de mena de Cu(Mo). Otros tipos de yacimientos cupríferos de Chile, como el IOCG de Candelaria (Atacama) o el de tipo "manto" de El Soldado son importantes, pero no sobrepasan los cientos de Mt de mena.

También hay yacimientos importantes de hierro, de oro y de plata en el norte de Chile. Los de Fe corresponden al tipo "magnetita en rocas volcánicas", formados alrededor de 110 Ma atrás y se distribuyen en una faja estrecha en la Cordillera de la Costa entre 25° y $31^{\circ} S$. Alcanzan unos 100 a 300 Mt de mena con ley 40-50% Fe. Durante la última década, su producción ha alcanzado unos 8 Mt anuales. Aunque los depósitos de oro están distribuidos a lo largo de todo el territorio, todos los importantes se sitúan en el norte del país, al igual que todos los depósitos de plata. Las

producciones anuales de oro y plata alcanzan unas 40 t y 1.300 t respectivamente. Sin embargo, la próxima explotación del gran yacimiento de Au-Ag de Pascua-Lama, situado en la frontera con Argentina, en $29^{\circ}28' S$, debería agregar unas 25 t de Au y 930 t anuales de Ag (Minería Chilena, 2004).

En términos de minerales industriales, Chile es bien conocido por sus yacimientos de nitratos, yodo y litio, todos ellos situados al norte de la latitud $26^{\circ} S$. La producción anual actual se sitúa en torno a 1 Mt de nitratos, 16.000 t de yodo y 42.000 t de carbonato de litio (este último, un metal esencial en la elaboración de acumuladores eléctricos de alto rendimiento).

Clima y Recursos Hídricos

El territorio chileno exhibe una fuerte polaridad climática N-S como consecuencia de su extensión geográfica entre las latitudes $17^{\circ}30' S$ y $56^{\circ}30' S$. Aunque la influencia del Océano Pacífico y en particular de la Corriente de Humboldt contribuye a moderar el rango de temperaturas, las precipitaciones costeras presentan variaciones extremas, desde casi 0 mm/año en las regiones del extremo norte (Tarapacá y Antofagasta) hasta unos 5.000 mm/año en las más australes (Aysén y Magallanes) (Errázuriz y otros, 1987). La extrema sequedad del segmento norte se debe a la acción combinada de la corriente fría de Humboldt y de la zona subtropical de alta presión, que reducen los fenómenos convectivos en las masas de aire, y por lo tanto inhiben las precipitaciones (Houston, 2006).

Como consecuencia de la presencia de la Cordillera de los Andes, que alcanza sobre 6.000 m de altura al norte de $36^{\circ}30' S$, y actúa como una barrera inductora y colectora de precipitaciones atmosféricas, se desarrolla una polaridad climática complementaria E-O. Al norte de $26^{\circ} S$, la mayor parte de las precipitaciones se relacionan con los frentes cálidos y húmedos procedentes del Océano Atlántico. Ellos cruzan la región amazónica, cuya humedad y evaporación los realimenta, y pasan sobre el territorio de Bolivia donde entregan la

mayor parte de sus precipitaciones, cayendo el resto sobre el altiplano chileno. Estos frentes, que se comportan como un monzón de verano y reciben el nombre de "Invierno Altiplánico", y constituyen la única fuente efectiva de precipitaciones en esta extensa zona del país (Houston y Hartley, 2003). Aunque ellas no llegan a acumularse en forma de depósitos glaciares cordilleranos, son responsables de la acumulación de aguas superficiales y subterráneas, así como de flujos esporádicos de agua, que pueden alcanzar el Desierto de Atacama (Houston, 2006). Se estima que cuando llegan a unos 300-350 mm, estas precipitaciones pueden contribuir a la alimentación de los acuíferos (que principalmente albergan aguas "fósiles", acumuladas en etapas climáticas menos desfavorables).

En esta zona, al norte de 26° S, hay una fuerte correlación entre la altura y las precipitaciones, las cuales son insignificantes bajo 2.500 m de altura (Ver Fig. 2A, Anexo Figuras y Tabla). Por otra parte, si las precipitaciones se sitúan bajo 50 mm/año (Ver Fig. 2B, Anexo Figuras y Tabla), no llegan a generar escurrimientos superficiales. Sólo un río de esta zona llega al océano (el río Loa), mientras un gran número de cuencas grandes o pequeñas actúan como reservorios de agua subterránea y como sitios de evaporación (sales y depósitos salinos tipo "playa"). Generalmente, estos cuerpos de agua están interconectados (Herrera y otros, 2006), fluyendo el agua entre ellos conforme al gradiente topográfico E-O. Un arreglo típico (Ver Fig. 3, Anexo Figuras y Tabla) incluye una zona superior de recarga controlada tectónicamente, que a su vez alimenta un humedal ("bofedal" o vega) situado a menor altura, y finalmente un salar (McKittrick, 2006). Conforme a Grossjean y Veit (2005), una parte mayor de los recursos hídricos actualmente disponibles corresponden a aguas fósiles, acumuladas entre 13.000 y 8.500 años atrás, durante los períodos más húmedos en el último episodio de glaciación. Sin embargo, la aridez ha sido la regla, más que la excepción, en esta zona. Como señala Clarke (2006), aunque la mayoría de los estudios realizados en el Desierto de Atacama "se han enfocado en la hiperaridez prevaleciente desde el Mioceno (unos 20 Ma atrás), todos las rocas sedimentarias terrígenas

presentes desde el Triásico superior (unos 200 Ma atrás), presentan evidencia de evaporitas y en consecuencia de clima árido".

Al sur de 26° S, la mayor parte de las precipitaciones están relacionadas con los frentes atmosféricos invernales provenientes del SO, los "Southern Westerlies". Las precipitaciones en la faja costera (en mm/año) van de 27 en latitud 28°27` S, a 84 en 29°54` S, 114 en 30°34` S y 247 en 31°55` S (DGA, 1987). Sin embargo, a 200-300 km de la costa, en la montañas andinas, las masas ascendentes de aire en enfriamiento entregan precipitaciones estimadas en el doble de aquellas de la faja costera y, lo que es muy importante, que se acumulan en forma de nieve y hielo. Por otra parte, tanto las precipitaciones costeras como las andinas aumentan unas dos o tres veces durante los episodios lluviosos del ciclo ENSO ("El Niño-Oscilación del Sur") que ocurren en promedio cada 5 ó 7 años. En efecto, durante los episodios de "El Niño" se produce un fuerte incremento de los frentes invernales del SO. Al menos ocho eventos de este tipo se han registrado en los últimos 50 años (Jenny y otros, 2002). En cambio, las precipitaciones disminuyen a la mitad o menos en los episodios secos del Ciclo ("La Niña"), producto de un enfriamiento de las aguas oceánicas (Montecinos y Aceituno, 2003).

Excepto episodios invernales esporádicos, generalmente relacionados con El Niño, las crecidas de los ríos ocurren durante la temporada de verano, como resultado de la fusión de las nieves acumuladas en las montañas andinas. Este fenómeno permite la existencia de seis ríos permanentes y sus afluentes, los que alcanzan el Océano Pacífico entre 26° y 32° S. Excepto el situado más al norte, el río Salado, todos ellos son la base para una importante actividad agrícola. Sus caudales medios (Salazar, 2003) son de 2,9 m³/s en el Río Copiapó (27°20` S), 3,5 m³/s en el Río Huasco (28°30` S), 8,1 m³/s en el Río Elqui (30°00` S), 15,1 m³/s en el Río Limarí (30°37` S) y 13,2 m³/s en el Río Choapa (31°37` S). En esta zona existe una importante red de embalses destinados a mejorar la seguridad de riego, cuya capacidad combinada llega a 1.500 Mm³ (Ver Tabla 1, Anexo Figuras y Tabla) dotados de

una extensa red de canales. Dichos embalses permiten mitigar la disminución de precipitaciones asociadas a los años secos. Puesto que los terrenos geológicos de este territorio son montañosos y están conformados por rocas ígneas poco permeables, los recursos de aguas subterráneas están confinados al fondo de los estrechos valles E-O ("Valles Transversales") y a redes de fractura en los macizos cristalinos (Arumí y Oyarzún, 2006). En consecuencia, las aguas subterráneas desempeñan aquí un rol relativamente menor en comparación con la que tiene al norte de 26° S.

La Industria Minera y la Competencia por el Agua

El Sistema Chileno de Gestión de Recursos Hídricos

El Código de Aguas de Chile de 1982 (modificado el 2005) dispone que corresponde al Estado, a través de la Dirección General de Aguas (DGA), el conceder derechos de agua a quienes los soliciten. Ellos se entregan sin cargo, ya sea a los individuos o personas jurídicas solicitantes. Según la naturaleza de su uso, se distinguen dos tipos de derechos de aguas: consuntivos (como aguas destinadas a riego) y no consuntivos (por ejemplo aguas destinadas a generación hidroeléctrica). Una vez que el derecho ha sido otorgado (después de comprobar su disponibilidad), éste se convierte en propiedad privada y puede ser libremente utilizado o no utilizado, vendido o arrendado. Sin embargo, el uso del recurso puede ser no autorizado (aunque se cuente con su propiedad), si la autoridad ambiental estima que ello puede generar serios daños (Minería Chilena, 2007a). Considerando el carácter privado del agua concedida, así como el hecho de que las aguas superficiales y subterráneas son tratadas como materias separadas en términos legales, es muy difícil desarrollar sistemas integrados de gestión del agua a la escala de cuencas hidrográficas. Sin embargo, el sector agrícola está generalmente bien organizado, a la escala de cuencas o sub cuencas, en asociaciones que: (1) distribuyen las aguas efectivamente disponibles conforme a los derechos de agua de sus asociados (Juntas de Vigilancia) y (2) manejan las infraestructuras

de riego, incluidas las redes de canales (Asociaciones de Canalistas). Por otra parte, el Gobierno está promoviendo el establecimiento de comunidades de usuarios de distintos sectores productivos e instancias de solución de conflictos (Mesas del Agua), con el objetivo de lograr un uso armónico y sustentable del recurso, en particular por parte de los sectores agrícola y minero.

Requerimientos de Agua de la Industria Minera

El agua se utiliza en una serie de actividades y procesos en la industria minera, los que van desde la etapa de los sondeos de exploración hasta las operaciones de los planes de cierre de operaciones mineras. En el norte de Chile, donde la magnitud de los recursos minerales a procesar excede la cantidad de agua con la que se cuenta para su beneficio, la disponibilidad y costos del agua son factores críticos para evaluar la factibilidad de nuevos proyectos, así como para la expansión de las presentes operaciones. Entre los muchos usos del agua en minería están sus aplicaciones en la supresión de polvo en las faenas mineras y en los caminos, así como su uso en la concentración de minerales sulfurados, en el transporte y depósito de relaves, en el transporte de sulfuros a puertos en forma de pulpa mediante concentraductos, y en la lixiviación en pilas ácidas y alcalinas. Todos los usos citados son importantes y no existen alternativas efectivas excepto en términos de eficiencia en el uso seleccionado, incluido el reciclaje del agua utilizada. En consecuencia, la industria minera moderna, impulsada por la creciente escasez de agua y por restricciones de carácter ambiental, ha desarrollado una serie de metodologías y procedimientos enfocados a: (1) el uso eficiente y el reciclaje del agua y (2) el control de la contaminación generada por la infiltración de aguas ricas en metales, aguas ácidas y aguas alcalinas cianuradas. Sin embargo, hay límites físicos y económicos para estas medidas de uso conservativo. Entre ellos está la fuerte demanda de agua que implica la concentración de minerales sulfurados, situada entre 1 y 3 m³ por tonelada de mena procesada (Lagos, 1997; Minería Chilena, 2005a).

En 1995, la industria minera chilena ubicada entre las Regiones I y VI requería unos 25 m³/s, para una producción de cobre de 2.5 Mt (Salazar, 2003), la cual se ha doblado desde entonces alcanzando sobre 5 Mt en 2006 (COCHILCO, 2007). En consecuencia, una estimación prudente para sus requerimientos actuales se sitúa en torno a 50 m³/s. Salazar (2003) estimaba la cifra mencionada en un 6.8% del consumo consuntivo de agua nacional. Sin embargo, ese consumo se sitúa casi totalmente en el norte del país, donde se realiza la mayor parte la actividad minera, donde los recursos hídricos son muy escasos, y donde se encuentran casi todos los nuevos proyectos de explotación y de expansión de faenas que esperan aprobación final.

Minería y Recursos Hídricos entre 18° y 26° S

Las regiones de Tarapacá y Antofagasta integra el llamado "Norte Grande". El año 2007 la parte norte de la Región de Tarapacá se separó en una nueva región administrativa: Arica-Parinacota (Ver Fig. 1, Anexo Figuras y Tabla) Considerando que toda la actividad minera importante se realiza en Tarapacá, y con fines de simplicidad, se utilizará para ambas el nombre histórico de Tarapacá.

Tarapacá y Antofagasta comparten una serie de importantes características, incluida la hiperaridez de sus fajas costera y central, su organización fisiográfica en cadenas de montañas y cuencas elongadas N-S, la importancia del monzón veraniego denominado "Invierno Altiplánico" como fuente casi exclusiva de las precipitaciones, la presencia de importantes yacimientos cupríferos en sus fajas costera y precordillerana y la existencia de grandes depósitos de nitratos y yodo en su depresión central.

Sin embargo, pese a su similar contexto geológico y fisiográfico, así como sus rasgos socioculturales (incluida la presencia de la cultura Aymara en sus poblados precordilleranos), el uso del agua en ambas regiones presenta marcadas diferencias (Ver

Fig. 4, Anexo Figuras y Tabla). Ello se debe principalmente a la magnitud de las operaciones mineras de Antofagasta, sustentadas en enormes reservas de cobre. Por otra parte, aunque Tarapacá cuenta también con explotaciones de gran magnitud, sus autoridades regionales han sido conservadoras respecto al otorgamiento de nuevos derechos de agua para expandirlas. Este ha sido el caso de la minera Doña Inés de Collahuasi, la cual no sólo ha tenido dificultades para obtener nuevos derechos, sino que ha sido sujeta a restricciones en el ejercicio de los ya concedidos, al observarse disminuciones en las descargas de fuentes naturales (que alimentan humedales), atribuidas a la extracción de aguas subterráneas por parte de la Empresa (Minería Chilena, 2007b). Por otra parte, el sector agrícola es todavía un consumidor importante de agua en Tarapacá, y pese a su posición geográfica extrema y a sus rasgos climáticos, Tarapacá exhibe un patrón de distribución del consumo de agua que es más parecido al de la región agrícola de Coquimbo que al de la vecina Antofagasta (Ver Fig. 4, Anexo Figuras y Tabla).

Demandas de Agua de la Minería y de la Agricultura

El precio del cobre subió de un promedio de US\$ 1,30/lb en el año 2004 a US\$ 2,70/lb en 2006 y ha US\$ 3,20/lb en 2007. Este hecho, junto con un número de descubrimientos de nuevos depósitos y la expansión de reservas en varios depósitos en explotación, impulsó importantes nuevos proyectos en Tarapacá y en Antofagasta. Considerando sólo Antofagasta, existían ya en 2005 proyectos mineros por un valor de US\$ 4.500 millones, los que se encontraban en su inicio o próximos a iniciarse (Minería Chilena, 2005b). Por otra parte, CODELCO Norte, la mayor de las Divisiones de la cuprífera estatal, anunció el mismo año sus proyectos para invertir US\$ 6.000 millones en sus operaciones en Antofagasta entre 2006 y 2015 (Minería Chilena, 2005c). Aunque la presente crisis puede afectar algunos de esos proyectos, las actuales proyecciones (Abril 2009) señalan que el precio actual US\$ 2/lb se mantendrá, con las naturales fluctuaciones, durante los próximos años. Considerando que ese era también el nivel de precios en 2005, es probable que dichos

proyectos efectivamente se materialicen.

Con el fin de enfrentar los crecientes requerimientos de agua, las empresas mineras han considerado diferentes opciones. Ellas incluyen la compra de derechos de agua a los agricultores, a las empresas de agua potable, o a otras empresas mineras. Puesto que en Chile existe un libre mercado del agua, se trata de una opción legítima, y que puede ser provechosa para ambas partes. Sin embargo, la adquisición de derechos de agua a pequeños agricultores de ambas regiones, puede poner en peligro la preservación del patrimonio cultural de las comunidades de etnia Aymara que habitan en los valles precordilleranos de ambas regiones y en los oasis de la Pampa del Tamarugal. Ello, considerando que sus actividades agrícolas y de crianza de auquénidos son elementos clave de su supervivencia cultural, que enmarcan las celebraciones religiosas y pastorales anuales de sus distintos poblados. En consecuencia, aunque la calidad y el valor económico de sus productos agrícolas sean más bien bajos (Alonso, 2001), la pérdida de esa actividad conduciría a la extinción de la cultura Aymara en Chile.

Por otro lado, el hecho de que la empresa de agua potable de Antofagasta perteneciera a un importante holding minero nacional, probablemente facilitó la transacción de recursos de agua consumidos por la población de ese puerto a la empresa minera que explota el yacimiento de Spence. A cambio, la población recibe ahora agua de mar desalinizada. Aparte del beneficio económico para ambas empresas, los consumidores de agua ganaron, en cuanto las aguas que ahora reciben carecen de los niveles de arsénico que tenían las cordilleranas (pese a las medidas implementadas para abatirlos). Aunque hay otros casos de uso de agua de mar, desalinizada o no desalinizada, el caso descrito es notable por cuanto además evita el costo energético de bombear agua de desde el nivel mar hasta las operaciones mineras, situadas lejos y a mayor altura. En consecuencia, reúne positivas características en términos de uso de tecnologías modernas y acertado enfoque empresarial, con ganancias para todos.

Como resultado de las operaciones de un

mercado libre en extremo competitivo, el precio por 1 l/s de agua se incrementó en las regiones de Tarapacá y Antofagasta de US\$ 2.500 (agricultor a agricultor), o US\$ 2.000-3.800 (agricultor a uso urbano), a US\$ 75.000-225.000, cifras pagadas por empresas mineras. Una importante transferencia de derechos de agua que involucró a dos empresas mineras, fue la venta de 631 l/s por parte de la minera Zaldivar a Escondida, por la suma de US\$ 135 millones, pagaderos a lo largo de un lapso de 15 años (Mc Kittrick, 2006). Aunque es evidente que una agricultura económicamente marginal no puede competir por el agua a estos niveles de precios, las presentes regulaciones ambientales limitan el acceso de las empresas mineras al uso de otros recursos hídricos. Por ejemplo, en noviembre 2007, la autoridad ambiental de Antofagasta rechazó una solicitud de minera Escondida para bombear 1.027 l/s de dos localidades andinas (Minería Chilena, 2007b). La razón de dicho rechazo fue el hecho de que ambas localidades se encontraban próximas a vertientes y a lagos salinos. Las primeras son importantes para la preservación de humedales ("bofedales") y en consecuencia de las actividades pastorales de las comunidades aymaras andinas que los utilizan. Los segundos, son hábitats de las poblaciones de flamencos andinos y de otras especies.

Impactos Ambientales

La minería en las regiones de Tarapacá y de Antofagasta está favorecida en términos ambientales por el hecho de que muchos de sus depósitos más importantes, como Escondida, Zaldivar y Lomas Bayas, se encuentran alejados de ciudades o poblados y que pocas formas de vida se desarrollan en su entorno inmediato. Por otra parte, existen pocas oportunidades de que se generen contaminaciones en un territorio donde sólo un río alcanza el océano y donde los niveles de agua subterráneas, si existen, son normalmente profundos. Además, con la excepción de Chuquicamata, cuya fundición emite volúmenes importantes de SO₂ (gas) y As₂O₃ (particulado), la industria minera de ambas regiones ha optado por operaciones hidrometalúrgicas (lixiviación en pilas, seguida de extracción por solventes y recuperación electrolítica del cobre) o bien por la simple concentración de los minerales sulfurados, los

que son exportados en esa forma semiprocada.

Minería y Recursos Hídricos entre 26° y 32° S

En este segmento, que incluye las regiones de Atacama y Coquimbo, es posible encontrar un importante aumento en los niveles de precipitación y escorrentía en comparación al extremo norte del país. Las actividades agrícolas, beneficiadas por las favorables condiciones de radiación solar, han incorporado prácticas de cultivo modernas y riego tecnificado, permitiendo la obtención de productos exportables de gran valor. Además, varios embalses (Ver Tabla 1, Anexo Figuras y Tabla) contribuyen a mitigar el riesgo agrícola asociado a periodos de escasez hídrica característicos del ciclo ENSO. Así, el sector agrícola compite con el sector minero en términos más equitativos por los recursos hídricos.

Demandas Hídricas del Sector Agrícola y Minero

Aunque es posible encontrar importantes actividades mineras en ambas regiones (por ejemplo Manto Verde, El Salvador, y Candelaria en Atacama; Andacollo y Los Pelambres en Coquimbo), la actual competencia por recursos hídricos se encuentra principalmente en la Región de Atacama, donde la disponibilidad de ellos es baja. Sin embargo, otras consecuencias importantes de la actividad minera han existido u ocurren actualmente en ambas regiones.

En Atacama, la actividad agrícola utiliza en forma importante aguas de los dos ríos de régimen permanente que escurren de cordillera a mar: el río Copiapó y el río Huasco. Una situación conflictiva ha surgido entre asociaciones de agricultores y regantes y compañías mineras como consecuencia de nuevos proyectos de cobre y oro, con inversiones que alcanzan US\$ 4.532 millones, que se encuentran próximos a comenzar. Estos proyectos corresponden al depósito de pórfido de cobre de Caserones (cuenca del río Copiapó)

y el importante depósito epitermal de Au-Ag-Cu de Pascua-Lama (cuenca del río Huasco). Estos conflictos se relacionan con la actual escasez de agua en la Región de Atacama, la cual ha llegado a poner en peligro su disponibilidad para consumo humano en ciudades como Copiapó y Caldera. Además, se ha producido en los últimos años un importante descenso en los niveles de aguas subterráneas en la cuenca del río Copiapó, así como una disminución en los volúmenes almacenados en el embalse Lautaro, en la misma cuenca (Minería Chilena, 2007c). Por otro lado, el proyecto de Pascua-Lama, con una inversión de US\$ 1.500 millones y ubicado en la cabecera de la cuenca del río Huasco, en el límite entre Chile y Argentina, ha levantado una importante controversia y oposición pública en la región, alcanzando incluso a llamar la atención a nivel internacional. Los agricultores y habitantes de la cuenca han manifestado su preocupación por la posibilidad de que ocurra contaminación del río por metales pesados y compuestos químicos propios de la explotación minera, así como por el riesgo de una disminución en los ya escasos recursos hídricos disponibles (Minería Chilena, 2006b).

Considerando la ubicación del depósito, la naturaleza del distrito con rocas altamente fracturadas y alteradas, y los elevados contenidos de arsénico asociados a la mineralización de cobre-oro, el riesgo de contaminación es efectivamente alto. De hecho, el patrón geológico, estructural y mineralógico existente es muy similar a lo que hay en la vecina zona del distrito de El Indio (sub-cuenca del río Turbio, Cuenca del Río Elqui, Región de Coquimbo), donde se observa una contaminación masiva e importante de aguas y sedimentos con elevados contenidos de Cu-As-Zn (Oyarzún y otros, 2007; Galleguillos y otros, 2008). Por otro lado, los riesgos de disminución en la disponibilidad de agua se asocian a la presencia en el área cercana al proyecto de depósitos de hielo y nieve de alrededor de 200-250 Mm³ (Minería Chilena, 2005d), que funcionan como glaciares o neveros semipermanentes. Tres de estos depósitos están, efectivamente, sobre o muy cerca de las futuras operaciones mineras. Estas acumulaciones de hielo y nieve son importantes ya que su derretimiento parcial contribuye a mitigar la ocurrencia de bajas escorrentías en los ríos en años secos o de bajas precipitaciones.

Como consecuencia tanto de condiciones naturales como de las continuas actividades humanas en el área del proyecto, una parte importante de estas masas de hielo-nieve, cerca de un 70% de acuerdo a reportes no oficiales, ya se ha derretido o deteriorado en forma permanente.

Con la excepción de algunos problemas menores y más bien locales, no existen en realidad aun en la Región de Coquimbo grandes conflictos asociados a la competencia por recursos hídricos escasos entre los sectores minero y agrícola. A pesar que McKittrick (2006) estima los precios de los derechos de agua para las regiones de Atacama y Coquimbo en el rango de US\$ 7.500-15.000 l/s, la competencia en la Región de Coquimbo es más bien menor dada la escasez de nuevos proyectos mineros de importancia. Sin embargo, existen algunos problemas potenciales relacionados con los diferentes usuarios del agua, en particular cuando derechos de agua son transferidos (comercializados) desde el sector agrícola hacia el sector minero. En efecto, es común encontrar que los derechos de agua han sido otorgados en algunas cuencas en exceso con respecto a la real disponibilidad de agua. Sin embargo, hasta ahora el sistema ha funcionado más o menos bien gracias a que el sector agrícola, históricamente el que más derechos de agua tiene y utiliza, usa el agua que dispone en forma discontinua. Además, tanto los procesos de recarga asociados a las ineficiencias de los métodos de riego usados como a las pérdidas por conducción en los canales de riego, los que muchas veces carecen de revestimiento o impermeabilización, permiten esta recirculación del agua. Así, el agua es utilizada varias veces "río abajo" en la cuenca, lo que explica el funcionamiento del sistema con derechos de agua otorgados en exceso (Oyarzún y otros, 2008). Sin embargo, cuando los derechos de agua son adquiridos por una empresa minera, el agua es normalmente extraída de la cuenca y este proceso de uso-re uso-recarga no ocurre. Recientemente, derechos de agua por cerca de 400 l/s en la cuenca de La Cantera (al Sur de La Serena) fueron adquiridos por Carmen de Andacollo, una compañía minera que explotará y concentrará alrededor de 429 Mt de sulfuros durante los próximos 20 años (Minería Chilena, 2007d). Considerando las características de esta pequeña y poco profunda cuenca, cuya recarga

de agua subterránea por lluvias es mínima (éstas últimas no sobrepasan los 90 mm/año en promedio), es muy probable que problemas serios surgirán y se intensificarán en un futuro cercano entre los agricultores de La Cantera y la compañía minera.

Otros Impactos Ambientales

Una de las consecuencias de la larga historia de actividades mineras no reguladas es la existencia de cientos de relaves no confinados y otros tipos de residuos y desechos mineros como botaderos y pilas de lixiviación. Estos depósitos se encuentran dispersos en montañas y valles, y pueden encontrarse en las proximidades de poblados o incluso en ellos (por ejemplo, el caso de la ciudad minera de Andacollo). Al considerar la creciente importancia agrícola de las regiones comprendidas entre 26°-33° S, así como la también creciente demanda de mercados extranjeros por productos agrícolas sanos e inocuos (cultivados en suelos no contaminados), el establecimiento del real nivel de riesgo y el manejo de tales pasivos debe ser realizado lo antes posible y en forma integral.

Factores Adicionales que Influyen en la Disponibilidad y Demanda de Recursos Hídricos

ENSO, el Invierno Altiplánico, y la Cuenca Amazónica

Las demandas en aumento de agua se agregan por supuesto al efecto de factores naturales como las sequías debido al calentamiento global o perturbaciones relacionadas con el ciclo ENSO (Montecinos y Aceituno, 2003). La acción combinada de factores naturales y antrópicos representa un escenario aun más complejo y amenazante. Además, un aumento en los niveles atmosféricos de CO₂ podría también afectar el ciclo ENSO (Collins, 2005), y por lo tanto, la disponibilidad de recursos hídricos del Centro y Norte de Chile, en particular la franja comprendida entre 26-32° S. Otra fuente de preocupación se relaciona con la alta variabilidad exhibida ya por el ciclo ENSO durante el Holoceno (los últimos 10.000 años),

tal como se ha deducido de evidencias geológicas y arqueológicas, registrando catastróficos episodios a los que se atribuyen la destrucción de civilizaciones costeras pre-Incas (Grodzicki, 1994).

Además, los eventos y magnitudes del fenómeno conocido como Invierno Altiplánico (la única fuente significativa de renovación de recursos hídricos al norte de 26° S), podría verse seriamente afectada por la progresiva destrucción de los bosques y humedales de la zona del Amazonas. Estos frentes de precipitación dependen de vientos troposféricos que transportan importantes cantidades de agua desde el Océano Atlántico a través de la zona del Amazonas, que mantiene condiciones de alta humedad atmosférica, hacia el interior del continente (Vuille, 1999). Así, la Amazonía actúa como un mecanismo sustentador que permite el viaje de las masas de agua atmosférica por más de 3.000 km tierra adentro. En consecuencia, eventos de sequía en la Amazonía, o su destrucción, afectarán probablemente la ocurrencia y magnitud de los eventos de Invierno Altiplánico. Si consideramos que alrededor de un 40% de la selva Amazónica podría verse destruida y un 20% adicional afectada en los próximos 20 años (Wallace 2007), esta situación se vuelve particularmente alarmante y requiere ser monitoreada.

Cambio Climático Mundial y Amenazas Relacionadas

Procesos globales como el cambio climático podrían afectar la futura disponibilidad de recursos hídricos en el Norte de Chile de dos formas. Primero, por sus efectos sobre la cuenca del Amazonas y, por consiguiente, sus efectos sobre el fenómeno del Invierno Altiplánico, como se discutió previamente. En segundo lugar, como consecuencia de una modificación del ciclo ENSO y de los frentes del SO. Ambos casos incluyen, sin embargo, una importante cuota de incertidumbre relacionado a: (1) los diferentes posibles escenarios de emisiones de gases invernadero; (2) las aun importantes limitaciones de los actuales modelos de cambio climático global; y (3) los efectos posibles de procesos no considerados por dichos modelos, tales como la degasificación y reacciones químicas en zonas de dispersión oceánica

profundas (Khilyuk y Chilingar, 2006). Con respecto a los posibles impactos del calentamiento global sobre el ciclo ENSO, McPhaden y otros (2006) concluyeron que "no es posible decir con fiabilidad aun como el calentamiento global afectará la variabilidad ENSO o el estado base sobre el cual este ciclo se desarrolla". Sin embargo, estos autores también indican que "condiciones de un evento de El Niño permanente existieron en la zona del Pacífico tropical durante el cálido Plioceno, alrededor de 3 a 5 Ma atrás, cuando los niveles de CO₂ atmosférico fueron comparables a los existentes hoy en día".

Un estudio de la variabilidad climática en el territorio chileno para el siglo actual (CONAMA, 2006; modelo PRECIS, resolución espacial de 25 km) consideró dos escenarios potenciales para las emisiones de gases invernaderos para el período 2011-2100, uno moderado y uno severo. Tres subperíodos fueron considerados en las evaluaciones: 2011-2030, 2046-2065, y 2071-2100. En el peor escenario, el período 2046-2065 registra una elevación de 300-500 m en la isoterma 0° C, afectando así severamente la capacidad de la Cordillera de Los Andes para almacenar nieve durante la época invernal. El modelo pronosticó también, para el mismo escenario base, una disminución en las precipitaciones para la zona del país comprendida entre 30°-40° S, pero al mismo tiempo un aumento en los niveles de precipitaciones en los eventos de invierno altiplánico. Sin embargo, es importante señalar que el modelo no considera los efectos posibles de la deforestación o el cambio climático global en la zona del Amazonas. Así, en términos generales, los pronósticos de cambio climático no son favorables para el área del centro y norte de Chile, ya afectada por escasez hídrica.

Conclusiones

Hay abundantes recursos minerales localizados en la parte Norte de Chile, donde los recursos hídricos disponibles son escasos. Esta riqueza mineral incluye los mayores depósitos de cobre y molibdeno de la Tierra, así como importantes operaciones mineras, que son de una importancia fundamental para la economía del país. Además, es posible esperar que el cobre

ocupe un rol central en las estrategias de desarrollo futuro del mundo, al fomentar el uso de la energía eléctrica por sobre aquellas relacionadas con emisiones de gases invernadero (por ejemplo, autos híbridos o completamente eléctricos). Por lo tanto, es necesario definir los pasos necesarios para asegurar la sustentabilidad de la industria minera. Sin embargo, el futuro y las necesidades de explotación de los recursos minerales debe ser compatible con aspectos culturales, como la existencia y preservación de las comunidades Aymara en el extremo norte del país (18°-26° S) así como con el desarrollo de otras actividades económico-sociales de importancia como la agricultura moderna (en la franja árida a semiárida de 26°-32° S). Por último, el cuidado y protección del ambiente es un requisito clave y básico en el grupo de países desarrollados, OCDE, al cual Chile ha decidido unirse. En consecuencia, la industria minera tiene que desarrollar diferentes enfoques, incluyendo elementos de tecnología, gestión de recursos hídricos y medio ambiente, cooperación con comunidades locales, acuerdos con el sector agrícola, etc. Un enfoque que combine e integre estos elementos no sólo debe considerar aspectos de cantidad si no también elementos de calidad y riesgo de contaminación de los recursos hídricos. Además, cuando acuíferos fósiles comienzan a ser explotados, las consecuencias de esta "minería del agua" (en oposición a su uso sustentable) deben ser plenamente entendidas. Finalmente, es necesario mantener un atento monitoreo de aquellos factores, tales como la destrucción de la selva amazónica y las consecuencias del cambio climático, que pueden alterar drásticamente los ya disminuidos recursos hídricos del Norte de Chile.

Agradecimientos

Agradecemos al Prof. de la Universidad de Idaho, Dr. Jerry P. Fairley, por sus comentarios y sugerencias en una versión inicial de este documento. Esta contribución se enmarca en el trabajo desarrollado en el Proyecto CAMINAR, cofinanciado por la Comisión Europea a través su 6^o Programa Marco de Cooperación Internacional, Contrato N° INCO-CT2006-032539 (la información en este documento se proporciona como tal y no se da garantía que la

información sea apta para cualquier propósito particular. El usuario utiliza esta información a su exclusivo riesgo y responsabilidad. Este documento no representa la política o la opinión oficial de la Comisión, del Parlamento o del Consejo Europeo).

Minería y Recursos Hídricos en Chile

Jorge Oyarzún ¹, Ricardo Oyarzún ^{1,2}

¹Depto. Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena,
Benavente 980, La Serena, Chile.

²Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)

Emails. Jorge Oyarzún: joyarzun@userena.cl ; Ricardo Oyarzún:
royarzun@userena.cl

Abstract

A convergence of geologic factors resulted in massive formation of copper deposits in the arid regions of north Chile, which are responsible for about a third of the current world mining copper output. Chilean production doubled in the last decade to 5.5 Mt metallic copper in 2008. The fact that its price has soared from 1.3US\$/lb in 2004 to over 3.2US\$/lb in 2007, before the present economic crisis, boosted several mining expansions and new projects and stressed the mining-agriculture demand for the scarce and fragile resources of water in north Chile. Water rights are freely negotiable in Chile and its massive transference to the mining industry may have social and environmental consequences in both the short and long term. Besides, mining has other impacts on the quality of the scarce water resources, as a consequence of both, mining and metallurgical operations, and the accumulation of tailing piles and other mine waste deposits on the watersheds. Also, water resources in North Chile are much dependent of two complex and unpredictable climatic phenomena: the Altiplano summer monsoon (north of 26° S) and the ENSO cycle (from 26° to 32° S). Both of them could be affected by processes beyond the Chilean control, such as the deforestation of the Amazonian region, and the effect of climatic forcers linked to Global Warming. In the meantime, the mining industry has been trying technological solutions (i.e. water recycling, desalinized marine water), as well as better management practices and understanding with other local water users. That, together with

continuing exploring for deep groundwater resources, accumulated during past climatic conditions on the Atacama Desert.

The following contribution focuses on: (1) the availability of water resources in north Chile, where most of the Chilean mining resources and activities are located, (2) the interplay between the water demands of the mining industry and the needs of the agricultural sector, (3) the basic water requirements of the indigenous communities of the northern regions, (4) the potential environmental and economic conflicts due to the over-allocation of water rights and its consequences on the impairment of water resources, (5) the global and continental climatic alterations that may add further stress to the fragile equilibrium of this part of the Chilean territory, and (6) the different options open the mining companies to cope with the shortage of water resources facing its present and future activities.

Key Words

Arid zones, water management, copper mining, environmental impacts and climate change.

Introduction

Copper mining is the main economic activity in Chile, with sales that attained a peak of US\$ 32,332 million in 2006, representing 55% of the country exports and about 37% of the total copper mined in the world. Current copper reserves are about 250 Mt of metallic Cu, some 38% of the world reserves (Minería Chilena, 2006a). Besides, US\$ 1,160 million were invested in new projects or expansions in 2006, and several ventures for US\$ 14,300 millions were pending final approval in 2007. Therefore, Chilean copper mining (also the principal world source of molybdenum, its principal byproduct) is a huge industry, in spite of their fluctuant economic profits.

The geological evolution of the Chilean territory determined that an overwhelming proportion of its metallic ore deposits, including the Cu(Mo) porphyries, were located in the arid to extremely arid northern part of the country. Thus, the lack of water resources has hampered the feasibility of new projects and expansions, and menaced the sustainability of ongoing operations responsible for 67% of the current Chilean copper production (Minería Chilena, 2005a).

A thorough understanding of the interactions and competition between these drivers is of vital importance, because water shortages and conflicts are likely to increase in the next years. Furthermore, careful examination of the economic development pressures in northern Chile may hold important lessons for other arid regions of the world, many of which are facing similar decisions regarding the allocation of water resources in times of increasing scarcity and growing demands.

Geology and Mineral Resources in Chile

Chile has a peculiar geography involving a narrow 4,500 km long N-S strip of mountainous territory between 17°30' S and 56° S, which is flanked by the Pacific Ocean and the Andean Mountains. The main physiographic features of the Chilean territory include (from west to east) a coastal cordillera, a central subsiding tectonic basin, and the high Andes. This simplicity is only disrupted between 23° S to 25°30' S with the addition of a central N-S block (the so-called Domeyko Range), and between 26° S and 33° S, where the central basin is absent, as a consequence of a compressive E-W tectonics stress, also expressed in flat plate subduction along this segment "See Fig. 1, Annexe Figures and Table".

The Chilean geology exhibits the strong imprint of subduction related processes, both in terms of magmatism and tectonics. Subduction began during the Paleozoic and was accelerated by the opening of the Atlantic Ocean, some 160 Ma (million years) ago. As a consequence of this, calc-alkaline magmas were emplaced from the plutonic to the volcanic levels, in a series of almost continuous episodes (Oyarzún, 2000). Meanwhile, the magmatic belts, that followed parallel trends to the oceanic-continental plate boundary, migrated from west to east from a position west to the present Coastal Range (Upper Triassic, some 220 Ma ago) to a position on the current Argentinean territory (Upper Tertiary, some 25-10 Ma ago). Afterward, during the Pliocene, magmatism moved backward to its current position along the high Andes. This magmatic activity was accompanied by an important metallogenic one of copper-molybdenum, gold, silver and iron deposits, mainly located at the sub-volcanic emplacement levels and linked to porphyric intrusive rocks.

Although metallic ore deposits are distributed throughout the Chilean territory, most of them,

including the Cu-Mo deposits containing more than 1,000 Mt (million tons) ore are located north of 34°10' S, where water resources range from short to extremely scarce. This fact responds both to geologic and climatic-physiographic reasons, as the semi-arid to arid conditions in northern Chile since Upper Tertiary times, favored large-scale supergene enrichment processes of the primary ore grade. Among the rather limited number of metal forming important ore deposits in Chile, copper, and in particular the Cu(Mo) porphyry deposits are largely dominant, with annual production of ca. 5 Mt Cu and 43,000 t Mo as a sub product. The major Cu(Mo) porphyries are distributed between 20°10' to 34°06' S, in N-S belts of Cretaceous to Pliocene age "See Fig. 1, Annexe Figures and Table". Some of these belts, in particular those of 45-30 Ma and 12-5 Ma are especially rich, including some segment presenting an exceptional mineral endowment. The 45-30 Ma belt, extending between 21° S and 26°30' S includes the giant Cu porphyries of Collahuasi (Tarapacá), and Chuquicamata and Escondida (Antofagasta). The second remarkably rich belt is located in the high Andes from 31°40' S to 34°06' S, where three younger, Pliocene (12- 4 Ma) world-class porphyry copper deposits are located: Los Pelambres, Rio Blanco-Los Bronces, and El Teniente, each one containing several thousands Mt of Cu(Mo) ore. Other Cu deposits such as those of the IOCG (e.g., Candelaria) or the Manto (e.g., El Soldado) types are also significant, but only a few of them exceed the hundreds of Mt ore.

Important deposits of iron, gold, and silver are also located in northern Chile. High tonnage iron mining is restricted to a narrow coastal belt between 25° and 31° S, where Volcanic-hosted type iron deposits, emplaced about 110 Ma ago, attain some 100 to 300 Mt ore, grading 40-50% Fe. During the last decade, Chile has produced some 8 Mt of iron ore per year. Although gold deposits are distributed along most of the Chilean territory, all the major ones are

distributed north of 34°10' S. Gold and silver productions are about 40 t and 1,300 t per year respectively. However, the huge Au-Ag-Cu Pascua-Lama deposit, located over the Chilean-Argentinean border at 29°28'S, should add to these figures some 25 t/year of Au and 930 t/year of Ag (Minería Chilena, 2004).

In terms of industrial minerals, Chile is well known by its nitrate, iodine, and lithium deposits, all of them located north of 26° S. Current annual production is about 1 Mt of nitrate, 16,000 t of iodine, and 42,000 t of lithium carbonate (the latter, an essential metal in the manufacturing of high performance electric batteries).

Climate and Water Resources

The Chilean territory exhibits a strong N-S climatic polarity, a consequence of its geographical deployment between 17°30' S and 56°30' S. Although the influence of the Pacific Ocean and the Humboldt Stream contribute to moderate the range of temperatures, there is extreme variation in rain precipitation along the coast. The range goes from almost 0 mm/year in the northern regions (Tarapacá and Antofagasta) to over 5,000 mm/year in the southern ones (Aysen and Magallanes) (Errázuriz and others, 1987). The extreme dryness of the northern realm is due to the combined action of the cold Humboldt Stream, and the subtropical high-pressure belt, that reduce convection and thus precipitation (Houston, 2006).

A complementary W-E climatic polarity is a consequence of the huge Andean Cordillera, which reaches over 6,000 m of altitude north of 36°30' S, and acts as an effective water collector barrier. North of 26° S, most of the precipitation is related to the warm summer atmospheric fronts that originate in the Atlantic Ocean. These

fronts that cross over the Amazonia region and the Bolivian territory are responsible for the so-called Bolivian Winter ("*Invierno Altiplánico*"), that behaves as a summer monsoon and represents the only significant natural water source in this broad zone of the country (Houston and Hartley, 2003). Precipitations fall over the Andean heights but do not accumulate in glacier deposits. However, they are responsible for the presence of surface and groundwater bodies, and even sporadic flash floods episodes that may reach the Atacama Desert (Houston, 2006). Precipitations of up to 300-350 mm over the upper altitude belt may account for some replenishment of the aquifers, which mostly enclose fossil water.

North of 26° S, there is a strong correlation between precipitation and altitude, the former being negligible below 2,500 m of altitude "See Fig. 2A, Annexe Figures and Table". Besides, runoff is also insignificant for precipitations lower than 50 mm/year "See Fig. 2B, Annexe Figures and Table". Only one Andean river (the Loa), reaches the Pacific Ocean, whereas a large number of small to large basins act as groundwater reservoirs and evaporation sites (the so-called "*salares*", *i.e.*, playa deposits). These reservoirs are mostly interconnected (Herrera and others, 2006), allowing water to flow along an E-W altitude gradient. A typical arrange "See Fig. 3, Annexe Figures and Table" includes an upper tectonically controlled recharge zone, which connects downward to a wetland (the so-called "*bofedal*" or "*vega*"), and finally to a *salar* (McKittrick, 2006). According to Grossjean and Veit (2005), a major portion of these groundwater resources accumulated during past stages of more humid conditions, such as the late glacial episode between *ca.* 13,000 and 8,500 years BP. However, aridity in the northern Chile territory was a dominant condition along its geologic history. Indeed, as stated by Clarke (2006), whereas most studies of the Atacama Desert "have focused on the hyperaridity prevalent since the Miocene (about

20 Ma ago), all terrestrial sediments in the region from the late Triassic (some 200 Ma ago) onwards record evaporitic traits and therefore arid climate".

South of 26° S most of the precipitations are related to SW winter atmospheric fronts, the Southern Westerlies. Precipitations for the costal belt are (mm/year): 27 at 28°27' S, 84 at 29°54' S, 114 at 30°34' S, and 247 at 31°55' S (DGA, 1987). However, the cooling of rising air masses at the Andean mountains (200-300 km from the coast) yields precipitations that are roughly estimated as twice those of the coastal belt and accumulate in snow and glacier deposits. Besides, both coastal and Andean precipitations increase 2 to 3 folds during ENSO (El Niño-Southern Oscillation) episodes, occurring with a periodicity of 5 to 7 years. Indeed, an increased activity of the Southern Westerlies, with more frontal activity during winter, is well correlated to El Niño years. At least eight very important El Niño flood events have been observed during the last 50 years (Jenny and others, 2002). In exchange, they may diminish to a half or less during the dry La Nina years, related to a dominance of cold oceanic waters (Montecinos and Aceituno, 2003).

Except for scattered strong winter rainy episodes, generally related to El Niño, river flow increases during the summer season as a consequence of snow melting at the high Andes. This process allows the existence of six river systems that flow from high Andes to the Pacific between 26°-32° S. Except for the northernmost one (Salado river), all of them support important agricultural activity. Average flows (m³/s) for the main rivers of the belt are (Salazar, 2003): 2.9 for Copiapó (27°20' S), 3.5 for Huasco (28° 30' S), 8.1 for Elqui (30°00' S), 15.1 for Limarí (30°37' S), and 13.2 for Choapa (31°37' S). There are also nine built water reservoirs, with a total capacity of *ca.* 1,500 Mm³ "See Table 1, Annexe Figures and Table",

and related extensive water channel system networks, a fact that mitigates the shortage of precipitations during dry periods of the ENSO cycle. Given that most of this realm consist of highlands formed by granitoids or volcanic formations, groundwater resources are confined to the sediments found in the narrow east-west oriented valley (the “*Valles Transversales*” system) or within fractured rock massifs (Arumí and Oyarzún, 2006). Therefore, groundwater plays here a less important role in comparison to that of the northernmost regions (north of 26° S).

The Mining Industry and the Competition for Water Resources

The Chilean Water Management System

The Chilean water code of 1982 (modified in 2005) indicates that it is the State (through the water authority: “*Dirección General de Aguas*”, DGA) who can grant water rights upon request. No charges are issued to the individuals or companies that request the rights. Depending on nature of water use, two types of water rights can be requested: consumptive (e.g. for irrigation agriculture) and non consumptive (e.g. for hydroelectric power generation). Once the water right is granted on the basis of its availability, it becomes a private property, and the owner can freely use it, not use it, sell it or rent it. However, the use of the resource may be not authorized if the environmental authority estimates that it can result in serious harm (Minería Chilena, 2007a). Given the private character granted to a major part of the Chilean water resources, and the fact that surface and groundwater are legally two separate assets, it is difficult to set up integrated water management systems at the watershed scale. However, the agricultural sector is normally well organized in associations that: (1) distribute river waters according to existing rights (“*Juntas de Vigilancia*”), and (2) manage the irrigation

infrastructures and channel networks (“*Asociaciones de Canalistas*”). Besides, the Chilean Government is promoting the establishment of water user´s organization and conflict-solving committees (e.g. *Mesas del Agua*) to achieve a sustainable and harmonic use and protection of water by the different stakeholders, in particular the agricultural and mining sectors.

Water Requirements of the Mining Industry

Water is used in a wide variety of activities and processes in the mining industry, from the drilling exploration stage to the closure plan operations. In northern Chile, where the amount of mineral resources exceeds that of water available for its processing, its availability and cost are critical factors for the feasibility of new mining projects, and limit the expansion of the present ones. Among the many water uses in mining are its applications as a dust suppressor in mines and roads, its use for the concentration of sulfide minerals, the transport and deposition of the tailings, the transport of sulfide concentrates to shipping ports, and the leaching of oxide and sulfide minerals in piles (heap leaching). All these uses are of paramount importance and lack real alternative solutions beyond the levels of improved recycling. Thus, the modern mining industry, driven both by environmental requirements and by the progressively scant water resources, has developed a number of devices and procedures aiming to: (1) the recycling of water, and (2) the control of pollution by infiltration of metallic rich, acidic, or cyanide bearing solutions. However, there are physical and economical limits for these conservative measures. The concentration of sulfide copper minerals is the most water demanding activity, with about 1 to 3 m³ water per ton ore for the average exploitations (Lagos, 1997; Minería Chilena, 2005a).

In 1995 the Chilean mining industry located between Regions I and VI required about 25 m³/s for its copper production (Salazar, 2003), that was then about 2.5 Mt/year and has doubled to attain over 5 Mt in 2006 (COCHILCO, 2007). Therefore, a prudent estimation for current water mining requirements is close to 50 m³/s. According to the Salazar (2003) report, the figure mentioned represented only 6.8% of the total national water consumption (excluded the non consumptive use for hydroelectric power generation). However, this percentage drastically increases in northern Chile, where most of the mining is done, water resources are meager, and a number of new mining projects are awaiting approval.

Mining and Water Resources Between 18° and 26° S

The Tarapacá and Antofagasta regions integrate the so-called "*Norte Grande*" (Deep North). In 2007 the northern part of the Tarapacá Region was separated into a new administrative region: Arica-Parinacota "See Fig. 1, Annexe Figures and Table". Considering that most of the current mining activity is located in Tarapacá, and for the sake of simplicity, we will address both regions with its historical Tarapacá name.

Tarapacá and Antofagasta share a number of important characteristics, including the hyperaridity of its coastal and central domains, the physiographic organization in N-S elongated basins and ranges, the dominance of the Altiplano (high plateau) summer monsoon, the presence of abundant copper resources in the Coastal and pre-Andean ranges, and the existence of rich nitrate and iodine deposits in the Tamarugal central basin.

Despite the apparently similar geographic and cultural settings, included the presence of Aymara communities in the pre-Andean ranges, the Tarapacá and Antofagasta regions have contrasting conditions regarding the current use

of water resources "See Fig. 4, Annexe Figures and Table". This is due to the magnitude and the number of high tonnage mining operations, which are very large in Antofagasta. Besides, the Tarapacá Region has been conservative regarding the granting of water rights for mining production expansions, as in the case of the Doña Inés de Collahuasi copper mine, subjected to restrictions for its possible responsibility in the reduction of natural springs discharges (Minería Chilena, 2007b). In addition, the agricultural sector is still a major consumer of water resources in Tarapacá and, despite its extreme geographic position and climatic conditions, the Tarapacá Region exhibits a distribution profile of water consumption that is more alike to that of the more agricultural Coquimbo Region "See Fig. 4, Annexe Figures and Table".

Mining and Agriculture Water Demands

Copper price increased from an annual average of US\$ 1.30/lb in 2004 to US\$ 2.70/lb in 2006, and US\$ 3.20/lb in 2007. This fact, combined to a number of new discoveries and reserve expansions at active districts, propelled a number of important mining projects in Tarapacá and Antofagasta. Considering only the latter region, mining projects for US\$ 4,500 million were by 2005 starting or close to start (Minería Chilena, 2005b). Besides, CODELCO Norte (the main branch of the state-owned copper mining company), announced (the same year) investments of US\$ 6,000 millions for its Antofagasta Region operations during the 2006-2015 period (Minería Chilena, 2005c). Although the current economic world crisis may hamper some of these projects, the present (April 2009) prospect for a copper price around US\$ 2.0/lb, for the coming years, is a positive factor for the development of the projects, when considered that the given figure was the price level of 2005.

In order to cope with the growing water

requirements, different options have been analyzed by the mining companies. They include acquisition of water rights from farmers, public water utilities or other mining companies. Giving the free market for water resources established by the Chilean water code, these are legitimate and economically attractive options. However, water right acquisition from small farmers may pose a serious danger to preservation of cultural heritage of the remaining Aymara native communities of the Precordilleran valleys and the Pampa de Tamarugal oasis. Key elements of this cultural survival are its agricultural activities and the annual religious celebrations and pastoral festivals in the different native villages. Therefore, although the quality and economic output of the Precordilleran agriculture are rather low (Alonso, 2001), its extinction could lead to the loss of the Aymara culture in Chile.

On the other side, the fact that the public water utility in Antofagasta city is owned by an important mining holding, has probably facilitated the trade of the water resources formerly consumed by the city to a mining operation (Spence) belonging to other mining company. In exchange, the population of Antofagasta is now served with desalinated seawater. In addition to the economic benefits, this exchange has improved the quality of the water supplied to the city, by lowering its natural arsenic content. Although there are other cases of using desalinated seawater by mining operations, this one, that involves technological, economical and managerial aspects is particularly clever, as avoids the energy costs required to pump desalinated water from the coast to the far away and higher altitude mining operations and appears as a win-win solution.

As a result of the free market operating on such extreme competitive conditions, the price for 1 l/s water rights increased from US\$ 2,500 (farmer to farmer transfer) or US\$ 2,000-3,800 (farmer to urban transfer) to approximately US\$

75,000-225,000 in the Tarapacá and Antofagasta regions. A major water transfer involved two mining companies, Zaldivar and Escondida, the former selling water rights for 631 l/s by the sum of US\$ 135 million to be paid over 15 years (McKittrick 2006). Although it is evident that a poor, marginal agricultural activity cannot compete for water resources with the mining industry, the present environmental regulations limit the access of the mining companies to other water resources. For example, in November 2007, the environmental authority of Antofagasta refused an application of the Escondida mining company to pump 1,027 l/s from two Andean locations (Minería Chilena, 2007b). The reasons behind this refusal relate to the fact that the water sources are close to springs and saline lakes, which are the natural habitat of local populations of Andean flamingos and other wild species. Besides, these water reservoirs provide the flow for water springs and the survival of an important Andean wetland ecosystem (*bofedal*), which in turn is directly related to the pastoral activities of the Andean aymara communities.

Environmental Impacts

Mining in the Tarapacá and Antofagasta Regions has been favored in environmental terms by the fact that many important deposits (e.g., Escondida, Zaldivar, Lomas Bayas, El Tesoro) are far away from towns or villages and placed where few life-forms are present. Besides, there are few opportunities for drainage pollution in a territory where only one river reaches the ocean and groundwater levels (when present) are normally deep. In addition, except for Chuquicamata, where sulphide smelting process is responsible for important SO₂(gas) and As₂O₃(particulate) emissions, the mining industry has opted for hydrometallurgy (heap-leaching followed by SX-EW) or by the simple concentration of sulphide minerals by flotation.

Mining and Water Resources between 26° S and 32° S

There is an important increase in water precipitation and in surface runoff in this segment, which includes the Atacama and Coquimbo Regions. Agricultural activities, benefited from favourable solar radiation conditions, have incorporated modern crop practices and irrigation technology, allowing the production of valuable exportable crops. Also, a number of water reservoirs "See Table 1, Annexe Figures and Table" contribute to mitigate the agricultural risk of arid periods due to the ENSO cycle. Thus, the agricultural sector competes with the mining industry in rather equal terms for water resources.

Mining and Agriculture Water Demands

Although important copper mining operations are carried out in the two regions (e.g., Manto Verde, El Salvador, and Candelaria in Atacama; Andacollo and Los Pelambres in Coquimbo), current competition for water resources is mainly located in the Atacama region, where those resources are very scant. Nevertheless, other controversial consequences of the mining activities are or have been present in both regions.

In Atacama, agriculture is supported by two permanent rivers running from the Andes to the ocean: Copiapó and Huasco. A conflictive situation has arisen between the farmer's association and the mining companies, when new copper and gold projects for US\$ 4,532 million are close to start. The new projects include the porphyry copper deposits of Caserones (Copiapó river watershed) and the huge epithermal Au-Ag-Cu deposit of Pascua Lama (Huasco river watershed). The conflict relates to the current water shortages in the Atacama Region, which has even affected its

availability for human consumption in the cities of Copiapó and Caldera. Besides, there is a notorious decrease in groundwater heads in the Copiapó river basin, and a decrease in the Lautaro (Copiapó river) reservoir levels (Minería Chilena, 2007c). In addition, the US\$1,500 million Pascua-Lama project on the Andean headwaters of the Huasco River, at the Chilean-Argentinean border, has raised controversy and public opposition in the region, as well as international awareness. The farmers of this river basin are worried, about probable pollution by heavy metals and chemicals, and by the water shortage risks (Minería Chilena, 2006b).

Considering the location of the deposit, the highly fractured and altered rocks of the district, and the high arsenic contents associated to the gold-copper mineralization, pollution risks are effectively high. In fact, the geological, structural, and mineralogical setting is very similar to that of the neighbour El Indio district (Turbio sub-basin, Elqui watershed, Coquimbo Region), where massive contamination of waters and sediments by Cu-As-Zn is observed (Oyarzun and others, 2007; Galleguillos and others, 2008). On the other hand, the water shortage risk relates to the presence in the surrounding area of about 200-250 Mm³ of ice deposits (Minería Chilena, 2005d), that perform as semi-permanent snow packs. Three of these snow packs are right on top of or close to the future mining operations. These deposits are valued because their partial melting contribute to mitigate low runoff periods during dry years. As a consequence of both natural conditions and to the continuous human activities in the project area, a significant part of these ice mass, about 70% according to unconfirmed reports, has been affected or has already melted.

Except for local scale problems, no major conflict related to mining-agriculture competition for scant water resources exists yet in the Coquimbo Region. Although McKittrick (2006)

estimate water rights prices both for the Atacama and Coquimbo regions in the range of US\$ 7,500-15,000 l/s, competition in the Coquimbo Region is rather mild due to the scarcity of new major mining projects. However a potential problem lies on the different use of hydrological resources, when water rights are transferred from farmers to miners. In fact, water rights have been granted in excess regarding the real availability of this resource. This was possible because of the discontinuous use of the resource by farmers, as well as by the effect of water infiltration during both transport along non-lined channels and soil irrigation practices. This infiltrated water is then used downstream by other water right owners (Oyarzún and others, 2008). However, when water rights are bought by a mining company, water is normally retired from the basin and this use-recharge-reuse process does not take place. Recently, ca. 400 l/s from La Cantera basin (south from La Serena) were bought by Carmen de Andacollo, a mining company that will mine and concentrate about 429 Mt sulphide ore during the next 20 years (Minería Chilena, 2007d). Considering the characteristics of the small and shallow basin, that obtains a minimum recharge from the meagre coastal precipitation (below 90 mm/year), it is likely that serious problems will arise in a near future between the La Cantera farmers and the mining company.

Other Environmental Impacts

One of the results of the long history of non-regulated mining activities is the existence of hundreds of unconfined tailings and other types of mine wastes such as abandoned mineral dumps and heap leaching piles. These deposits are scattered in the mountains and valleys of this territory, they may be found in the proximity of villages and even within them (e.g., the mining town of Andacollo). Taken into consideration the growing agricultural importance of the 26°-33° S Regions, and the

increasing demand from foreign markets of safe crops (grown on non-polluted lands), the risk assessment and reclamation of these liabilities should be undertaken as soon as possible.

Additional Factors on Water Availability and Demand

ENSO, the Summer Monsoon and the Amazon

Rising water demands may greatly overweight the effect of natural factors such as water shortages due to global warming or disturbances related to the ENSO cycle (Montecinos and Aceituno, 2003). The combined action of man-related and natural factors poses an even more threatening scenario. In addition, an increase in atmospheric CO₂ could also affect the ENSO cycle (Collins, 2005), and therefore the hydrological resources of North-central Chile, in particular the 26-32° S belt. Another source of concern is the high variability exhibited by ENSO during the Holocene (the last 10,000 years), as recorded by geologic and archaeological evidence, which included extreme episodes considered responsible for the destructions of pre-Inca coastal civilizations (Grodzicki, 1994).

Besides, the Altiplano summer monsoon yields (the only significant water source north of 26° S) could be seriously affected by the progressive destruction of the Amazonia wetlands and forests. These precipitation fronts depend on tropospheric winds, carrying increased water contents supplied by the Atlantic Ocean, and partly by the Amazonia region (Vuille, 1999) that maintain inland humid atmospheric conditions. Thus, the Amazonia performs as a sustaining mechanism, allowing the atmospheric water transference over 3,000 km of continental territory. In consequence, dry conditions on the Amazonia pose a serious threat for the Altiplano summer monsoon, the only source of

precipitations for the Chilean northernmost regions. Unfortunately, this is a likely scenario that should be carefully monitored, considering that about 40% of the Amazonia forest could be completely destroyed and an additional 20% deteriorated in the next 20 years (Wallace, 2007).

Global Climate Change Threats

The global climate change might affect the future availability of water resources in north Chile in two ways. First, by its effects on the Amazon basin, and therefore on the Altiplanic summer monsoon, as discussed above. Second, by a modification of the ENSO cycle and the Southern Westerlies. Both cases involve considerable uncertainties related to: (1) the different possible scenarios for greenhouse gas emission; (2) the current limitations of the global climate change models; and (3) the possible effects of processes not considered by these models, such as outgassing and chemical reactions in deep ocean spreading zones (Khilyuk and Chilingar, 2006). Regarding the probable impacts of global warming on the ENSO Cycle, McPhaden and others (2006) conclude that "we cannot say with confidence at present how global warming will affect either the ENSO variability or the background state on which it is superimposed". However, they also indicate that "permanent El Niño-like conditions developed in the tropical Pacific during the warm Pliocene, about 3 to 5 Ma, when atmospheric CO₂ levels were comparable to those of today".

A study on climatic variability of the Chilean territory for the present century (CONAMA, 2006; PRECIS model, spatial resolution 25 km) considered two potential scenarios for greenhouse gas emissions for the 2011-2100 period, a moderate and a severe one. Three periods were considered: 2011-2030, 2046-2065, and 2071-2100. In the worst case scenario, the 2046-2065 period registers a 300-

500 m rise of the 0° C isotherm, thus severely reducing the capacity of the Andes mountains to store snow during the winter season. The model also forecasts for the same scenario a decrease in precipitations for the 30°-40° S belt, but an increase in precipitation is predicted for the summer monsoon. However, the model does not consider the possible effects of deforestation or those of global climate change on the Amazon region. Thus, in general terms, global climatic change predictions are not favorable for the already stressed region under consideration.

Conclusions

Abundant mineral resources in Chile are located in the north half of the country, where water resources are meager or very scarce. This mineral endowment includes the major copper and molybdenum resources of the Earth, as well as their principal mining operations, that are of fundamental importance for the Chilean economy. Besides, copper should occupy a central role in the future world development strategies, depending on electric power to avoid greenhouse gas emissions (f.i., hybrids or fully electric cars). Therefore, it is mandatory to define the required steps to assure the sustainability of this mining industry. However, its future has to be compatible with the cultural surviving of the Aymara communities in the northern regions (18°-26° S) and with that of modern agriculture in the 26°- 32° S arid to semi-arid belt. Also, environmental care is now a must in the group of advanced societies, such as the OECD, to which Chile has decided to join. In consequence, the mining industry has to develop a number of combined approaches, including technology, water and environmental management, cooperation with local communities, agreements with the agricultural sectors etc. Those approaches should aim not only the availability and distribution of water resources, but also consider its pollution risks. Besides, when fossil aquifers are tapped, the

consequences of “mining water” (in opposition to its sustainable use) should be fully understood. Finally, it is necessary to maintain an attentive monitoring to those factors, such as the destruction of the Amazon forest and the consequences of climate change, that may drastically alter the already meager hydrological resources in Northern Chile.

Acknowledgements

We thank Prof. Jerry P. Fairley (U. of Idaho) for his constructive comments on an earlier version of this document. This contribution is done within the framework of the CAMINAR Project, partially funded by the European Commission, contract number INCO-CT2006-032539 (The information in this document is provided as it is and no guarantee or warranty is given that the information is fit for any particular purpose. The user thereof uses the information at its sole risk and liability. This document does not represent the official policy or views of the European Commission, Parliament or Council).

- Alonso H (2001) Uso competitivo del agua en minería y agricultura en el Norte de Chile. *Revista Minería Chilena* 236: 31-37.
- Arumí JL, Oyarzún R (2006) Las aguas subterráneas en Chile. *Boletín Geológico y Minero* 117: 35-45.
- Camus F, Dilles JH (2001) A special issue devoted to porphyry copper deposits of Northern Chile; preface. *Economic Geology* 96: 233-237.
- Clarke, JDA (2006) Antiquity of aridity in the Chilean Atacama desert. *Geomorphology* 73: 101-114.
- COCHILCO (2007) Yearbook: copper and other mineral statistics 1987-2006 [in Spanish]. Comisión Chilena del Cobre.
- Collins M, × The CMIP Modelling Groups (BMRC (Australia), CCC (Canada), CCSR/NIES (Japan), CERFACS (France), CSIRO (Australia), MPI (Germany), GFDL (USA), GISS (USA), IAP (China), INM (Russia), LMD (France), MRI (Japan), NCAR (USA), NRL (USA), Hadely Centre (UK), YNU (South Korea)) (2005) El Niño- or La Niña-like climate change?. *Climate Dynamics* 24: 89-104.
- CONAMA (2006) Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Comisión Nacional del Medio Ambiente-Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- DGA (1987) Balance hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Errázuriz AM, Cereceda P, González JI, González M, Henríquez M, Rioseco R (1987) Manual de Geografía de Chile. Andrés Bello, Santiago, Chile.
- Galleguillos G, Oyarzún J, Maturana H, Oyarzún R (2008) Retención de arsénico en embalses: El caso del Río Elqui, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México* 23: 29-36.
- Grodzicki J (1994) Nasca: Los síntomas geológicos del fenómeno El Niño y sus aspectos arqueológicos. *Estudios y Memorias N° 12*, Universidad de Varsovia, Centro de Estudios Latinoamericanos.
- Grosjean M, Veit, H (2005) Water resources in the arid mountains of the Atacama desert (Northern Chile): past climate changes and modern conflicts. In: Huber UM, Bugmann HKM, Reasoner MA (Eds.) *Global Change and Mountain Regions*, Springer, the Netherland. Pages 93-104 .
- Grilli A (2001) Disponibilidad de recursos hídricos y explotación de recursos mineros. *Revista Minería Chilena* 240: 29-35.
- Herrera C, Pueyo JJ, Saez A, Valero-Garcés B (2006) Relaciones de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y laguna Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. *Revista Geológica de Chile* 33: 299-325.
- Houston, J (2006) The great Atacama flood of 2001 and its implications for Andean hydrology. *Hydrological Processes* 20: 591-610.
- Houston J, Hartley AJ (2003) The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the hyper-aridity in the Atacama desert. *International Journal of Climatology* 23: 1453-1464.
- Jenny B, Valero-Garcés BL, Urrutia R, Kelts K, Veit H, Appleby PG, Geyh M (2002) Moisture changes and fluctuations of the Westerlies in mediterranean Central Chile during the last 2000 years: the Laguna Aculeo record (33°50'S). *Quaternary International* 87: 3-18.
- Khilyuk LF, Chilingar GV (2006) On global forces of nature driving the Earth's climate. Are humans involved? *Environmental Geology* 50: 899-910.
- Lagos G (1997) Eficiencia del uso del agua en la minería del cobre. Serie Documentos de Trabajo N° 273. Centro de Estudios Públicos, Santiago.

- McKittrick R (2006) Development and protection of groundwater resources in northern Chile. VI World Copper Conference, Santiago, Chile.
- McPhaden MJ, Zebiak S, Glantz MH (2006) ENSO as an integrating concept in earth science. *Science* 314: 1740-1744.
- Minería Chilena (2004) Barrick iniciará explotación de Pascua-Lama en 2009. *Revista Minería Chilena* 279: 9-13.
- Minería Chilena (2005a) ¿Hay agua para la industria minera?. *Revista Minería Chilena* 294: 113-117.
- Minería Chilena (2005b) Nueva oleada de proyectos mineros. *Revista Minería Chilena* 288: 31-39.
- Minería Chilena (2005c) División Codelco Norte: una panorámica de los grandes proyectos. *Revista Minería Chilena* 292: 19-23.
- Minería Chilena (2005d) Barrick alista plan de manejo de glaciares. *Revista Minería Chilena* 286: 153-154.
- Minería Chilena (2006a) Panorama minero en su mejor momento. *Revista Minería Chilena* 299: 71-93.
- Minería Chilena (2006b) Pascua Lama espera aprobación Argentina. *Revista Minería Chilena* 299: 123-129.
- Minería Chilena (2007a) El revés de Pampa Colorada. *Revista Minería Chilena* 317: 59-61.
- Minería Chilena (2007b) Falta de agua amenaza crecimiento. *Revista Minería Chilena* 313: 19-21.
- Minería Chilena (2007c) La encrucijada del agua en Atacama. *Revista Minería Chilena* 310: 73-75.
- Minería Chilena (2007d) Hipógeno: el proyecto estrella de Carmen de Andacollo. *Revista Minería Chilena* 313: 73-74.
- Montecinos A, Aceituno P (2003) Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in Central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate* 16: 281-296.
- Oyarzún J, 2000. Andean metallogenesi: a synoptical review and interpretation. In: Cordani UG, Milani EJ, Thomaz Filho A, Campos DA (Eds.) *Tectonic Evolution of South America, 31st International Geology Congress, Rio de Janeiro*. Pages 725-753.
- Oyarzún R, Oyarzún J, Lillo J, Maturana H, Higuera P (2007) Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion-contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology* 53: 283-294.
- Oyarzún R, Arumí JL, Alvarez P, Rivera D (2008) Water use in the Chilean agriculture: current situation and areas for research development. In: Sorensen, M.L. (Ed.) *Agricultural Water Management Trends*. Nova Publishers, Inc., New York.
- Salazar C (2003) Situación de los recursos hídricos en Chile. Reporte de Investigación. Third World Centre for Water Management, the Nipon Foundation.
- Skewes MA, Stern CR (1996) Late Miocene mineralized breccias in the Andes of Central Chile: Sr- and Nd-isotopic evidence for multiple magmatism sources. In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R (Eds) *Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization, Styles and Metallogeny*. Society of Economic Geologists Special Publication N° 5. Pages 33-41.
- Vuille M (1999) Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology* 19: 1579-1600.
- Wallace S (2007) El último bastión ecológico. *Nacional Geographic (en español)* 20: 2-29

Anexo Figuras y Tabla

Tabla 1. Embalses en la franja 26°-32° S

Región	Name	Location	Maximum storage (Mm3)
Atacama	Lautaro	27o 24' S; 70o 18' W	35
	Santa Juana	28o 36' S; 70o 36' W	168
Coquimbo	La Laguna	30o 08' S; 70o 04' W	40
	Puclaro	30o 00' S; 70o 50' W	200
	Recoleta	30o 28' S; 71o 04' W	100
	La Paloma	30o 44' S; 71o 00' W	750
	Cogotí	31o 00' S; 71o 05' W	150
	Corrales	31o 52' S; 70o 56' W	50
	Culimo	32o 04' S; 71o 19' W	10

Figura 1. Principales rasgos tectónicos, metalogénicos y geográficos del Norte de Chile (modificado de Skewes y Stern, 1996; Camus y Dilles, 2001).

1: Perú-Chile trench; 2: Graben central; 3: Río; 4: Depósito de cobre porfírico; 5: Depósito epitermal de Au(Ag); 6: Cinturón metálico; 7: Regiones (A: Arica-Parinacota; B: Tarapacá; C: Antofagasta; D: Atacama; E: Coquimbo; F: Valparaíso; G: Metropolitana; H: O'Higgins); 8: Límites administrativos; 9: Ciudad; 10: Límite internacional

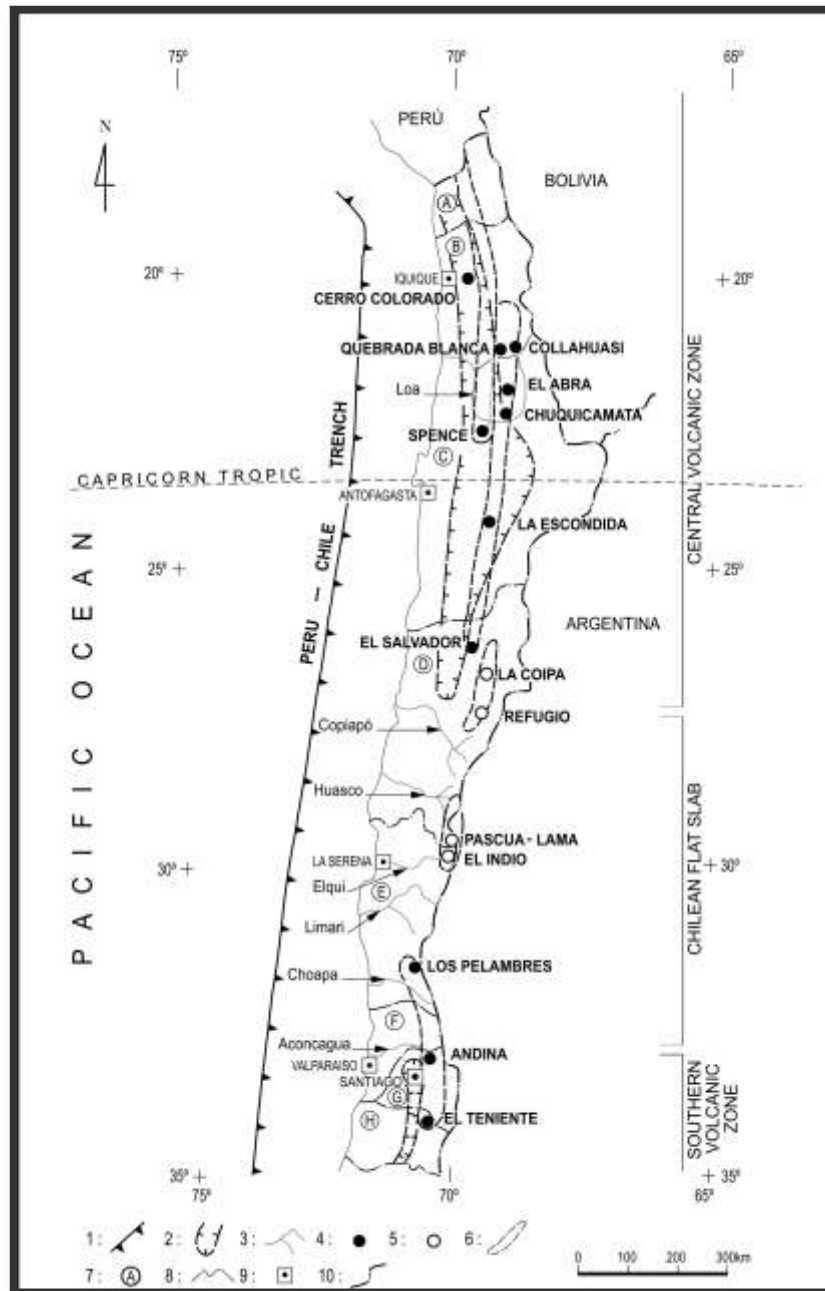


Figura 2.
Relaciones Altitud-precipitación-escorrentía en el Norte de Chile (modificado de Grilli, 2001)

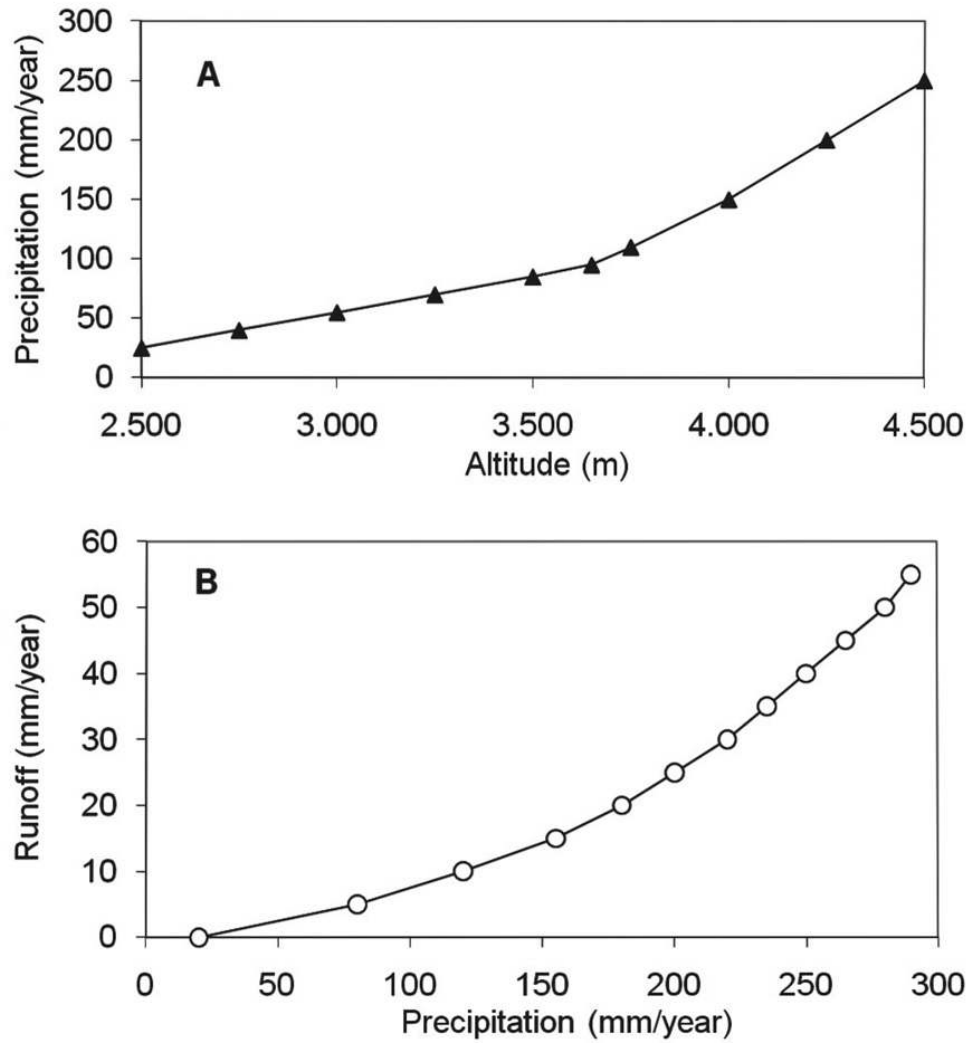


Figura 3.

Esquema conceptual de las zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas en los Andes del Norte de Chile (modificado de McKittrick, 2006)
 1: Roca basal; 2: Sedimentos cenozoicos; 3: Fallas normales; 4: Sedimento de salar; 5: Humedales (bofedales); 6: Proceso evaporativo; 7: Nivel freático regional; TDS: Sólidos totales disueltos.

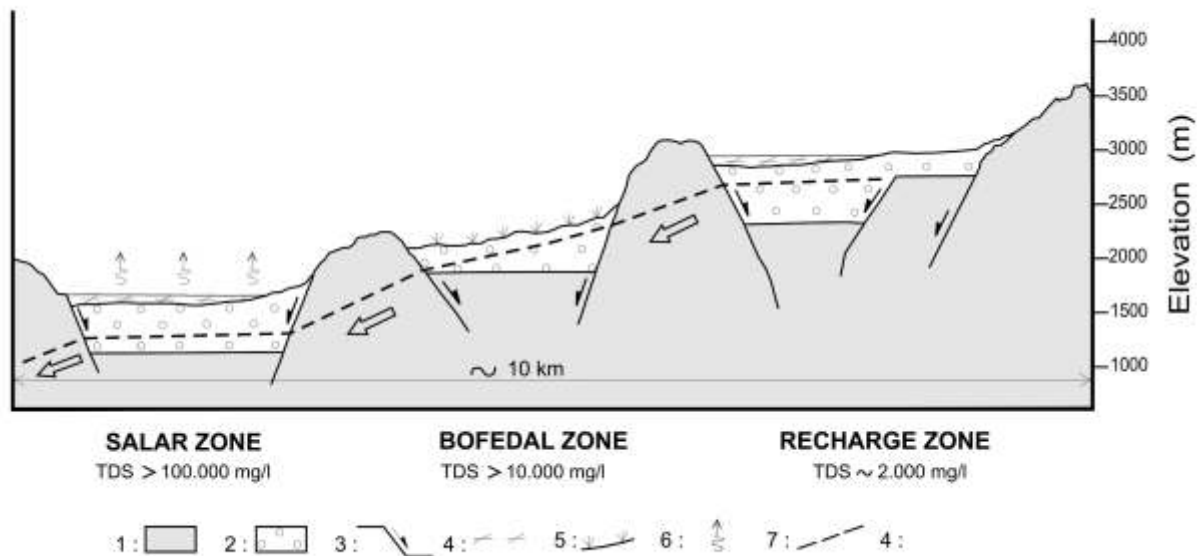
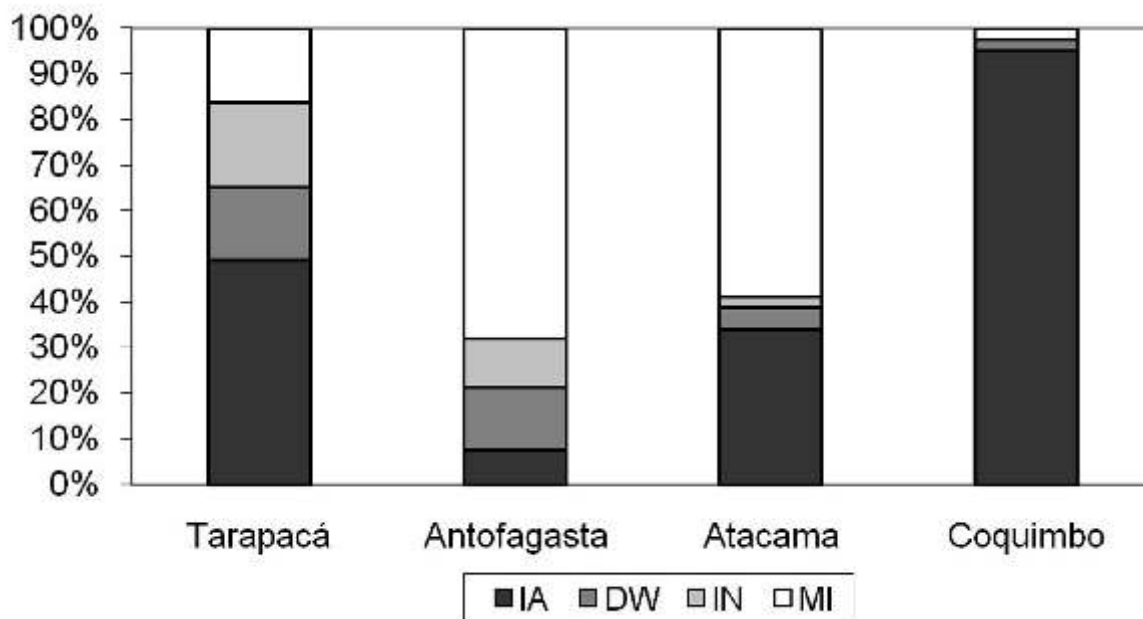


Figura 4.

Patrones de uso de agua en diferentes regiones del Norte de Chile (IA: Agricultura de Riego; DW: Agua Potable; IN: Industria; MI: Uso en Minería)



Evaluación de Impactos Ambientales

Jorge Oyarzún Muñoz (Geol. Dr. Sci.)

Director Progr. Diplomado en Gestión Ambiental Minera (GAM-ULS.)
Coord. Acad. Progr. Diplomado en Sustentabilidad Ambiental Minera (ULS.)
Prof. Titular Depto. Ingeniería de Minas Universidad de La Serena (Chile). Carreras
de Ingeniería Civil Ambiental e Ingeniería Civil de Minas.



Pintura de la serie sobre incendios de pozos de petróleo en Kuwait durante la Guerra del Golfo
Susan Crile 1991 - Austin Museum of Art - <http://www.tfaoi.com/newsm1/n1m283.htm>



CONTENIDOS

Capítulo 1. Evaluación de Impacto Ambiental y Ordenación del Territorio

- 1.1 El Paradigma Ambiental
- 1.2 Las Leyes Ambientales
- 1.3 Surgimiento de la EIA
- 1.4 EIA y Ordenación del Territorio

Capítulo 2. Proyectos, Aspectos e Impactos Ambientales

- 2.1 Los Proyectos y su Definición y Flexibilidad
- 2.2 El Medio Ambiente y su Dinámica y Complejidad
- 2.3 Impactos Ambientales: Factores Culturales e Ideológicos
- 2.4 Naturaleza y Gravedad de los Impactos Ambientales
- 2.5 Impactos de Operaciones Normales y de Emergencias Ambientales
- 2.6 La EIA, entre la Ciencia y el Arte Adivinatorio

Capítulo 3. La EIA en la Legislación de Chile y el Extranjero

- 3.1 La EIA en Chile
- 3.2 La EIA en Argentina
- 3.3 La EIA en E. E. U. U.
- 3.4 La EIA en España y en el Reino Unido

Capítulo 4. La EIA y las Normas Ambientales

- 4.1 Naturaleza y Utilidad de las Normas Ambientales
- 4.2 Criterios y Procedimientos en la dictación de Normas Ambientales
- 4.3 Algunas Normas. Las Zonas Saturadas o Latentes
- 4.4 Las Normas Ambientales y la EIA

Capítulo 5. La Evaluación de Impacto Ambiental y la Participación Ciudadana.

- 5.1 Democracia, Comunidad y Participación
- 5.2 La Participación Ciudadana en Chile
- 5.3 Participación Ciudadana: Ambiente, NIMBY e Intereses Económicos

Capítulo 6. Las Metodologías de Evaluación de Impactos Ambientales

- 6.1 Aplicación y Evaluación de las Metodologías
- 6.2 Las Listas de Chequeo y la Matriz de Grandes Presas
- 6.3 La Matriz de Leopold y el Método Delphi
- 6.4 El Método Batelle – Columbus
- 6.5 Los Diagramas de Redes
- 6.6 El Método de Superposiciones de Mc Harg y los SIG
- 6.7 La Matriz de Metas-Logros: Una Visión Comunitaria y de la Equidad Social
- 6.8 El Análisis de Decisiones: Una Visión Experta

Capítulo 7. Los Modelos Físico-Matemáticos en la Evaluación de Impacto Ambiental

- 7.1 Naturaleza, Valor y Limitaciones de los Modelos.
- 7.2 Algunos Modelos Conceptuales Principales
- 7.3 La Elaboración de Modelos Físico-Matemáticos
- 7.4 Criterios para la Selección y Aplicación de Modelos
- 7.5 La EIA y el Peso de los Modelos

Capítulo 8. Los Informes de Estudios de Impacto Ambiental

- 8.1 Objetivos y Contenidos del Informe de IA
- 8.2 Características de Fondo de un Buen Informe de IA
- 8.3 Características de Forma de un Buen Informe de IA
- 8.1 Cómo Leer un Informe de IA: Desafíos para los Evaluadores

Capítulo 9. Estudios y Evaluaciones de Impacto Ambiental: Análisis Crítico

- 9.1 Los Estudios de Impacto Ambiental son también Evaluaciones
- 9.2 Factores Económico-Sociales en Estudios y Evaluaciones de Impacto Ambiental
- 9.3 Los Servicios del Estado en la EIA
- 9.4 La Percepción Pública del SEIA
- 9.5 ¿Conflictos Ambientales o Conflictos Económicos Intersectoriales?
- 9.6 ¿Existe en Chile una Efectiva Cultura Ambiental?

Capítulo 10. La Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos Mineros

- 10.1 Complejidad Física de la EIA de Proyectos Mineros
- 10.2 Complejidad Tecnológica y Evolución de una Explotación Minera
- 10.3 Entorno Físico y Biológico del Proyecto e Impactos Ambientales
- 10.4 Entorno Social y Cultural e Impactos Ambientales
- 10.5 Planes de Cierre y la EIA de Proyectos Mineros

Capítulo 1

Evaluación de Impacto Ambiental y Ordenación del Territorio

1.1

El Paradigma Ambiental

El ser humano no cuenta con un aprecio innato de los valores ambientales y el "tema ambiental" emergió recién en la segunda mitad del siglo XX como una materia de interés científico, político y público. Sin embargo, algunos aspectos relacionados con el tema tienen un origen anterior. Entre ellos está el aprecio por el paisaje, que se debe principalmente a los pintores que, desde el Renacimiento en adelante, enseñaron a valorar la riqueza visual de la naturaleza, más allá de su utilidad económica. Desde el lado de la ciencia, la ecología (término introducido en 1878) mostró las complejas relaciones entre los seres vivos, y entre éstos y su ambiente. Sin embargo, recién a partir de 1950, una serie de catástrofes llevó el tema ambiental a la preocupación pública. Entre ellas estuvo el envenenamiento por mercurio de Minamata (Japón, 1950-60), la muerte de unas cuatro mil personas en Londres por un episodio de contaminación atmosférica (1952) y la muerte masiva de aves por efecto del DDT y otros insecticidas en E.E.U.U., relatada por Rachel Carson en su libro "La Primavera Silenciosa" (1962). A éstas se unieron varios accidentes de buques petroleros, con los respectivos derrames y sus efectos en la fauna marina y en la contaminación costera.

En 1972, científicos del MIT y otras universidades, unidos en el llamado "Club de Roma", publicaron el informe "Los Límites del Crecimiento", que planteó las dificultades del crecimiento poblacional y económico, en términos de la limitada disponibilidad de materias primas y energía, así como de la contaminación generada. Ese mismo año, la

Comunidad Europea decide adoptar una política medioambiental. Dos años antes (1970), E.E.U.U. había creado la Agencia de Protección Ambiental (USEPA).

En los años siguientes, se agregaron casos como el de Love Canal (E.E.U.U., 1980), donde desechos tóxicos enterrados bajo una población fueron causa de enfermedades y muertes, el escape de isocianato de metilo de la planta de Bhopal, India, de Unión Carbide, responsable de 2000 muertes (1984), el desastre del reactor nuclear de Chernobyl, Ucrania (1986), el derrame del Exxon Valdez en 1989, etc.

Por otra parte, Gro Harlem publica en 1987 "Nuestro Futuro Común" y se va estableciendo el concepto del "Desarrollo Sostenible", que implica el uso responsable de los recursos naturales, la equidad social del desarrollo y la prevención de la contaminación. Actualmente, este concepto se ha incorporado al "paradigma ambiental" y forma parte del discurso de los gobiernos y de las empresas. Estas últimas han incorporado también las normas de gestión ambiental, basadas en la norma británica BS-7750 (1992).

En tanto, el tema ambiental ha evolucionado Norte América y Europa en líneas diversas, y alcanzado en algunos casos posiciones extremas. Algunas de estas líneas conciernen a temas como los siguientes:

- Contaminación atmosférica.
- Contaminación de aguas superficiales y subterráneas.
- Residuos peligrosos y urbanos.
- Seguridad alimentaria (contaminación y transgénicos).
- Biodiversidad y especies en riesgo de extinción.
- Preservación de ambientes naturales valiosos (parques, etc.).

- “Derechos” de la flora y fauna silvestres.
- “Ecología” industrial (empresa y medio ambiente).
- Adelgazamiento de la capa de ozono.
- “Gases invernadero” y calentamiento global.

En el análisis y toma de posición respecto a los distintos temas, se identifican dos posiciones diferentes. Una, que enfoca los temas ambientales desde el punto de vista de los intereses humanos, vale decir, que entiende que cuidar el medio ambiente es necesario para el bienestar e incluso para la supervivencia de la humanidad. La otra, que postula que los valores ambientales deben ser resguardados incluso más allá de los intereses propios de los seres humanos. Esta posición, la de la llamada “ecología profunda” considera a la humanidad como un miembro más de la comunidad de los seres vivos, que en consecuencia tiene derechos y obligaciones hacia las demás especies con las que comparte la Tierra.

Finalmente, es importante considerar el hecho de que el tema ambiental aparece frecuentemente asociado a otros, como los derechos de los pueblos nativos a preservar su identidad cultural, al tema de la equidad social, etc. y que incluso toma connotaciones filosóficas y religiosas. Desde luego, también pasa a ser un tema político y se mezcla con materias como la globalización. Ignorar lo anterior, puede llevar a serios errores, en algunos casos asociados a graves pérdidas económicas debidas a proyectos industriales fallidos (ello ha sido “oficializado” en Perú donde la “Licencia Social”, otorgada por las comunidades locales, es prácticamente obligatoria para los proyectos mineros).

1.2

Las Leyes Ambientales.

Aunque existen antiguos y curiosos precedentes, como un decreto real del año 1285 que prohibía quemar carbón en Londres (ya afectado por el smog), la legislación ambiental es de fecha relativamente reciente. Así, en E.E.U.U., las leyes de protección de la atmósfera y el agua datan de 1972 y la de protección de especies biológicas en peligro, de 1973. El mismo país, promulgó en 1977 una ley relativa a control y restauración de labores mineras a cielo abierto, y en 1986, la denominada ley del “superfondo”, destinada a proveer fondos y procedimientos para la limpieza de sitios contaminados. Un año antes (1985), se había promulgado una ley relativa a seguridad alimentaria, con el fin de proteger a la población de efectos de la contaminación a través de los alimentos.

En Chile se dictaron algunas disposiciones legales ya en la primera mitad del siglo XX, destinadas a la protección de las aguas de riego. A ellas fueron agregándose otras disposiciones (leyes o decretos) de distintos ministerios, las cuales no fueron refundidas ni eliminadas al dictarse la ley sobre bases generales del medio ambiente (Ley 19.300, del 09/03/1994). En consecuencia, ellas coexisten con esta ley marco. En su Artículo 1º, la ley 19.300 alude al derecho constitucional a “vivir en un medio ambiente libre de contaminación” y señala que ella, regulará la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental, “sin perjuicio de lo que otras normas establezcan sobre la materia”.

La Ley 19.300 comprende cuatro materias. La primera está constituida por un conjunto de definiciones. Entre ellas, es interesante la diferencia de enfoque entre las definiciones de

contaminación y contaminante. Ello, en cuanto a la existencia de contaminación, queda sujeto a disposiciones legales (y no a sus consecuencias en los posibles afectados). En cambio, al definir contaminante se alude a su carácter de riesgo para la salud de las personas, la calidad de vida de la población, la preservación de la naturaleza o la conservación del patrimonio ambiental.

La segunda materia tratada es el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), que nace con esta ley. Una tercera parte (Párrafos 4 a 7 del Título II y Párrafo 1 del Título III) reúne una serie de temas misceláneos, como los relativos a normas de calidad ambiental y de emisión, a planes de manejo y descontaminación y a la responsabilidad por daño ambiental. Finalmente, en su cuarta parte (Párrafo 2 del Título III en adelante) concierne al estatuto de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), así como a las Comisiones Regionales del Medio Ambiente (COREMAS).

1.3

El Surgimiento de la Evaluación de Impacto Ambiental.

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA; gramaticalmente podría ser más adecuado decir "del impacto ambiental" o "de impactos ambientales") surge en E.E.U.U. en 1970, con la promulgación de la Ley Nacional de Política Ambiental (NEPA). En su sección 102, esta ley exige a todas las agencias federales utilizar un enfoque de EIA a todas sus intervenciones que puedan afectar el medio ambiente, establecer métodos y procedimientos con tal fin y elaborar los respectivos Estudios de Impacto Ambiental. Es interesante el hecho de que la Ley Nacional (NEPA) define como primer objetivo "cumplir las responsabilidades que cada generación tiene como un albacea del medio ambiente para las futuras generaciones" y como tercer objetivo

"Conseguir el más amplio y beneficioso uso del medio ambiente, sin degradación, ni riesgo para la salud o la seguridad, ni cualquiera otras consecuencias no deseables ni pretendidas".

En el estudio de impacto ambiental prescrito por la ley NEPA, las agencias federales deben considerar cinco áreas principales relativas a sus acciones y sus posibles efectos:

- El impacto ambiental de la actuación.
- Cualquier efecto ambiental adverso resultante de ella que no pueda ser evitado si la propuesta se ejecuta.
- Alternativas a la actuación propuesta.
- Relaciones entre los usos y beneficios a corto plazo y aquellos relativos a la productividad a largo plazo.
- Cualquier efecto irreversible e irrecuperable resultante de la actuación propuesta.

Las agencias federales de E.E.U.U. han desarrollado distintos procedimientos para evaluar los impactos directos. Sin embargo, reconocen que los impactos de mayor importancia (adversos o benéficos) suelen ser secundarios o incluso terciarios, los que son mucho más difíciles de evaluar.

A partir de 1970 varios estados de E.E.U.U. adoptaron legislaciones ambientales equivalentes a la NEPA, manteniendo el procedimiento para evaluación de proyectos de las agencias públicas. En la década de los '80, más de 75 países habían incorporado este proceso de EIA a su legislación, incluyendo también los proyectos presentados por privados. Actualmente, más de 100 países lo practican y constituye un procedimiento obligatorio para optar a créditos internacionales.

1.4

EIA y Ordenación del Territorio.

En principio, existen dos aproximaciones extremas al “uso sustentable” (sostenible) del territorio. La primera supone que no hay usos preferentes o prohibidos “a priori” y que cada proposición de uso debería ser analizada específicamente, considerando sus impactos ambientales positivos y negativos. Esta corresponde, con matices, a nuestro SEIA. Así, en Chile, aunque sujeto a ciertas restricciones (parques nacionales, zonas saturadas, planes reguladores comunales), es posible plantear el desarrollo de cualquier tipo de proyecto en cualquier lugar del país. Corresponde al SEIA decidir su aprobación o rechazo, así como las posibles condiciones en caso de aprobación. Esto, desde el punto de vista ambiental, dado que existen otros tipos de restricciones (por ej., en materia de explotación de hidrocarburo).

El otro extremo corresponde al caso ideal de la “ordenación del territorio”. Esta supone que el territorio ha sido estudiado en detalle en sus aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, meteorológicos, etc. Las consecuencias ambientales del conocimiento obtenido se han llevado a mapas de adecuación de uso, que permiten establecer cuáles son las ubicaciones posibles para determinado tipo de proyecto (una central termoeléctrica a carbón o petróleo, una refinería–fundición de cobre, una explotación de áridos, un aeropuerto, etc.). Por ejemplo, Polonia dispone de información geoquímica muy completa a distintas escalas, que permiten también excluir suelos del uso agrícola, cuando su contaminación supera determinados niveles.

Desde luego, sería poco realista esperar que Chile cuente con tales niveles de información como para implementar un sistema de ese tipo. Sin embargo, se puede pensar en una

incorporación progresiva de la ordenación del territorio de manera de facilitar la aplicación del SEIA. De esa manera, las empresas proponentes (y el mismo Gobierno) sabrían donde es razonable y donde no proponer determinados proyectos (por ej., nuevos aeropuertos) dejando al SEIA el análisis detallado de los impactos ambientales específicos propios de las características particulares del proyecto propuesto. Al respecto, el SERNAGEOMIN ha iniciado algunos trabajos en esta materia.

Capítulo 2

Proyectos, Aspectos e Impactos Ambientales.

2.1

Los Proyectos y su Definición y Flexibilidad.

Una evaluación de impacto ambiental exitosa (cualquiera sea la resolución final) depende de dos o tres factores claves. El primero es una clara definición del proyecto, lo que incluye entender muy bien las consecuencias ambientales de sus tecnologías y de su magnitud. Si el proyecto posee un buen grado de flexibilidad, ello ayudado a incorporar recomendaciones que surjan de su evaluación ambiental. Por ejemplo, el Proyecto Alumysa fracasó por falta de flexibilidad respecto a su ubicación.

El segundo factor de éxito radica en la buena comprensión del medio físico y biológico en el que se implantará el proyecto. Desde luego, las interrelaciones entre las actividades del proyecto, el medio físico y el medio biológico pueden llegar a ser complejísticas e involucrar aspectos desconocidos (caso del metil-mercurio en Minamata, Japón; caso de los cisnes negros y CELCO, en Valdivia, etc.). Sin embargo, es importante esforzarse por lograrlo en la medida necesaria, porque es el único modo de evitar futuras sorpresas desagradables.

Un tercer factor que puede tomar creciente importancia, es la genuina aceptación de la comunidad en la cual se implantarán las principales actividades del proyecto. Al respecto, los logros a corto plazo que no implican una aceptación efectiva pueden llevar a la larga a graves problemas. Esto, especialmente si el proyecto se sitúa en el extranjero y existen razones históricas, culturales o políticas que demandan cautela.

Se entiende por aspectos ambientales cada una de las intersecciones entre las acciones del proyecto y el ambiente físico, biológico y humano en el que se implantará. En el caso de un gran proyecto minero, por ejemplo, esas interacciones (más sus efectos indirectos y de retroalimentación) pueden llegar a ser casi infinitas. De ahí que sea imprescindible “filtrarlas”, basándose en los conocimientos disponibles, la experiencia y el buen criterio (e intuición) de los evaluadores. Desde luego, ello no es sencillo.

Pongamos un ejemplo. Se instalará una planta petroquímica. Un componente menor es una instalación electrolítica que utiliza electrodos de mercurio. Los efluentes de la planta irán a un río (estamos en los años '50), que desemboca en una bahía. En el fondo de la bahía hay bacterias anaeróbicas que producen compuestos metílicos. ¿Qué podría tener que ver la planta petroquímica con esas bacterias? ¿Deberíamos incluirlas como un factor ambiental e “intersectarlas” con alguna acción de la planta?. Desde luego, no se nos ocurriría pensarlo, y efectivamente pasaron varios años antes que se las relacionara con los casos de parálisis, afecciones neurológicas y muertes de los aldeanos de la Bahía de Minamata, Japón, intoxicados con metil-mercurio, ingerido con los alimentos marinos que consumían.

Como señalamos antes, los aspectos se “filtran” al analizar la matriz de acciones del proyecto

contra los factores ambientales. A ello sigue un segundo filtrado, al determinar qué aspectos serán considerados como impactos ambientales (ya sean negativos o positivos).

La selección de los impactos ambientales, realizada en la etapa del Estudio de Impacto Ambiental, implica que dicho estudio incluye ya una primera evaluación, la que será seguida en el mismo Estudio por una jerarquización, según los criterios que el mismo Estudio defina (aunque existen criterios generales que trataremos en la sección 2.3).

2.2

El Medio Ambiente y su Dinámica y Complejidad.

La ciencia ha demostrado la extraordinaria complejidad de las interacciones en el medio físico, y algunas de ellas han sido ampliamente divulgadas por los medios, como el famoso “efecto mariposa” que limita las predicciones meteorológicas a largo plazo, planteado en 1961 por Edgard Lorenz (en la versión popular, el aleteo de una mariposa en Brasil podría causar un tornado en Texas). Si el medio físico es complejo y frecuentemente imprevisible (el volcán Chaitén como ejemplo), las complejidades y sorpresas de la red de interacciones biológicas lo superan. Desde luego, ello se multiplica al agregar las interacciones entre el mundo físico y el biológico así como las intervenciones humanas, a través de las acciones del proyecto.

De lo señalado se desprende la necesidad de extremar el uso del conocimiento, la investigación y la experiencia en aquellos proyectos que implican intervenciones a gran escala en el medio físico y biológico. Aún así, se deberá estar siempre dispuesto a “esperar lo inesperado”. Al respecto sobran ejemplos. Así, en una zona reconocida como “asísmica” en

E.E.U.U., se inició una serie de sismos, justo cuando se pensaba instalar en ella un reactor nuclear. Alguien notó que había un sismo por mes y lo más curioso, ocurrían el mismo día de cada mes. Dicho día coincidía con una inyección profunda de riles, que al parecer activaban una falla cortical. También son ejemplos de interacciones inesperadas los casos ya mencionados de Minamata, Japón y el de CELCO en Valdivia (caso de los cisnes de cuello negro).

2.3

Impactos Ambientales: Factores Culturales e Ideológicos.

La EIA se sustenta sobre el concepto de que el ambiente por intervenir posee determinadas cualidades: físicas, biológicas, económicas o culturales, positivas o negativas, que le otorgan o le restan valor. Al evaluar un proyecto, procura predecir y juzgar las ganancias o pérdidas de valor, así como proponer medidas que mejoren el balance final, o rechazar el proyecto si sus costos ambientales son demasiado altos. En lo antes señalado hemos utilizado la palabra "valor" como "medida del bien asignado a algo". Por ejemplo, es valioso disponer de agua pura, aire limpio, suelos no contaminados y productivos, etc.

Cuando valoramos, lo hacemos considerando tanto las cualidades intrínsecas o propias de las cosas como sus cualidades extrínsecas o utilitarias. Por ejemplo, defendemos las ballenas por lo que son, otros prefieren cazarlas por su "valor económico". Aquí llegamos a una complicación: es normal, que ambas cualidades se superpongan y no sea fácil separarlas. Por ejemplo, el valor intrínseco del agua pura y cristalina se une a su valor para la salud, la actividad turística, etc.

Una segunda complicación surge de lo que denominamos "valores", en el sentido de

creencias religiosas, éticas, estéticas, etc. que informan nuestra visión del mundo. Ello implica que cuando "valoramos" un bien ambiental, nuestros propios valores juegan un rol principal. De ahí la gran importancia de separar hechos de valores (no siempre fácil) al realizar la evaluación de impactos ambientales.

Al respecto, uno de los paradigmas que afloran a menudo en los planteamientos de los grupos ambientalistas se refiere a la oposición entre lo natural (supuestamente bueno) y lo artificial, considerado como malo o peligroso. En consecuencia se contempla un lago como algo bueno, mientras un embalse es malo o peligroso. Igual ocurre respecto a los vegetales transgénicos, al uso de fertilizantes y plaguicidas, etc. Desde luego, este rechazo tiene razones objetivas, como los casos de graves enfermedades y muertes por contaminantes tóxicos o cancerígenos en el agua, el aire o los alimentos, pero también tiene una raíz que se conecta con creencias religiosas o antiguos mitos.

En esa visión, el pasado aparece como una edad dorada, cercana a la versión del paraíso. El ser humano es visto como "naturalmente bueno" y su vida en pleno acuerdo con la naturaleza. Entonces, una caída (el "progreso", la propiedad, la desobediencia) lo expulsa de ese mundo y lo lleva a un camino de creciente extravío (la Torre de Babel, etc.). La naturaleza a su vez castiga su proceder (diluvios, sequías, terremotos, etc.), de manera que comprenda su error y retorne al buen camino.

La realidad está muy lejos de ese sueño. La vida primitiva era y es miserable. Enfermedades, muerte temprana, hambre, supersticiones, etc. Pero el sueño es permanente y no cambia. Si la humanidad regresara al estado primitivo, no solamente su calidad de vida se perdería, sino que también perecería en un elevado porcentaje, porque justamente son esos "factores artificiales" (agua tratada,

antibióticos, vacunas, fertilizantes inorgánicos, agricultura mecanizada, etc.) los que han permitido elevar la supervivencia y por lo tanto aumentar la población y alimentarla. Ello implica el uso intensivo de energías convencionales así como de la química y de la minería y se demuestra fácilmente con números, pero la mayoría de las personas no están dispuestas a cambiar sus creencias por cifras o por razones científicas (que tampoco comprende).

En resumen: es normal que los cambios asociados a un proyecto tiendan a aparecer como impactos negativos (el lago es bueno, el embalse malo), así como el hecho de que los factores culturales e ideológicos jueguen un rol abierto u oculto al definir el carácter y gravedad de los impactos ambientales. Cincuenta años atrás una mina a cielo abierto abandonada en el desierto era un atractivo turístico. Hoy constituye un impacto ambiental... salvo que sea antiguo, como las ruinas de explotaciones mineras romanas en España o de las salitreras del norte de Chile, cuando se convierte en un "patrimonio histórico minero". Por otra parte, si la misma cavidad fuera producto de una caldera volcánica o de la caída de un asteroide constituiría un valioso componente del patrimonio geológico. A este respecto, la minería está en una posición desventajosa, frente a la verde o más familiar agricultura (cuyos pesticidas son invisibles, a diferencia de los depósitos de relaves). Es un hecho que a la minería le conviene aceptar, concentrando sus esfuerzos en no agregar más razones objetivas al rechazo que recibe por causas subjetivas o ideológicas.

2.4

Naturaleza y Gravedad de los Impactos Ambientales.

Más allá de los aspectos relativos o ideológicos recién discutidos, existe una amplia variedad en

la naturaleza de los impactos ambientales, y un igualmente amplio rango en su magnitud y variedad.

En primer lugar tenemos su clasificación en impactos ambientales positivos y negativos. Desde luego existen impactos positivos, pero es frecuente que se citen como tales otros de naturaleza económica o social, que deberían ser considerados aparte, por importantes que sean. Algunos ejemplos de impactos ambientales positivos serían: a) El retiro de desechos sólidos mineros, producto de un proyecto de recuperación de sus contenidos metálicos. b) El retiro de chatarra de hierro para su conversión en acero, así como el ahorro de emisiones de CO₂ que implica este proceso siderúrgico respecto al tradicional, ambos impactos positivos, producto de la instalación de una planta de reciclaje. c) La sustitución de celulosa obtenida de explotaciones forestales por papel usado recolectado (disminuyendo así la tala de árboles, que fijan CO₂ atmosférico y protegen el suelo de la erosión). Adicionalmente, ello implica un tratamiento tecnológico menos agresivo en términos ambientales, alarga la vida de los vertederos y entrega un medio de subsistencia a sectores sociales desfavorecidos.

La naturaleza de los impactos ambientales es muy variada e incluye, entre otras:

- Contaminación del aire, aguas superficiales y subterráneas y de los suelos.
- Destrucción del hábitat, pérdida de biodiversidad y de especies en riesgo de extinción.
- Degradación del medio físico (erosión, remoción en masa y excavaciones). Alteraciones del paisaje.
- Degradación de recursos hídricos, pérdida de vías navegables, etc.
- Daños a sitios de interés arqueológico, histórico o cultural.

- Pérdida de formas culturales.
- Etc.

Naturalmente, la escala de los impactos en términos de magnitud presenta también un amplio rango. En tal sentido las grandes operaciones mineras, agrícolas, forestales y de explotación de recursos pesqueros se sitúan en el extremo superior de la escala, junto con los proyectos hidroeléctricos mayores. No es extraño, por lo tanto, que reciban la atención principal de la opinión pública y los media (aunque por lo general la agricultura escapa a ella por razones históricas y por su menor visibilidad).

La evaluación de la gravedad de los impactos ambientales combina aspectos objetivos y subjetivos. Dicha evaluación es realizada primero durante el Estudio de Impacto Ambiental y luego revisada durante el proceso formal de Evaluación de Impacto Ambiental, etapa en la cual existe la oportunidad de participación de la comunidad afectada. Desde luego, es esperable que surjan controversias entre los grados de gravedad que cada una de las tres instancias asigna a un impacto específico.

En todo caso, existen ciertos criterios generales, como los señalados a continuación, para considerar que un impacto ambiental es grave:

- El impacto afecta la salud o la seguridad pública.
- El impacto implica superar una norma o disposición legal.
- El impacto afecta ámbitos naturales o humanos intrínsecamente valiosos (parques naturales, sitios históricos, etc.).
- Es irreversible, extenso o intenso.
- Afecta a especies en peligro de extinción.
- El componente afectado es reconocido por su

importancia funcional para el medio ambiente.

- El componente afectado es reconocido pública o políticamente como importante.
- El impacto tiene potencialidad para generar conflictos sociales.

Por otra parte, durante el Estudio de Impacto Ambiental, se suele evaluar la gravedad de los impactos mediante la asignación de puntos (por ej., de 1 a 3) según factores como su naturaleza, intensidad, magnitud y grado de reversibilidad. Puede ser práctico utilizarlos, siempre que no confundamos las cosas y lleguemos a creer que esos números representan efectivamente un método cuantitativo.

En el caso de nuestro país, donde aún no existe una verdadera "cultura ambiental" (o está restringida a sectores muy escasos de la población), los impactos ambientales que reciben mayor atención son los que generan conflictos entre sectores productivos importantes. Al respecto, tanto la agricultura como la pesca-acuicultura se han opuesto con éxito a proyectos mineros y metalúrgicos, obteniendo su modificación o bien importantes indemnizaciones económicas. Parodiando a Neruda (Alturas de Machu Picchu) se podría preguntar: "Piedra en la piedra, ¿el ambiente donde estuvo?".

2.5

Impactos de Operaciones Normales y de Emergencias Ambientales.

Las operaciones normales de un proyecto pueden ser causa de impactos desde una etapa temprana. En efecto, basta el anuncio de la posible instalación de un proyecto importante para producir cambios en las relaciones y decisiones económicas al interior del ámbito afectado, y por lo tanto en la calidad de vida de su población.

Lo mismo ocurre con los cambios de uso del suelo. Así, la desafectación del aeropuerto Los Cerrillos decidida bajo el Gobierno del Presidente Lagos, no solamente complicó las cosas para la aviación civil y permitió el desarrollo de importantes proyectos inmobiliarios en su superficie. También permitió el desarrollo de edificaciones en altura en el corredor de aproximación y despegue de los aviones, antes restringido por razones de seguridad. Naturalmente, ello repercutirá, a su vez, en la densidad poblacional, la congestión del tránsito, la contaminación del aire y la evacuación de aguas lluvia (por el mayor flujo de los conductos de desagüe) en la ya complicada ciudad de Santiago.

En el caso de un proyecto minero, ciertos efectos menores anteceden al descubrimiento mismo del depósito en la etapa de exploración, la que implica intervenir el hábitat natural, instalar campamentos, construir caminos de montaña, etc. Si la operación es exitosa, dará lugar a una implantación mayor previa a la decisión final de explotación, la cual puede durar varios años (caso Pascua – Lama), en el curso de los cuales es imposible no perturbar el ambiente original. Al mismo tiempo, la perspectiva del proyecto puede cambiar las relaciones económicas y productivas en el área de influencia. Por ejemplo, las ventas de derechos de agua de riego a la empresa minera y por lo tanto disminución de la actividad agrícola.

La etapa de construcción del proyecto puede implicar riesgos de impactos ambientales mayores, dependiendo de su magnitud y lugar de emplazamiento. Cientos o miles de trabajadores pertenecientes a distintas empresas llegan al área del proyecto, e interactúan con la comunidad local. Se producen grandes movimientos de tierras, utilizando explosivos y maquinaria pesada. La alteración de la superficie puede afectar al drenaje superficial y subterráneo y existe un mayor

riesgo de accidentes dada la diversidad de pertenencias y las descoordinaciones entre grupos de trabajadores de distintas empresas. Esto puede ser causa de serios impactos ambientales.

Durante la operación de un proyecto minero es esperable que se registren grandes cambios en su magnitud y características (por ej., de cielo abierto a subterráneo o viceversa; de lixiviación de oxidados a concentración de minerales sulfurados, etc.). También puede cambiar la escala de la operación y otros factores. Sin embargo, en principio, la empresa debería tener un buen control de sus impactos ambientales, puesto que cuenta con sistemas de gestión y personal entrenado, que le permiten normalmente mantenerlos dentro de los límites autorizados.

Con posterioridad al cierre de la operación minera la situación puede, en algunos casos, causar impactos graves y permanentes. Es el caso de la generación de drenaje ácido bajo condiciones de clima templado lluvioso y con relieve montañoso, situación que existe, por ejemplo, en las antiguas operaciones de minería polimetálica en el Estado de Montana (NW E.E.U.U.). En esas condiciones, la oxidación de minerales sulfurados generará drenaje ácido rico en metales pesados “por siempre” (a la escala humana) lo que obligará a un permanente trabajo de limpieza de las aguas contaminadas. Algo parecido, pero de menor gravedad debido al clima semiárido de la región, puede ocurrir con las operaciones cerradas de la mina El Indio. Al respecto, es ilustrativo el hecho de que ese distrito ya generaba drenaje ácido hace 10 mil años (un fenómeno natural), al que se sumó el efecto de su explotación, con cerca de 100 km de labores interiores en un macizo rocoso altamente fracturado, lo que favorece las reacciones roca-agua-aire y la contaminación del drenaje subterráneo que lo atraviesa.

Por otra parte, es normal que los mayores impactos ambientales de las operaciones mineras o industriales en general se asocien a situaciones de emergencia, previstas o imprevistas. En su ocurrencia influyen distintos factores, que incluyen el desorden, producto de desorganización social general del Estado (caso Chernobil, Ucrania, ex URSS) o al interior de la empresa, por efecto de conflictos laborales, así como los de carácter económico.

Cuando por alguna razón la situación económica de una empresa se deteriora, se registra una serie de efectos creadores de sinergias negativas: alejamiento del personal más calificado, rotación (y en parte no reemplazo) del personal, fallas de mantención y reposición de equipos, pérdida de la cultura organizacional, etc. Ejemplos sobran, pero uno de los más impresionantes es el caso Bhopal (India) que afectó a una subsidiaria de la importante empresa norteamericana Union Carbide, la cual elaboraba un pesticida cuya fabricación utilizaba el compuesto altamente tóxico isocianato de metilo. Su fuga en 1984 produjo unas dos mil muertes y otros miles de graves intoxicaciones. Desde hacía varios años, la demanda del pesticida había bajado mucho, y la empresa estaba en serios problemas económicos.

Sin embargo, también una bonanza de precios puede generar indirectamente daños ambientales. Es el caso ejemplificado por la fundición de Bunker Hill, Idaho (Distrito Coeur d'Alene). En 1973 el sistema de filtros de su chimenea dejó de funcionar durante un período de gran bonanza de precios. Los ejecutivos de la empresa prefirieron continuar las operaciones contaminando gravemente la atmósfera con plomo y causando un fuerte daño neurológico a la población, en particular a los niños, más susceptibles a este tóxico. Según se señaló posteriormente, un cálculo económico había mostrado que las ganancias permitirían pagar

fácilmente las posibles multas ambientales.

Es importante que los estudios, y en especial las evaluaciones de impacto ambiental, presten particular atención a los riesgos mayores de emergencias ambientales, dado que éstas pueden constituir las mayores fuentes de impacto de cualquier proyecto.

2.6

La EIA, entre la Ciencia y el Arte Adivinatorio.

Cuando se presentó en 1996 el estudio de impacto ambiental de '102 kg' sobre el Proyecto Alumysa, de la empresa canadiense Noranda, dicho proyecto llevaba ya unos 10 años de preparación y análisis. Concebido para aprovechar la riqueza en recursos hidráulicos de Aysén, el proyecto incluía la construcción de tres centrales hidroeléctricas, para una generación de 758 MW en total, que proveerían la energía necesaria para producir 440 Mt de aluminio por año, con una inversión de US\$ 2750 millones. La planta de Alumysa se ubicaría 5 km al sur de Puerto Chacabuco, en el Fiordo Aysén, mientras que las centrales en torno a ella, se localizarían a 30 km y 20 km. La oposición del sector salmonero y del sector turístico impidió que el proyecto fuera aprobado, proponiéndose a la empresa cambiar su ubicación a la cuenca del Río Baker, lo que ésta no aceptó.

Once años después (Abril 2007) una serie de sismos, con epicentro justamente en el Fiordo Aysén, en el área del proyecto, que causaron deslizamientos con fenómenos tipo tsunami y pérdida de vidas, produjeron alarma nacional y obligaron a trasladar las operaciones salmoneras. El origen de esos sismos permanece desconocido, si bien la zona afectada se sitúa en la intersección de una gran falla norte-sur: La Falla Liquiñe – Olqui, con una estructura transversal importante. Desde luego

no se sabe si la sismicidad se reiniciará ni cuándo ni cuál será su posible magnitud.

No conocemos los '102 kg' de información de ese Estudio de Impacto Ambiental. Sin embargo, no leímos ni escuchamos que las discusiones en torno al proyecto incluyeran ni menos se centraran en el riesgo sísmico. Al igual que la reactivación del Volcán Chaitén, los sismos del Fiordo Aysén fueron una sorpresa. En cuanto a Noranda, fue afortunada por la no aprobación de su proyecto, que desde luego se situaba, sin saberlo, en el área más equivocada.

Aunque el caso Alumysa puede ser un ejemplo extremo, todo proyecto complejo y de gran magnitud está expuesto a esta clase de sorpresas. En consecuencia es mejor reconocer que el Estudio y Evaluación de Impacto Ambiental constituye, en el mejor de los casos, lo que en inglés se denomina una "educated guess", vale decir una conjetura o suposición que hace el mejor uso posible de la información científica y tecnológica disponible. Como señalaron un competente evaluador económico de proyectos (N. Sapag) y un gran geólogo de exploraciones (D. Lowell) refiriéndose a sus también complejos campos de competencia "Hay que acostumbrarse al hecho de que la mayoría de las veces estaremos equivocados". Lo peligroso es no reconocerlo.

Ello implica, si se asume con honestidad profesional, la necesidad de utilizar al máximo el conocimiento científico y tecnológico, junto con mucha imaginación, humildad y apertura de mente, tratando permanentemente de aprender de la experiencia de otros. Ello implica también la necesidad de constante estudio, lo que en este tiempo de permanentes apuros no es siempre fácil. También requiere utilizar el "principio de precaución" así como estar abiertos a "esperar lo inesperado".

Los redactores de los Estudios de Impacto Ambiental tienden, consciente o inconscientemente, a actuar como abogados del proponente, en lugar de hacerlo como investigadores imparciales. Seguramente entregan al proponente información relevante que no siempre se incluye en el Estudio. Ello puede ser negativo en cuanto el EIA debería ser una guía permanente para el buen manejo de la operación del proyecto, y lo que no está en él no podrá ser tenido en cuenta. A la manera de los cursos de la Universidad, cuyo objetivo es entregar "herramientas de trabajo" (y no están para ser "pasados", como simples vallas en una carrera de obstáculos), el EIA debería ser la base conceptual sobre la cual operara el sistema de gestión ambiental (y no pasar al olvido una vez recibida la calificación de impacto ambiental favorable).

En suma: pese a todo el conocimiento y la experiencia utilizado, así como las herramientas de modelación físico-matemática, los SIG y otros instrumentos, siempre persistirá una zona de incertidumbre dentro de la cual debemos confiar en conjeturas o "adivinar" de la mejor manera posible. El aceptar su existencia nos permitirá actuar con más realismo y precaución, y estar atentos a señales débiles pero importantes de los riesgos subyacentes al proyecto.

Capítulo 3

La EIA en la Legislación de Chile y el Extranjero.

3.1

La EIA en Chile.

La EIA se aplica tanto a los proyectos de carácter privado como público, aunque ha habido cierta renuencia del sector público a evaluar efectivamente sus propios proyectos (por ej.,

asumiendo que algunas autopistas del sistema Santiago no son tales para este efecto).

La ley determina los proyectos que obligatoriamente deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) cuyo listado se encuentra en el Artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente (LBMA) 19.300. Esta Ley se complementa con el DS N° 95/02: "Reglamento del SEIA", con las Normas de Calidad, Normas de Emisión y las modificaciones posteriores de los textos legales y reglamentarios.

Se entiende que el SEIA es un instrumento de gestión pública al servicio de la toma de decisiones respecto a la aceptabilidad ambiental de los proyectos, pero no un instrumento de decisión propiamente tal, puesto que la decisión final será de orden político. Para el caso de los proyectos que sean aprobados, se espera que el proceso evite o reduzca sus efectos negativos y potencie aquellos de carácter positivo.

Los proyectos pueden ingresar al SEIA ya sea bajo la forma de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). La DIA es suficiente para proyectos cuya naturaleza y envergadura no implican en principio riesgos mayores. Dichos riesgos mayores corresponden a categorías como:

- Salud de la población.
- Efectos adversos sobre recursos naturales renovables (en calidad o cantidad).
- Reasentamiento de comunidades humanas o alteración de su vida.
- Localización próxima a poblaciones, recursos o áreas protegidas.
- Alteración significativa de valores paisajísticos o turísticos.
- Alteraciones a monumentos, sitios con valor antropológico, cultural, etc.

El proponente de un proyecto o actividad puede ingresar obligada (si se encuentra incluido en el Artículo 10) o voluntariamente al SEIA. En el primer caso se verifica si los riesgos que implica son de carácter mayor, como los antes mencionados. Si así es, debe presentar un EIA; si no, una DIA es suficiente. Dicho documento debe exponer el tipo de proyecto o actividad, describirlo, señalar sus aspectos legales y los compromisos ambientales voluntarios asumidos, así como adjuntar documentos de respaldo.

Si el ingreso es voluntario, se verifica si el proyecto o actividad implica algún riesgo mayor. Si es así, es analizado para requerirle una DIA o un EIA según sea el resultado del análisis. En caso contrario, pasa directamente al Procedimiento Sectorial, para el otorgamiento de los respectivos permisos.

Los EIA, a diferencia de las DIA pasan por un proceso complejo de evaluación, dentro del cual la Dirección Regional de CONAMA (o CONAMA central, si el proyecto afecta a dos o más regiones) desempeña el rol de organismo técnico de coordinación. La evaluación del proyecto está a cargo de la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA), presidida por el Intendente Regional e integrada por los Gobernadores, por los SEREMIS de los Ministerios con injerencia ambiental y por los consejeros regionales. Dicha evaluación se realiza sobre la base del Estudio de Impacto Ambiental presentado por el proponente, normalmente realizado por una firma consultora especializada.

Entre los aspectos principales que debe incluir el EIA está la descripción pormenorizada del proyecto o actividad, la legislación aplicable al mismo, el estudio de línea de base (vale decir la descripción del ambiente físico, biológico y humano previo a la implantación del proyecto),

la predicción y evaluación de los impactos ambientales asociados al proyecto, el plan de medidas de mitigación, reparación o compensación y el plan de seguimiento de las variables ambientales.

También en esta etapa de evaluación se verifica la Participación de la Comunidad, para lo cual ésta cuenta con un extracto del Proyecto, incluidos sus efectos ambientales y las medidas de mitigación propuestas. Las organizaciones ciudadanas con personería jurídica y las personas naturales directamente afectadas disponen de sesenta días, contados desde la publicación del extracto, para formular sus observaciones al EIA

Completado el proceso de evaluación, en el cual los servicios públicos como DGA, SERNAGEOMIN, SAG, etc. desempeñan un rol principal, y después de verificar CONAMA que se dispone de información suficiente para la calificación ambiental del proyecto, COREMA adopta una decisión definitiva. Esta puede ser de Aprobación, Aprobación Condicional o Rechazo. En caso favorable, los distintos servicios públicos deben entregar los respectivos permisos sectoriales requeridos para la implementación del proyecto (sistema de "Ventanilla Unica").

3.2

La EIA en Argentina.

Hay dos diferencias principales entre el SEIA de Chile y el sistema implementado en Argentina. La primera es de forma: se denomina "Informe de Impacto Ambiental" al "Estudio de Impacto Ambiental" de nuestro SEIA. Por otra parte, el proceso chileno de Evaluación de Impacto Ambiental se denomina en Argentina "Declaración de Impacto Ambiental", que es emitida después de evaluar el respectivo Informe (Ley 24.585).

En materias de fondo, es importante señalar que existe un sistema separado para la evaluación del impacto ambiental de la minería, que incluye todas las actividades comprendidas entre la exploración, explotación, beneficio y elaboración de minerales y rocas.

3.3

La EIA en E.E.U.U.

El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de USA está definido en la Sección 102 de la Nacional Environmental Policy Act (NEPA) que incluye tres apartados sobre este tema. El primer apartado señala la obligatoriedad del procedimiento a todas las agencias federales. El segundo obliga a dichas agencias a desarrollar metodologías para incorporar la EIA a la toma de sus decisiones. Finalmente, el tercer apartado expone la obligación de preparar Estudios de Impacto Ambiental en determinados casos, e identifica sus elementos básicos. Al respecto, existe un Consejo de Calidad Ambiental que genera directrices sobre los EIA.

El sistema define como "Evaluación Ambiental" al proceso realizado para evaluar la necesidad de hacer un "Estudio de Impacto Ambiental" para un determinado proyecto o actuación. Cada año se efectúan algunas decenas de miles de evaluaciones ambientales

La EIA describe las consecuencias ambientales del proyecto o actuación que puedan afectar seriamente el medio ambiente natural o humano. Son seguidos por la respectiva Evaluación, que considera los impactos sobre los componentes físico-químicos, bióticos, culturales y socioeconómicos del entorno. Ellas pueden ser realizadas por Agencias Federales o Estados, para evaluar tanto proyectos públicos como privados.

Las actuaciones federales consideran en primer lugar si existe una exclusión categórica que las exima del proceso evaluativo. Si no es así, el proyecto puede pasar directamente a la etapa de Estudio de Impacto Ambiental o bien a una Evaluación Ambiental. Esta última determina si el proyecto o actuación implica o no riesgos de impactos significativos. En el primer caso, debe pasar a la ejecución de un Estudio de Impacto Ambiental.

3.4

La EIA en España y en el Reino Unido.

En España, una ley de 1986 define los proyectos o actuaciones sometidos o exceptuados del proceso de EIA. Como en Chile, la ley define como Estudio de Impacto Ambiental aquel estudio técnico con base científica que sirve de base a la EIA. Los aspectos a considerar en el estudio son definidos por la Administración (en Chile, ello tenía su equivalente en los "Términos de Referencia", que posteriormente dejaron de aplicarse). Después de evaluado el Estudio, la Administración emite una Declaración de Impacto Ambiental. Dicha Declaración da a conocer los principales efectos ambientales del Proyecto, la conveniencia o no de realizarlo y, en caso favorable, las condiciones bajo las cuales éste debe efectuarse.

En Gran Bretaña (Reino Unido), los Estudios de Impacto Ambiental y su evaluación son realizados bajo la tutela de los gobiernos locales. Sin embargo, si un proyecto no es aprobado, el proponente puede recurrir al respectivo ministerio (según la actividad económica correspondiente). El ministerio puede otorgarle la autorización, sujeta al cumplimiento de determinados requisitos o compromisos.

Capítulo 4

La EIA y las Normas Ambientales.

4.1

Naturaleza y Utilidad de las Normas Ambientales.

Las normas ambientales tienen una relación directa de propósito con el Artículo 19, N° 8 de la Constitución Política de Chile, que declara "el derecho de todas las personas a vivir en un ambiente libre de contaminación", así como el deber del Estado de "velar porque este derecho no sea afectado" y "tutelar la preservación de la naturaleza, protegiendo el medio ambiente". Las normas ambientales permiten concretar dichos propósitos, fijando niveles mínimos o máximos para los distintos parámetros de importancia ambiental, e idealmente obligando a su cumplimiento por medio de la fiscalización apoyada por la ley.

Conforme a su objetivo de velar por la vida y la salud humana, o bien por la protección o conservación del medio ambiente o la preservación de la naturaleza, las normas se clasifican en Primarias y Secundarias. Las primeras son de aplicación nacional mientras las segundas pueden serlo igualmente o bien tener validez para zonas específicas del país.

Una segunda clasificación se refiere al carácter de lo normado, que puede ser la Calidad Ambiental o las Emisiones. Naturalmente, el objetivo último de la normativa será el resguardo de la calidad ambiental. En consecuencia, las normas de Calidad Ambiental tienen mayor importancia. Sin embargo, desde el punto de vista de la gestión ambiental pública, las Normas de Emisión tienen la ventaja de permitir una efectiva intervención de la Autoridad, tanto en la planificación como en la fiscalización del cumplimiento de lo normado.

Existe, por lo tanto, una complementariedad entre ambos tipos de normas. El cumplimiento de las normas de calidad define las metas a alcanzar (o aquellos niveles que no deben ser sobrepasados). La fijación y vigilancia de las normas de emisión permite (o debe permitir) que se logre el cumplimiento de las normas de calidad.

La fijación de normas considera la posibilidad de sobrepasar los niveles fijados. Sin embargo, se establecen límites absolutos a esas desviaciones, así como períodos de tiempo tolerables para ellas y valores medios que deben cumplirse. Todo lo anterior supone que existen sistemas de monitoreo que cuentan con la cobertura, sensibilidad, precisión y exactitud necesarias, con el personal requerido para analizar los registros de monitoreo y con los fiscalizadores dotados de efectiva autoridad e instrumentos coercitivos (multas, cierres temporales, etc.). Ello está lejos de la realidad chilena actual, pero puede llegar a ocurrir en el futuro, al menos en áreas especialmente delicadas.

4.2

Criterios y Procedimientos en la Dictación de Normas Primarias.

En esta materia es esencial evaluar cuáles son los niveles ya sea de exceso o de defecto a partir de los cuales un parámetro ambiental puede causar daño a la salud humana. Naturalmente, tales determinaciones son de naturaleza probabilística y están basadas tanto en evidencias directas como indirectas (por ej., pruebas de laboratorio con animales sometidos a condiciones de exceso o defecto del parámetro y corregidas según su peso corporal). En términos probabilísticas se procura analizar el efecto que han tenido dichas condiciones sobre salud humana, pero es difícil separarlas de otros efectos diferenciadores. Existe, por lo tanto, un

gran campo de incertidumbre. Un ejemplo de ella es el del analgésico Talidomida, que a mediados del siglo XX fue causa de numerosos casos de malformación fetal debido a su consumo por madres embarazadas. La Talidomida, había sido probada en mamíferos menores, sin mostrar efectos negativos, que en cambio se manifiestan en el ser humano.

No obstante, pese a todas las dificultades, se llega a proponer números después de largos estudios en países desarrollados. Normalmente, se acepta como norma aquella cifra que, si es sobrepasada (en un sentido o el otro), tiene una probabilidad de 1 en un millón de afectar gravemente la salud de una persona, pudiendo ser causa de muerte si ello ocurre a lo largo de un extenso período.

Sin embargo, ese no es el único criterio a considerar al fijar una norma de calidad ambiental. También es necesario analizar las dificultades que implica lograr su efectivo cumplimiento. Al respecto, existen dos problemas principales. El primero está dado por factores naturales o antrópicos que son responsables de valores anormales del parámetro a normar. Es el caso del arsénico en aguas del norte de Chile, producto de factores naturales (volcanismo, presencia de yacimientos minerales y áreas de alteración hidrotermal), pero también incrementado por actividad minero-metalúrgica. El segundo, el costo que representa para el país y su industria el cumplimiento de la norma a adoptar.

En el fondo, en ambos casos se trata de factores de incidencia económica y social. Si un parámetro es naturalmente alto en un territorio, la necesidad de cumplir la norma implicará inversiones en plantas de purificación, capaces de rebajarlo a niveles aceptables (por ej., caso del As en aguas de la Región de Antofagasta). En algunos casos, la misma situación puede obligar

a prescindir del uso de recursos como suelos aguas de regadío que sobrepasan la norma, con los naturales costos sociales (pérdida de oportunidades laborales) y económicos.

Igualmente, la necesidad de cumplir una norma de calidad puede obligar a cerrar aquellas industrias incapaces de cumplir con las normas de emisión necesarias para no sobrepasar la primera. Ello implica un serio problema para los países subdesarrollados, cuyas industrias carecen de tecnologías de punta y no cuentan con suficientes ingresos para adquirirlas competitivamente.

Por supuesto existe una alternativa de uso común: fijar normas exigentes y luego no cumplirlas. Ello da una apariencia de rigurosidad ambiental, pero se traduce en un desprestigio de los textos legales que daña gravemente al país.

En consecuencia, es mejor ser realista al fijar las normas de calidad y luego esforzarse en lograr un efectivo cumplimiento, esperando que el progreso del país pueda hacerlas paulatinamente más exigentes.

Con relación a las normas de emisión, es importante considerar dos factores. El primero es su carácter instrumental respecto al cumplimiento de las normas de calidad, que son las que realmente importan. El segundo, la necesidad de considerar las características del medio receptor. La intensidad, temporalidad y dirección de los vientos, el caudal, estacionalidad de flujo y capacidad de dilución de los ríos, no deberían ser ignorados. En consecuencia, idealmente las normas de emisión deberían ser, más que normas, límites específicos establecidos para una cuenca (por ej., la Cuenca de Santiago), un río, un proyecto, etc.

La dictación de una nueva norma ambiental parte de una decisión de CONAMA, la que es seguida de un proceso de discusión, que incluye consultas a los organismos públicos (60 días), así como la participación ciudadana (donde las empresas tienen desde luego un rol principal). De ahí surge la generación de un anteproyecto de norma, en el que la referencia a las normas existentes en países de Europa y Norteamérica tiene la debida consideración. Igualmente se consideran aspectos técnicos y científicos específicos de nuestro país. En una siguiente etapa se evalúan los impactos económicos de la proposición de norma (30 días), que da lugar a un Primer Proyecto, elaborado en otros 30 días, que es propuesto a discusión pública.

El proyecto en discusión incluye los fundamentos de la proposición, las metodologías de control y los procedimientos de fiscalización. La discusión también incluye una nueva instancia de participación ciudadana. Para ello se dispone de otros 60 días. Finalmente, luego de otros 30 días se elabora un Segundo Proyecto, que incluye valores de concentración, períodos permitidos, organismos públicos competentes para su fiscalización y metodologías ad-hoc a utilizar. Este nuevo proyecto pasa de la Dirección Ejecutiva de CONAMA, a su Consejo Directivo, y de él al Presidente de la República, que dicta el respectivo Decreto Supremo de la Norma. Es un largo proceso, que desde luego se beneficia de los estudios y experiencias de los países extranjeros, cuyas normas de calidad son utilizadas como referencia.

4.3

Algunas Normas. Las Zonas Saturadas o Latentes.

Algunos ejemplos de normas ambientales de calidad y de emisión son los siguientes:

- Norma de Calidad Primaria (NCP) para material

particulado respirable PM 10.

- Norma de calidad secundaria (NCS) para material particulado sedimentable en la cuenca del Río Huasco.
- NCP para PM 2,5 (proceso iniciado en 1999).
- NCP para plomo en el aire.
- Norma de Emisión (NE) para As emitido al aire.
- NE de material particulado para la cuenca del Río Huasco.
- NE de riles a aguas superficiales.
- NE a aguas subterráneas.
- NE de riles a aguas marinas y continentales superficiales.

En su Párrafo 6, la Ley 19.300 considera (Artículo 43) la declaración de zonas del territorio como saturadas o latentes, a través de un decreto supremo que define con precisión el área geográfica que afectan. También se indica (Artículo 44) que otro decreto supremo del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establecerá planes de prevención o de descontaminación, cuyo cumplimiento será obligatorio en las zonas latentes o saturadas respectivas. Tanto la elaboración como la proposición de estos planes corresponde a CONAMA, previo informe del correspondiente COREMA.

La Declaración de Zona Saturada o Latente sigue un proceso más técnico que el de las normas primarias de calidad o de emisión, en cuanto incluye programas de monitoreo de la calidad ambiental de la zona respectiva y un menor grado de participación pública. En cambio, participan los organismos públicos con tuición ambiental sobre el área analizada. Entre los factores a considerar están los costos económicos y sociales de la medida así como los mecanismos de compensación de emisiones, cuando ello sea posible, y el plazo en el que se espera alcanzar la reducción de emisiones propuesta por el plan.

4.4

Las Normas y la Evaluación de Impacto Ambiental.

Algunos años antes de la dictación de la ley 19.300, un consultor ambiental de empresas mineras señalaba que la situación ambiental en Chile se parecía a jugar un partido de fútbol en una cancha sin demarcar y sin reglas claras. Desde luego esa ley y muchos decretos han contribuido a cambiar esa situación y la dictación de normas ayuda también a facilitar las decisiones.

Sin embargo, dos factores hacen que la EIA sea mucho más que la simple constatación de cumplimientos o incumplimientos de normas por un nuevo proyecto o actividad. Desde luego está el hecho de que el número de normas dictadas es aún muy pequeño respecto al que se requeriría con ese fin. Adicionalmente, debemos recordar que la complejidad de relaciones ambientales implica mucho más que la suma de los numerosos parámetros que nos permiten analizarlas. Ello, debido a sus múltiples interacciones, retroalimentaciones, efectos indirectos y sinergias. Así, un proyecto podría satisfacer todas las normas y, aún suponiendo que todas ellas fueran las adecuadas, presentar serios problemas debido a los efectos citados. Por otra parte, no todo se puede normar y el buen criterio basado en conocimiento y experiencia seguirá siendo necesario, aunque se produzca un importante crecimiento de las normativas disponibles.

Finalmente, con relación a las normas secundarias, es lógico que ellas deban adaptarse a las situaciones existentes. En consecuencia su mayor valor consiste en la preservación de un determinado nivel de calidad ambiental, producto de factores naturales así como de anteriores intervenciones antrópicas. También pueden ser útiles para establecer posibilidades

de uso, como la realización de actividades de acuicultura en aguas naturales.

4.5

La EIA y los Tratados Internacionales.

El tema ambiental es abordado a nivel global por muchas instituciones, incluidas 21 diferentes agencias de las Naciones Unidas. En materia de tratados, más de 150 tratados ambientales globales se ha negociado desde principios del siglo XX. Además existen unos 500 acuerdos bilaterales transfronterizos, como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), la Convención sobre el Comercio de Especies Silvestres en Peligro (1973), la Convención de 1979 sobre Contaminación Transfronteriza del Aire y la de 1999, según la cual los países en vías de desarrollo pusieron fin a la producción y consumo de CFCs, con meta en su eliminación en 2010.

Este tema fue discutido con ocasión del caso CELCO (Valdivia), cuando se decidió la construcción de un ducto para el vertido de riles al mar. Según los oponentes a dicho procedimiento, el mismo violaría acuerdos sobre la materia suscritos por Chile.

Es importante tomar en cuenta que los tratados y convenciones suscritos y refrendados por Chile tienen la fuerza de leyes y, por lo tanto, deben ser considerados como tales durante el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental.

Capítulo 5

La EIA y la Participación Ciudadana.

5.1.

Democracia, Comunidad y Participación.

El concepto de participación tiene raíces históricas diferentes en los países latinoamericanos respecto a la que tiene en E.E.U.U. La "fundación" de los E.E.U.U. fue emprendida por colonos que buscaban libertades civiles y religiosas que los reinos de Europa no les garantizaban. Cuando los colonos se asentaron y expandieron los nuevos territorios a expensas de los pueblos nativos, lo hicieron en buena parte por su propia cuenta y su declaración y guerra de independencia surgió de comunidades que ya actuaban como pueblos libres.

La situación fue diferente en Latinoamérica, donde los conquistadores actuaron con un poder delegado de los reyes de España y Portugal. Sus Virreinos y Capitanías Generales reproducían localmente el gobierno central y sus ciudadanos libres eran orgullosos súbditos del Rey, quien premiaba su fidelidad con títulos nobiliarios (nuestra Primera Junta de Gobierno fue presidida por don Mateo Toro y Zambrano, Conde de la Conquista).

Cuando se produjo la independencia, no se registró un cambio mayor en la actitud de los ciudadanos incorporados a la cultura europea implantada. Más bien se produjo una asimilación de roles, y sus Directores Supremos o Presidentes asumieron el papel del antiguo Virrey, Capitán General o Gobernador.

En cierto grado, aún en las democracias relativamente funcionales de Latinoamérica la actitud del ciudadano es normalmente la de esperar de la autoridad el que resuelva sus

problemas y luego responsabilizarla por no hacerlo. En cambio, al menos al nivel de las pequeñas comunidades, es normal que en E.E.U.U. las personas entiendan que es su derecho el decidir en las materias que los afectan. Por otra parte, ven a la autoridad electa más bien como a un funcionario pagado por ellos (el derecho del "taxpayer"), que en consecuencia debe responder con su trabajo por el sueldo que recibe y las atribuciones que se le han delegado. En esas comunidades se procura que la mayor parte de las decisiones sean discutidas y decididas por los ciudadanos y éstos dedican tiempo y energía a esa labor participativa.

Es importante entender esta diferencia, porque la idea de participación ciudadana en el proceso de EIA viene del procedimiento utilizado en los E.E.U.U., y por lo tanto se contrapone con nuestras tradiciones o no logra los frutos que en principio se esperan de ella. Al respecto es interesante considerar el hecho de que varias metodologías de evaluación de impacto ambiental desarrolladas en E.E.U.U. están precisamente diseñadas para posibilitar el máximo de participación ciudadana en ese proceso.

5.2

La Participación Ciudadana en Chile.

Como se indicó en la Sección 3.1, la participación ciudadana en el SEIA se verifica durante la etapa de evaluación, sobre la base de un extracto del proyecto. Dicho extracto debe contener, al menos, los siguientes antecedentes (Párrafo 3º, Artículo 27 de la Ley 19.300).

- Nombre de la persona natural o jurídica responsable del proyecto o actividad.
- Ubicación del lugar o zona donde el proyecto o actividad se ejecutará.
- Indicación del tipo de proyecto o actividad de que se trata.

- Monto de la inversión estimada.
- Principales efectos ambientales y medidas mitigatorias que se proponen.

En cambio, la COREMA mantendrá en reserva los antecedentes técnicos, financieros y otros que el interesado solicite sustraer al conocimiento público. Esto puede representar un serio problema si se trata de un procedimiento que juega un rol principal en los posibles efectos ambientales. De hecho, una de las razones que la comunidad de Esquel, Argentina, esgrimió al rechazar un proyecto aurífero de la empresa Meridian Gold, fue el secreto del mecanismo propuesto para descomponer el cianuro, justificado por la empresa sobre la base de una posible futura patente.

Tanto las organizaciones ciudadanas con personalidad jurídica como las personas naturales directamente afectadas, tienen 60 días para exponer sus observaciones al Proyecto. El problema serio que se presenta al respecto es la capacidad científico-técnica de esas personas naturales para comprender efectivamente los efectos ambientales que pueden llegar a afectarlas, así como la adecuación de las medidas mitigatorias propuestas.

Considerando las diferencias en materia de educación científico-técnica y recursos entre la empresa proponente y los posibles afectados, es razonable suponer que solamente aquellos que cuentan con suficientes recursos (por ej., propietarios de tierras y de derechos de aguas, empresarios exitosos) o bien aquellos grupos que disponen de fuerza gremial (como los pescadores), pueden efectivamente ejercer ese derecho. En tales condiciones, la participación comunitaria puede fácilmente tomar el rumbo de las compensaciones económicas o la lucha intersectorial. No es probable que el ambiente sea el mejor resguardado en dicha pugna.

Tampoco es probable que lo sean aquellos no involucrados en la pugna entre los intereses sectoriales.

5.3

Participación Ciudadana: Ambiente, NIMBY e Intereses Económicos.

Cuando se habla de proteger el ambiente (o medio ambiente) entendemos que se alude en parte a ciertas características que poseen valor intrínseco, más allá de su valor utilitario (por ej., su biodiversidad), las que también pueden contribuir a nuestra calidad de vida: belleza, silencio, placidez, y que igualmente pueden ser aprovechadas con fines utilitarios (turismo, acuicultura, etc.). Por ello es penoso observar con que frecuencia la llamada participación ciudadana termina centrada en algún tipo de compensación económica o laboral (legítima, pero que no debería ser central, porque no todo es reducible a dinero).

Otro aspecto de la participación que es legítimo, pero no necesariamente constructivo, es el que se refiere a rechazar por principio todo emplazamiento de instalaciones necesarias, pero que la gente querría tener tan lejos de su vista como fuera posible. Ello se refiere al "síndrome NIMBY" (sigla en inglés de "no en mi patio trasero"). Al respecto, da la impresión de que ciertos sectores fueran seleccionados para recibir las instalaciones que otros quieren ver lejos (Peñalolén se queja amargamente al respecto). Es natural suponer que los sectores más acomodados de la población (que también cuentan con más poder de decisión) conseguirán siempre imponer sus intereses. En el caso de Santiago y otras ciudades, los barrios populares tienden a recibir más contaminación atmosférica, más inundación durante los temporales de lluvia, etc. que el barrio alto. Sin embargo, son los que menos protección médica tienen para enfrentar esos y otros efectos de la

pobreza. Al respecto, una de las metodologías participativas de EIA desarrolladas en E.E.U.U. justamente busca balancear, con compensaciones, la distribución de instalaciones necesarias pero indeseables como vecina. Tal vez sea una buena idea imitar ese procedimiento, especialmente mientras no contemos con un sistema de ordenamiento del territorio que permita tomar decisiones sobre bases objetivas de adecuación física del terreno (por ej., para la construcción de un nuevo aeropuerto para la aviación civil de Santiago).

Capítulo 6:

Las Metodologías de Evaluación de Impacto Ambiental.

6.1

Aplicación y Evaluación de las Metodologías de EIA

Las metodologías de EIA están destinadas a sistematizar y potenciar el proceso de evaluación. Cómo en el caso del uso de modelos físico-matemáticos, el simple uso de una metodología, por buena que sea, no garantiza nada. Por el contrario, si es inadecuada, puede contribuir a cometer serios errores al facilitar el que se excluyan actividades y criterios necesarios para detectar posibles fuentes de impactos ambientales. En consecuencia, al igual que respecto a los modelos, es necesario elegir una metodología adecuada a los fines, conocer sus posibilidades y limitaciones y utilizarla para hacer mejor el trabajo, entendiendo que en el mejor de los casos será una guía útil, pero no hará el trabajo por nosotros (materia en la que ciertos programas computacionales han introducido malos hábitos).

Las diferentes metodologías de EIA propuestas, pueden ser evaluadas ya sea en términos de su enfoque de las relaciones Causa - Efecto o desde

el punto de vista de su contribución a los procesos de planificación y toma de decisiones conforme a las siguientes interrogantes:

- Enfoque de las Relaciones Causa – Efecto:
 - ¿Están analizados los posibles efectos de las acciones del proyecto sobre una base probabilística o solamente determinística?
 - ¿Se consideran solamente los efectos directos o se incluyen aquellos de carácter indirecto y los de retroalimentación?
 - ¿Se analizan los efectos sólo en términos estáticos o se considera también la dinámica (cambios) de las relaciones?Enfoque en Términos de su Contribución a Planificación- Decisión:
 - ¿La metodología se adapta al logro de objetivos sólo individuales (por ej. ambientales) o múltiples (ambientales + sociales, etc.)?
 - ¿Permite la metodología separar claramente hechos de valores o la separación es solamente difusa?
 - ¿Utiliza la metodología el juicio experto (especialistas) o incluye un proceso de juicio participativo (ej.: comunidad)?
 - ¿Se trata de una metodología simple, rápida, de bajo costo o bien de un proceso largo, complejo, exigente?

Es importante considerar al respecto que las situaciones más difíciles en EIA implican conflictos entre valores (tema ya discutido en 2.3). También se debe tomar en cuenta que los juicios de Valor pueden ser introducidos en el proceso de EIA de dos maneras: a) Estrechando o ampliando la gama de efectos a considerar; b)Asignando ponderaciones a los distintos efectos (y a los diferentes objetivos, si la metodología los incluye).

Finalmente, es necesario considerar que el diseño de la metodología por sí solo puede facilitar o dificultar la participación de los distintos sectores interesados en el proceso de EIA.

6.2

Las Listas de Chequeo y la Matriz de Grandes Presas.

Se trata de dos metodologías muy simples. La primera está constituida por un listado de todas las acciones del proyecto susceptibles de dar lugar a impactos. (Es equivalente a la lista de compras que se acostumbra a llevar al supermercado). En todo caso, puede usarse en combinación con cualquier metodología más compleja. Por sí sola, la Lista de Chequeo sólo ayuda a no olvidar nada (si está biconfeccionada). De todas maneras habrá que enfrentar cada uno de los ítemes con los distintos factores ambientales. Si hacemos una segunda lista con estos últimos y las confrontamos, situándolas en dos ejes coordenados, tendremos una matriz y ya estaremos en otra metodología: La Matriz de Leopold.

La matriz de Grandes Presas constituye, más que una metodología de evaluación, una declaración de los impactos ambientales asociados al proyecto, los cuales son evaluados los en términos de su certidumbre (Ciertos, Probables, Improbables o Desconocidos), de su duración (Temporal, Permanente), del plazo en que se manifestarán (Corto, Mediano, Largo). La importancia del Proyecto se califica Menor, Moderada o Mayor y los Impactos en Benéficos o Positivos, Dañinos o Negativos, Neutros y Predecibles, pero difíciles de calificar. En cuanto a los efectos detectados, se establece si éstos generan o no acciones de respuesta en el Proyecto. Una aplicación de esta Matriz al EIA del Proyecto Andacollo Cobre, agregó, además, los criterios de Extensión e Intensidad. La aplicación de la Matriz en ese caso estableció solamente impactos bajos, excepto los de carácter socioeconómico, que fueron calificados como positivos moderados. Los componentes ambientales considerados en Andacollo fueron: 1) calidad del aire, 2) geomorfología y suelos, 3)

paisaje, 4) hidrología, 5) calidad del agua, 6) flora y fauna, 7) arqueología, 8) ruido y vibraciones, 9) red vial, 10) aspectos socioeconómicos, y 11) aquellos relativos a la observación astronómica. Conociendo el proyecto y su sitio de emplazamiento, es difícil no detectar un buen grado de subjetividad en las calificaciones mencionadas.

6.3

La Matriz de Leopold y el Método Delphi.

La Matriz de Leopold está descrita en la Circular N° 645 de 1971 del US Geological Survey. "A Procedure for Evaluating Environmental Impacts" por L. Leopold y otros. Se trata de un método simple, útil para realizar un primer análisis o para presentar un cuadro - resumen de impactos. Respecto a los criterios analizados en 6.1, la principal ventaja que se le reconoce es que su uso requiere poco tiempo y dinero.

La Matriz sitúa los factores o variables ambientales en el eje vertical, agrupados según su naturaleza: a) Física o Química; b) Biológica; c) Ecológica; d) Cultural. En el eje horizontal se sitúan las actividades del proyecto. Cada intersección corresponde a una celda, para la cual se verifica si existe efectivamente una intersección factor ambiental / acción del proyecto, y si ella implica un impacto ambiental (con consecuencias negativas o positivas). Si ese es el caso, se valora la magnitud e importancia del impacto, lo que se expresa por dos números superados por una línea oblicua en la misma celda. Por magnitud se entiende la extensión del impacto, que puede medirse en términos de una superficie, volumen, porcentaje, etc. (por ej., la superficie de suelos afectados). En cambio, la importancia es más valorativa y se refiere al aprecio que merece el factor afectado (por ej., las aguas de un río de reconocida calidad química y pureza). Además, se coloca un signo negativo a las celdas que

impliquen impactos negativos. La Matriz original propuesta tenía 8.800 celdas. Sin embargo, se puede confeccionar una de cualquier tamaño, adecuada a las características del proyecto a analizar y su entorno ambiental y cultural.

Si se examinan los resultados de la Matriz por columnas, se observará el impacto de una acción o actividad en particular. A su vez, la observación de una línea horizontal mostrará los efectos sobre un determinado factor o componente ambiental.

Se recomienda en general asignar, tanto a importancia como a magnitud, un número entre 1 y 10 (siendo 10 la máxima importancia o magnitud). En caso que se desee atribuir un valor numérico a los efectos totales de una acción o al efecto sobre un componente ambiental específico, es mejor multiplicar los valores de importancia y magnitud de cada celda y luego proceder a su suma algebraica por columnas o líneas horizontales. En todo caso, los números obtenidos representarán sólo una apreciación y no deben ser tomados como una efectiva cuantificación del impacto.

Respecto a la asignación de valores, se recomienda utilizar el Método Delphi: Unas cinco personas discuten la situación para cada celda. Luego asignan independientemente puntajes y ellos son contrastados. Si no hay grandes diferencias, se asigna el promedio de las cifras obtenidas. En caso contrario, se repite la discusión y se procede a promediar las nuevas cifras.

Una importante limitación de la Matriz de Leopold original es la imposibilidad de incluir los efectos indirectos o de retroalimentación. Para enfrentarla en parte, se ha propuesto utilizar los resultados de las interacciones factor ambiental / acción como si fueran nuevas acciones del proyecto o actividad, situándolos en el eje

horizontal y repetir la confrontación.

Para ejemplificar lo recién señalado, supongamos que una acción del proyecto implica un fuerte descenso de los niveles de agua subterránea. Al hacer interactuar ese efecto con el factor cubierta forestal, podemos deducir que implicará un deterioro en dicha cubierta, el cual puede ser valorizado en términos de magnitud e importancia.

6.4

El Método Batelle – Columbus.

Desarrollado por el Instituto de Investigaciones Batelle en su sede de Columbus, Ohio, aparece descrito en la publicación de N. Dee y otros (1972), "An Environmental Evaluation System for Water Resource Planning". Su objetivo principal fue incrementar la consistencia entre las EIA que debía realizar el U.S. Bureau of Reclamations, al introducir aspectos más amplios y cuantitativos en el análisis de los efectos de sus acciones remediales.

El Método está basado en setenta y ocho indicadores de calidad ambiental, dispuestos en una estructura jerárquica de cuatro niveles de información:

- A: Categorías, que expresan impactos agregados en cuatro áreas: Ecología, Contaminación Ambiental, Estética e Intereses Humanos.
- B: Componentes, que expresan sub-categorías operacionales, por ej., la Contaminación incluye Agua, Aire, Ruido y Tierra.
- C: Atributos, que constituyen el nivel jerárquico clave, ponderado conforme a su importancia relativa, y cuyo nivel de calidad ambiental es medido.
- D: Medidas, los autores sugieren una o más

técnicas de medidas para cada uno de los atributos del nivel C.

Un aspecto básico del Método es el uso de funciones de transformación que permiten convertir medidas específicas en unidades conmensurables de calidad ambiental. Para ello se grafica la calidad ambiental en el eje vertical en la escala de 0 a 1 (1 máxima calidad). En el eje horizontal se grafica la respectiva medida, por ejemplo, oxígeno disuelto en el agua. Tanto la decisión respecto a qué valores de esa medida corresponden a las cifras 0 y 1, así como la forma de la curva deben ser decididos por el usuario sobre la base de su conocimiento, experiencia y criterio o bien tomados de referencias publicadas.

Por otra parte, se distribuyen 1.000 puntos (denominados "Unidades de Importancia Paramétrica: UIP) entre los distintos Atributos del área considerada para la implantación del proyecto o intervención. Al respecto es importante señalar que el uso de este Método se justifica cuando existen diversas alternativas de uso para un área, ya que éste mostrará las ganancias o pérdidas ambientales que se derivarían de cada una de ellas. Ejemplo de Atributos serían la Biodiversidad, Calidad hidrológica, Pesca deportiva, Aguas subterráneas, Productividad agrícola, Atractivo turístico, etc. Naturalmente, al evaluar cada proyecto alternativo es necesario mantener los Atributos seleccionados para la evaluación y los puntajes atribuidos para el área en consideración. Para la atribución de dichos puntajes es aconsejable utilizar un método tipo Delphi.

Otorgados los puntajes, se procede a multiplicar los Valores de Calidad Ambiental (VCA), obtenidos a través de las funciones de transformación por las correspondientes UIP. Finalmente, se compara la calidad ambiental

actual (sin proyecto) con las computadas para distintas alternativas de proyecto. Al respecto hay que considerar que sólo se dispone de medidas para la situación actual. En consecuencia, las otras deben ser obtenidas a través de modelación o de efectos determinísticos incluidos en el proyecto (por ej., la anegación de n hectáreas de terreno por un embalse). También se debe considerar el hecho de que puede haber más de una medida para establecer la calidad ambiental de un atributo (por ej., oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos y pH para el agua) y, por lo tanto, sería necesario establecer un valor, promediando – con o sin ponderación – las cifras obtenidas.

Este método satisface parcialmente las cualidades de ser razonablemente económico y rápido, así como de servir para el logro de distintos objetivos.

6.5

Los Diagramas de Redes.

Se trata de un método conceptualmente sencillo y muy útil para analizar y mostrar las complejas relaciones entre los factores ambientales, que actúan como una red, a través de la cual se propagan los efectos perturbadores de las acciones del proyecto. Naturalmente, su implementación dependerá del conocimiento, experiencia, acuciosidad e imaginación de las personas que lo aplican.

Puesto que los Diagramas de Redes solamente indican la probable existencia de efectos directos, indirectos y de retroalimentación de las acciones del proyecto, la magnitud de dichos efectos deberá ser modelada matemáticamente o bien estimada sobre la base de experiencia previa o información referencial.

En el Diagrama, la actividad del proyecto analizada se representa en la parte centro

izquierda del sistema y los factores ambientales a la derecha. Flechas que parten de la acción, correspondientes a cada uno de los efectos ambientales de la actividad, la unen con los respectivos factores ambientales. A su vez, los efectos indirectos y de retroalimentación son representados por otras flechas que parten de factores afectantes a los afectados.

Por ejemplo: el dragado de un canal mediante bombeo de los sedimentos del fondo afecta la vegetación acuática, lo que a su vez afecta a la fauna. También el bombeo afectará la turbidez del agua, lo que igualmente tiene consecuencias en la flora y la fauna, etc.

En general, los Diagramas de Redes deberían ser utilizados en todo EIA en el que sea razonable esperar la existencia de efectos indirectos y de retroalimentación, en combinación con cualquier otra metodología de EIA.

6.6

El Método de Superposiciones de Mc Harg y los SIG.

El método de Mc Harg (1969) descrito en el libro “Design with Nature” – Natural History Press, N.Y., propone un proceso ecológico sistemático de planificación. Éste considera cuatro valores de un medio o proceso natural:

A: Cualidades intrínsecas, por ej., su belleza.

B: Productividad.

C: Contribución al equilibrio ecológico.

D: Riesgos de su uso impropio (¿Qué pasaría si...?)

Estos valores se ordenan según una jerarquía que toma en cuenta lugar y tiempo, la que debe ser considerada al evaluar los impactos.

El Método parte elaborando una serie de mapas de carácter ambiental sobre material

transparente para su posterior superposición. Naturalmente, hoy se dispone de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), consistentes en “capas” de información digital georreferenciada, lo que facilita mucho el uso de esta metodología.

El segundo paso consiste en la elaboración de Listas de Control, que comprenden unos 30 atributos, divididos en:

- Clima - Fisiografía - Suelos - Vida Silvestre - Geología - Hidrología - Vegetación - Uso de la Tierra.

Los factores más relevantes son seleccionados conforme al problema considerado y se procede a calificar los atributos de manera ordinal (por ej., Contaminación del Aire: alta, media, baja, muy baja) lo que se expresaba en los mapas originales mediante distintos tonos de gris (los SIG ofrecen mayor flexibilidad). También se confeccionan mapas que suman dos o más factores. También aquí la digitalización de la información amplía el abanico de posibilidades y hace más sencilla la tarea (como en el tratamiento matemático de las imágenes satelitales).

El resultado final son series de mapas que indican la adecuación del terreno a distintos usos (por ej., conservación, recreación, residencial, comercial, industrial, etc.). De ahí que el método se adecúe muy bien a estudios de ordenación del territorio. Se considera que este método es relativamente económico y rápido, y que facilita parcialmente la detección de efectos indirectos.

6.7

La Matriz de Metas – Logros: Una Visión Comunitaria y de la Equidad Social.

Este método fue descrito por M. A. Hill (1968) en la publicación “A Goals Achievement Matrix for

Evaluating Alternative Plans” en el “Journal of the American Institute of Planners”, 34: 19 – 28. Está diseñado para apoyar la toma de decisiones de inversión pública, donde agrega al análisis varios factores aparte del de la simple “eficiencia económica”. La Matriz se aplica a proyectos alternativos, midiendo sus consecuencias sobre metas que interesan a la Comunidad. También ayuda a mostrar de qué manera los beneficios y costos de cada alternativa se distribuyen entre los distintos sectores de habitantes interesados o afectados por cada proyecto. Esta última es una notable virtud del método.

El primer paso de su aplicación consiste en identificar, mediante consultas estructuradas y análisis de antecedentes históricos recientes, cuales son los ideales y metas principales de la comunidad, y en definirlos como objetivos operacionales. Estos pueden ser expresados ya sea en términos monetarios (por ej., aumentar el ingreso per cápita en un 10 %), no monetarios pero cuantitativos (por ej., mejorar la capacidad de atención hospitalaria en un determinado porcentaje) o no monetarios cualitativos (mejorar la calidad de vida a través de parques u otros espacios públicos, etc.).

A través de una modalidad participativa se asigna un peso a cada meta, el que debe reflejar el valor relativo que la comunidad le otorga. Posteriormente, se prepara un análisis de costo – beneficio para cada una de las metas, entendiendo por beneficio la aproximación que ella implica al objetivo perseguido, y por costo el alejamiento del mismo que ella conlleva. Por ejemplo, el logro de una meta puede aproximarnos al objetivo económico perseguido, pero alejarnos de otro relativo a la calidad de vida (como ocurre cada vez que una comuna en Chile sacrifica áreas verdes para destinar las zonas desafectadas a la construcción de edificios).

A lo anterior sigue la identificación de los sectores de la comunidad afectados positiva o negativamente por el proyecto. Aunque ello no garantiza la equidad social de las decisiones finales, al menos otorga más transparencia al proceso.

En resumen, el método facilita una mayor consistencia entre los ideales y metas de una comunidad y las decisiones que adoptan sus autoridades. Al mismo tiempo ayuda a visualizar el grado de equidad social que ellas implican. Ello bastaría para conferirle un notable valor ético y social, a lo que se agrega su carácter intrínsecamente democrático (entendiendo que democracia significa mucho más que votaciones periódicas).

En términos de su evaluación metodológica (6.1), se estima que ella satisface parcialmente lo relativo a la naturaleza probabilística de los efectos ambientales y plenamente lo concerniente a ser un método con objetivos múltiples, que hace una clara distinción entre hechos y valores y que favorece la participación comunitaria.

6.8

El Análisis de Decisiones: Una Visión Experta.

Esta metodología presenta una interesante simetría respecto a la recién expuesta. Como ella, busca maximizar el valor social de las decisiones. Sin embargo, representa el extremo opuesto en cuanto las evaluaciones y decisiones son tomadas por una autoridad central, que asume conocer los mejores intereses de la comunidad y toma las decisiones óptimas.

La metodología está descrita en el libro de R. Keeney y H. Rafia (1976) "Decisions with Multiple Objectives, Preferences and Trade –

offs" (John Wiley and Sons, N.Y.). Se inscribe en una sub-área de la Investigación de Operaciones y debe ser utilizada por analistas altamente capacitados.

La aplicación del método supone que tanto el sistema intervenido como sus perturbaciones eventuales son o pueden ser conocidos (uso de modelos) y que hay alternativas de decisión claras.

El método incluye cuatro etapas:

- A: Estructuración formal del problema. En ella se definen objetivos y atributos o parámetros medibles para cada uno de ellos, así como los grupos o sectores que pueden ser afectados de distintas maneras y grados por el proyecto.
- B: Evaluación probabilística de los futuros valores de cada atributo, debidos a los cambios causados por el proyecto.
- C: Análisis utilitario, donde se expresa la importancia adjudicada a cada atributo, en una escala decreciente de 0 a 1 (donde 0 corresponde a la utilidad máxima).
- D: Determinación de una función utilitaria de multi-atributos, donde la incorporación simultánea de todos los parámetros permite establecer la alternativa o estrategia que maximiza la utilidad.

En un ejemplo del uso de este método, los autores establecen la ubicación óptima para un aeropuerto considerando objetivos como: a) Mínimo costo de construcción y mantenimiento (Atributo: costo total para el período establecido); b) Adecuada capacidad (Atributo: N° de operaciones de aterrizaje / despegue por hoja), c) Seguridad (Atributo: N° de personas probablemente accidentadas en un período dado); d) Ruido (Atributo: N° de personas sometidas a alto nivel de ruido: 90 CNR o más).

La evaluación de esta metodología reconoce que

satisface plenamente lo relativo a la naturaleza probabilística de los efectos ambientales, lo concerniente a la aproximación a objetivos múltiples y a la clara distinción entre hechos y valores.

Capítulo 7

Los Modelos Físico - Matemáticos en EIA.

7.1

Naturaleza, Valor y Limitaciones de los Modelos.

Los modelos desempeñan dos roles muy importantes en ciencia y tecnología. En primer lugar constituyen hipótesis acerca del funcionamiento de los sistemas naturales, por ej., el Sistema Solar, el ciclo de una estrella, las relaciones materia-energía en las interacciones ecológicas, el "efecto invernadero", sus consecuencias en el cambio climático global, etc. Si el sistema es complejo, el uso de modelos es imprescindible.

El segundo rol de los modelos concierne a su uso en simulación de escenarios. Así, cambiando las magnitudes de los parámetros involucrados, es posible responder a preguntas del tipo "¿Qué pasaría si...?" cuya importancia es máxima para la ciencia y la tecnología modernas.

La mayoría de los modelos en uso son de naturaleza conceptual, vale decir, se basan en un entendimiento general de las relaciones causa-efecto entre los principales factores que intervienen en el sistema modelado. Ellas pueden ser naturaleza física, físico-química, biológica, económica, etc. y normalmente pueden ser representadas por ecuaciones, susceptibles de resolución analítica o numérica.

Sin embargo, existen modelos de carácter diferente, que actúan como un ente con capacidad de aprendizaje, cual es el caso de las redes neuronales. Un ejemplo simple de un modelo que "aprende" está dado por una ecuación constituida por una serie de términos, cada uno correspondiente a las variables que se asumen como más significativas, multiplicados por coeficientes y elevadas a exponentes que se van corrigiendo conforme a un método iterativo. Por ejemplo, el contenido de cobre de las aguas de un río puede depender del pH del agua, del caudal, del contenido de material fino en suspensión, etc. Si tal ecuación es formulada y corregida día a día conforme a la comparación entre el resultado que entrega y el valor efectivamente leído en las distintas estaciones de muestreo, se puede llegar a un buen predictor partiendo de una situación inicial ambigua (dicha tarea es "realizada por el propio modelo").

De lo señalado se desprende que es imposible concebir la ciencia y tecnologías modernas sin el uso de modelos en todas sus ramas o especialidades. Por otra parte, el desarrollo de computadores y la incorporación de modelos basados en el cálculo numérico (a diferencia de los modelos iniciales analíticos que requerían la resolución "manual" de ecuaciones diferenciales que pueden ser muy complejas) han potenciado mucho su desarrollo.

Persisten, sin embargo limitaciones. Ellas se desprenden de la gran complejidad de los sistemas naturales aún de aquellos de apariencia simple (ver 2.2). Ella implica, en primer lugar, contar con los valores de las numerosas variables requeridas para dar cuenta de esa complejidad (lo que puede ser una tarea muy difícil o imposible). Suponiendo que se pudiera contar con todas, viene una segunda, igualmente grave, dificultad: el tiempo de cálculo que aún los computadores más poderosos y avanzados requieren para procesar

la información (días, meses o años, en el caso de los modelos de cambio climático).

En consecuencia, es imprescindible simplificar y por lo tanto, alejarse de la realidad. Por ejemplo, las predicciones del cambio climático global utilizan celdas de información tan grandes que “no ven” (y, por lo tanto, no consideran) la Cordillera de los Andes, que juega un rol tan importante en el clima del oeste de Sudamérica.

De ahí que las predicciones de los modelos (aunque tengan impresionantes nombres en inglés y se vinculen a prestigiosas instituciones del extranjero) deben ser tomadas solamente como estimaciones referenciales y con mucha cautela en EIA. Naturalmente es bueno utilizarlos, pero con “conocimiento de causa” y el necesario sentido crítico.

7.2

Algunos Modelos Conceptuales Principales.

En esta parte describiremos los factores principales considerados en modelos de uso común de EIA.

A. Contaminación de un lago: Supongamos un lago que recibe alimentación de un río, así como del drenaje difuso de sus laderas. El lago desagua a través de un segundo río y una tubería aporta un cierto flujo de agua que contiene determinadas concentraciones de uno o más contaminantes. El oleaje producto del viento permite intercambio de gases entre la atmósfera y el lago y, por lo tanto, oxigenación hasta determinado nivel denominado termoclina. Bajo él, dominan condiciones reductoras, derivadas de la actividad bacteriana anaeróbica.

Para modelar el sistema se deben definir en primer lugar sus límites (como en un sistema

termodinámico, los límites de los sistemas a modelar pueden ser reales o virtuales y abiertos o cerrados en términos de flujo de materia o energía). Supongamos en este caso que sus límites son dados por las paredes rocosas del embalse y en consecuencia que los sedimentos del lago se incluyen en el sistema. Los contaminantes que ingresan por la tubería, según su carácter químico y físico-químico pueden: a) Ser removidos con el agua del río-desagüe, si son solubles en alguna forma (iónica, molecular, coloidal); b) Ser precipitados y sedimentados con material particulado en el fondo del lago; c) Ser parcialmente incorporados a plantas y organismos acuáticos. A través de cálculos químicos, físico-químicos, sedimentológicos, hidráulicos, etc., es posible calcular también la masa de cada contaminante que sigue cada uno de esos caminos. Un ejemplo al respecto es el efecto del Embalse Puclaro, que fija con los sedimentos un importante porcentaje del As, Cu y Fe que ingresa a él, actuando como un dispositivo de decantación.

B. Dinámica de un estuario: En un estuario, las aguas de un río se incorporan al mar ¿Cómo ocurre ese proceso? Las aguas del río, por su menor salinidad poseen una densidad también menor. En consecuencia forman una especie de “lengua” de agua dulce sobre la cuña de agua salada situada bajo ella, cuya posición y forma depende de las variables hidráulicas del río (caudal y velocidad) y de las del mar (mareas, oleaje). En la interfase agua dulce agua salada se produce la conversión de la primera en “agua de mar”. Ello implica un cambio en la concentración de electrolitos y del pH, que conlleva la precipitación y sedimentación de algunos elementos y sustancias disueltas, purificando por lo tanto el aporte de metales pesados. Sin embargo, éstos pueden ser incorporados de manera importante por los organismos filtradores (como almejas, machas, etc.) lo que requiere cautela en su consumo, si la contaminación es importante.

C. Explotación de aguas subterráneas cercanas al mar: Si un cuerpo que contiene y permite la conducción de agua subterránea (Acuífero) se extiende más allá de la línea de costa, ocurre que el agua dulce del acuífero “flota” sobre una cuña de agua salada.

Mientras la explotación del acuífero no supera su realimentación, la situación se mantiene estable. Sin embargo, si llega a superarla se adelgazará, alcanzando la superficie superior del cuerpo de agua salada un nivel más alto, disminuyendo así la capacidad de almacenamiento de agua dulce del acuífero.

El movimiento del agua subterránea se rige, en primer lugar, por la Ley de D'Arcy, según la cual el flujo de aguas subterráneas entre dos puntos A y B es proporcional a su diferencia de nivel piezométrico (o simplemente de altura, si se trata de acuíferos no confinados) y a la conductividad hidráulica del acuífero, e inversamente proporcional al camino que debe recorrer. El agua fluye perpendicularmente a las curvas de nivel piezométrico. Si transportan contaminantes, éstos pueden moverse a la misma velocidad que el agua o bien ser afectados por otros factores, como la difusión (que es proporcional a los gradientes de concentración). La difusión es importante cuando el flujo del agua subterránea es muy lento. Es importante considerar que la contaminación del agua subterránea es muy grave por dos razones principales: a) Puede persistir por años, siglos o incluso milenios; b) No es posible predecir con seguridad el camino que seguirá, ni por lo tanto quienes serán los afectados por ella.

D. Dispersión del humo de una chimenea: El humo expulsado por una chimenea sale con determinado impulso inicial dependiente de la masa y temperatura del aire caliente expulsado, así como del diámetro y longitud de la chimenea. Ese impulso le permite ascender una cierta distancia sobre la boca de la chimenea. A partir de ahí su suerte depende de la relación entre el

enfriamiento de la atmósfera con la altura y la tasa de enfriamiento de la masa expulsada por efecto de su expansión adiabática. Si la atmósfera se enfría más rápido, el humo continuará ascendiendo y se dispersará. Si el enfriamiento ocurre a igual tasa, sólo ascenderá por efecto inercial (dado el impulso con que sale). Finalmente, si se enfría más rápido que la atmósfera, se verá impedido de subir, porque será más denso que ella.

Una situación muy negativa es la formación de la capa de inversión térmica, común en cuencas cerradas como la de Santiago en los meses de otoño e invierno. En ese caso, durante el día se genera un volumen de aire caliente a baja altura (efecto de vehículos, calefacción, etc.). Durante la noche éste sube y se estaciona a algunos cientos de metros de altura. Al siguiente día, el ascenso de las masas de humo se ve frenado por esa masa de aire de menor densidad, lo que va incrementando los niveles de contaminación atmosférica de la cuenca.

Cuando la turbulencia permite la dispersión normal del humo, ella puede ser analizada mediante un modelo de tipo gaussiano. Este modelo que incluye como factores los gradientes de temperatura y la velocidad y dirección del viento, considera también la dispersión horizontal y vertical de los contaminantes debido al efecto de difusión, asociado a los gradientes de concentración.

En general, un modelo predictor de la contaminación atmosférica pretende establecer la concentración de contaminantes en un punto de coordenadas x , y , z , y en un tiempo t (p. ej., que contaminación existirá en la Plaza de Armas de Copiapó a las 12 del día de mañana). Desde luego no se trata de una respuesta fácil y por ello es frecuente escuchar, p. ej., que el modelo de Santiago para predicción de emergencias “se equivocó”.

E. Minas Tara, Irlanda, un Modelo Base para la Gestión Ambiental: Cuando se descubrieron ricos depósitos polimetálicos en Irlanda, alrededor de la década del 1970, hubo reticencia tanto del Gobierno como de la comunidad para aprobar la actividad minera, la cual fue estrictamente condicionada en sus aspectos ambientales. Uno de los exitosos sistemas de gestión desarrollados, el de Minas Tara, está estructurado en torno a un modelo numérico integral del área intervenida, la mina y su operación, diseñado para simular los efectos de distintas decisiones a adoptar.

El modelo incluye una amplia base de datos, incorporada a un SIG. Esta comprende información topográfica, hidrológica superficial y subterránea, de suelos, de cubierta vegetal, instalaciones y atmosférica. Por otra parte, mediante geoestadística se procede a regularizar las áreas de influencia de dicha información, la cual es renovada constantemente a través de su ingreso digital, proporcionando una serie de capas actualizadas de datos. El centro del sistema es un modelo numérico del conjunto de los componentes, el cual permite simular la evolución de situaciones (p. ej., una emergencia) así como el efecto de las posibles medidas de remediación que se adopten. En consecuencia se constituye en el núcleo del Sistema de Gestión Ambiental, proveyendo información actualizada procesada (que recibe a su vez de sus sistemas de monitoreo) así como una predicción de la evolución de las situaciones y del efecto de los posibles cursos de acción que se adopten.

7.3

La Elaboración de Modelos Físico-Matemáticos.

La primera decisión al elaborar un modelo se refiere a su grado de complejidad, puesto que de él dependerá el número de variables que lo

integren y por consiguiente de las interacciones a considerar y la complejidad de la matemática necesaria para describir y simular el sistema considerado.

Seleccionadas las variables a incluir (considerando su probable peso en el comportamiento del sistema) se debe proceder a establecer las ecuaciones sobre la base del conocimiento físico, químico, físico-químico, biológico, etc., sin olvidar los efectos indirectos y de retroalimentación. Naturalmente, es mucho más fácil decir esto que llevarlo a la práctica, especialmente si están involucradas relaciones entre sistemas físicos y biológicos. Un ejemplo sencillo. El contenido de CO₂ del agua disminuye al aumentar la temperatura. También disminuye al aumentar la acidez del agua. Si hay plantas acuáticas en el medio, aumentará durante la noche, por la respiración de ellas, pero disminuirá durante el día por efecto de la fotosíntesis. Todas esas relaciones se pueden expresar mediante ecuaciones, que a su vez, están ligadas entre sí, (p. ej., el pH también está determinado en parte por el CO₂ presente en el agua). Desde luego, las mismas ecuaciones químicas deben transformarse en expresiones matemáticas y finalmente llevarse a un modelo numérico.

Volviendo al simple caso del CO₂, en CELCO Valdivia se utilizaba un proceso de purificación del efluente basado en la coprecipitación de contaminantes con Al(OH)₃, producto de la hidrólisis de la sal de Al. Dicha reacción implica un descenso del pH (aumento de acidez) y se ha señalado que afectaba la acidez de las aguas del Río Cruces. Más acidez, menos CO₂ disponible, menos fotosíntesis de lucheillo, el alimento principal de los cisnes de cuello negro. Correcta o no, esta interpretación muestra como incluso un caso muy sencillo puede dar lugar a interacciones complejas.

Elaborado el modelo físico-matemático, es necesario calibrarlo, utilizando información conocida y ajustando los parámetros del modelo, de manera que entregue resultados coincidentes con los de la información usada.

Finalmente, el modelo debe ser validado, aplicándolo a situaciones similares pero correspondientes a otras áreas y conjuntos de datos de los utilizados en su calibración. La evaluación del modelo validado debe mostrar los niveles de aproximación a los datos "reales" que alcanza bajo distintos escenarios, así como sus límites de validez (es decir, de las condiciones bajo las cuales su aplicación entrega resultados aceptables).

7.4

Criterios para la Selección y aplicación de Modelos.

Entre los factores a considerar en la selección de un modelo para fines de EIA, la información disponible implica un primer requisito. Tendría poco sentido utilizar un sistema complejo y sofisticado si se carece de información confiable para alimentarlo. Ello se refiere tanto a la información histórica (por ej., vientos dominantes, dirección y velocidad, distribución a lo largo del año, frecuencia y cuantía de las precipitaciones, etc.) como aquella de la que se dispondrá posteriormente para fines predictivos.

Otro factor a considerar es la variabilidad del medio a modelar. Por ejemplo, las características cambiantes de dirección y magnitud de los vientos en el área de Calama-Chuquicamata hacen de escasa o nula utilidad cualquier modelo predictivo. En cambio, un acuífero bien conocido ofrece una excelente oportunidad de modelación, dada la lentitud del flujo de agua subterránea y su control por la permeabilidad primaria y secundaria de rocas y sedimentos.

También se deben considerar los requerimientos del estudio que se realiza. ¿Interesa contar con órdenes de magnitud o se pretende alcanzar cifras más precisas? En todo caso dichos requerimientos deben ser realistas en términos de considerar la información disponible y la variabilidad del sistema en estudio.

Otro aspecto a analizar es el referente a la experiencia y pericia de quienes operarán el modelo, así como los tiempos (incluidos tiempo de computador) disponibles para esta tarea. Ello también implica recursos económicos para la adquisición y operación del modelo.

Finalmente, es recomendable seleccionar un modelo que se adapte realísticamente a las condiciones antes señaladas. Ojalá dicho modelo sea conocido y se utilice ampliamente, porque ello permitirá comparar resultados y tener una noción más "aterrizada" sobre la exactitud de las predicciones entregadas por el modelo. Al respecto se debe considerar que, en el mejor de los casos, como en las aplicaciones hidrogeológicas, errores de orden de 50% o más son considerados satisfactorios. Igualmente, que cabe esperar errores de predicción de varios cientos por ciento, en los casos menos favorables (como sistemas atmosféricos turbulentos).

7.5

La EIA y el Peso de los Modelos.

De lo antes señalado en este capítulo se desprenden conclusiones simples respecto a esta materia. Desde luego, los modelos deben ser utilizados en los EIA, pero sus resultados considerados "con mucha prudencia", tanto durante el Estudio como en el proceso de Evaluación.

Ello implica aceptar sus resultados sólo después

de un buen análisis de las condiciones de uso del modelo y de sus características (información utilizada, adecuación del modelo a la situación analizada, errores normales de predicción del modelo, etc.).

Igualmente importante: al decir “aceptar los resultados” entender por ello el contar con una “opinión educada” más. Esto es importante, porque los no-especialistas pueden llegar a considerar las predicciones de los modelos con un exceso de confianza, como si fueran revelaciones de un oráculo sagrado. Por el contrario, conviene “ponerlos en cuestión” y comparar sus predicciones con otras fuentes, por ejemplo, datos obtenidos de condiciones análogas, la experiencia de los consultores y evaluadores, etc.

Finalmente, en casos de duda, si la situación modelada es importante, es mejor comparar el resultado con la aplicación de más de un modelo, y en caso de discrepancia no resuelta, aceptar el resultado más negativo, siguiendo el Principio de Precaución. Algo más: no forzar el uso de modelos cuando las condiciones son inadecuadas para ello. Mejor es nada que un autoengaño ...

Capítulo 8

Los Informes de Estudios de Impacto Ambiental.

8.1

Objetivos y Contenidos del Informe de EIA

El EIA de un proyecto implica el trabajo de un conjunto de científicos, ingenieros y otros profesionales. Cada uno de ellos debe utilizar su conocimiento, experiencia, capacidad de observación e imaginación para lograr la mejor comprensión posible de las características del proyecto y de sus acciones, así como del medio

físico, biológico, social, económico y cultural en que éste se implantará. Puesto que las relaciones entre los factores ambientales y las acciones del proyecto son complejas, es necesario que intervengan especialistas de numerosas disciplinas. Es natural que cada uno de ellos observe la realidad desde el conocimiento, métodos y criterios de su especialidad. Eso daría, el conjunto de visiones propio de un estudio multidisciplinario. Sin embargo, se necesita más que eso, porque el ambiente no es solamente una suma de efectos sino que agrega a ello las numerosas interacciones posibles. Por consiguiente, se requiere alcanzar el nivel interdisciplinar, en el cual cada especialista va más allá de su terreno para explorar en conjunto con los demás esas complejas zonas fronterizas de interacción.

Por otra parte, es esencial que cada miembro del equipo tenga siempre presente que no está estudiando la biología, hidrología, geología, etc. del área de influencia del proyecto como tal, sino en función de la detección de aspectos y posibles impactos ambientales. Lo anterior puede parecer obvio, pero la extensión y falta de pertinencia de muchos capítulos de informes de EIA muestran que es un problema recurrente.

En un sentido en apariencia opuesto, la falta de entendimiento de la importancia de algunas disciplinas, unida al deseo de ahorrar costos, puede llevar a no realizar el respectivo estudio, optando simplemente por la operación de “cortar y pegar” aprovechando la base de referencias disponibles. Esto ha ocurrido con alguna frecuencia respecto a la geología, procediéndose a reproducir la información disponible, sin extraer mayores consecuencias de ella para los fines del EIA. En un caso extremo, el encargado de cortar y pegar llegó a equivocarse el área respectiva, “pegando” información geológica correspondiente a una zona bastante alejada.

Desde luego, el Informe del EIA podrá ser, en el mejor de los casos, tan bueno como el estudio realizado. Típicamente, incluye los siguientes elementos y su contenido:

Portada: Que incluye nombre del proyecto y de la empresa proponente, así como nombre y señas (dirección, e-mails, fonos de contacto) de la empresa consultora responsable del EIA y fecha de su entrega.

• **Informe "Ejecutivo" o de Síntesis:** Se trata de un informe destinado al conocimiento de personas que necesitan tomar decisiones, pero carecen del tiempo y conocimientos técnicos para una lectura pormenorizada (por ej. miembros del cuerpo de directores de la empresa, autoridades públicas, legisladores, etc.). Debe destacar los aspectos principales (impactos mayores, temas conflictivos, conclusiones). Su extensión debiera estar comprendida entre 10 y 30 páginas.

• **Descripción del Area de Influencia:** Una "Línea de Base" del área, informando sobre sus aspectos físicos, biológicos, socioeconómicos y culturales debe ser presentada, de manera que permita comprender los factores ambientales que será necesario contrastar con las actividades del proyecto. La pertinencia, claridad y precisión de esta sección del informe es esencial, resguardando una longitud que haga posible su lectura en el atareado mundo de hoy.

• **Descripción del Proyecto:** Debe ser la adecuada para comprender sus objetivos, recursos y envergadura. Sus componentes, materias primas, operaciones, tecnologías, desechos y efluentes deben ser descritos en forma precisa, de manera que el lector informado pueda comprender e incluso deducir las acciones que implican aspectos y posibles impactos ambientales. También debe existir precisión respecto a posibles impactos positivos

del proyecto en términos de generación de empleo para la población local. Igualmente importante es lo referente a la sustentabilidad económica del proyecto (al respecto ver 2.5).

• **Metodologías de Evaluación de Impactos:** Los métodos seguidos para detectar y evaluar aspectos e impactos ambientales deben ser descritos y su uso justificado, explicando su campo de utilidad y sus limitaciones. Esto es especialmente importante respecto a los modelos utilizados (ver 7.4).

• **Impactos del Proyecto:** Los impactos ambientales, socioeconómicos y culturales evaluados deben ser expuestos, incluida su importancia y magnitud, cuya apreciación debe ser justificada. También pueden exponerse aquí las medidas de corrección, mitigación o compensación propuestas.

• **Evaluación de Alternativas:** Si el proyecto cuenta con flexibilidades en términos de ubicación, magnitud, tecnología, etc., ellas deben ser expuestas, así como el grado en que contribuyen a corregir o mitigar algunos impactos y los posibles impactos alternativos que implicaría su adopción.

• **Programa de Vigilancia Ambiental:** En esta parte se describen los programas de monitoreo destinados a asegurar que las variables de mayor peso ambiental se mantienen dentro de límites aceptables, así como los procedimientos a utilizar para corregir sus desviaciones.

• **Listado de Autores:** Los autores del Informe deben ser identificados y sus responsabilidades explicitadas. Es importante indicar alguna seña para contacto (preferentemente e-mail) de manera que puedan recibir consultas específicas.

- Referencias Utilizadas: Listado completo, de preferencia indicando específicamente la parte utilizada si se trata de libros o informes mayores. También se recomienda incluir aquí una lista de abreviaturas y siglas.

- Apéndices o Anexos: Incluyen información de respaldo al informe. Ojalá toda aquella información no esencial para la adecuada comprensión de los temas de importancia ambiental efectiva, encuentre su lugar en esta parte del Informe.

8.2

Características de Fondo de un Buen Informe de IA.

No es difícil señalar estas características. Desde luego ellas parten de la definición de una buena EIA. Ese buen estudio se realiza para detectar y evaluar efectiva y oportunamente los impactos ambientales, socioeconómicos y culturales de un proyecto. Ello, con el objeto de aprovechar sus flexibilidades (ver 2.1) o proponer medidas correctivas o de mitigación que lo hagan aceptable y ojalá deseable. Una buena EIA no se realiza para obtener la aprobación de un proyecto como única meta ni a como dé lugar. Si el proyecto presenta serios problemas ambientales, que se logra pasen inadvertidos en su gravedad, a la larga todos pueden perder. Sobre este punto hay muchos ejemplos. Desde luego el tema involucra importantes aspectos éticos, pero también las consecuencias prácticas aconsejan proceder con honestidad intelectual.

De lo anterior se desprende que un buen Informe de IA debe ser igualmente honesto. Su nombre lo indica: ha sido elaborado para informar (no para perder al lector en interminables descripciones de la naturaleza, su flora y su fauna). En primer lugar, se espera que informe sobre impactos ambientales y respecto a las perturbaciones sociales y culturales que

puede generar. Ello no implica dejar de lado los aspectos económicos, siempre que se entienda que el crecimiento económico por sí solo no es siempre positivo y puede incluso perjudicar a más personas de las que beneficia. Al respecto, sobran ejemplos asociados a explotaciones petrolíferas, monocultivos y en la actualidad a biocombustibles.

En resumen: Un buen Informe de IA es honesto, pertinente, claro y tan sencillo como sea posible. Efectivamente informa al lector sobre los hallazgos y proposiciones de un EIA que es igualmente honesto, metodológicamente correcto e inspirado en la búsqueda de la mejor alternativa para todos (empresa, comunidad, país).

8.3

Características de Forma de un Buen Informe de IA.

Como señalamos en la sección anterior, el mérito de un buen informe radica precisamente en su capacidad para informar al lector. Ese debe ser su objetivo de fondo, cuyo logro demanda tanto honestidad como claridad intelectual de parte de sus redactores.

Sin embargo, suponiendo que la intención y la comprensión existen, errores en la forma: estructura, ilustración y redacción del informe pueden perjudicar el logro de ese propósito esencial. Al respecto, el excelente texto de L.W. Canter (1998, ver Referencias) clasifica los errores de forma de los informes de EIA en tres tipos, a saber:

Errores estratégicos: Estos se refieren a la unidad intelectual del informe, la que debe ser lograda por el director del EIA. El informe no debe ser un simple compendio de una serie de estudios especializados, sino que necesita

mostrar una visión unificada, centrada en las materias pertinentes, con claridad en sus conclusiones. Ello no implica que no deban señalarse contradicciones o dudas si estas existen y son importantes, pero ello debe ser realizado con igual claridad y sin ambigüedades. Si existen proposiciones alternativas (ubicación del proyecto, etc.), sus pros y contras deben ser igualmente indicados. El informe no debe incluir plagios de información (ojo con las Referencias). En suma: cuidar la unidad, claridad, pertinencia y honestidad del Informe.

Errores estructurales: Conciernen a la presentación del documento. A la dificultad para encontrar la información buscada o las respuestas a las dudas que susciten los temas tratados. La mejor forma de evitarlos consiste en establecer un orden lógico y simple en el tratamiento de los temas y conservarlo en los distintos capítulos del informe. También ayuda un buen manejo de las tablas y de la información gráfica, para que se integre bien con el texto. También deben evitarse las generalidades en la redacción del informe, explicando con precisión los qué, los cómo, los quién y los cuándo (si se trata, por ej., de medidas de mitigación). Desde luego debe procurarse la mayor continuidad entre los capítulos y secciones del informe, evitando lagunas que desconcierten al lector.

Errores tácticos: La educación moderna descuida la enseñanza de la redacción y la ortografía, lo que se une a la escasa popularidad de la lectura entre los jóvenes. Ello explica que personas con formación científica o técnica superior cometan errores serios en ambos aspectos. Aunque los programas de manejo computacional de textos ayudan a corregir errores ortográficos, no detectan todos, y es aconsejable que una persona capacitada en ambos aspectos revise la edición del documento (aunque ella corresponde, en sus aspectos de fondo, al Director del EIA).

8.4

Cómo Leer un Informe de IA: Desafíos para los Evaluadores.

El informe de '102 kg' del proyecto Alumysa (ver 2.5) ilustra las dificultades que implica para los evaluadores el gigantismo de estos documentos. Al respecto, durante la Segunda Guerra Mundial, los servicios de contraespionaje procuraban saturar de información –correcta e incorrecta– al enemigo, sabiendo que era la mejor manera de restarle capacidad de decisión.

Podemos imaginar al evaluador serio, tratando de comprender las complejas e intrincadas relaciones entre factores ambientales y acciones del proyecto, sometido a plazos severos y exceso de carga de trabajo. Tal vez una información esencial está disimulada o poco destacada entre las líneas 22 y 25 de la página 621. Pero es tarde, está cansado y el tiempo se agota. Sin querer la pasa de largo. Actualmente se utiliza menos papel y la información se recibe en formato digital. Su lectura obliga a una postura más rígida, la radiación de la pantalla cansa la vista. Es posible que la situación sea peor que cuando el informe pesaba en kg de papel.

Desde luego es importante que los evaluadores se adiestren en el arte de la lectura rápida. Parte de la formación de los ingenieros superiores y los cuadros administrativos de elite en Francia incluye la lectura y asimilación de extensos documentos. Así se aprende a captar lo esencial, aún cuando esté disimulado en una masa de material banal. Pero nuestras universidades no practican ese tipo de entrenamiento y el arte de la lectura rápida no es muy común en nuestro medio.

Entendemos, en todo caso, que CONAMA está exigiendo informes de IA más breves y centrados en los temas pertinentes. Es una

situación que requiere espíritu de cooperación y buena fe de ambas partes, sinceramente comprometidas en el entendimiento de los impactos ambientales que implica un proyecto, así como en la selección de las mejores alternativas para superarlos.

Capítulo 9

Estudios y Evaluaciones de IA. Análisis Crítico.

9.1

Los Estudios de Impacto Ambiental son También Evaluaciones

Como señalamos en 6.1, los estudios de impacto ambiental implican forzosamente una primera evaluación de los mismos, y ella puede producirse en una etapa muy temprana, cuando se decide qué aspectos ambientales serán evaluados y cuales no. Ello es imprescindible puesto que en principio podrían llegar a ser casi infinitos. Desde luego esta inclusión o exclusión reviste una enorme importancia, considerando que los aspectos excluidos quedarán fuera del análisis, evaluaciones y discusiones del EIA a menos que sean reintroducidos posteriormente en la etapa formal de Evaluación.

Una segunda evaluación durante el EIA se verifica al seleccionar la metodología de evaluación de impactos. Como hemos señalado en el Capítulo 6, sus características son determinantes en cuanto a la decisión de qué aspectos representan impactos efectivos. Por ejemplo, la Matriz de Metas-Logros (6.7) permite analizar aspectos relativos a la distribución social de beneficios y costos, que están fuera del alcance de la Matriz de Leopold (6.3). Aparte de lo anterior, existe una amplia libertad, dentro de cada metodología, para la asignación de calificaciones de gravedad de los impactos mediante adjetivos o números, excepto si el impacto previsto viola la ley o

sobrepasa una norma. Sin embargo, también en esto último, puede haber un grado de subjetividad, por ej., cuando está involucrado el uso de un modelo de dispersión de efluentes, ya que su selección puede modificar el resultado obtenido.

En consecuencia, es conveniente reconocer la naturaleza compleja de los EIA. Por una parte constituyen estudios científicos puros, que pueden haber sido elaborados conforme a los más altos estándares de la especialidad. En el otro extremo implican apreciaciones forzosamente subjetivas. En el mejor de los casos, estas últimas pueden representar el mejor criterio de especialistas honestos y experimentados. Pero es difícil que no exista cierto grado de compromiso entre la firma consultora y la empresa proponente del proyecto. Si esta última se muestra demasiado abierta en sus apreciaciones, se arriesga a perder futuros clientes, de manera que debe buscar un compromiso razonable.

En relación al punto anterior, la participación de las Universidades o de Institutos de investigación científica en los EIA implica algunos aspectos controvertidos. Desde luego esa participación puede restringirse a un estudio específico, realizado de manera impecable por especialistas competentes y objetivos, sin compromiso alguno con los intereses del proyecto. Sin embargo, en el curso del EIA será utilizado en conjunto con otros que implican criterios y apreciaciones de naturaleza más subjetiva e incluso parcial. Si, posteriormente surgieran controversias en cuanto a impactos ambientales no detectados o subestimados en materias relacionadas directa o indirectamente con dicho estudio científico, la institución responsable se vería envuelta en la polémica. Así podría aparecer ante la opinión pública como avalando las conclusiones del Estudio cuestionado. (Sobre esto hay ejemplos, como el del caso CELCO, Valdivia).

9.2

Factores Económico-Sociales en Estudios y Evaluaciones de Impacto Ambiental.

Algunas críticas (por ej., S. Valdés, U. de Chile) a las supuestamente altas exigencias del SEIA, aluden a la escasa valoración concedida a los beneficios socioeconómicos de los proyectos en los EIA, que se concretarían a reseñar los empleos directos e indirectos que ofrecería el proyecto. En cambio, se considerarían escasamente materias tales como su aporte a la reducción de la pobreza, a la creación de empleos dignos, ingresos tributarios, mejoramiento de infraestructura, etc., los que recién aparecerían en un primer Addendum al EIA. El mismo autor hace ver que el sector minero ha implementado en sus operaciones las normas ISO 14001 lo que implicaría un compromiso de cumplimiento ambiental. La idea de base es que una mayor consideración temprana de los beneficios económico-sociales contribuiría a generar una actitud más favorable de la comunidad durante la etapa en la que ésta tiene oportunidad de participar.

Respecto al punto de vista resumido, cabe recordar cuál fue el origen de los EIA. Básicamente se trataba de analizar los costos ambientales de iniciativas de organismos públicos destinadas a mejorar las condiciones de vida de las personas. En consecuencia no estaba en tela de juicio el valor de tal iniciativa, sino simplemente analizar sus posibles efectos negativos para el ambiente.

Igualmente se debería entender que todo proyecto bien formulado, elaborado por una empresa, está destinado a crear riqueza. Obligadamente generará trabajo y la riqueza creada, tributos para el Estado y los gobiernos locales. El EIA no está destinado a evaluar esos beneficios, aunque si debe considerarlos en dos aspectos básicos. El primero es la

sustentabilidad económica del proyecto, puesto que si ésta fracasa los costos ambientales pueden ser muy graves (Bhopal, India; Chernobyl, Ucrania; Summittville, Colorado, USA, etc.). El segundo se refiere a los efectos socioeconómicos y culturales, pero no simplemente en términos de creación de riqueza y empleo, sino a los efectos a corto, mediano y largo plazo en la calidad de vida y la identidad cultural de la comunidad positiva o negativamente afectada.

En el caso específico de los proyectos mineros, es necesario considerar que su enfoque moderno procura lograr un rápido ritmo de producción y en lo posible localizar a sus trabajadores fuera del área de influencia del proyecto, lo que facilita su futuro cierre. En consecuencia, tanto en términos positivos como negativos su influencia sobre la comunidad local tiende a disminuir en términos socioeconómicos directos. No ocurre lo mismo en términos indirectos, donde las necesidades de agua, los eventuales contaminaciones, etc. pueden afectar seriamente otras actividades de la comunidad en el área de influencia del proyecto.

Respecto a la adopción de la norma ISO- 14001, sin duda es un hecho positivo, pero corresponde a un ámbito diferente (la gestión ambiental privada), respecto al de la gestión ambiental pública en que se inscribe el SEIA.

Finalmente, conviene recordar que, en su decisión final de calificación ambiental, la autoridad política ponderará los aspectos positivos y negativos de un proyecto, incluyendo en los primeros la creación de riqueza y empleo que el proyecto involucra.

9.3

Los Servicios del Estado en la EIA.

Los servicios del Estado desempeñan un rol relevante en la EIA y en Chile se caracterizan por su profesionalismo y dedicación, cimentados en una larga tradición y sólidos valores institucionales.

Por otra parte, como es normal tanto en Chile como en el extranjero, cada servicio es celoso defensor de sus atribuciones y cuando existen fronteras difusas respecto a un tema en particular, ello se expresa con energía.

Tanto la naturaleza de su trabajo, como la formación profesional de sus cuadros técnicos, pueden llevarlos a una fuerte identificación con el sector al cual se dirige su servicio, en especial si buena parte de su vida profesional se ha desarrollado en la actividad privada (por ejemplo, Ingenieros de Minas de SERNAGEOMIN con el sector minero, Ingenieros Agrónomos del SAG con el sector agrícola, etc.).

Lo anterior, aparte de ser razonable, puede ser también muy positivo, siempre que se inscriba en los principios del desarrollo sustentable, entendiendo que el mismo implica la garantía de que el desarrollo de un sector o actividad no debe afectar el de otros sectores o actividades. Por lo tanto, cada servicio debe ser especialmente cuidadoso en cuanto a señalar aquellos aspectos de los proyectos evaluados que puedan ser causa de impactos ambientales negativos. Es una responsabilidad muy importante, porque son los mejor preparados para detectarlos y esa es la misión que se les ha encomendado. Por otra parte, un comportamiento ambiental responsable ofrece la mejor garantía de desarrollo a largo plazo del sector económico al que sirven.

9.4

La Percepción Pública del SEIA.

Como es normal que ocurra, la mayoría de las personas tienen escaso conocimiento respecto a qué es y cómo funciona el SEIA. En cambio, reciben noticias de prensa, radio o TV respecto a distintos tipos de conflictos ambientales, así como a los temores o protestas de la comunidad respecto a los impactos de proyectos en proceso de evaluación.

En esto influyen dos mecanismos muy importantes. El primero se refiere al concepto de noticia. "Las buenas noticias no son noticias" (Good news, no news) que tanto desespera a los comunicadores y autoridades del Estado. Por más esfuerzos que se hagan, esto no cambiará, y es mejor aceptarlo como un hecho (salvo, naturalmente, que se trate de una victoria deportiva, pero ahí estamos en otro dominio). El segundo concierne a una desconfianza innata en las autoridades públicas y en las grandes empresas, robustecida por muchos ejemplos a lo largo de la historia, y que la prensa, el cine, la TV, los libros, etc. no dejan de promover. Sin embargo, existen esfuerzos de los gobiernos modernos por actuar con mayor transparencia y las empresas más visionarias procuran demostrar creciente responsabilidad en las consecuencias de sus actos (iniciativas como la "Responsabilidad Social Corporativa, etc.). En materias ambientales, la imagen de la autoridad puede ser robustecida a través de la actividad de la futura Superintendencia de Fiscalización Ambiental, siempre que ella cuente con suficientes atribuciones y las ejerza con efectividad (lo que sí le puede ganar una atención positiva de la prensa).

En cambio, en algunas situaciones la autoridad enfrenta un juego sin posibilidades de ganar, como en el caso de las fuentes energéticas "duras" (por desgracia, las únicas que

resuelven los problemas mayores). Si no enfrentan el problema, se las acusa, justamente, de faltas de política y de acciones concretas. Si lo hacen respaldando determinada solución (por ej., las futuras centrales hidroeléctricas de Aysén), son acusadas de influir en las decisiones del SEIA. Por supuesto, la autoridad podría decir “apoyamos este proyecto siempre que reciba la aprobación del SEIA”. Pero el hecho de que esa aprobación final corresponda al nivel político destruye el mismo argumento.

Finalmente, dada la connotación negativa que tiene la política para la mayoría de las personas, el hecho de que la decisión final del proceso de Evaluación sea “política” despierta una natural suspicacia. En suma, es normal que exista una percepción pública negativa. Lo importante es que, pese a esa percepción, el Sistema sea efectivamente exitoso en prevenir los impactos ambientales graves de los proyectos, así como en conciliar el resguardo de la calidad ambiental con las necesidades de desarrollo del país.

9.5

¿Conflictos Ambientales o Conflictos Económicos Intersectoriales?

Como hemos señalado antes (ver 5.3), las asimetrías de conocimiento, recursos e influencias entre las comunidades locales y las grandes empresas proponentes de proyectos, llevan a que los conflictos importantes existan solamente cuando chocan intereses entre sectores económicos poderosos.

En términos prácticos, lo anterior implica que los pequeños conflictos se resuelven a través de indemnizaciones o compensaciones menores. En cambio, los grandes conflictos pueden implicar grandes desembolsos (que podrían hacer el proyecto inviable) o bien obligar a cambiar su ubicación o a cancelarlo (si no existe

la necesaria flexibilidad).

El primero de los dos últimos casos está ilustrado por la ubicación original seleccionada por la empresa subsidiaria de Phelps Dodge para el puerto de embarque de minerales de la mina Candelaria (Copiapó). Previamente a la realización de la EIA, la empresa decidió ubicarlo en Calderilla, una bahía en la cual se practicaban actividades de acuicultura. La fuerte oposición de los acuicultores al proyecto llevó finalmente a que la COREMA de Atacama propusiera su traslado a Caldera, como condición para aprobar el proyecto. Aunque la empresa rechazó esta proposición, amenazando con retirar el proyecto, el buen juicio y la riqueza del yacimiento la llevó finalmente a aceptarla. En este caso, el hecho de que la empresa ya había adquirido los terrenos para instalar el puerto de embarque le restó una importante flexibilidad.

El segundo caso está ilustrado por el proyecto Alumysa, ya antes analizado (2.6), donde los intereses de salmoneros y del sector turístico mancomunados prevalecieron sobre los de la transnacional proponente, que no tuvo la flexibilidad de trasladar el proyecto a la cuenca del Río Baker. Sin embargo, en este caso la empresa se vio favorecida en cuando sin saberlo, se evitó los problemas e incertidumbres derivados del carácter sísmico que adquiriría pocos años después el área por ellos seleccionada para instalar el proyecto.

Conflictos entre empresas mineras y agrupaciones poderosas de agricultores se han resuelto generalmente a través de fuertes indemnizaciones directas (caso de El Mauro, Choapa) o indirectos (Asociación de Regantes del Río Huasco). En un caso (cultivadores de olivos Vs. CMP, también en el Valle del Huasco) se llegó a dictar una norma ambiental secundaria ad hoc y la empresa realizó importantes estudios e inversiones para

mostrar que no tenía responsabilidad en la menor productividad de esas plantaciones.

En todos los casos referidos, el conflicto de fondo no ha concernido al ambiente como tal, sino al posible efecto ambiental de una actividad económica sobre otra. En consecuencia, se trata de conflictos intersectoriales con base ambiental, más bien que de conflictos ambientales por sí mismos.

9.6

¿Existe en Chile una Efectiva Cultura Ambiental?

Entre las cualidades que los chilenos reconocen en sí mismos (y que también son reconocidas por algunos extranjeros) están su sentido de la organización, sentido práctico y realismo. También el chileno tiene cierta inventiva política y cierta capacidad de anticipación y ha logrado atraer la atención de la opinión pública europea para sus variados proyectos políticos del último medio siglo.

Sin embargo, carece o ha ido perdiendo la capacidad de agregar belleza como un ingrediente importante de su calidad de vida. Al menos desde mediados del siglo pasado, parece haber existido una competencia entre los alcaldes por transformar las frondosas arboledas de las plazas (la Plaza de Armas de Santiago incluida) en desiertos de cemento. Por otra parte, nuestras ciudades son cada vez más pobres en áreas verdes, las que se han destinado a fines más rentables.

Tampoco parece haber un genuino aprecio por la naturaleza que vaya más allá de su uso práctico agrícola o forestal. De ahí que el proyecto Parque Pumalín, en Chile austral, destinado a la preservación de sus bosques y paisajes haya despertado tantas sospechas (desde

conspiraciones geopolíticas hasta sospechas de herejías teológicas vinculadas a la ecología profunda). Simplemente era y es inconcebible que un ciudadano extranjero invirtiera su dinero para preservar un patrimonio ambiental – por valioso que éste fuera – restándolo a su explotación utilitaria.

Lo antes expuesto no tiene nada de nuevo y por el contrario ha sido señalado con dureza por autores como J. Edwards Bello, B. Subercaseaux y otros. Más grave aún, es el clima de violencia difusa que se ha instaurado en las últimas décadas y que tiene complejos orígenes (políticos, culturales, etc.). Esa violencia, que se traduce en destrucción del patrimonio urbano, saqueos, etc., no está restringida a sectores sociales determinados, y afecta incluso a actividades antes recreativas, como los encuentros deportivos. Es muy difícil que surja, en ese contexto, un genuino aprecio por los valores ambientales, que requieren de un estado mental diferente.

Es razonable pensar que la importancia que el Estado otorgue al tema ambiental va a estar ligada a la importancia efectiva que le concedan sus ciudadanos. De ahí que cabe preguntarse si existe una cultura ambiental en Chile o existen al menos las condiciones para crearla. En estos aspectos es costumbre basar las esperanzas sobre los jóvenes, pero en este caso podría ser ilusorio, por las razones ya expuestas. En tal caso, el “tema ambiental” seguirá siendo una disputa de carácter intersectorial y el ambiente visto solamente en sus términos utilitarios más inmediatos.

Capítulo 10

La Evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos Mineros.

10.1

Complejidad Física de la EIA de Proyectos Mineros.

Aunque los proyectos mineros, incluso los de mayor envergadura, no ocupan una gran extensión del territorio, ciertamente lo afectan intensamente. A diferencia de la agricultura, que opera en dos dimensiones, la minería lo hace en las tres. En el caso de las grandes explotaciones a cielo abierto, crea cavidades de tal magnitud que pasan a ser rasgos geográficos, claramente visibles desde el espacio exterior. En el de las mayores e incluso medianas explotaciones subterráneas, desarrolla redes de galerías y labores verticales que alcanzan miles de km, lo que multiplica las superficies de reacción roca/agua/aire. Las cavidades superficiales o subterráneas afectan a su vez los niveles de aguas subterráneas y la calidad química del agua, al interceptar el nivel freático y permitir la oxidación y disolución de minerales sulfurados y de metales pesados. Ello se traduce en disminución y deterioro del recurso hídrico, que puede actuar igualmente como vehículo de contaminación entre la faena minera y las aguas superficiales.

Tanto la minería superficial como la minería subterránea masiva (tipo block caving) modifican y desestabilizan el relieve superficial, favoreciendo procesos de erosión y de remoción en masa. Por otra parte, los desechos sólidos de la explotación y beneficio metalúrgico: estériles, tranques de relaves, pilas de lixiviación, constituyen relieves positivos que pueden ser desestabilizados por movimientos sísmicos (en particular los depósitos de relaves). Aparte de ello, pueden convertirse en centros generadores de polvo contaminante, si se sitúan

en regiones áridas o semiáridas.

Los factores reseñados muestran la complejidad física de una explotación minera, la que debe ser muy bien comprendida para realizarla con éxito y prevenir graves impactos ambientales como resultado de la misma. A ello colaboran disciplinas como la geología, la geomecánica, la hidrogeología, la geomorfología, etc. Factores como la presencia de fallas activas, la liberación de estrés por efecto de la explotación, la litología y la fracturación de las rocas, son muy importantes para éste y otros análisis.

A lo anterior hay que agregar la complejidad mineralógica del yacimiento y su entorno, que se traduce en las asociaciones de minerales de menas, que contienen los metales valiosos y sus impurezas, las asociaciones de minerales de ganga acompañantes y las de minerales de alteración hidrotermal y supergénica. Cada yacimiento tiene sus asociaciones características, que dependiendo del clima y topografía, establecen también patrones propios de anomalías geoquímicas, incluida la probabilidad de generación de drenaje ácido. Desde luego, también esta información es indispensable para establecer el modelo geo-metalúrgico del yacimiento, así como los riesgos ambientales de carácter químico que plantea su explotación y el beneficio de sus menas. Esta preocupación debe tener un lugar central al evaluar el plan de cierre de la respectiva operación minero-metalúrgica.

Algo más: A diferencia de otro tipo de proyectos comparables, por ejemplo una gran industria de la "química pesada", en minería la "materia prima" es siempre diferente y en parte desconocida (en general, el conocimiento detallado del depósito va precediendo a su explotación y parte del yacimiento queda siempre sin llegar a conocerse). Por otra parte, debido a la zonación de la mineralización

primaria y de aquella de carácter secundario (debida a la oxidación, removilización y enriquecimiento metálico), la composición de la mena cambia a lo largo de la explotación. Es importante entender estas complicaciones e incertidumbres propias de la naturaleza de los minerales y sus yacimientos al emprender la evaluación de impactos ambientales de un proyecto minero – metalúrgico.

10.2

Complejidad Tecnológica y Evolución de Una Explotación Minera.

La minería moderna es una actividad de notable complejidad, que utiliza conceptos científicos avanzados así como tecnología de última generación (como robots, carguío y transporte teledirigidos y controlados por posicionadores satelitales, etc.). Geólogos, ingenieros de minas, metalúrgicos, químicos, mecánicos, eléctricos, ambientales, industriales y de sistemas; geomensores, ingenieros comerciales y economistas, médicos, abogados y otros profesionales aportan sus conocimientos y destrezas para enfrentar las dificultades de naturaleza y escala que ella implica, ya reseñadas en la sección anterior.

En la práctica, una explotación minera compleja a gran escala evoluciona de manera difícil de prever, por efecto de cambios en distintos factores condicionantes.

El primero es la heterogeneidad mineralógica, litológica, estructural y geomecánica del yacimiento, descrita en la sección anterior. En el límite, puede implicar el descubrimiento de un nuevo depósito como prolongación del primero, no sospechado inicialmente y a veces de mucha mayor magnitud y/o ley (Candelaria en Punta del Cobre y Los Colorados, también en Atacama, son casos ilustrativos).

El segundo factor combina los efectos del primero con aquellos de carácter geométrico y con los propios del sistema de explotación. Este puede obligar –o hacer recomendable– pasar de un método de explotación a cielo abierto a uno subterráneo o viceversa, lo que implica la necesidad de evaluar nuevamente sus impactos ambientales.

Un tercer factor se refiere al precio de los metales o a una ampliación importante de las reservas, que puede llevar a replantear las características de una explotación (argumentos de la compañía minera Los Pelambres para la ampliación del proyecto, poco tiempo después de la aprobación de su EIA).

Un cuarto factor puede responder a un nuevo desarrollo tecnológico o a un cambio sustancial de precios que haga explotables recursos antes considerados como subeconómicos. Es el caso del Proyecto Hipógeno de Minera Carmen de Andacollo, que explotará cerca de 400 millones de t de mineral primario, cuya ley ponderada de cobre (Cu + Au) es algo inferior a 0,4% (hasta hace poco, subeconómica).

Consecuencia de lo expuesto, la EIA de una explotación minera debe ser vista como la primera de una serie, al igual que los impactos ambientales previstos. Igualmente, el cierre de una operación minera puede representar simplemente una pausa entre dos proyectos de explotación. Lo anterior es conocido, pero no siempre “reconocido” en el momento de realizar la respectiva evaluación.

10.3

Entorno Físico y Biológico del Proyecto e Impactos Ambientales.

La década de los '70 fue pródiga en el descubrimiento y desarrollo de pórfidos de cobre

– oro en los arcos de islas del Pacífico Occidental. Situados en las alturas de paisajes exuberantes, con tupida vegetación y ríos torrentosos, su exploración y desarrollo implicaron verdaderas proezas, que enorgullecieron a la geología y la ingeniería de minas. Naturalmente, ellas fueron posibilitadas e impulsadas por sus elevadas reservas y el valor que el oro agregaba a la mineralización de cobre.

En cambio, la cuenta ambiental fue también muy subida, llegando a ser causa de una rebelión local y miles de muertes en la isla de Bougainville, donde se explotó uno de los primeros yacimientos, el de Panguna. Las consecuencias políticas no llegaron a ese extremo en otras explotaciones insulares, pero sí sus consecuencias ambientales.

Estas últimas eran predecibles considerando los factores topográficos y climáticos bajo los cuales se desarrollaban las explotaciones, los que dieron lugar a una descontrolada erosión de suelos profundamente meteorizados, cargando de sedimentos finos las aguas de los ríos y afectando la pesca y los cultivos de la población local.

Desde luego, una situación diametralmente opuesta se ha registrado en explotaciones de yacimientos porfíricos de cobre del norte de Chile, como Escondida, donde los factores de topografía y drenaje (este último prácticamente inexistente) no implican riesgo ambiental alguno. Por otra parte, algunas explotaciones se encuentran a decenas o cientos de km de cualquier población, lo que restringe mucho sus posibles impactos (generalmente ligados a contaminación aérea, como en Chuquicamata o a posibles efectos ecológicos de la extracción de aguas de salares, caso de Escondida).

En general, el drenaje de las regiones áridas o semiáridas se caracteriza por su carácter

alcalino, lo que tiende a neutralizar la acidez generada por la oxidación de los minerales sulfurados. Ello favorece a la minería chilena, cuyas principales explotaciones se sitúan en ese tipo de regiones y por lo tanto presentan menor riesgo como generadores de drenaje ácido.

Sin embargo, importantes yacimientos como El Teniente, Río Blanco y Los Pelambres, se sitúan en la cabecera andina de cuencas hidrográficas en las que se realiza una actividad agrícola importante. Ello obliga a ser especialmente cuidadosos en materia de control de las operaciones, en particular respecto al riesgo de la contaminación por derrame de relaves o riles.

Al apreciar el riesgo ambiental que implican depósitos situados en esa ubicación, tanto la mineralogía de la mena como la alteración de las rocas encajadoras deben ser consideradas con especial atención. Por ejemplo, el distrito de El Indio, desde antes de su etapa de explotación, fue una importante fuente de contaminación de metales pesados y arsénico. Ello, debido a su mineralogía rica en enargita (sulfoarseniuro de cobre) y a la extrema alteración de sus rocas encajadoras, que facilitó la emisión de drenaje ácido. En cambio, el yacimiento de Los Pelambres, pese a su magnitud que es muy superior, ha tenido un efecto contaminante reducido. Ello se explica principalmente por el menor grado de alteración hidrotermal avanzada de sus rocas, así como por su mineralogía más favorable.

En términos de su efecto sobre la flora y fauna locales, la minería indudablemente afecta áreas extensas, donde dicho efecto negativo es inevitable. En cambio, ejerce protección sobre un entorno más amplio, sobre el cual ha adquirido la propiedad de la tierra. En ese territorio puede favorecer el desarrollo de fauna silvestre, como en el caso de los rebaños de guanacos del distrito de El Indio, preservándolos de su caza ilegal.

10.4

Entorno Social y Cultural e Impactos Ambientales.

La población chilena presenta un alto grado de homogeneidad cultural, y en el norte y centro del país está implantada una tradición minera. Ello implica que los proyectos de mediana o gran minería representan más bien una competencia al interior del sector (mineros artesanales o “pirquineros” versus empresas mineras) que un problema de choque cultural. Incluso es común que pequeños o medianos agricultores sean a la vez pequeños o medianos mineros. Ello no significa que no existan ocasionales choques de intereses, generalmente vinculados al agua. Pero no son choques entre extraños y, por lo tanto, no implican problemas culturales.

En cambio, sí existen riesgos en el extremo norte de Chile (Tarapacá, Antofagasta) donde poblaciones de origen aymara cultivan tierras en la precordillera. Se trata de cultivos poco productivos, pero que sustentan una rica cultura de agricultores y pastores. Puesto que el agua es un recurso escaso y que alcanza elevado precio, la transferencia de sus derechos puede ser muy atractiva para ellos. Desde luego, eso implicaría la pérdida de una cultura y modo de vida que no subsistiría en las ciudades. Es un impacto difícil de evaluar, pero que no puede ser ignorado.

10.5

Planes de Cierre y la EIA de Proyectos Mineros.

Es razonable esperar que el cierre de una operación minera vaya acompañado de una serie de medidas, que ayuden a evitar o mitigar los impactos ambientales y sociales que seguirán a dicho cierre. Ello incluye a numerosos y variados posibles impactos, como la permanente generación de drenaje ácido, los

riesgos de erosión y remoción en masa de las rocas y los desechos sólidos depositados, la cesantía de trabajadores y su efecto económico-social (el interminable caso del carbón), la emisión del polvo a la atmósfera desde los depósitos de relaves, el uso de instalaciones no desmanteladas por delincuentes, el riesgo de cavidades no tapadas para excursionistas, pastores, motociclistas, etc.

A la manera de un producto, cuyo ciclo de vida puede ser evaluado, se ha planteado su equivalente en términos del “ciclo de vida de un proyecto minero”, del cual la etapa final correspondería al post cierre.

También se ha planteado que, de alguna manera, dicho plan de cierre debería estar descrito o bosquejado ya desde la etapa de evaluación de impacto ambiental del proyecto. La idea en sí es atractiva y realizable, a condición de que se entienda efectivamente que se trata de un simple bosquejo. Ello, por dos razones principales, que se desprenden de lo señalado en la sección 2.2.

En primer término, es muy difícil –imposible en el caso de proyectos complejos de gran envergadura– saber cuál será el estado final del proyecto (incluso lo es el saber si el estado final es efectivamente final).

En segundo lugar, a lo largo de la vida de un proyecto pueden ocurrir muchos cambios, aparte de los cambios en la propiedad de la empresa, posiblemente asociados a distintos estilos de ingeniería. También los conocimientos y la tecnología pueden evolucionar mucho, llevando a adaptar medidas o soluciones muy distintas de aquellas que se hubieran podido concebir originalmente.

Uno de los factores que ha complicado la

adopción en Chile de una legislación relativa a planes de cierre (cualquiera sea la importancia efectiva que éstos pueden tener) es la relativa a las provisiones financieras para su ejecución. Ese tema surge de experiencias negativas, como el caso de la empresa canadiense Galactic Resources, que se declaró en quiebra al desencadenarse los impactos ambientales del yacimiento reabierto de Summitville, Colorado (E.E.U.U.). Se han buscado distintas alternativas, como la colocación financiera de ese fondo-seguro, de modo que se conserve o aumente su valor a lo largo del tiempo. Sin embargo, la imposibilidad de definir y dimensionar la situación al momento del cierre, hace muy difícil establecer cuál sería el monto requerido para el mismo, materia de primera importancia.

De lo anterior se desprende que elaborar y respaldar planes de cierre en una etapa temprana involucra muchas incertidumbres y problemas. Ello no significa, sin embargo, que el tema debe estar ausente de las EIA. Su presencia es importante, al menos, en los aspectos siguientes:

- La EIA debería asegurar que el proyecto no involucrará impactos ambientales que representen amenazas permanentes más allá del entorno inmediato del mismo. El mejor ejemplo de esos impactos es la generación de drenaje ácido, que en condiciones desfavorables (como las de las antiguas explotaciones cupríferas de Montana, E.E.U.U.) son "para siempre" y requerirán un permanente proceso químico de las aguas contaminadas. Al respecto, se debe tener presente que no es posible "cerrar" un yacimiento densamente fracturado, en particular si se trata de una explotación subterránea situada en un alto topográfico, que recibe abundante lluvia o nieve. En Chile, este problema puede afectar al distrito ya cerrado de El Indio y en el futuro, a Pascua-Lama.

-La EIA debería exigir procedimientos de diseño y operación que aseguren, a lo largo del proceso de explotación, el cierre de aquellas labores, depósitos de desechos mineros, etc. que no sean indispensables para sus operaciones minero-metalúrgicas. Ello implica varias ventajas importantes: a) Simplifica mucho el cierre "final"; b) Resta importancia al tema de la garantía monetaria; c) Permite comprobar la efectividad de las operaciones de cierre parcial mientras la empresa está en pleno funcionamiento. Ello permite que la empresa cuente con los recursos humanos y económicos en el lugar, para realizar un seguimiento efectivo e implementar las medidas de reparación que se muestren necesarias.

En resumen, el tema del plan de cierre debería estar presente en las etapas de estudio y evaluación de impacto ambiental, pero centrado en materias esenciales y entendiéndolo la imposibilidad de prever el estado final de una explotación minera.

Referencias Principales

- Canter, L. W. (1998). Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Mc Graw-Hill / Interamerica de España S.A.U., Madrid, 841 p.
- CEPAL (1991). Evaluaciones del Impacto Ambiental en América Latina y El Caribe. CEPAL, Santiago, 232 p.
- CIEPLAN (1991). Desarrollo y Medio Ambiente, hacia un enfoque integrador. CIEPLAN, Santiago, 228 p.
- CONAMA (1994). Manual de Evaluación de Impacto Ambiental. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Santiago, 264 p.
- Diamond, J. (2005). Collapse. Ed. Viking, New York, 576 p.
- Enger, E. D. Y Smith, B. F. (2006). Ciencia Ambiental: Un Estudio del Interrelaciones. Mc Graw-Hill / Interamericana Eds. México D. F., 476 p y anexos.
- Fernández, H. (2006). Plan Estratégico de Comunicación (PEC) para la Industria Minera Argentina. Eds. R. Villas Boas y A. González, Río de Janeiro, 194 p.
- Fernández, G. y González, P. Eds. (2005). Minería y Monumentos Nacionales / Consejo de Monumentos Nacionales, Santiago, 155 p.
- ITGM (1989). Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería. Instituto Tecnológico Geo-Minero de España, Madrid, 320 p.
- Mendoza, M. (1994). Todos Queríamos ser Verdes. Chile en la Crisis Ambiental. Ed. Planeta, Santiago, 265 p.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República (1994). Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Diario Oficial 19/03/94, p. 1-9.
- Nichols, R. y Hyman, E. (1980). A review and analysis of fifteen methodologies for environmental assessment. Office of Water Research and Technology. U.S. Dept. Of the Interior, 125 p.
- Opazo, A. Ed. (1999). Chile: Desafíos Éticos del Presente. Ed. Aguilar, Santiago, 478 p.
- Padilla, C., Ed. (2000). El Pecado de la Participación Ciudadana. Conflictos Ambientales en Chile. Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales, Santiago, 177 p.
- Pojman, L. P. (2005). Environmental Ethics. Thompson – Wadsworth Eds., Toronto, Ontario, 678 p.
- Villas Boas, R. y Page, R. Eds. (2002). La Minería en el Contexto de la Ordenación del Territorio. CNPq. y SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino), Río de Janeiro, 409 p.
- Warhurst, A. y Noronha, L. (2000). Environmental Policy in Mining. Corporate Strategy and Planning for Closure. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 513 p.

Planes de Cierres Mineros - Curso Resumido

Jorge Oyarzún Muñoz (Geol. Dr. Sci.)

Director Progr. Diplomado en Gestión Ambiental Minera (GAM-ULS.)
Coord. Acad. Progr. Diplomado en Sustentabilidad Ambiental Minera (ULS.)
Prof. Titular Depto. Ingeniería de Minas Universidad de La Serena (Chile).
Carreras de Ingeniería Civil Ambiental e Ingeniería Civil de Minas.



Explotación artesanal de oro en la selva amazónica de Brasil (El dorado do Juma)
AP Photo by Victor R. Caivano (<http://www.daylife.com/photo/0fQV91o8AKbMJ>)



CONTENIDOS

INTRODUCCION

Capítulo 1. Cierres y Planes de Cierre Mineros.

- 1.1 Diferencias entre un Cierre y un Cierre Planificado.
- 1.2 Objetivos Específicos de un Plan de Cierre Minero.
- 1.3 Plan de Cierre y Ciclo de Vida de una Explotación Minera.

Capítulo 2. Evaluación de Impacto Ambiental, Sistemas de Gestión Ambiental y Planes de Cierre de Minas.

- 2.1 Consideraciones sobre el Cierre en la Etapa de Evaluación de Impacto Ambiental de un Proyecto Minero.
- 2.2 El Plan de Cierre Minero y el Sistema de Gestión Ambiental.

Capítulo 3. El Diagnóstico Global del Sitio y los Planes de Cierre.

- 3.1 Diagnóstico de los Factores Físicos y Biológicos.
- 3.2 Diagnóstico de los Factores Socioeconómicos y Culturales.

Capítulo 4. Drenaje Acido: Predicción y Prevención.

- 4.1 Predicción de la Generación de Drenaje Acido.
- 4.2 Prevención de la Generación de Drenaje Acido.

Capítulo 5. Técnicas de Tratamiento del Drenaje Acido.

- 5.1 Tratamiento del Drenaje Ácido en Operaciones de Explotación y Cierre.
- 5.2 Recuperación Económica de Metales del Drenaje Acido.

Capítulo 6. Cierre y Estabilización de Labores Mineras.

- 6.1 Cierre y Estabilización de Labores Mineras a Cielo Abierto.
- 6.2 Cierre y Estabilización de Labores Mineras Subterráneas.

Capítulo 7. Aspectos Hidrológicos Superficiales y Subterráneos.

- 7.1 Aspectos Hidrológicos de la Minería a Cielo Abierto: Factores Determinantes.
- 7.2 Aspectos Hidrológicos de la Minería Subterránea: Factores Determinantes.
- 7.3 La Restitución de un Drenaje Superficial Estable.
- 7.4 El Drenaje Post-Cierre de Labores Subterráneas.

Capítulo 8. Manejo de Suelos Contaminados en Planes de Cierre Mineros.

- 8.1 Contaminación Geoquímica – Mineralógica de Suelos.
- 8.2 Otros Tipos de Contaminación de Suelos.

Capítulo 9. Estabilización y Protección de Desechos Minero-Metalúrgicos.

- 9.1 Principales Tipos de Desechos Minero-Metalúrgicos.
- 9.2 Factores a Considerar en el Diseño de Cubiertas Protectoras.
- 9.3 Estabilización y Protección de Depósitos de Relaves.
- 9.4 Estabilización y Protección de Pilas de Lixiviación y Botaderos.
- 9.5 La Estabilidad a Largo Plazo de las Cubiertas Protectoras.

Capítulo 10. Aspectos Socioeconómicos de un Plan de Cierre.

- 10.1 Experiencias y Desafíos en el Manejo de Aspectos Socioeconómicos.
- 10.2 ¿Cómo Dejar un Legado Sustentable de la Explotación Minera y Minimizar los Impactos Socioeconómicos de su Cierre?

Capítulo 11. Aspectos Legales y Normativos de los Cierres Mineros.

- 11.1 Aspectos Legales y Normativos de Planes de Cierre Mineros en Diversos Países.
- 11.2 El Cierre de Minas en Chile. Una Legislación Postergada.

Capítulo 12. Costes, Financiación y Garantías de los Planes de Cierre.

- 12.1 Costes y Financiación de los Cierres Mineros.
- 12.2 Distribución de los Costes del Cierre durante la Operación.
- 12.3 Planes de Cierre de Minas y Garantías Financieras.

Capítulo 13. Seguimiento y Control de los Cierres Planificados.

- 13.1 Metodologías de Seguimiento y Control.
- 13.2 El Problema de los Horizontes de Tiempo.

Capítulo 14. Reutilización de los Sitios e Instalaciones.

- 14.1 Aspectos a Considerar en la Reutilización de Sitios.
- 14.2 Principales Tipos de Reutilización de Sitios Rehabilitados.

Capítulo 15. Los Pasivos Mineros Abandonados.

- 15.1 Consideraciones Generales sobre el Problema.
- 15.2 Los Pasivos Ambientales Mineros en Chile: ¿Cómo Resolver, al menos, los Casos más Graves?



INTRODUCCIÓN

El cierre de faenas minero-metalúrgicas plantea con especial fuerza el tema de la equidad intergeneracional. Ello, porque en muchos casos los efectos negativos pueden manifestarse sólo décadas o incluso siglos después del cierre de las operaciones.

Como en otros ámbitos, el cierre de minas puede ser enfocado solamente en términos del simple (pero esencial) cumplimiento legal o bien incluir igualmente un serio interés por hacer muy bien aquello que efectivamente importa. La redacción de este curso resumido apunta básicamente a lo segundo. Ello requiere una comprensión temprana, amplia y profunda de las características del sitio (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, biológicas, socioculturales etc.), así como su consideración al seleccionar el diseño y las tecnologías para la explotación.

De lo anterior se desprende la necesidad de que un buen plan de cierre se fundamente en un buen estudio de impacto ambiental, que a su vez sea el sustento conceptual de la gestión ambiental de las operaciones y del futuro plan de cierre (lo contrario a ello es un estudio de impacto ambiental realizado para "pasar la evaluación", una gestión ambiental "para poder certificar" y un plan de cierre para salir lo antes posible de los problemas legales y olvidarse del asunto).

La elaboración de este curso se benefició de la existencia de varios excelentes textos y actas de conferencias especializadas, que se indican en las Referencias. También expone las experiencias del grupo de estudios de geoquímica y gestión ambiental del Departamento Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena. Quienes integramos el grupo hemos tenido el beneficio del conocimiento y la amistad de especialistas de universidades de Polonia, España, Alemania y Argentina, con quienes hemos colaborado desde mediados de la década de los '90. Actualmente, esa colaboración se ha extendido a Inglaterra, Portugal, Perú y Bolivia, a través del Proyecto

CAMINAR de la Comisión Europea, desarrollado en Chile por CAZALAC, la Universidad de La Serena y CEAZA. Igualmente hemos contado con la valiosa colaboración de servicios públicos, cómo la Dirección General de Aguas y de varias empresas mineras. Con ellos hemos compartido la convicción de que el conocimiento y la cooperación son esenciales como base de una buena gestión en materias de tanta complejidad como las que nos interesan.

A diferencia de otras industrias, en minería no es posible decidir la ubicación del yacimiento a explotar, como tampoco las características de sus minerales, de su macizo rocoso, de su hidrología etc., algunas de las cuales nunca llegan a ser conocidas ni comprendidas satisfactoriamente. Por otra parte, esas características varían a través del yacimiento y en cierta medida también cambian en el tiempo (por ejemplo, al intensificarse la fracturación y meteorización por efecto de la misma explotación). Sin embargo, si bien no es posible determinarlas y es difícil llegar a comprenderlas satisfactoriamente, es necesario llegar a tener la mejor comprensión posible y utilizarla efectivamente.

Finalmente, esperamos que este curso resumido pueda ser de alguna utilidad para los estudiantes y graduados de nuestras carreras de pregrado y de nuestros programas de postítulo y postgrado, así como para quienes se interesan por hacer de la minería una actividad plenamente responsable frente a la actual y a las próximas generaciones.

Capítulo 1

Cierres y Planes de Cierre Mineros (PCM)

1.1

Diferencias entre un Cierre y un Cierre Planificado.

A diferencia de una explotación agrícola, una de carácter minero está limitada en el tiempo, aunque ese límite puede ser difícil de establecer.

Una explotación minera puede cerrar temporal o definitivamente por razones como las siguientes:

- Agotamiento de las reservas económicas conocidas.
- Baja en la demanda/precios de los metales o minerales explotados.
- Mal manejo financiero de la empresa.
- Problemas geotécnicos/hidrológicos graves.
- Conflictos laborales prolongados.
- Conflictos de origen político (guerra civil, incautaciones, etc.).
- Cambios en la legislación (en particular la relativa a impuestos).
- Restricciones vinculadas al ambiente y otras materias.

Estas causales pueden coincidir en el tiempo o encadenarse en redes causa-efecto. El primer caso se ejemplifica en el Distrito Punitaqui (Región de Coquimbo, Chile), que sufrió en 1997 los efectos casi simultáneos de un sismo y una inundación, que dañaron antiguas y ya deterioradas labores. Ello coincidió en una penuria de reservas económicas y con el desplome del precio del oro, su principal producto, lo que obligó a la empresa (Cía. Minera Tamaya) a cesar su explotación. Respecto al segundo, es obvio que una baja en los precios de sus productos puede llevar a dificultades financieras, que a su vez conduzcan a conflictos laborales, etc.

Por otra parte, todas las causas señaladas pueden ser revertidas. En el ejemplo del yacimiento de hierro Los Colorados (Región de Atacama, Chile), de Cía. Minera del Pacífico, el deslizamiento de una pared llevó al cierre de una explotación de mediano tonelaje y limitadas reservas. Sin embargo, posteriores estudios geofísicos y sondajes (= sondeos) mostraron su conexión con un cuerpo mucho mayor de alta ley, lo que llevó a la apertura de una nueva explotación. De ahí que es difícil asegurar que el cierre de la explotación de un yacimiento o distrito sea definitivo.

Cuando se produce el simple cierre de una explotación se puede desencadenar un enorme deterioro en el ambiente físico, biológico y humano de su área de influencia. Ello ha ocurrido muchísimas veces en el pasado, e incluso en el pasado reciente y en países desarrollados. Es el caso de Summittville, Colorado, distrito aurífero del Siglo XIX, reabierto en 1984 por la empresa canadiense Galactic Resources. Después de repetidos errores de ingeniería que desencadenaron una extensa contaminación por drenaje ácido, la que llegó a amenazar las pilas de cianuración (lo que implicaba el riesgo de generación de HCN), la empresa se declaró en bancarrota en 1992, obligando a la intervención federal.

En términos físicos, el cierre no programado ni ejecutado responsablemente, puede llevar a efectos como los siguientes:

- Desplome de labores superficiales y subterráneas.
- Erosión de los depósitos de desechos sólidos mineros.
- Perturbación del drenaje superficial y subterráneo.
- Generación de drenaje ácido con metales pesados.
- Contaminación del agua y la atmósfera (material particulado).
- Incremento de procesos erosivos y de remoción en masa.

Las perturbaciones señaladas pueden afectar gravemente el ambiente biológico, por ejemplo, a través de la contaminación del drenaje, que se acidifica y se carga de metales pesados y de material particulado, produciendo mortandad de peces; del efecto de los suelos contaminados sobre la cubierta vegetal; del desencadenamiento de procesos erosivos, etc. Ello, aparte del riesgo que implican las cavidades mineras para la fauna mayor.

En cuanto al ser humano, experimenta el efecto de todos los factores anteriores, más aquellos de carácter socioeconómico y cultural. La pérdida de la actividad minera (que por otra parte, pudo

haber afectado el desarrollo de otras actividades económicas previas a su implantación) puede destruir no solamente el sustento económico sino también la base de valores sociales y familiares de la comunidad afectada. Ello es especialmente grave cuando la identidad del padre de familia está construida en torno a su oficio de minero, y en consecuencia se siente degradado al aceptar un trabajo alternativo (reacción característica, pero no exclusiva, del minero del carbón). Como en el caso del cierre de las minas de carbón de Lota – Coronel – Arauco en Chile, esta situación puede persistir aún décadas después del cierre de la actividad.

Naturalmente, el objetivo esencial de un cierre programado, bien planificado, ejecutado y controlado después de su realización, es prevenir, mitigar y revertir esos efectos dañinos. Ello implica que la idea del cierre debe estar presente desde la etapa de evaluación de la posible explotación de un yacimiento. Debe acompañar el diseño de las labores y la selección de las tecnologías a utilizar, y desde luego, lo referente a la localización de los trabajadores y sus familias (actualmente se prefiere disponer sólo de alojamientos para los trabajadores en lugar del proyecto). La Evaluación de Impacto Ambiental debe considerar el cierre de la explotación, pero sólo en sus aspectos centrales y esenciales (porque es muy difícil saber como evolucionará). Por otra parte, el cierre debe realizarse paralelamente a la explotación, de manera de dejar para el momento final lo menos que sea posible. Si hay comunidades cuya vida económica y laboral está fuertemente ligada a la explotación, es necesario que se estudien y desarrollen en conjunto actividades económicas alternativas. Este es un aspecto central a desarrollar como parte de la Responsabilidad Social Corporativa de la empresa minera.

En suma: Un PCM está destinado a evitar los posibles traumas que implicaban los antiguos cierres de explotaciones mineras. Ello, tanto en términos de un acrecentado daño ambiental como en sus efectos económicos y sociales sobre las comunidades situadas en el área de influencia de la explotación. Esto incluye lo referente a eventuales daños a otras actividades económicas desarrolladas o posibles de desarrollar en dicha área de influencia.

1.2

Objetivos Específicos de un PCM.

- Un PCM debe cumplir al menos con los siguientes objetivos específicos:
- Asegurar el cumplimiento de leyes y normas que regulan el cierre minero, así como de los compromisos corporativos asumidos por la empresa.
- Asegurar el cierre y estabilidad de las labores mineras superficiales y subterráneas.
- Prevenir la erosión, remoción en masa y subsidencia asociadas a los efectos de la explotación minera realizada.
- Estabilizar y proteger los desechos sólidos producto de la explotación minera.
- Resolver satisfactoriamente lo relativo a suelos contaminados en el área de la explotación, así como a depósitos de residuos peligrosos y no peligrosos enterrados en ella.
- Restaurar en lo posible la hidrología original del sitio o al menos una red hidrológica estable.
- Prevenir la generación de drenaje ácido y, si es necesario, tratarlo para reducir su acidez y contenido metálico a niveles legal y ambientalmente aceptables.
- Establecer la financiación requerida por el PCM, así como su distribución en el tiempo, y las fuentes y mecanismos que lo proveerán.
- Asegurar el cumplimiento de las condiciones requeridas para que el sitio intervenido recupere sus cualidades para el desarrollo de la vida silvestre, o permita el de nuevas actividades humanas.
- Procurar que el cierre de la explotación implique el menor grado posible de efectos socioeconómicos negativos para los trabajadores y la comunidad situada en su área de influencia económica y laboral.
- Establecer las medidas necesarias de seguimiento y control de los resultados del PCM.

1.3

Plan de Cierre y Ciclo de Vida de una Explotación Minera.

El concepto de Ciclo de Vida es utilizado en la evaluación de los aspectos e impactos ambientales de un producto, desde su manufactura a su disposición o reciclaje al final de su vida útil. Análogamente, se puede aplicar al análisis de los costes y beneficios ambientales de un proyecto minero, desde su etapa de exploración hasta la de su post-cierre (van Zyl et al, 3: 217-273). La utilidad de este enfoque radica en la visión global del proyecto, que permite la toma de decisiones que consideran los costes, beneficios y riesgos económicos y ambientales que ellas implican. Dichas decisiones son a su vez evaluadas en términos de su adecuación a los problemas, alternativas consideradas, consecuencias, pros y contras, incertidumbres involucradas, riesgos aceptados y relación consistente con otras decisiones.

Lo antes señalado es importante porque por ejemplo determinada decisión tecnológica coste-eficiente puede implicar en la etapa de cierre gastos mayores que los que ahorró anteriormente.

Entre las materias principales a considerar en esta aproximación, van Zyl et al señalan las siguientes:

- Base de conocimientos disponibles del ciclo de vida de la mina.
- Costes implicados en las etapas del ciclo de vida.
- Tecnologías de protección ambiental disponibles.
- Participación de la comunidad.
- Políticas y decisiones.

Ellas deben ser manejadas en el marco de un enfoque de evaluación de riesgos, que dé una perspectiva más amplia de los costes y beneficios de cada decisión analizada.

Un aspecto importante a considerar (Warhurst y Noronha, 2: 13-31) es el referente al flujo de caja de una explotación minera a lo largo de su vida. Como es lógico, dicho flujo es negativo durante la etapa de exploración y desarrollo, así como en la etapa de cierre. Por lo tanto, conviene aprovechar la etapa de producción tanto para invertir en labores de cierre factibles en esa etapa, como para establecer provisiones de fondos para la etapa final.

Capítulo 2

Evaluación de Impacto Ambiental, Sistemas de Gestión Ambiental y Planes de Cierre de Minas.

2.1

Consideración del Cierre en la Etapa de Evaluación del Impacto Ambiental de un Proyecto Minero.

Desde luego, el tema del cierre del proyecto minero y la calidad ambiental y sustentabilidad (= sostenibilidad) del futuro ecosistema son materias de importancia al realizar su EIA (Estudio de Impacto Ambiental). Sin embargo, como señala Sasso (2: 101-116) esa evaluación es generalmente un estudio "reactivo", en el cual el ambiente es considerado "a posteriori", después que el proyecto ha sido definido, diseñado y dimensionado. En esas condiciones, su principal utilidad es la de cumplir los requisitos legales para la aprobación del proyecto presentado. Ello lleva a que el estudio realizado sea olvidado, en lugar de llegar a ser una guía durante las etapas de construcción, operación, cierre y post-cierre del proyecto. Otro importante factor que colabora a esa negativa situación es la continua evolución de los proyectos mineros, cuyas características y dimensiones siguen de cerca los cambios de precios y de tecnologías, de manera que es muy difícil prever su situación en el también desconocido momento del cierre. Ello lleva a Sasso a recomendar una mayor integración de la EIA (Evaluación de Impacto Ambiental = Estudio de Impacto Ambiental) al "Ciclo del Proyecto", procurando una visión más completa de todas sus fases de desarrollo y de la consecuencia de las decisiones (de diseño, tecnología, etc.).

El mismo autor propone una visión más comprensiva del proceso de evaluación de impactos ambientales, la cual incluye:

Asegurar que las decisiones que se adopten sean ambientalmente sanas y sustentables (=sostenibles).

Asegurar que sus consecuencias ambientales sean identificadas tempranamente y consideradas en el diseño e implementación del proyecto.

Realizar la EIA de manera que sirva efectivamente como una herramienta de gestión en la toma de decisiones.

Realizar la EIA de modo que constituya una fuente de información para la construcción, operación, monitoreo y auditoría del proyecto minero.

Lo propuesto por Sassoon es consistente con la evaluación del "Plan de Vida de la Mina" que realiza la Cía. Río Tinto de Australia (Grimshaw, 3: 289-300). Dicha evaluación, realizada con fines internos de toma de decisiones, considera enfoques conceptuales básicos del proyecto, así como los órdenes de magnitud involucrados. En la etapa de factibilidad, se incluyen las estrategias y planes de manejo del cierre de la operación, en sus aspectos ambientales, sociales y económicos. El Plan de Vida de la Mina debe identificar los riesgos ambientales potenciales, los planes de mitigación y las soluciones técnicas más adecuadas.

En suma, al relacionar la EIA con el PCM, aparecen tres conclusiones principales, a saber:

La EIA tradicional es tardía y solamente reactiva si el diseño del proyecto no integró un análisis y evaluación sólidos de los aspectos ambientales, incluidos los de la situación post-cierre (pese a todas las incertidumbres que ello involucra).

Pese a lo anterior, no tiene sentido incluir detalles del plan de cierre en la EIA, puesto que

es muy difícil (o imposible) prever la situación final de un proyecto minero de cierta complejidad y magnitud (Sassoon, op. cit).

Sin embargo, la EIA sí debería incluir el análisis de los aspectos principales que involucrará el cierre. Entre ellos están los relativos a drenaje ácido, estabilidad futura del paisaje (respecto a erosión, remoción en masa y subsidencia) y restablecimiento del sistema hidrológico. Ellos han representado los mayores costes ambientales de proyectos mineros y pueden ser evaluados tempranamente. En cambio, es difícil que las mejores medidas de cierre logren controlarlos cuando el clima, la topografía, la geología y la mineralogía son desfavorables.

2.2

El Plan de Cierre Minero y el Sistema de Gestión Ambiental.

Un buen Sistema de Gestión Ambiental (SGA) debe considerar en su diseño, implementación y operación, las informaciones y recomendaciones entregadas por la EIA (ojalá científica y técnicamente sólido, pertinente y honesto) y por su proceso de evaluación. Puesto que dicho estudio tendría que considerar los aspectos esenciales concernientes al futuro cierre (2.1), ellos deberían ser naturalmente incorporados a la operación del SGA, en particular en la fijación de sus objetivos y metas. Por otra parte, ello debería ocurrir naturalmente en el contexto de un cierre progresivo, donde se va asegurando el cierre estable de labores mineras, depósitos de desechos sólidos, etc., que no se utilizarán en el futuro.

Por otra parte, el SGA debería prestar especial atención a los signos precoces de problemas que dificultarán el futuro cierre, como la aparición o incremento de drenaje ácido, la intensificación de la erosión, etc. También es necesario que analice con perspectiva las soluciones del tipo "déjelo debajo de la alfombra", porque ellas complicarán y encarecerán el cierre final (esas soluciones pueden ser una tentación, cuando la propiedad de las empresas cambia de mano con demasiada frecuencia, como ocurre en la actualidad).

Capítulo 3

El Diagnóstico Global del Sitio y los PCMs.

3.1

Diagnóstico de los Factores Físicos y Biológicos.

Los factores físicos del área de influencia del proyecto constituyen un control decisivo respecto a sus consecuencias ambientales. De ahí que deben ser el primer elemento a considerar en el Diagnóstico Global del sitio, ya sea en una etapa temprana de factibilidad del proyecto minero como al enfrentar un plan de cierre en una etapa tardía de la explotación, al acercarse el fin de su vida útil. El problema de la segunda alternativa es que ya puede ser demasiado tarde para resolver los problemas ambientales más graves generados por la explotación realizada.

En la conocida obra "Collapse" de J. Diamond (2005) pp 454-468 se relatan los efectos de la minería de pórfidos de cobre-oro realizada en Nueva Guinea y en los arcos de islas volcánicas vecinos del Pacífico Occidental (Ok Tedi, Grasberg – Ertsberg, Panguna), así como de la minería polimetálica del Estado de Montana (E.E.U.U.). En el primer caso se trató de notables hazañas de la ingeniería de minas, que logró la explotación de yacimientos ubicados en las cumbres de montañas rodeadas de laderas abruptas y cubiertas por bosques de lluvia, con precipitaciones anuales de miles de mm de agua. Si la explotación minera fue un éxito admirable por las dificultades vencidas, la degradación ambiental (erosión descontrolada, relaves vertidos directamente a los ríos) y sus consecuencias sobre la población nativa fueron desastrosos (y llevaron a una guerra civil en el caso de Panguna, en Bougainville, con el coste de miles de vidas). En esas condiciones sería ilusorio hablar siquiera de un "Plan de Cierre". En Ok Tedi, la presa de relaves colapsó, de manera que su contenido destruyó las pesquerías asociadas al río del mismo nombre, mientras enormes cantidades de sedimentos contaminados destruían la vegetación de la planicie aluvial y se iniciaba la liberación de cianuro.

Seguramente, un diagnóstico global de los factores físicos y biológicos del área intervenida habría mostrado tempranamente la imposibilidad de realizar dichas explotaciones sin incurrir en tan elevados costes ambientales. Ese reconocimiento llegó recién en 2001, cuando BHP declaró que "la explotación de Ok Tedi no es compatible con nuestros valores ambientales y la compañía nunca debió haberse involucrado en ella".

Una situación menos dramática, pero que involucra elevados costes ambientales y económicos (para mantener los primeros dentro de ciertos límites), está dada por la herencia de la minería metálica en Montana, por su efecto en la generación de drenaje ácido. Así, en el caso de la mina de oro Zortman – Landusky, desarrollada por la Cía. Pegasus Gold, se han invertido ya US\$ 52 millones en el tratamiento de su drenaje ácido (la empresa fue a bancarrota después de pagar US\$ 32 millones). Se estima que 10 de las principales minas del Estado requerirán tratamiento de su drenaje ácido "por siempre", incrementando el coste de su cierre por un factor de 100 sobre las estimaciones originales. Montana es un Estado reconocido por sus bellezas paisajísticas, sus ríos de aguas originalmente límpidas y pródigas para la pesca deportiva, sus bosques, etc. Sin duda un hermoso marco para la filmación de películas... pero también para la generación y propagación del drenaje ácido, que afecta recursos tan valiosos.

Los proyectos mineros surgen en toda clase de ambientes: en las cumbres de arcos de islas cubiertos de bosques de lluvia, como Bougainville, en la sequedad de desiertos casi absolutos, como Escondida (al SE de Antofagasta, Chile), en los paisajes montañosos de Montana, en los fríos del Ártico o del NW de Canadá, etc. En cada caso, un diagnóstico oportuno permitirá evitar un fracaso económico o ambiental o bien diseñar operaciones de características y magnitud que hagan la operación rentable y garanticen que ella y su posterior cierre serán aceptables en términos ambientales. Igualmente, si la operación minera ya se realizó, es necesario efectuar ese diagnóstico para elaborar un plan que ofrezca garantías de sustentabilidad en el tiempo.

Al realizar tal evaluación, Welsh (3: 69-77) recomienda a los organismos reguladores centrarse en lo que “realmente importa” y desarrollar políticas y normativas apropiadas (que deberían ofrecer flexibilidad en el enfoque caso a caso). El autor citado estima especialmente importante verificar que se esté realizando una “minería para el cierre”, así como prestar atención a los signos tempranos de deterioro que puedan afectar la estabilidad del futuro cierre.

Por otra parte, Welsh et al (3: 167-178) recomiendan a las empresas enfocar el cierre con una aproximación basada en la evaluación de riesgos. Ella considera factores como los posibles usos posteriores del sitio, la caracterización de los materiales presentes, los costes de rediseño del paisaje, las expectativas de la comunidad y los riesgos de falla de la rehabilitación. La metodología propuesta evalúa las posibles fallas en términos de sus consecuencias (entre insignificantes y mayores) así como su probabilidad de ocurrencia (de muy baja a casi segura). La combinación de ambas estimaciones lleva a clasificar los riesgos en Insignificantes (baja probabilidad y consecuencias), Menores, Moderados, y Mayores (alta probabilidad y consecuencias). Un análisis similar fue propuesto por Logan et al (3: 225-233), el que utiliza análisis multicriterios, análisis de riesgos y análisis coste-beneficios, basando los criterios de decisión en: a) requerimientos legales, b) políticas corporativas, c) riesgos potenciales, y d) objetivos deseables, llegando finalmente a un análisis coste-beneficio de las opciones posibles.

Naturalmente, el diagnóstico de cada sitio intervenido implicará una serie de factores a considerar, algunos de los cuales tendrán una importancia decisiva por ser características extremas como las montañas boscosas de Nueva Guinea. En un caso aparentemente opuesto, Reshetnyak y Fedotova (3: 735-741) reseñan los problemas de cierre de explotaciones mineras en el Ártico. Factores como temperaturas extremas, congelación – descongelación, agua en rocas, avalanchas de nieve, etc. se unen a la necesidad de proteger las aguas de la contaminación y a la extrema vulnerabilidad de la flora y faunas locales (cuya

recuperación demanda largo tiempo). El mismo trabajo señala los efectos del cambio climático en regiones árticas, que se expresa en factores como la fusión del permafrost, que pueden complicar aún más el cierre de la mina (Al respecto, ver el caso Giant Mine, Yellowknife, en p 111). El mismo factor puede dificultar también el cierre de faenas en los Andes de Chile, donde el ascenso de la isoterma de la línea de nieve pronosticado por algunos modelos, provocaría crecidas y aluviones invernales.

3.2

Diagnóstico de los Factores Socioeconómicos y Culturales.

A diferencia de los factores físicos, que pese a los cambios climáticos tienen mayor permanencia, los de carácter socioeconómico y cultural están sujetos a rápidos cambios, no siempre favorables. Igualmente, ellos deben ser considerados como variables básicas para evaluar la decisión de llevar a cabo el proyecto, así como para obtener su aprobación. En Chile, ello está asociado a la EIA mientras que en Perú y otros países latinoamericanos está llegando a ser una especie de permiso independiente (“Licencia Social”). Desde luego, sería erróneo desarrollar un proyecto contra la voluntad de las comunidades vecinas o generando una grave división al interior de ellas, aunque se cuente con el apoyo decidido del respectivo Gobierno, porque la política es muy volátil y el futuro incierto.

Iniciado el proyecto, se abre a la empresa una importante interrogante. ¿En qué grado le conviene asociar a la comunidad al desarrollo del proyecto? La empresa no puede actuar como una extraña: tanto la comunidad como el gobierno central esperan que se convierta en un oferente de empleos y un factor de desarrollo. Sin embargo, si la unión es muy estrecha, los conflictos gremiales pueden ser más graves y el cierre de la explotación más traumático y difícil. Por consiguiente, parece razonable adoptar una política que favorezca el desarrollo de actividades económicas complementarias durante la vida de la explotación minera. Esa acción de promoción y el apoyo a la educación que facilite tal diversificación económica,

pueden ser un buen objetivo de la Responsabilidad Social Corporativa de la empresa. Un objetivo que, si es exitoso, facilitará el futuro cierre de la explotación en materias socioeconómicas y culturales.

En suma: Las relaciones con las comunidades vecinas, así como con los centros locales de servicios a la minería, deberían manejarse de modo opuesto al estilo del pasado, donde la empresa era a la vez eje económico y centro de gobierno. La situación ideal es la de una comunidad activa y autosuficiente, con economía diversificada, capaz de adaptarse al cierre del proyecto minero, pese a las dificultades que éste genere inicialmente. Si esa situación no existe al inicio del proyecto, su vida útil es el lapso con que cuenta la empresa para lograrlo.

Capítulo 4

Drenaje Ácido. Predicción y Prevención

4.1

Predicción de la Generación de Drenaje Ácido.

La producción y migración de drenaje ácido es el problema más grave que enfrenta el cierre de faenas mineras. Ello, porque no solamente afecta al sitio de la explotación, sino que tiene la capacidad de llevar el daño hasta decenas o cientos de km de distancia, afectando al recurso más valioso: el agua. Aunque la acidez por sí misma afecta los ecosistemas y cultivos, así como los usos del agua, su efecto más grave radica en que facilita el transporte de metales pesados, contribuyendo a su dispersión desde los yacimientos. Aunque este problema puede estar presente en la etapa de explotación, el control del drenaje mediante bombeo y la estabilidad de las instalaciones permite mantenerlo bajo límites aceptables. En cambio, al cesar la explotación el agua puede invadir las labores subterráneas, que se deterioran progresivamente, generando una situación difícil o imposible de manejar.

Para comprender la razón de ser de este fenómeno conviene partir de lo más básico: el hecho de que el agua pura presenta un muy bajo grado de disociación en $H^+ + OH^-$, llegando el producto de sus concentraciones a 10^{-14} moles/L. Puesto que cada molécula de agua disociada produce un H^+ y un OH^- , su reacción es neutra. Cuando predominan los iones H^+ , se dice que el agua es ácida, cuando los OH^- , alcalina. El pH se define como el logaritmo con signo negativo de la concentración de H^+ . Si el agua es neutra será 7.0; si es ácida, menor que 7.0. La acidez del agua, si es moderada, no es dañina. Por ejemplo, el agua gasificada (y las gaseosas en general) tienen un pH del orden de 3.5. Sin embargo, el mismo pH en el agua de una mina podría ser muy peligroso, por la concentración de cobre, zinc y otros metales que se presentan disueltos en esas condiciones.

Dos reacciones principales controlan el pH de las aguas naturales: la primera corresponde a la hidrólisis de los silicatos, principales minerales de las rocas. Cuando éstos se meteorizan en ausencia de acidez, la reacción da lugar a una base (hidróxido) fuerte, vale decir, disociada, y a un ácido débil, no disociado:



En consecuencia, este proceso genera alcalinidad del agua, esto es, valores de pH superiores a 7.0, debido a los grupos OH^- que libera.

La segunda reacción es la de CO_2 con H_2O , que produce H_2CO_3 parcialmente ionizado en H^+ y HCO_3^- ($CO_2 + H_2O = H_2CO_3 = H^+ + HCO_3^-$)

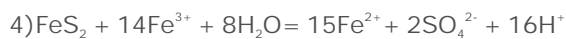
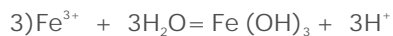
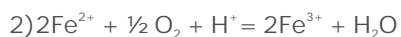
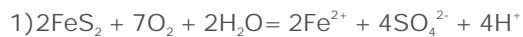
Puesto que esta reacción libera H^+ , tiende a comunicar al agua una moderada acidez. El CO_2 está naturalmente presente en la atmósfera. Además es liberado por la respiración de animales y plantas, y por la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno.

De lo expuesto se deduce una "competencia" entre dos reacciones que conducen a resultados opuestos. En clima húmedo, en presencia de abundante vegetación como en el sur de Chile, predomina el efecto de la segunda y tanto los

suelos como las aguas de ríos y lagos son moderadamente ácidos. En cambio, desde el centro al norte del país, su aridez o semiaridez conlleva el dominio de la primera, confiriendo a las aguas y suelos una reacción de moderada a mediana alcalinidad. Como veremos más adelante, ello contribuye a limitar en gran medida los efectos del drenaje ácido, los que podrían ser muy graves si nuestros grandes yacimientos se situaran en el sur del país.

El principal mineral responsable de la generación de drenaje ácido de minas (o yacimientos no explotados) es pirita: FeS_2 . Ello, debido a que su fórmula incluye un átomo de azufre "extra", que al oxidarse en presencia de agua da lugar a la formación de ácido sulfúrico. La pirita es un mineral frecuente y abundante, no solamente en yacimientos metálicos sulfurados, sino también en los de carbón, donde se ha formado por reducción de sulfatos en el mismo ambiente pantanoso.

La producción de drenaje ácido por oxidación de pirita tiene su complemento en la hidrólisis del sulfato férrico, también generadora de H^+ . Aunque principalmente ocurre en presencia de oxígeno y es acelerada por acción bacteriana, igualmente puede tener lugar en ausencia de ambos factores, como lo indican las ecuaciones siguientes:



Las primeras dos ecuaciones ocurren en ambiente oxigenado. La primera implica la oxidación de pirita con liberación de H^+ y la segunda, la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} . La tercera reacción es hidrolítica, puede ocurrir o no en presencia de oxígeno y libera más H^+ . Por último, la cuarta reacción implica la oxidación de pirita por acción de Fe^{3+} , con liberación de H^+ . Es muy importante, porque puede ocurrir en ausencia de oxígeno, vale decir, en niveles de la mina protegidos respecto al acceso de ese elemento.

Mitchell (2: 117-143) presenta un claro y completo resumen de los distintos aspectos relativos al drenaje ácido. El autor citado reseña su persistencia (siglos – tal vez milenios) y los enormes volúmenes generados, cuando el clima, la topografía y la extensión y densidad de labores subterráneas lo favorecen (unos 70 millones de litros/día, en un solo distrito de Cornwall, UK). Al respecto, en el distrito de El Indio, en los Andes de Coquimbo, Chile, el drenaje ácido precedió a la explotación minera de oro-cobre-arsénico y se han encontrado elevadas concentraciones de los tres elementos y sulfato aguas abajo del distrito, en niveles sedimentarios datados en 9640 ± 40 años (Oyarzún et al, 4).

Las principales fuentes de generación de drenaje ácido son:

Labores subterráneas

Acopios de estériles o < minerales económicos

Rajos abiertos (= cortas)

Pilas de lixiviación

Depósitos de relaves

Vertientes naturales

En el caso de las labores subterráneas, el agua superficial oxigenada accede al macizo rocoso a través de infiltraciones favorecidas por su permeabilidad primaria, pero especialmente por estructuras como diaclasas, fallas o fracturas de subsidencia. Al respecto, un macizo rocoso presenta una ilusoria apariencia de solidez, cuando normalmente está cruzado por estructuras a todas las escalas. En consecuencia, poco se logra cerrando los accesos principales a las labores mineras subterráneas cuando existe fuerte fracturación, agua abundante y gradientes hidráulicos favorables al flujo subterráneo. Por otra parte, es normal que los yacimientos metalíferos se formen justamente en macizos altamente fracturados, y que su explotación incremente mucho la fracturación inicial.

Puesto que la generación de drenaje ácido ocurre en la interfase roca mineralizada/agua, la multiplicación de la superficie por efecto de la

minería subterránea genera un efecto comparable al del crecimiento exponencial de la superficie interna del carbón activado. En yacimientos medianos, las labores pueden alcanzar cien o más km, y varios miles en los depósitos mayores, lo que implica enormes superficies de contacto.

La superficie expuesta es comparativamente menor en un rajo abierto, pero la exposición directa de las paredes a la atmósfera incrementa la velocidad del proceso.

Al cierre de su explotación, los rajos (= cortas) pueden albergar pequeños lagos y se convierten en especies de reactores químicos donde ocurren reacciones de oxidación, hidrólisis, precipitación, etc. El agua que accede a ellos, superficial o subterráneamente, participa en esas reacciones y a su vez el sistema alimenta – y contamina – el drenaje subterráneo. Sin embargo, los rajos inundados pueden ser utilizados para tratar el drenaje ácido. Esper et al (3: 603-611) describen esta situación, así como el uso del modelo PHREEQC como predictor de la evolución química del sistema.

Los depósitos de estériles ricos en piritita y los acopios de minerales sulfurados, presentan especial facilidad para la generación de drenaje ácido por su elevada permeabilidad, así como por el incremento de superficie que implica el hecho de que la roca se encuentre ahora formando bloques de escala decimétrica. Williams y Rhode (3: 521-532) enfatizan la facilidad de generación y liberación de drenaje ácido desde estos depósitos, tanto durante la operación de la explotación como después de su cierre, y recomiendan aplanar el techo de la pila y cubrirlo con un material que impida o limite la percolación de agua. En el caso de los depósitos de relaves, el crecimiento de la superficie específica es aun mucho mayor. Sin embargo, ello es contrapesado por la menor permeabilidad del material, lo que retarda la velocidad del proceso. Williams (3: 533-542) estima que este problema puede ser remediado en gran medida depositando los relaves tan secos como sea posible.

El tema de las pilas de lixiviación ácida de minerales de cobre y su posible efecto contaminante fue tratado por Dixon et al (3: 571-576) y por Rivera et al (3: 565-570). Los primeros consideran las pérdidas de soluciones ácidas desde las pilas de lixiviación, en las cuales la actividad bacteriana continúa generando soluciones ácidas ricas en cobre mucho después de concluida su irrigación, lo que debe ser considerado en los planes de cierre. Los segundos, se refieren a la responsabilidad ambiental que implican las acumulaciones cristalinas de sulfatos de aluminio y magnesio en la base de las pilas de lixiviación, cuya magnitud estiman en cifras muy elevadas.

En términos de predicción, la generación de drenaje ácido debe considerar tres aspectos principales, a saber:

- Predicción del potencial químico de generación de drenaje ácido.
- Evaluación del potencial hidrogeológico para el acceso y conducción de las soluciones.
- Predicción del contenido metálico del drenaje ácido y del efecto de su posterior neutralización.

Respecto al primer punto, existen tanto criterios generales a considerar en la evaluación, como tests específicos de laboratorio. Esencialmente se trata de confrontar el potencial de generación de acidez con la capacidad de neutralización de las rocas y los minerales de ganga. En materia de tests, éstos se clasifican en estáticos y dinámicos. Los primeros son más sencillos, rápidos y fáciles de interpretar, pero sus resultados son menos confiables que los de tipo dinámico. En cuanto a los criterios geológico-geoquímicos, es evidente que la presencia de rocas carbonatadas implica una alta capacidad de neutralización. En cambio, se tiende a pasar por alto la capacidad neutralizadora de las rocas silicatadas (Oyarzún: 6; Oyarzún et al 7), probablemente por la dificultad de incluirla en los tests, dada la mayor lentitud de las reacciones. Esa capacidad es máxima en las rocas máficas poco alteradas o con alteración potásica o propilítica, decrece en las rocas con alteración sericitica y es nula en las rocas afectadas por alteración argílica.

Desde luego, la riqueza en pirita de la roca y de la mena será un criterio de mayor potencial de drenaje ácido, mientras la presencia de calcita favorecerá su neutralización.

Respecto a la evaluación hidrológica e hidrogeológica, factores como el clima (precipitaciones, temperaturas), la topografía (que influye en el gradiente hidráulico) y el grado de fracturación del macizo rocoso, son los principales factores a considerar. El volumen de precipitaciones juega al respecto un rol complejo. Si es muy escaso, el fenómeno tendrá poca extensión y si es demasiado abundante, se favorecerá la dilución del drenaje ácido generado. En consecuencia, la situación intermedia presenta los mayores riesgos.

Finalmente, respecto al contenido metálico del drenaje ácido, éste dependerá de la mineralogía de la mena así como de la química de los metales pesados que ésta contiene. Metales como cobre, zinc, cadmio, etc., son solubles en soluciones ácidas sulfatadas. En cambio, es afortunado que el sulfato de plomo presente un bajo producto de solubilidad. Cuando el drenaje superficial ácido es atenuado por mezcla con aguas de pH mayor, su contenido metálico es transferido a los sedimentos finos, un caso muy bien ilustrado por el efecto del distrito de El Indio en aguas y sedimentos de la cuenca del Río Elqui (Guevara et al: 8; Oyarzún et al: 18).

4.2

Prevención de la Generación del Drenaje Ácido.

Respecto a la prevención del drenaje ácido, existe una variedad de metodologías, que pueden agruparse como sigue:

- Explotación selectiva del yacimiento (dejando sin intervenir los sectores con mayor potencial de drenaje ácido).
- Construcción de pantallas y sellado con hormigón para aislar sectores de mayor riesgo.
- Sellado de faenas abandonadas y de sondajes (= sondeos).
- Modificación del drenaje superficial o subterráneo.

- Uso del agua como aislante, por ejemplo en un rajo abierto (= corta) ya explotado.
- Conducción de aguas contaminadas a piscinas de tratamiento.
- Uso de bactericidas.
- Uso de compuestos inorgánicos que generen una cubierta aislante sobre pirita y otros sulfuros.
- Depósito segregado del estéril con alto potencial de drenaje ácido. Depósito conjunto de estériles con potencial de drenaje ácido y estériles con potencial neutralizador.
- Cubiertas sintéticas, revegetación y materiales con capacidad reductora sobre desechos sólidos mineros.

El tema del drenaje ácido en sus diferentes aspectos (predicción, prevención y tratamiento) ha sido y es motivo de numerosos estudios científicos y técnicos, así como de proyectos y asociaciones internacionales. Entre ellas está la International Mine Water Association, que publica la revista "Mine Water and the Environment", muchos de cuyos artículos están dedicados a esta materia. Otra importante iniciativa es el Programa MEND, que ha realizado una serie de proyectos y publicaciones sobre el tema. Ellas incluyen el 5.4.2. Mend Manual, que describe más de 200 tecnologías que cubren el campo completo: muestreo, análisis, predicción, prevención, tratamiento y monitoreo de drenaje ácido. Otro manual, Mend 2.21.4 cubre el diseño, construcción y monitoreo de cubiertas para proteger depósitos de residuos sólidos mineros. Además, ofrece 3 CD Roms, con 160 documentos técnicos (su sitio web es: <http://mend.nrcan.gc.ca>).

En suma: la generación de drenaje ácido constituye uno de los problemas más serios que enfrentan las explotaciones mineras y una dificultad que puede llegar a ser imposible de resolver en un cierre minero (salvo mediante tratamiento a perpetuidad). Sin embargo, hoy se dispone de excelente información para enfrentar el difícil problema que implica.

Capítulo 5

Técnicas de Tratamiento del Drenaje Ácido

5.1

Tratamiento del drenaje ácido en Operaciones de Explotación y de Cierre.

Reiteremos la idea básica de este curso: Un plan de cierre exitoso (efectivo, sustentable a largo plazo, de costes moderados) se basa en una explotación bien realizada, que introduce los riesgos ambientales en la evaluación coste-beneficio de sus decisiones. A su vez, esa explotación consideró en su diseño, magnitud, selección de tecnologías, etc. los resultados de una efectiva evaluación de impactos ambientales (no una realizada a posteriori respecto a las decisiones básicas, con el único objeto de obtener la aprobación de la autoridad política).

Lo anterior es de especial pertinencia respecto al problema del drenaje ácido, que como hemos señalado antes, puede “ser para siempre” a la escala humana (con costes totales fuera de todo orden lógico, aunque al fin terminen siendo asumidos por el Estado – vale decir por todos).

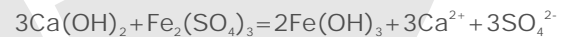
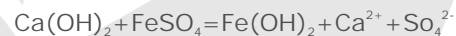
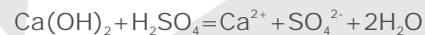
También la necesidad de tratar el drenaje ácido puede surgir durante la explotación minera, incluso en etapas tempranas de algunos tipos de yacimientos. Al respecto, requieren especial cuidado los de tipo epitermal “ácido-sulfático”, situados en zonas montañosas y cuya red de drenaje los conecta con ríos importantes, pero cuyo caudal es moderado (lo que favorece la concentración de metales pesados y dificulta la dilución de la acidez). En esos yacimientos, ejemplificados por Summitville, Colorado (E.E.U.U.) y por El Indio y Pascua-Lama (este último en la frontera chileno-argentina), las rocas encajadoras del depósito no solamente carecen de capacidad neutralizante sino que se convierten ellas mismas en generadoras de acidez. Naturalmente, al decidir su explotación, el tema del drenaje ácido deberá considerarse en el diseño de sus instalaciones en todos sus aspectos, desde la prevención al tratamiento de las soluciones.

El artículo antes citado de Mitchell (2: 117-143) presenta una excelente síntesis de las técnicas de tratamiento de drenaje ácido. También este tema ha sido tratado extensamente por el proyecto – consorcio MEND, así como en numerosos artículos de la revista *Mine Water and the Environment* y en otros trabajos citados en el presente capítulo.

En la descripción de las metodologías de tratamiento seguiremos la clasificación propuesta por Mitchell (op. cit), complementada con la del ITGME (= IGME) (2; 1989) y la información entregada por otros trabajos (3; 2007).

Sistema de Tratamiento Activo. Básicamente corresponden al uso de cal u otro neutralizante, precedido o acompañado de aireación (u otro oxidante más energético) para facilitar la precipitación de Fe y Mn a un pH menor. A este respecto, Tsukamoto y Vásquez (3: 593-602) proponen el uso de un reactor cilíndrico rotatorio, económico tanto en requerimiento de espacio como de energía.

Las reacciones básicas de estos sistemas son:



Los metales presentes pueden precipitar con las distintas fases sólidas (sulfatos, hidróxidos, carbonatos, arseniatos, etc.). Al respecto, Loomer et al (3: 829-838) destacan el riesgo que presentan los barros resultantes del proceso, cuyo pH es superior a 9, si un posterior descenso de pH permite la redisolución de los metales pesados que contiene (Cu, Zn, Cd, etc.).

Entre los beneficios de la tecnología, Mitchell destaca:

- Economía de espacio.
- Facilidad para enfrentar cambios de composición y flujo del drenaje ácido.
- Los cambios de temperatura afectan poco al proceso.

- El Método es efectivo, incluso con aguas altamente ácidas.
- Se trata de una tecnología bien conocida y probada.

En cambio, implica limitaciones y algunos problemas cómo:

- Necesidades altas de mantención del equipo (efecto sales).
- Si el pH se eleva con el objeto de precipitar manganeso, otros metales pueden formar compuestos solubles (por ej., Al(OH)_3 puede formar un aluminato soluble).
- Los barros son inestables, y los metales que contienen pueden redisolverse al disminuir o al aumentar su pH (ver Loomer, op. cit.).
- La disposición de los barros es complicada. Poseen un elevado contenido de agua, cuya eliminación es muy costosa, ya sea económica o ambientalmente (según el procedimiento seleccionado).
- La eventual recuperación de metales pesados valiosos de los barros no es económica con las actuales tecnologías.

Se han desarrollado variables más efectivas del método de neutralización, que permiten la obtención de barros con mayor contenido de sólidos (10 – 30 %, contra 2% del método tradicional). Ellos requieren el uso de reactores y una mayor inversión de capital, pero incluso así resultan más económicos que otras alternativas, como las de extracción bioquímica.

Sistemas de Tratamiento Pasivo. La construcción de humedales artificiales procura reproducir los mecanismos naturales de precipitación y fijación de metales pesados, así como de neutralización de la acidez que actúan en esos ecosistemas. La actividad bacteriana anaeróbica juega un rol importante en ellos, a través de mecanismos como la disminución de la acidez a través de la reducción del sulfato a sulfuro y la capacidad de este último ion para precipitar sulfuros de los metales pesados. Por otra parte, la materia orgánica junto con la fracción arcillosa, favorece la adsorción de metales, colaborando a purificar las soluciones.

Comparados con los métodos activos, los humedales artificiales requieren una mayor superficie, pero usan materiales de menor coste (como desechos orgánicos) y demandan menos mantención y atención.

Normalmente operan conforme a una serie de unidades, que realizan distintos procesos:

- Lagunas anóxicas: reducen oxígeno y disminuyen acidez ($\text{SO}_4^{2-} - \text{S}^{2-}$).
- Intercepciones de drenaje anóxicas con caliza (reducen acidez y oxígeno).
- Celdas aeróbicas vegetales, que remueven Fe y Al como hidróxidos.
- Celdas anaeróbicas, ricas en materia orgánica. Pueden o no estar vegetadas. Convierten SO_4^{2-} en S^{2-} , que precipita metales pesados.
- Filtros de roca: sustrato para crecimiento de algas y bacterias Mn-oxidantes.

Entre los beneficios de este método están:

- Bajos costes de capital, operación y mantención.
- Las celdas anaeróbicas pueden utilizar desechos orgánicos problemáticos (por ej., vinazas, barros de aguas residuales, etc.).
- Pueden albergar especies silvestres.

Sus limitaciones y aspectos negativos comprenden:

- Requieren grandes extensiones de tierra.
- Están afectados por los cambios estacionales.
- Requieren años o décadas para alcanzar su régimen estable.
- No operan indefinidamente.
- Su impacto final en el contenido metálico local y en la cadena alimenticia regional es aún desconocido.
- Se pueden producir remociones de metal del humedal (wetland) al drenaje si las características y flujo de drenaje ácido exceden su capacidad.
- El material del humedal se puede convertir en

sí mismo en un residuo peligroso al fin de su vida útil (unos 25 años).

Considerando los aspectos recién reseñados, Mitchell sugiere que el uso de esta tecnología es más apropiado cuando se requieren tratamientos a largo plazo de soluciones que poseen bajas concentraciones de contaminantes.

Tratamiento Pasivo in situ. Consiste en distintos tipos de operaciones, como excavar en parte del acuífero contaminado, reemplazando el material por una mezcla reactiva permeable, que actúa como barrera química. Si ésta incluye carbono orgánico, puede contribuir a la acción anaeróbica sulfato-reductora. Mc Cartney et al (3: 577-582) proponen una variante denominada "atenuación natural", consistente en infiltrar efluentes líquidos a través de tuberías, para aprovechar reacciones químicas en la zona vadosa (vale decir, sobre el nivel freático del agua subterránea). El procedimiento se ha utilizado en Nevada (E.E.U.U.) para tratar efluentes líquidos neutros o ligeramente básicos de las pilas de lixiviación aurífera con cianuro. En condiciones de clima, hidrogeología y materiales de relleno favorables (limo-arcillosos, ricos en óxidos de Fe y materia orgánica) se han logrado disminuciones de 94 a 100 % en los contenidos de Al, Sb, As, Cd, Cr, Cu, Ni y CN de las soluciones.

Métodos Híbridos (Activos – Pasivos). Estos utilizan procesos biológicos para reducir acidez y remover metales del drenaje ácido. Sin embargo, lo hacen en reactores artificiales. Se clasifican en:

- **Rejillas Bacterianas:** Diferentes tipos de bacterias autótrofas (cianobacterias dominantes) implantadas en un substrato inorgánico remueven metales de la solución. El procedimiento parece ser viable y de bajo coste, así como adaptable a distintas composiciones de la solución (variando la asociación bacteriana).
- **Birreactores:** Se diseñan para simular condiciones propias de las distintas celdas de un humedal. Las bacterias desempeñan distintas funciones, como la reducción de sulfatos, la precipitación de sulfuros, etc. Esta aproximación

se encuentra aún en una etapa inicial de diseño.

Los rajos abiertos al término de su explotación, así como lagos o depresiones naturales, han sido frecuentemente utilizados para el tratamiento de soluciones ácidas o de efluentes básicos cianurados. De esta manera se pueden constituir, a su vez, en pasivos ambientales.

Vidalón y Della Porta (3: 543-551) describen el caso del lago Yanamate, en Cerro de Pasco, un distrito de gran complejidad geológica y mineralógica de Perú, que incluye cuerpos silicificados ricos en pirita, generadores de drenaje ácido. El lago Yanamate, que se encuentra en un área de calizas karsticas, recibió unos 95 millones de m³ de soluciones (D.A + efluentes de planta SX – EW) con pH 1.3. El cese de la explotación en 2003 ha permitido un leve aumento del pH (actualmente cercano a 2.0). Las soluciones acumuladas en el lago exceden por mucho los límites máximos aceptados para aguas de ríos en cuanto a As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn y otros metales.

Otro caso, ahora concerniente a soluciones básicas, es el de Mina Colomac (Chapman et al, 3: 553-564), 220 km al NE de Yellowknife, en los Northern Territories de Canadá, donde se han depositado 2 millones de m³ en un lago local. Las soluciones, procedentes de la Mina Colomac, contienen elevadas concentraciones de complejos cianurados, así como de sus productos de descomposición (thiosulfatos y amoníaco).

En Montana (Kleinmann y Booth: 9), el Distrito de Butte, antes famoso por su riqueza de Cu, Zn, Mn, Pb, Mo, Ag y Au, es ahora notorio por sus problemas ambientales, resultantes de 140 años de minería, concentración y fundición de minerales, así como de la naturaleza mineralógica del distrito, su clima y topografía. El lago Berkeley, que llena el antiguo rajo abierto central, la mayor acumulación de drenaje ácido del mundo, empezó a llenarse en 1983, al cesar el bombeo de las labores. En opinión de los expertos, el tratamiento de ese drenaje ácido representa una carga que debería ser asumida "por siempre".

5.2

Recuperación Económica de Metales del Drenaje Ácido.

La recuperación de metales del drenaje ácido, en particular la de cobre ha sido practicada con resultados prácticos. En el distrito minero de Andacollo (Región de Coquimbo, Chile), la actividad bacteriana favoreció la disolución de minerales de cobre en una red de antiguas labores inundadas. Ello fue aprovechado por los mineros en los 1980's para bombear las soluciones ricas en cobre, y precipitar el metal mediante cementación con chatarra de hierro. En algunos yacimientos de uranio se ha constatado un fuerte aumento en la concentración del agua que inunda las labores abandonadas. Junto con la necesidad de abatir esas concentraciones, ello ofrece la oportunidad de recuperar económicamente ese elemento (Michálek 3: 509-519).

Sin embargo, en general ha sido difícil desarrollar tecnologías económicas de recuperación de metales pesados de soluciones ácidas. Tanto el programa MEND en Canadá y el Resource Recovery Project en E.E.U.U., están trabajando en esta línea. Las tecnologías más promisorias son las de intercambio iónico selectivo y separación por membranas de emulsiones líquidas. El Berkeley Pit en Butte, Montana, ha sido utilizado como base para desarrollo de tecnologías y demostraciones en E.E.U.U., bajo el patrocinio del US Department of Energy. Se ha estimado que concentraciones de Cu sobre 100 mg/L (100 ppm) pueden ser económicamente recuperadas.

Capítulo 6

Cierre y Estabilización de Labores Mineras.

6.1

Cierre y Estabilización de Labores Mineras a Cielo Abierto.

Las explotaciones mineras a cielo abierto incluyen dos tipos principales: A) Las realizadas en la pared de un cerro, a la manera de una cantera y B) Los rajos abiertos (open pits) efectuadas mediante excavaciones en profundidad en el terreno.

Unas y otras requieren dos tipos de cuidado básico al cerrar la explotación (así como durante ella). El primero se refiere a la necesidad de proteger su acceso respecto a excursionistas que pudieran correr riesgos inadvertidos. Otra situación del mismo orden se refiere al acceso de pirquineros, respecto al cual no hay barreras físicas posibles y cuya actividad podría ser riesgosa para su propia seguridad, así como afectar la estabilidad ambiental del cierre. Por otra parte, el cierre perimetral debe impedir también el acceso de animales mayores, en particular de aquellos objeto de actividades pastoriles.

El segundo tipo de cuidado concierne a la estabilidad de las labores. En efecto, después de la explotación, los procesos de meteorización, facilitados por la fracturación incrementada de las rocas debido a la tronadura (= voladura de rocas), pueden hacer inestables los anteriores taludes. En consecuencia, ellos facilitan la ocurrencia de procesos de remoción en masa (deslizamientos, hundimientos rotacionales) así como una intensificación de la erosión. Aparte de su efecto ambiental, como el incremento de material particulado y la contaminación metálica del drenaje, ello también puede ser causa de fenómenos de mayor riesgo, como el brusco rebase de un rajo inundado (un pequeño lago), debido al deslizamiento en una de sus paredes.

En el caso de las explotaciones tipo cantera,

junto con corregir su talud y diseñar un buen sistema de drenaje, puede ser aconsejable vegetar sus paredes, con especies que efectivamente contribuyan a su estabilidad y sean autosustentables bajo las condiciones climáticas del sitio. La mejor manera de tener éxito en este aspecto es seleccionar las mejores opciones a través de pruebas durante la etapa de explotación de la mina, sometiendo a las plantas a las mismas condiciones en que se encontraran después del cierre, lo cual debería excluir el riego una vez "asentadas". Esto es especialmente importante en regiones áridas o semiáridas.

En cuanto a los rajos abiertos (= cortas), el régimen hidrológico y la hidrogeología local, junto con la litología y mineralogía, son factores claves a evaluar al considerar el cierre de la explotación minera. En regiones húmedas, ellos albergarán pequeños (o grandes) lagos, a menos que sean rellenados con desechos sólidos de la misma explotación. En condiciones de extrema aridez, pueden albergar cantidades menores de agua, si el rajo alcanza a interceptar un acuífero profundo o bien una falla que actúa como conducto de agua subterránea. Sin embargo, la evaporación impedirá una acumulación importante de agua. En algunos casos, como el Berkeley pit en Montana, antes mencionado (5.2), estos lagos son utilizados en el tratamiento remedial del drenaje ácido rico en metales.

En términos hidrológicos es importante considerar la posición del sitio minero en la respectiva cuenca hidrográfica. Si se encuentra en altura, en la cabecera de la cuenca, y ésta incluye ríos y lagos donde se realizan actividades humanas importantes (ciudades, agricultura, industrias, etc.) o si esos ríos y lagos poseen importancia ecológica (caso normal) o proveen recursos alimentarios (pesca, etc.) a la población nativa, la situación puede ser en extremo delicada. Desde luego, los mayores riesgos se referirán a los efectos del "lago artificial" en la calidad del agua subterránea y superficial, aunque también habría que considerar riesgos geotécnicos, si se constituye en una especie de embalse y sus paredes pueden sufrir desprendimientos.

Un artículo de Johnson y Carroll (3: 701-708) analiza de manera muy completa lo referente a las distintas situaciones posibles y los correspondientes problemas y soluciones, a la luz de los respectivos modelos hidrológicos y geoquímicos.

En términos hidrológicos, la ecuación general nos dice:

Almacenamiento = Entradas-Salidas (líquido+vapor)

Las entradas están constituidas por drenaje superficial, agua de lluvia y aguas subterráneas. Las salidas por agua subterránea, agua evaporada y, eventualmente, agua de rebase. Tanto el acceso como la salida de agua subterránea dependen del gradiente hidráulico local, y por lo tanto de la topografía, así como de la permeabilidad primaria y secundaria (red de fracturas) y de los niveles piezométricos, además, naturalmente, de las precipitaciones, régimen de derretimiento de nieve o hielo etc.

En condiciones áridas es posible que el nivel freático se encuentre tan profundo que la escasa infiltración producida desde el rajo (posibilitada por lluvias esporádicas) tenga pocas probabilidades de interactuar con él. Sin embargo, este tema requiere prudencia. Al respecto conviene recordar que las potentes zonas de oxidación y cementación de los yacimientos cupríferos del norte de Chile (un proceso natural de transporte vertical de cobre por drenaje ácido), se formaron en condiciones de clima semiárido a árido e implicaron interacciones con niveles freáticos profundos.

En cuanto al modelo geoquímico, éste implica considerar las reacciones entre las rocas (incluidos minerales primarios, de alteración hidrotermal y supergénica, minerales de mena y minerales de ganga), el agua (que contiene distintos iones en equilibrio) y el aire. Las numerosas y complejas reacciones posibles dan lugar a la solución (iónica, molecular o coloidal) de nuevas especies, así como a la precipitación y sedimentación de otras. Ello incluye procesos de

oxidación, reducción, hidrólisis, adsorción, etc., facilitados por la mayor fracturación de las paredes y el fondo del rajo, producto de los procesos de tronadura (= voladura de rocas). En consecuencia, el lago artificial se convierte en un complejo reactor, que puede contaminar seriamente el drenaje regional a través de sus aportes al agua subterránea.

Johnson y Carroll distinguen tres posibles escenarios, a los cuales se puede agregar un cuarto, consistente en el uso "permanente" del lago artificial para tratamiento del drenaje ácido generado (caso del Berkeley pit).

En un escenario se permite la formación del lago artificial así como el ingreso y salida de agua subterránea. En condiciones de aridez se genera un fuerte aumento de la concentración de solutos (por evaporación) así como de materiales precipitados, que pueden contribuir a sellar fracturas en el fondo. Desde luego, tal situación sólo es aceptable si no existen riesgos de contaminar aguas subterráneas que extiendan el problema más allá del sitio.

Un segundo escenario, denominado de "relleno optimizado" comprende el cubrimiento o inmersión de las rocas de la pared del rajo susceptibles de generar drenaje ácido. Aparte de ello, se procura sellar el fondo de la explotación para evitar descargar al drenaje subterráneo y se realizan procedimientos de tratamiento pasivo (adición de cal, caliza molida y materia orgánica) para mejorar la calidad del agua. También se recomienda considerar otras opciones de manejo, consistentes con las limitaciones del método y las condiciones prevalecientes a largo plazo.

Un tercer escenario implica el relleno completo del rajo (= corta), permitiendo que el agua subterránea fluya a través de él como un componente más del sistema hidrológico, lo que implica la disolución progresiva de parte de los materiales de relleno. En este caso no quedan paredes expuestas. Sin embargo, el agua infiltrada desde la superficie, que lleva oxígeno disuelto, puede permitir su oxidación. En consecuencia, se recomienda el agregado de

materiales alcalinos y orgánicos (por ej., residuos de tratamiento de aguas negras) para reducir la acidez y generar un ambiente reductor.

6.2

Cierre y Estabilización de Labores Mineras Subterráneas.

Las explotaciones mineras subterráneas necesitan estabilización y cierre especialmente cuidadosos (lo que en muchos casos es prácticamente imposible) por una serie de razones. Algunas de ellas fueron señaladas en el Capítulo 5, y se refieren al carácter de "reactores de gran superficie" que presentan las labores subterráneas con relación a la generación del drenaje ácido (y su transferencia al drenaje subterráneo). Desde luego, también las labores subterráneas cerradas, y especialmente ellas, deben ser protegidas del acceso de pirquineros, que se exponen a serios riesgos en su interior. Cuando la explotación minera ha sido realizada cerca de poblaciones humanas (y cuando se procura dar nuevos usos al sitio minero), es muy importante evitar los fenómenos de subsidencia. Por último, es importante señalar que en Chile, como en otros países que no han restaurado aún sus pasivos mineros, es frecuente encontrar cavidades verticales (piques) abiertas, sin señalización alguna de su presencia (por ej., en la periferia de ciudades o pueblos como Andacollo, La Higuera, etc.). Durante el cierre es necesario clausurar el acceso a las labores subterráneas, sean éstas verticales, horizontales o inclinadas y en lo posible rellenarlas. Si son inaccesibles, ello puede efectuarse mediante la inyección de material cementante a través de perforaciones. Aparte de sus efectos en el drenaje subterráneo (tanto en la modificación de su flujo y niveles piezométricos como en la calidad del agua), las labores subterráneas pueden ser causa de subsidencia. Ello es especialmente grave si las labores se sitúan cerca de poblados o ciudades, así como si se espera destinar el sitio cerrado a nuevos usos.

Un tipo especial de subsidencia, que ocurre durante la explotación del yacimiento, es la formación de grandes cráteres por efecto del

hundimiento en bloques (block caving), método utilizado en la minería subterránea de yacimientos porfíricos de cobre (como El Teniente, Río Blanco y El Salvador). Se trata de un efecto de gran magnitud y muy difícil de enfrentar y que facilita el ingreso de agua a las labores subterráneas, y por lo tanto, la generación de drenaje ácido.

Aparte del caso recién mencionado, son las explotaciones poco profundas las que implican mayores problemas de subsidencia. Conforme al Manual del ITGME (= IGME) (1), por lo general tienen menos de 50 m de profundidad y raramente más de 150 m. Desde luego, sus consecuencias dependen mucho de la litología y estructuras de las rocas, y el agua subterránea puede jugar también un rol importante en la desestabilización del sistema. No se debe olvidar el hecho de que los yacimientos metalíferos se sitúan en rocas hidrotermalmente alteradas y muy fracturadas, y que durante y después del cese de la explotación la alteración supergénica continúa debilitándolas. Entre los principales mecanismos físicos de deterioro y colapso de faenas, están el hinchamiento del piso, la trituración de los pilares y el hundimiento del techo.

En el caso de los piques o chimeneas abandonadas, el colapso de su cubierta rocosa puede dar lugar a la formación de grandes cráteres. No es el caso de las explotaciones tipo caserones y pilares, cuyos efectos suelen ser menores.

En la planificación del cierre es necesario conjugar tres aspectos, a saber:

- Análisis de la información disponible, más inspección visual si es posible, complementada con sondajes de reconocimiento.
- Elaboración y ejecución del programa de relleno y cementación.
- Control de la efectividad del programa ejecutado.

En el caso de los piques se acostumbra a utilizar una tapa en forma de pirámide o cono invertido, sobre la cual se rellena y cementa el espacio,

dejando una altura de relleno similar a la longitud del diámetro del pique. También se suele utilizar, en lugar de esa tapa, una losa de hormigón, situando igualmente el relleno sobre ella. En casos especiales, se utiliza un relleno cementado profundo del pique.

En el antiguo distrito de Portovelo, Ecuador, se encuentra la ciudad de Zaruma, cuyo casco urbano está amenazado por vacíos subterráneos, que implican peligros de subsidencia, así como por excavaciones abandonadas en su superficie. Un artículo de Blanco et al (10) describe los problemas de estabilidad de taludes y su frecuente asociación a peligros de subsidencia, lo cual agrava la situación. El mismo trabajo propone una zonificación preliminar del sitio, basada en criterios geomecánicos.

Un trabajo muy completo de restauración por cierre de una mina de carbón en la República Checa está descrito por Adamec et al (3: 237-246). El caso corresponde a una mina abierta ya en siglo XVI y que cerró en los '90. El objeto de las labores realizadas fue triple: a) Eliminar riesgos de acumulación de gas metano y de incendios. b) Eliminar riesgos de subsidencia. c) Proteger los recursos hidrogeológicos.

El trabajo realizado consistió en la inyección de un material fluido cementante, elaborado con relaves de la misma flotación del carbón, escorias de hornos, materiales de desechos de procesos metalúrgicos y agua de la mina. Dicha composición consideró las propiedades de la mezcla para mantener su fluidez alrededor de 90 minutos (tiempo requerido para alcanzar las labores más alejadas). Su tiempo de fraguado es unos 10 días. La resistencia de este relleno hidráulico alcanza a unos 2-12 MPa (rango que considera las facilidades o dificultades relativas para su depósito). El agua en exceso es filtrada y bombeada al exterior.

Entre las ventajas del método empleado, los autores citados destacan el uso de materiales cuya disposición externa representaría un problema ambiental. En general, este tipo de procedimientos tiene amplias aplicaciones,

sujeto naturalmente a una evaluación geomecánica y geoquímica de su comportamiento a largo plazo.

Capítulo 7

Aspectos Hidrológicos Superficiales y Subterráneos

7.1

Aspectos Hidrológicos de la Minería a Cielo Abierto. Factores Determinantes.

Como hemos señalado en el Capítulo 3, las características del sitio, junto con la magnitud, el diseño y el cuidado en la ejecución, son factores determinantes en el impacto de las labores mineras sobre el régimen hidrológico, y sus efectos en la erosión, sedimentación y contaminación del agua.

Entre las características del sitio, juegan un rol principal la geología, particularmente en sus aspectos litológicos y estructurales, la geomorfología y el clima. Al respecto, la geomorfología refleja la interacción de la geología y el clima, y se expresa en una topografía determinada. Por otra parte, la cubierta vegetal está en alto grado determinada por el clima y la altura. Otra relación importante es la existente entre la tectónica (que determina el ascenso o descenso de bloques geológicos), los procesos de remoción en masa y los agentes erosivos (en particular el agua, líquida o sólida). Mientras la tectónica tiende a crear grandes diferencias topográficas, la remoción en masa y la erosión actúan en la dirección opuesta, rebajando las cumbres y rellenando las depresiones.

De lo antes expuesto se deduce que existe un equilibrio entre las formas del relieve, su cubierta vegetal y el clima. Dicho equilibrio puede ser de un extremo dinamismo, como en las cadenas montañosas con fuerte régimen pluvial (Nueva Guinea, Andes de Colombia y Ecuador, etc.) o de una muy baja dinámica, como en algunos relieves del desierto del norte de Chile, donde prevalecen superficies de edad geológica terciaria.

Cuando se instala una operación minera de cierta envergadura, se produce una ruptura del equilibrio, al adaptarse las superficies a las necesidades de infraestructura requeridas por la minería, a lo que se agrega el desarrollo de cavidades o el arranque de minerales tipo cantera, producto de la minería a cielo abierto. Por otra parte, el drenaje mismo puede ser modificado para facilitar la operación, como en el caso de El Indio (Robledo y Meyer 3: 53-65) así como para depositar relaves y otros desechos sólidos aprovechando la topografía de quebradas o depresiones. Durante la operación de la explotación, la ingeniería se encarga de mantener las condiciones de equilibrio inestable instaladas (aunque no siempre con éxito, ver Capítulo 3). Sin embargo, después de su abandono, el drenaje buscará una nueva situación de equilibrio, mientras la ausencia de la cubierta vegetal original facilitará el proceso erosivo (y por consiguiente un incremento en la turbidez de las aguas, que probablemente estará acompañado de mayores concentraciones de hierro y otros metales pesados). De ahí la necesidad de que el cierre de las operaciones procure establecer un estado del drenaje próximo a un nuevo equilibrio, así como reducir al mínimo posible los efectos en la remoción en masa y la erosión. Naturalmente, dicha necesidad será tanto mayor cuanto más dinámico sea el régimen, y más delicada la posición de la explotación minera, por ejemplo en la cabecera de una cuenca fluvial.

7.2

Aspectos Hidrológicos de la Minería Subterránea: Factores Determinantes.

En esta materia son igualmente válidos los conceptos formulados en la sección anterior, con el agregado de la mayor importancia que cobra la geología y la mineralogía (primaria y secundaria) del sitio intervenido y de su entorno.

Un breve repaso de los principales conceptos hidrogeológicos puede ayudar a comprender mejor los contenidos de la presente sección. En primer término es importante considerar que, normalmente, el drenaje superficial y el subterráneo están estrechamente relacionados, y que el segundo tiende a seguir,

aproximadamente, las variaciones de la superficie topográfica. Parte del agua que cae o circula sobre la superficie se infiltra. Al principio atraviesa una zona donde no alcanza a saturar todos los poros o fracturas por las que pasa. Esa zona se denomina "zona vadosa" y en ella el agua es relativamente rica en aire disuelto, y por lo tanto, en oxígeno. Su límite inferior está dado por aquel nivel (variable en el tiempo) a partir del cual todos los poros y fracturas interconectados están saturados de agua, el cual se denomina "nivel freático". Si ese nivel está conectado libremente con la superficie, se dice que el cuerpo que almacena y conduce el agua es un "acuífero libre". El agua de un acuífero libre se desplaza siguiendo la Ley de D'Arcy, que señala que el flujo entre dos puntos del acuífero es directamente proporcional a la diferencia de altura del nivel freático y a su conductividad hidráulica e inversamente proporcional a la longitud del camino que debe recorrer. En general ese recorrido involucra trayectorias curvas, perpendiculares a las líneas de igual altura del nivel freático.

También puede ocurrir que un acuífero esté confinado entre dos formaciones geológicas impermeables. En tal caso la Ley de D'Arcy rige igualmente, pero la altura del acuífero (expresada, por ej., respecto al nivel del mar) debe ser reemplazada por su "altura piezométrica" que incluye la presión a la cual el agua se encuentra.

Según su aptitud para almacenar y transportar agua, los cuerpos de roca se clasifican en acuíferos (máxima conductividad hidráulica acuitardos (baja) y acuicludios (mínima o nula conductividad). Esa capacidad está dada por el volumen de huecos (poros, vesículas, fracturas) y por sus interconexiones. Así, una roca o sedimento puede tener un gran volumen de poros, y una buena capacidad para almacenar agua, pero una baja capacidad para conducirla. Ello ocurre, por ejemplo con los sedimentos de grano fino, como arcillas o limos (que se comportan como acuitardos).

La permeabilidad de las rocas se clasifica en primaria y secundaria. La primaria es propia de la granulometría de las rocas. Al igual que en el

caso de los sedimentos, las rocas sedimentarias de granulometría homogénea, formadas por clastos de tamaño arena o superior (gravas, etc.) tienen mayor permeabilidad primaria. También existe alta permeabilidad primaria en algunas rocas volcánicas, que presentan estructuras tipo tubos o túneles, con gran capacidad de flujo. La permeabilidad secundaria se debe a fracturas (diaclasas o fallas) y existe en todo tipo de rocas, aunque en grado distinto. También puede producirse por disolución de minerales. El caso más notable es el de las estructuras kársticas de disolución en rocas calizas, que dan lugar a la existencia de verdaderos ríos subterráneos.

Al abrirse labores subterráneas en áreas que presentan niveles freáticos de profundidad normal (algunos metros o decenas de metros bajo la superficie), la mina se convierte en un verdadero sistema de drenaje, que tiende a bajar el nivel freático local. Ello obliga a un permanente desagüe de las labores mediante bombas. Antes del desarrollo de las bombas a vapor en el siglo XIX, ello obligaba a detener las labores a cierta profundidad, por la imposibilidad de contrarrestar el acceso de agua a las labores. En el caso de la minería profunda del oro en Sudáfrica, el problema del agua en las labores ha obligado a mantener abiertas minas ya agotadas, para evitar que su inundación lleve al colapso de operaciones vecinas.

Finalmente, hay que visualizar todo macizo rocoso como una red de fracturas, con mayor o menor capacidad para conducir el agua, algunas de las cuales pueden aportar una alta conductividad, incluso a rocas carentes de permeabilidad primaria (como fallas principales en macizos de rocas graníticas).

El hecho de que las labores abandonadas pasen a constituir una especie de "acuífero kárstico", implica importantes riesgos geoquímicos, ya discutidos en el Capítulo 5. Por otra parte su relleno no impide que el agua circule través de ellas, aunque su régimen hidrogeológico pasará a ser el de un acuífero normal o el de un acuitardo, según las características y grado de cementación del relleno utilizado. Este tema será discutido en particular en la sección 7.4.

7.3

La Restitución de un Drenaje Superficial Estable.

Se entiende por erosión el transporte de sedimentos por efecto de un agente erosivo (el agua o el aire). En el caso de la erosión fluvial, se produce una interacción recíproca entre el efecto erosivo del agua, que excava su propio curso, y la forma excavada, que a su vez determina el curso del agua. Cuando ese curso no es definido y afecta de manera pareja a una superficie, se habla de erosión laminar.

La erosión hídrica puede afectar a rocas, sedimentos y suelos. Las rocas desde luego son más resistentes, salvo que sean solubles (como las calizas) o estén muy fracturadas o alteradas. Los sedimentos y los suelos se erosionan, en cambio, con facilidad, a menos que estén protegidos por una cubierta vegetal adecuada o presenten un grado de permeabilidad que facilite la infiltración, disminuyendo el escurrimiento superficial.

Dos factores desempeñan un control clave sobre la erosión hídrica, aparte de las características físicas del material expuesto. Ellos son el ángulo y longitud de los taludes por una parte, y la magnitud de las precipitaciones por otra. Respecto al segundo factor, es más importante su intensidad que su valor total, puesto que si es alta, no solamente aumenta la erosión sino que también se favorecen los procesos de remoción en masa (coladas en barro, deslizamientos y hundimientos rotacionales), los que pueden tener consecuencias muy graves.

Existe una serie de procedimientos para controlar los procesos erosivos durante la explotación así como con posterioridad al cierre de ella. Estos consisten principalmente en la construcción de canales y de barreras o diques.

Los canales tienen por objeto interceptar y conducir el drenaje de la manera más segura posible. Por una parte se construyen canales o trincheras paralelas a las curvas de nivel, de manera de interceptar el escurrimiento laminar

y conducirlo a canales de desagüe. Si se desea también facilitar la infiltración de parte del agua, su fondo se deja sin revestimiento. El diseño del curso y pendiente de los canales considera criterios hidráulicos, de manera de tener el mejor control de volúmenes y velocidades de flujo. Esta materia está tratada en detalle por el Manual del ITGME (= IGME) (1), que puede ser utilizado como guía de diseño. Los canales pueden ser revestidos con materiales vegetales, con grava o con hormigón.

El efecto de los canales se complementa con la construcción de barreras filtrantes, destinadas a interceptar los sedimentos gruesos, así como con piscinas de decantación, diseñadas para sedimentar materiales finos, disminuyendo así la turbidez del agua. Naturalmente, estas obras exigen una periódica y permanente limpieza y mantención.

El cierre de las faenas de Cía. Minera El Indio dio lugar a un interesante trabajo de restauración hidráulica, descrito por Robledo y Meyer (3: 53-65). El distrito de El Indio (Au, Cu, As) se sitúa en los Andes de la Región de Coquimbo, Chile, muy cerca de la divisoria de aguas que marca el límite con Argentina, en latitud aproximada 30° S y a unos 4.000 m de altitud. Su drenaje afecta al Río del Toro, afluente del Río Turbio, que a su vez es afluente del Río Elqui. En la cuenca del Río Elqui se sitúan tres ciudades principales y se desarrolla una importante actividad agrícola, en parte destinada a la exportación de frutas. Aparte de su posición geográfica y topográfica delicada, el Distrito es un importante generador de drenaje ácido (con Cu y Zn) y de contaminación arsenical.

Originalmente, el Río Malo, afluente del Río Toro, pasaba por el centro del Distrito, lo que fue modificado por los operadores originales (a fines de los '70) mediante canales y túneles de desviación del agua. El plan de cierre del Distrito incluyó el abandono de dicho sistema de conducción del agua, así como la restauración del drenaje original, mediante la construcción de un sistema de canales revestidos. En complemento, se construyó una piscina de decantación, y posteriormente se utilizó la capacidad excedente de un tranque de relaves,

con el objeto de decantar parte del arsénico transportado con el material en suspensión.

La restauración del Río Malo estableció los siguientes criterios:

- El sistema debería funcionar perfectamente en régimen normal.
- Los eventos extremos no deberían implicar daños serios al sistema.

El diseño realizado consideró aspectos como flujos máximos en función de la superficie del área drenada, relaciones amplitud / profundidad del canal basadas en criterios hidráulicos, diseño de sinuosidades tipo meandro para el manejo del flujo, diseño de perfiles y revestimiento del canal. Esto último utilizó criterios “naturales” así como de la artesanía tradicional andina (encaje “justo” de los bloques de piedra).

El resultado obtenido es estéticamente armónico y ha funcionado bien, aunque hasta ahora no ha sido sometido a eventos extremos. Consulta 4.8 km de canales construidos.

Otro caso de interés, referente a un ambiente geográfico y a un tipo de minería distinto, está descrito por van Renssen (3: 431-439). El caso concierne a una extensa explotación carbonífera, que incluyó tanto minería a cielo abierto (strip mining) sobre un área de 17 km², como labores subterráneas: la mina Rietspruit, Sudáfrica. La planificación del cierre se inició unos 10 años antes del cese de la explotación, lo que permitió planificarlo detenidamente, tanto en sus aspectos físico-ambientales como financieros. La restauración de la superficie implicó alrededor del 80 % del presupuesto total. Ella fue realizada en términos de obtener un óptimo manejo hidrológico, tanto superficial como subterráneo, utilizando un procedimiento de modelación computacional de la superficie final para optimizar dicho manejo. El hecho de que otras minas operaban en sectores vecinos, así como la necesidad de evaluar conjuntamente lo referente al drenaje superficial y subterráneo, llevó a buscar una solución que conjugara todos los factores respecto a este último. Dicha solución optó por un drenaje de las labores

subterráneas de la mina en cierre hacia otras minas en operación, decisión apoyada en un estudio del sistema de flujos de agua entre las diferentes minas del Distrito.

7.4

El Drenaje Post-Cierre de Labores Subterráneas.

Esta materia ha sido tratada extensamente en secciones anteriores de este capítulo (7.2) y de capítulos anteriores (4, 5 y 6). En consecuencia, sólo resumiremos aquí algunas consideraciones centrales, junto con una referencia al caso del distrito El Indio expuesto por Robledo y Meyer (op. cit.).

Dichas consideraciones centrales se refieren a:

- La integración de las labores subterráneas cerradas al sistema de drenaje del sitio, incluyendo las interacciones aguas subterráneas – aguas superficiales. Ello vale tanto para labores no – rellenas (que se comportan como un acuífero kárstico) como para aquellas rellenas y cementadas, cuyo comportamiento como acuífero o acuitardo dependerá de las características del relleno.
- Es imposible aislar completamente las labores subterráneas, porque todos los macizos rocosos están recorridos por redes de fracturas a diversas escalas. Ello implica que, si en el distrito existen condiciones favorables a la generación de drenaje ácido, no se podrá aislar a las labores subterráneas respecto a ese problema, que puede generar un deterioro progresivo de su estabilidad.
- En distritos en los que existen varias minas en operación que laboran bajo el nivel freático, el cierre de cualquiera de ellas puede afectar seriamente a las demás, por lo cual se debe considerar el sistema en su conjunto.

La contaminación del drenaje subterráneo afectará normalmente al drenaje superficial. Sin embargo, existe un riesgo aún mayor de que afecte a usuarios de aguas subterráneas, las que no están protegidas por los monitoreos de calidad que se realizan para las aguas superficiales.

En el caso del distrito de El Indio, se establecieron tres fuentes principales de drenaje ácido infiltrado hacia el drenaje subterráneo:

- Infiltración de aguas superficiales que atravesaban depósitos de desechos mineros sólidos.
- Infiltración desde la base de los rajos abiertos hacia zonas reactivas en las labores mineras subterráneas.
- Infiltración de aguas superficiales a través de los suelos reactivos del fondo del valle del Río Malo.

Aunque las fuentes de infiltración señaladas fueron consideradas entre las acciones del cierre, no se ha logrado aislar el sistema de labores subterráneas respecto al drenaje del Distrito. En consecuencia, las labores (que no fueron rellenadas) siguen recibiendo y entregando aguas ácidas, ricas en Cu y Zn (Galleguillos, 11), las que se integran a las aguas superficiales. Ello es natural, considerando el alto grado de fracturación y alteración de las rocas del Distrito, así como los elevados gradientes hidráulicos que implica su posición topográfica en un valle de alta pendiente, rodeado por elevadas montañas.

Capítulo 8

Manejo de Suelos Contaminados en Planes de Cierre Minero.

8.1

Contaminación Geoquímica – Mineralógica de Suelos.

La contaminación de suelos de antiguos distritos mineros es una temática ampliamente estudiada, en particular a través de los estudios ligados a trabajos de limpieza del programa "Superfondo" (Superfund) (Ley de 1981 sobre Responsabilidad Legal, Compensación y Reacción Ambiental Integral CERCLA) de E.E.U.U. El mismo programa ha estimulado el desarrollo de metodologías de tratamiento in situ (por ej., vitrificación) y de tratamiento externo de los suelos contaminados. El tema de la contaminación de suelos y su remediación

está tratado en detalle en la obra del ITGME (= IGME) (12) "Contaminación y Depuración de Suelos".

En el presente capítulo hemos dividido esta materia en dos secciones. Esta primera incluye tanto lo referente a los contenidos metálicos iniciales del yacimiento o distrito, como aquellos debidos a su posterior explotación minera y beneficio metalúrgico (no siempre fáciles de separar). La segunda sección considerará otros tipos de contaminación ligadas a la operación y a la presencia humana en el distrito. Ella incluye temas como la contaminación con hidrocarburos, desechos "domésticos", aguas residuales, residuos peligrosos y no peligrosos, etc.

En primer término es conveniente considerar que los yacimientos metalíferos están rodeados por aureolas de contenidos anormales en metales y aniones (por ej., sulfatos, arseniatos) de origen primario (contemporáneas a la formación del depósito) y secundario (dispersiones debidas a meteorización y erosión de rocas mineralizadas). Las segundas pueden ser muy extensas, dependiendo de la movilidad de los elementos involucrados y del grado de meteorización y erosión del yacimiento. En casos extremos pueden ser tan grandes y ricas como para formar yacimientos periféricos (por ej., caso del yacimiento Exótica o Mina Sur de Chuquicamata).

Es natural que la explotación y el beneficio de los minerales incrementen de modo importante esos contenidos, ya sea a través de los procesos de molienda, lixiviación, pirometalurgia, etc. Diversos criterios permiten estimar la contribución de la explotación minera-metalúrgica a los contenidos iniciales, entre ellos la comparación de los valores finales con los del Estudio de Línea de Base del proyecto o con los mapas geoquímicos elaborados durante la etapa de exploración del distrito. Sin embargo, normalmente el cierre asume responsabilidad sobre la eliminación de aquellos contenidos que impliquen riesgo para la salud humana o el ambiente, cualquiera sea su origen. En el caso del cierre de El Indio (ya tratado en capítulos anteriores), los suelos con alto

contenido de As y Sb fueron extraídos y enviados a un depósito de seguridad externo. Ello, después de no tener éxito un proceso de encapsulamiento con cemento que habría permitido su disposición en el sitio de la explotación (Araya, 13).

El tema del arsénico ha recibido una bien merecida atención por dos razones principales. La primera es su bien conocida toxicidad (es un veneno favorito de las novelas de misterio), aunque los principales casos de envenenamiento progresivo masivo con arsénico de origen ambiental (Bangladesh, China, México) no se asocian a actividades mineras. La segunda es su abundancia en minerales de mena principales (como enargita: sulfoarseniuro de cobre) o que los acompañan (arsenopirita). En consecuencia, se han diseñado varios procedimientos para enfrentar el problema, a través de su encapsulamiento, (por ej., en escorias silicatadas), o su incorporación a fases químicas de baja solubilidad (por ej., arseniato de Ca y Fe, análogo a la apatita o a escoradita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)). Esta materia está bien reseñada en un artículo de Mitchell (2: 258-281).

En el estudio de suelos contaminados por metales pesados, han tenido una importante aplicación las metodologías geoestadísticas, desarrolladas inicialmente para la evaluación de reservas metálicas de los yacimientos. También los estudios se han facilitado y hecho más completos gracias al desarrollo de metodologías analíticas instrumentales para multielementos, como ICP. Al respecto, van der Waals et al (3: 815-828) describen el uso de ambas metodologías en la preparación y control de planes de cierre.

Un aspecto complementario a considerar es el referente a la biodisponibilidad de los metales. En principio, puede ser razonable pensar que más que sus contenidos totales, interesa aquella fracción que por su forma químico-mineralógica puede ser efectivamente incorporada al metabolismo de los seres vivos. Por ejemplo, en el distrito de El Almadén, España, explotado desde la antigüedad como la mayor mina de mercurio del mundo, existe una extensa y elevada contaminación. Sin embargo, sólo una

pequeña fracción de ella es, efectivamente, biodisponible (Molina et al, 14). Respecto a este tema, Almendras et al (3: 859-866) presentan la comparación de dos metodologías para evaluar la biodisponibilidad de cobre, zinc, plomo y hierro, además de arsénico. La metodología BIOMET utiliza biosensores bacterianos, mientras la de carácter químico PBASE trabaja sobre la base de la distribución de los metales entre las fracciones solubles y no solubles en agua de los metales pesados. Los autores citados concluyen que ambas metodologías son útiles y complementarias para realizar esta evaluación.

El mismo tema es analizado también por Diacománlis et al (3: 191-198), que reportan cifras de biodisponibilidad de arsénico comprendidas entre 1.6 y 8.9% en suelos contaminados por faenas mineras en Australia. La forma más común en los desechos mineros es la pentavalente (arsenato), la cual presenta valores de biodisponibilidad inferiores a 5% (comparada con más de 5% para la trivalente). Sin embargo, los autores aconsejan utilizar por prudencia la cifra de 10%. Respecto al plomo, se midieron valores de 0.6 a 1.4%, recomendándose utilizar 2% para fines de evaluación de riesgos.

Sin embargo, reconociendo la importancia que reviste la biodisponibilidad, hay dos aspectos importantes a considerar. El primero se refiere a los cambios que se generan en la forma químico-mineralógica por efecto de reacciones químicas y actividad bioquímica, los que pueden hacer biodisponibles contenidos metálicos que hoy no lo son.

El ejemplo clásico al respecto es la catástrofe ambiental de Minamata, Japón, en los años '50, donde la actividad bacteriana del fondo de una bahía llevó el mercurio a una forma biodisponible (metil mercurio) produciendo un grave y progresivo envenenamiento de los pobladores del lugar.

Otra reserva concierne al riesgo de recibir los metales pesados a través de la respiración, por efecto de la erosión eólica de los suelos, lo que es muy factible en condiciones de clima árido y semiárido. En consecuencia, tanto en éste como

en otros aspectos sometidos a incertidumbre, es mejor adoptar el principio de "precaución" y procurar eliminar las fuentes de riesgo.

8.2

Otros Tipos de Contaminación de Suelos.

Durante la explotación de un yacimiento y del beneficio metalúrgico de sus minerales, existen variadas e importantes posibilidades de contaminación, que implican distintos niveles de riesgo. Desde luego, están las referentes al uso de combustibles, lubricantes y otros hidrocarburos, cuyo almacenamiento (filtraciones desde estakes), uso, recambio, etc., va generando variados grados de contaminación. A ello hay que agregar el depósito de residuos peligrosos y no peligrosos, el de desechos "domésticos" generados por los campamentos, el efecto de aguas residuales (que infiltradas en el punto A puede reaparecer formando una vertiente de B...) etc. Algunos de los desechos ocupan considerable volumen y son notablemente persistentes, como los neumáticos usados. Otros, mucho más peligrosos, pueden ocupar poco volumen, y pasar inadvertidos entre los grandes volúmenes de materiales banales.

Al respecto, la actual "minería responsable" (que requiere algo más que una certificación ISO – 14001) procura mantener un stock limitado y ordenado de tales contaminantes. Sin embargo, la política de "póngalo debajo de la alfombra" ha sido y continúa siendo utilizada (y los acopios de estéril pueden ser una atractiva alfombra). En consecuencia, ésta es una de las tareas más complejas y que demandan más laboriosidad y paciencia de un programa de cierre.

Por otra parte, ciertos contaminantes tienden a ser sobreestimados en sus efectos nocivos, probablemente complicando y encareciendo innecesariamente las tareas. Al respecto si uno menciona "una contaminación de varios m de ancho y más de 100 km de largo formada por una capa de hidrocarburos pesados" las personas tienden a imaginar una catástrofe ambiental. En cambio, si se les habla de un camino asfaltado de igual longitud (vale decir lo

mismo) nadie evoca tal catástrofe...

El tema de los hidrocarburos en suelos del desierto del norte de Chile, producto de la operación y mantención de maquinaria, fue considerado por Godoy-Faúndez et al (3: 407-411), quienes proponen un método de bio remediación para tratar los materiales contaminados (suelos y aserrín usado en su recolección). El método propuesto consigue un 35 a 60% de remoción al cabo de 42 días de continuo tratamiento.

Una solución tentadora para deshacerse de materiales molestos durante la operación minera o al enfrentar su cierre es licitarlos a bajo o cero coste. Sin embargo, si ello se realiza sin una efectiva consideración y aseguramiento del destino de esos materiales, puede causar mucho más daño que si simplemente se los dispusiera en el sitio de la explotación. Hace algunos años, un memorista (= tesinando) genuinamente preocupado por el tema ambiental y cuya memoria se relacionaba con el manejo de este tema en una gran empresa minera, decidió seguir la pista de las baterías usadas licitadas. Su descubrimiento de que ellas terminaban desparramadas sobre un sitio eriazado de Santiago, generando una efectiva y peligrosa contaminación por plomo, fue recompensado con el reproche de su supervisor en la empresa, quien no deseaba recibir noticias molestas.

En suma, éste es un tema complicado, que requiere un manejo especialmente responsable por parte de la empresa, así como un inteligente y honesto análisis de riesgos, tanto por parte de la empresa como de las autoridades reguladoras. Es necesario centrarse en lo que de veras importa y hacerlo bien, aunque otras cosas sean más decorativas y se presten más al lucimiento (incluyendo publicaciones científicas...). Desde luego ello implica aceptar algunas imperfecciones, porque siempre los medios humanos y materiales serán limitados.

Capítulo 9

Estabilización y Protección de Desechos Minero-Metalúrgicos.

9.1

Principales Tipos de Desechos Sólidos Minero-Metalúrgicos.

Como señalan Fourie y Tibbett (3: 3-12) la restauración, y en particular la cubierta de protección de los desechos sólidos mineros, representan uno de los mayores desafíos en materia de diseño y costes de un cierre minero, por lo que demandan especial atención. Estos desechos sólidos pueden ser agrupados en tres grupos principales: depósitos de relaves, pilas de lixiviación (heap leaching) y botaderos de estériles (= escombreras). Como veremos a continuación existen variaciones importantes al interior de los dos primeros grupos, tanto en materia de composición como del proceso físico de depósito.

Los depósitos de relaves constituyen el desecho de un proceso de flotación, precedido por una molienda fina del material a tratar. Aunque la mayoría de los depósitos corresponden al tratamiento de minerales sulfurados, los hay también de la minería no metálica (concentración de bauxita), de la flotación del carbón, etc.

En el caso de los minerales sulfurados, el relave está constituido por agua, restos de la roca encajadora de la mineralización, minerales de ganga (carbonatos, sulfatos, etc.) y pirita (más otros sulfuros de nulo valor económico), que han sido "deprimidos" para evitar que rebajen la ley del concentrado. Además, contienen restos de las sustancias orgánicas e inorgánicas utilizadas para el manejo del pH y de las propiedades de superficie ("surfactantes") de los minerales, que permiten controlar el proceso de flotación. Inicialmente, los relaves de flotación de sulfuros presentan un pH básico, debido a los requerimientos del proceso. Sin embargo, su evolución posterior, dependiente del porcentaje de pirita y otros sulfuros incluidos, puede determinar que evolucionen a condiciones de menor pH, lo que implica el riesgo de generación

del drenaje ácido. Por otra parte, el molibdeno contenido en el agua del relave es soluble en condiciones básicas oxidantes, por lo cual puede ser un contaminante importante en percolados de relaves "frescos".

Los depósitos de relaves se presentan generalmente en embalses o "tranques" construidos en depresiones o en quebradas, y contenidos por un muro de material sólido o bien por la fracción más gruesa, que sedimenta en esa zona (con o sin la ayuda de ciclonado), mientras la fracción fina acompaña al "sobrenadante", formando un pequeño lago donde sedimenta. Se forma así un depósito cuya granulometría varía en la horizontal (entre arena y limo fino), que en un corte vertical presenta el aspecto típico de un sedimento lacustre finamente estratificado. Sin embargo, esta situación puede alterarse en el caso de los relaves "en pasta", que poseen la consistencia de un mortero, debido a la extracción del agua por un proceso avanzado de centrifugación y que, por lo tanto, pueden disponerse libremente sobre la superficie del terreno.

Aparte de los riesgos de percolación de soluciones contaminantes, los depósitos de relaves pueden ser muy inestables frente al efecto de ondas sísmicas, como se manifestó en el flujo de los relaves de la mina El Soldado (Región de Valparaíso), que arrasaron el pueblo de El Cobre, causando más de 400 muertes en 1965 (Aliste, et al 15). Otro riesgo importante en el caso de zonas áridas o semiáridas, se refiere a su erosión eólica. Aparte del efecto que ello tiene en términos del incremento de partículas respirables en el aire, algunos de los minerales presentes en el relave pueden tener efectos particularmente negativos. Es el caso, por ejemplo, de las fibras de asbesto derivadas de la alteración de actinolita, mineral presente en muchos relaves de la faja de Fe-Cu-Au de la cordillera de la Costa del norte de Chile.

Finalmente, la posición de muchos depósitos de relaves al interior de quebradas o en la planicie aluvial de los ríos, implica riesgos importantes de erosión hídrica, y, por lo tanto, de contaminación de los cursos fluviales y canales de regadío.

Las pilas de lixiviación de minerales corresponden a dos tipos: a) pilas de lixiviación alcalina cianurada para extracción de oro y b) pilas de lixiviación ácida para lixiviación de minerales de cobre. También en este caso hay distintas modalidades de operación, y se distingue entre pilas estáticas, que se mantienen y desarrollan en el mismo sitio, y pilas dinámicas, cuyos materiales “agotados” son retirados y dispuestos en otro sitio.

Tanto en el caso de las pilas alcalinas como de las ácidas, el material es sometido a tratamiento previo, que puede incluir molienda, aglomeración y “curado” con ácido (en el caso de la lixiviación ácida). Sin embargo, en casos especiales (minerales de baja ley que no resisten los costes de la preparación), el mineral puede ser puesto a lixiviar después de una molienda previa gruesa. En el caso de la lixiviación de minerales de cobre, éstos pueden estar constituidos por sulfuros ricos (principalmente calcosina Cu_2S), oxidados (sulfatos, carbonatos, silicatos, etc.) o mezclas de sulfuros y oxidados. Aunque la acción bacteriana genera ácido sulfúrico por oxidación de sulfuros, en los tres casos se utiliza una solución lixivante que contiene ese ácido.

Aunque el fondo de la pila de lixiviación se prepara cuidadosamente y está protegido por geomembranas, necesarias para colectar los metales lixiviados (sean Cu o Au), es normal que existan ciertas pérdidas, que tienden a aumentar cuando los materiales envejecen o son sometidos a estrés (por ej., sísmico). Por lo tanto es necesario adoptar medidas de protección durante y después de su uso.

Respecto a posibles fugas, las pilas de cianuración despiertan especial recelo en la población local y fueron seguramente la principal causa del rechazo al proyecto de Meridian Gold en Esquel, Argentina. Ello es normal, considerando que el cianuro es un veneno tan conocido como el arsénico, aunque tiene la ventaja de ser un compuesto de relativamente fácil degradación a formas químicas inofensivas.

Como los depósitos de relaves, las pilas de

lixiviación deben ser protegidas tanto de pérdidas por percolación como de la erosión eólica, materias que serán consideradas en las siguientes secciones.

Finalmente, los botaderos de estériles (o minerales de ley subeconómica acumulados considerando posibles cambios de precios o tecnologías), ofrecen la ventaja de su mayor estabilidad física, producto de su granulometría de bloques. Ello los protege de la erosión y de las vibraciones sísmicas, aunque al mismo tiempo los hace más vulnerables a la infiltración de agua, constituyendo posibles fuentes de drenaje ácido, si su litología y mineralogía así lo determinan.

9.2

Factores a Considerar en el Diseño de Cubiertas Protectoras.

Se entiende que la base de los depósitos de desechos sólidos de la actividad minero-metalúrgica debe ser preparada (ojalá para resistir el paso del tiempo y de los sismos) al inicio de su construcción. En consecuencia, si no hay muestras de fallas en ese aspecto, corresponde al plan de cierre preocuparse de rectificar sus taludes e instalar una cubierta que los proteja de la infiltración de agua y de la erosión eólica. En cuanto a la erosión hídrica, corresponde también al plan de cierre prevenirla (ver Capítulo 7), entendiéndose eso sí que el diseño original tuvo el buen criterio de no situar los depósitos de desechos sólidos cerca del paso de posibles torrentes o cursos fluviales.

En la presente sección hay dos materias importantes a considerar, las que por otra parte están bastante ligadas entre sí. Ellas corresponden respectivamente a las condiciones climáticas del sitio y a los factores generales a considerar en el diseño y la composición de la cubierta.

En condiciones áridas o semiáridas, la infiltración de agua representará un problema menor. En cambio, la cubierta debe ser lo

suficientemente estable para proteger el depósito de la erosión eólica, favorecida por la falta de humedad y vegetación.

Lacy y Barnes (3: 767-775) analizaron el cierre de depósitos de relaves en las regiones áridas de Australia Occidental. Los autores recomiendan aprovechar la etapa de explotación del yacimiento para probar distintas soluciones y variables, junto con una clara comprensión inicial (pre-explotación) de las propiedades mineralógicas y geoquímicas del material que integrará los relaves. Por otra parte, es importante responder a una serie de interrogantes que incluyen los objetivos del cierre, el uso final del sitio en restauración y las expectativas de las partes interesadas. En materias científico-técnicas, interesan en particular las variables climáticas cuantía y distribución de las precipitaciones, y potencial de evaporación, drenaje superficial y subterráneo, potencial de drenaje ácido del material de los relaves, presencia de metales pesados tóxicos y materiales disponibles para la construcción de la cubierta.

La selección de la vegetación a utilizar se realiza principalmente a través de métodos empíricos. En el área considerada por Lacy y Barnes las precipitaciones son inferiores a 300 mm (similares a las de Chile central) y se distribuyen esporádicamente en el año; la elevación es de unos 500 m. Las temperaturas fluctúan en verano entre 23° y 38° C y en invierno entre 7° y 20° C y la topografía es suavemente ondulada. Las pruebas de selección de vegetación utilizaron cubiertas de material de 100 a 250 mm, y se dejaron áreas sin cubrir como control. También se utilizaron barreras para proteger el sitio de animales. Las pruebas incluyeron, además, un tratamiento físico y químico, para evaluar la influencia de la textura y composición (nitrógeno, fósforo, potasio, etc.) en el comportamiento de las plantas a lo largo de un período de 5 años, con controles bianuales. Estas pruebas fueron seguidas por una segunda serie en sitios más complejos. Las conclusiones finales mostraron la importante influencia del material de la cubierta, especialmente en términos del control de la capilaridad.

Aunque se utilizaron especies de plantas nativas propias de la región semiárida, algunas muy

resistentes a la salinidad (halófitas), ese factor, así como el efecto de años secos, se mostraron como los problemas principales, siendo necesario proveer externamente la humedad para asegurar su supervivencia.

Otra experiencia de cierre, que incluye tanto protección de relaves como botaderos en ambiente árido, ha sido descrita por O'Kane et al (3: 709-722) para la mina Bajo de la Alumbrera, Catamarca, Argentina. En el caso descrito, el mayor desafío consiste en evitar la contaminación del Río Vis Vis a través del drenaje superficial o subterráneo del sitio, que será cubierto por 500 ha de botaderos y 900 ha de relaves. Las precipitaciones en la zona alcanzan unos 160 mm anuales, de los cuales la mitad puede ser depositada en un solo mes (Enero – asociada al Invierno Altiplánico). El potencial de evaporación alcanza unos 1.400 mm.

La estrategia de la empresa (Minera Alumbrera) consulta el cierre progresivo de los depósitos a lo largo de la explotación del yacimiento. Se han evaluado varios tipos de recubrimientos, considerando también modelaciones de su comportamiento: relaves con cubierta de 0.5 m de material molido no-reactivo de la mina, botaderos con 1.5 m de material de desecho "benigno". Después de tres años de monitoreo, los diferentes materiales utilizados han mostrado su capacidad para mantener una mínima percolación, en acuerdo con las predicciones del modelo calibrado. Al respecto, es obvio que la favorable relación entre las bajas precipitaciones anuales y el alto potencial de evaporación han colaborado con el efecto de las cubiertas. En el caso de los relaves no cubiertos, se estima que la percolación no pasará de un 1.5% de la precipitación total en el período modelado de 10 años.

Considerando la información entregada por el trabajo reseñado, se puede estimar que en casos como el descrito los riesgos mayores se asocian a la erosión eólica de los relaves no cubiertos, así como al eventual efecto erosivo hídrico de precipitaciones intensas (lo que puede ser manejado a través del diseño del drenaje superficial).

Una situación opuesta se registra en regiones lluviosas como en el sitio de Pierina, explotación aurífera a cielo abierto de Barrick en el Departamento de Ancash, Perú (Zhan et al; 3: 633-644), ubicada entre 3.800 y 4.200 m de altitud. La precipitación anual del sitio llega a unos 1.200 mm, contra 1.060 mm de evaporación potencial, y en su mayor parte cae entre los meses de Octubre y Abril, asociada a tormentas.

La explotación, que incluye el beneficio de la mena mediante pilas de lixiviación cianurada, se inició en 1998, y de inmediato se consideró su futuro cierre, el que comprende cubiertas protectoras para los depósitos de estéril y las pilas de lixiviación agotadas. La cobertura diseñada incluye una capa de baja permeabilidad (arcilla/limo), sobre la cual se dispone una cubierta de suelo vegetada con propiedades evapo-transpirativas. El material de cubierta arcillo-limoso se dispuso en los ensayos con grados de compactación distintos (compactado a 35 cm, no compactado 55 cm) y sobre él se situó un suelo de 30 cm. Esto, sobre una pendiente de la pila 2.5:1. También se colocaron dispositivos de drenaje, a intervalos regulares en la capa de suelo, los que se mostraron muy efectivos para reducir la infiltración. Las pruebas realizadas demostraron que la infiltración se redujo a un 6-15 % del agua precipitada y que la capa no compactada de arcilla/limo presenta una mayor capacidad de reducir la infiltración que aquella compactada. Aunque la vegetación implantada no afectó significativamente la infiltración, sí contribuyó a disminuir la velocidad de escorrentía y la erosión.

Las experiencias también mostraron que áreas planas facilitan el encharcamiento del agua, y por lo tanto la infiltración, por lo cual el diseño debe evitarlas en condiciones de clima húmedo. Respecto al contenido de oxígeno del agua infiltrada, sólo se observó una ligera disminución por efecto de la capa arcillo-limosa.

El uso de material de cubierta constituido por "pasta de roca" (roca molida mezclada con material de relaves) en la protección de depósitos de relaves fue evaluada en el sitio de

Copper Cliff en Notario, Canadá (Miskolczi y Wilson 3: 689-700) durante un año (2001). Los resultados obtenidos fueron positivos respecto a la capacidad de una cubierta de 600 o más mm de espesor para actuar como una barrera efectiva contra la infiltración de agua, la cual puede ser aún mejorada, agregando 1.5% de bentonita. Al contrario de los resultados reportados por Zhan et al (op. cit.) para Pierina, en este caso la compactación jugó un rol positivo en la reducción de la infiltración. (Nota: en principio, se debería esperar que la compactación siempre implicará mayor impermeabilidad. Sin embargo, es posible que en algunos casos genere estructuras secundarias verticales que produzcan un resultado opuesto).

El uso de materiales geotécnicos (geomembranas) en conjunto con aserrín, para proteger "relaves" derivados del tratamiento de purificación de bauxita, fue descrito por Worthington et al (3: 655-664). En este caso la protección se refiere al efecto de la erosión hídrica durante lluvias intensas en Collie, Australia. Aunque la vegetación podría cumplir también ese rol, ella puede ser inestable bajo pendientes fuertes como la de los relaves considerados (2.25:1). Por otra parte, esas superficies son muy vulnerables a la erosión en el período entre su construcción y el establecimiento de la vegetación. El método utilizado demostró una muy buena protección contra la erosión, pero implicó un pobre crecimiento vegetacional sobre el depósito. Al respecto, los autores señalan que, aunque la vegetación es el mejor control de la erosión (intercepta la lluvia, disipa la energía del escurrimiento, atrapa sedimentos, es permanente (si el clima es adecuado) y sus raíces afirman el suelo, al mismo tiempo facilita la infiltración del agua (lo que puede tener efectos negativos en términos de contaminación).

Finalmente, dos trabajos presentan una perspectiva general sobre los problemas e incertidumbres que implica esta materia, en particular cuando se trata de evaluar efectos a largo plazo.

Weeks y Wilson (3: 683-688) sostienen que aunque la importancia de cubrir los depósitos de desechos sólidos mineros está bien establecida, las metodologías de predicción de su comportamiento están aún en evolución. En particular, aspectos como la orientación de las pendientes y su efecto en la evaporación no son considerados por los modelos y pueden tener efectos serios en su comportamiento. Por su parte, Fourie y Tibbett (3: 3-12) analizan lo referente al comportamiento a largo plazo de las cubiertas. Ellos afectan a sus propiedades hidráulicas, en particular las de cubiertas destinadas a actuar como barreras, siendo la actividad de los procesos pedogénicos una causa principal del daño.

En relación con el tema del comportamiento a largo plazo de las cubiertas es importante definir qué se entiende por tal ¿décadas? ¿siglos?. Es evidente que ni los ejecutores del cierre ni las autoridades que lo aprobaron deberán responder cuando tal plazo se cumpla. Pero esa es una razón más para actuar con la mayor responsabilidad posible, porque al fin y al cabo se trata de un legado al futuro...

9.3

Estabilización y Protección de Depósitos de Relaves.

En esta sección consideraremos algunos aspectos específicos de la estructura, riesgos y protección de los depósitos de relaves. El Manual del ITGME (= IGME) (1) presenta en sus páginas 45 a 57 un completo resumen de los métodos de construcción de las presas o tranques de relaves o "residuos". Entre los principales factores a considerar en su ubicación y diseño, señala:

A) Factores locales:

- a) Geología; b) Sismicidad; c) Topografía;
- d) Red de drenaje; e) Hidrogeología; f) Clima.

B) Características de los lodos:

- a) Granulometría; b) Contenido de arcilla;
- c) Mineralogía y química;
- d) Método de vertido; e) Densidad;
- f) Lixiviabilidad.

C) Características de los efluentes:

- a) pH; b) Cationes metálicos;
- c) Potencial redox; d) Toxicidad; e) Volumen;
- f) Necesidad de evaporación.

D) Limitaciones ambientales:

- a) Calidad del aire; b) Calidad de aguas superficiales y subterráneas;
- c) Requerimientos de restauración;
- d) Drenaje superficial.

El tema de la sismicidad debe ser considerado con especial seriedad en los países andinos, especialmente si existen poblaciones en la posible ruta de los lodos, o si hay recursos importantes que el flujo de lodos pueda contaminar aguas abajo. Al respecto, la vibración sísmica eleva las presiones de poro, y el agua que actúa como adhesivo tipo van der Waals entre las partículas finas, se separa (efecto tixotrópico) con el resultado de que el sólido fluye como un líquido denso. Troncoso y Garcés (3: 31-41) señalan que la resistencia a la cizalla, la resistencia cíclica y la rigidez del material del relave aumentan con el paso del tiempo, favoreciendo su resistencia a eventos sísmicos. Sin embargo, en el caso del flujo de los relaves de la mina El Soldado (ver 9.1) tanto los relaves jóvenes como el relave "viejo" fallaron, causando una catástrofe en pérdida de vidas humanas. Por otra parte, no fue el único sitio afectado por fallas de depósitos de relaves, pero era el único que tenía cerca, pendiente abajo, un poblado, El Cobre, que ya existía cuando se inició el depósito de los relaves. En consecuencia, es mejor suponer que los relaves efectivamente fallarán y disponerlos donde no impliquen peligros importantes si ello ocurre. Un ejemplo importante de falla de un embalse de relaves producto de un error geotécnico en su fundación y sin intervención de actividad sísmica, ocurrió en Aznalcóllar, Sevilla, España (de Vallejo et al, 16), afectando a un afluente del río Guadalquivir y al Parque Nacional de Doñana. La ruptura del embalse de 28 m de altura, perteneciente a la empresa minera Boliden-Aprisa, se debió a un deslizamiento de muy bajo ángulo producido en margas azules de su fundación, sometidas a alta presión intersticial de agua. Por efecto del derrame se produjo una fuerte y extendida contaminación con metales pesados a lo largo

del río, que requirió una larga y prolija limpieza para mitigar sus efectos. Ello ilustra la importancia de realizar estudios geotécnicos serios al decidir la fundación de estas estructuras.

El Manual del ITGME (= IGME) distingue cuatro tipos de métodos de construcción de presas de residuos, a saber:

A) Presa convencional "de escollera". Implica la construcción de un dique inicial de material rocoso y finos para impermeabilizarlo. Su resistencia sísmica y capacidad para almacenar agua son buenas, pero su coste es alto.

B) Construcción "aguas arriba". Es el método más utilizado. Construido un dique inicial, se van levantando sucesivos diques más altos hacia el interior de la presa, formados con los materiales más gruesos, arenosos, del lodo, ya sea decantados naturalmente o mediante ciclonado. Es el sistema más económico, pero su capacidad para resistir sismos es mala, al igual que su capacidad para almacenar agua.

C) Construcción "aguas abajo". Como su nombre lo indica su modo de construcción es el inverso del anterior. Es más seguro para almacenar residuos, y se asemeja a las presas de tierra convencionales. Parte de un dique inicial construido con materiales naturales y puede incluir núcleos impermeables y elementos de drenaje para control del nivel freático y filtraciones. Su capacidad para almacenar agua y su resistencia sísmica son buenas, pero implica un alto coste de construcción.

D) Construcción "centrada". Combina los dos métodos anteriores. Su estabilidad sísmica es intermedia, al igual que su capacidad de almacenamiento de agua y su coste relativo.

Otro modo de construcción es el de "descarga espesada", con una concentración de sólidos de 55 – 65%, los que se descargan en un solo punto, de manera que el depósito adopta forma cónica. Aunque no requiere la construcción de una presa, se debe instalar un sistema de recolección, represado y decantación del efluente líquido. Es muy inestable frente a eventos sísmicos.

Al cerrar un depósito de relaves es conveniente remodelar su topografía, con el objeto de reducir

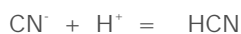
las tensiones en la base del dique. Esto se puede hacer descargando parcialmente el material de coronación, que puede ser usado como refuerzo al pie del depósito, sobre una capa de material filtrante. Puesto que frente a la erosión eólica el material ofrece escasa resistencia, es necesario cubrirlo, y en lo posible vegetarlo (tema de la sección anterior).

Finalmente, Williams (3; 533-542) analiza las distintas estrategias propuestas para reducir la infiltración de líquidos percolados desde depósitos de relaves durante las etapas de operación y de post-cierre. El hecho de que sean cubiertos (para prevenir otros problemas, ya discutidos en 9.2) implica que se impide la pérdida de líquido por evaporación. Mientras parte del agua permanece retenida en el material del relave, otra es recogida en su base y evaporada en una laguna de decantación. Para impedir que parte del agua escape bajo la base o por las paredes del depósito, conviene que el relave sea depositado tan seco como sea posible, y permitir la evaporación durante el proceso de depositación. También es importante asegurarse de que la zona vadosa bajo el relave permanece insaturada. Respecto al tema de la erosión, Williams sostiene que en regiones áridas o semi áridas como las de Australia, la vegetación natural es incapaz de proteger el relave y que se requiere de una estructura protectora de soporte para los arbustos implantados.

9.4

Estabilización y Protección de Pilas de Lixiviación y Botaderos.

Como ya hemos señalado, el riesgo de contaminación con cianuro desde pilas de lixiviación alcalina de oro, constituye un tema de mucha importancia real, el que además se magnifica en la percepción de la opinión pública. El cianuro es un conocido veneno y su forma ácida (HCN) se utiliza en E.E.U.U. para ajusticiar a los condenados a muerte en la cámara de gases. Si baja el pH de la solución cianurada, se forma el gas HCN:



En consecuencia, no es de extrañar la desconfianza con que las comunidades cercanas a una explotación activa o cerrada ven este tema (por ej., caso Meridian Gold, en Esquel, Argentina, ya antes mencionado).

Sin embargo, a diferencia del As, que es un elemento químico, el cianuro está formado por la combinación de dos elementos inofensivos, tiende a descomponerse naturalmente en condiciones favorables y la velocidad de tal descomposición puede ser acelerada mediante varios procesos. Por otra parte, mientras As se acumula en el organismo, el cianuro no es acumulativo, lo cual es otro punto a su favor.

Mitchell (2: 270-273) presenta una completa revisión de las alternativas de tratamiento del cianuro, no todas las cuales se prestan para su degradación en las pilas, pero sí para el de sus percolados. Dichas alternativas incluyen:

- Degradación natural
- Bio-Tratamiento
- Proceso con peróxido
- Humedales artificiales
- Proceso SO₂/aire de INCO
- Intercambio iónico
- Método Cyanisorb
- Precipitación de CN-libre
- Cloración alcalina.

El hecho de que el cianuro sea utilizado para lixiviar el oro, responde a su capacidad para formar complejos solubles con muchos metales pesados (Zn, Cd, Hg, Fe, etc.). El oro, que requiere un elevado ambiente oxidante para disolverse como Au⁺, al formar complejos puede hacerlo en condiciones oxidantes moderadas, lo que permite su disolución en forma de complejo cianurado. Los complejos cianurados se encuentran en equilibrio con otras formas químicas, de modo que si el pH disminuye se forma naturalmente HCN, reacción catalizada por la luz ultravioleta. Sin embargo, este proceso no es satisfactorio debido a su lentitud (especialmente si no hay tiempo suficiente para exposición a la luz uv) y a su difícil control.

El proceso con peróxido de hidrógeno (“agua oxigenada”) destruye directamente el CN⁻, sin formación de compuestos intermedios, de modo que da lugar a la formación de amoníaco y carbonato.

El proceso SO₂/aire de INCO, que usa cobre como catalizador, sirve para oxidar cianuros metálicos a cianatos, con la formación de cianuro de Fe insoluble y de sales estables de ferrocianuro. Su empleo requiere que el material lixiviado sea tratado antes de su disposición.

La cloración alcalina es el método más antiguo y el más conocido. La aplicación de cloro oxida el cianuro pero da lugar a la formación de compuestos intermedios (como cloroaminas) que deben ser tratados, junto con el exceso de cloro, antes de disponer el material. La tendencia actual es la de preferir otros métodos de oxidación.

El biotratamiento, como se practicó con éxito en la mina Mc Laughlin de Homestake desde 1983, utiliza *Pseudomonas*, en asociación con nitrificación bacteriana de amoníaco y adsorción/precipitación de metales libres en biofilms.

Humedales (wetlands) artificiales podrían ser utilizados para degradar efluentes líquidos con cianuro, pero no se conocía con exactitud (al año 2000) ni su efectividad ni el mecanismo de degradación involucrado.

Intercambio iónico. Puede ser utilizado para extraer cianuro de efluentes líquidos. Las resinas son luego limpiadas acidulándolas para llevar el CN⁻ a HCN, que a su vez es neutralizado con Na₂CO₃ o NaOH (método Cyanisorb).

Precipitación de cianuro libre, utilizando Fe, para inmovilizarlo como cianuro de Fe. Es un método sencillo para remover CN⁻ de efluentes líquidos. Sin embargo, a largo término el cianuro de Fe puede liberar cianuro nuevamente, lo que debe ser considerado.

Ninguna de las tecnologías reseñadas resuelve

todas las posibles necesidades. Por el contrario, hay situaciones en que se requiere combinarlas como es justamente el caso del tratamiento de pilas de lixiviación y de sus efluentes líquidos. En consecuencia se recomienda seleccionarlas considerando las condiciones específicas y requerimientos de cada sitio.

La lixiviación se puede practicar de tres maneras: heap (en pilas), dump (sobre botaderos = escombreras) e in situ, aparte de la denominada vat (en estanques). La lixiviación en pilas se realiza sobre materiales relativamente homogéneos, dispuestos en pilas construidas sobre superficies especialmente preparadas. La construcción persigue lograr una lixiviación homogénea e impedir pérdidas del lixiviado, que implicarían daño tanto ambiental como económico. Pueden ser removidas y reemplazadas por material fresco (pilas dinámicas) o simplemente crecer vertical y horizontalmente. En todo caso, sobre ellas existe permanente control, al menos durante la etapa de explotación.

Un análisis de las tendencias para el cierre de operaciones de lixiviación en pilas en Nevada, USA, realizado por Frechette (3: 613-617) señala que los esfuerzos se han centrado en dos aspectos: a) Estabilización y rehabilitación de la pila agotada; b) Control del drenaje a corto y largo término desde la pila. En el segundo aspecto, la práctica general ha sido utilizar las anteriores piscinas como dispositivos de evaporación (o celdas de evapo-transpiración si se utiliza vegetación). Es común que el drenaje de la pila continúe uno o dos años (a veces más) después de su cierre. Si la química del drenaje no permite su exposición al aire libre, se conduce a una piscina rellena, donde la evaporación ocurre desde el líquido, situado a poca profundidad bajo la superficie del relleno (efecto que puede ser incrementado mediante la transpiración de plantas). Naturalmente, el clima juega un rol principal en el éxito de estos procesos, que se facilitan en condiciones áridas.

A diferencia de la lixiviación en pilas, el dump leaching consiste en la lixiviación en botaderos de minerales de baja ley, amorfos y heterogéneos, acopiados en espera de que

circunstancias económicas favorables (alza del precio del metal, disponibilidad de ácido sulfúrico barato, en el caso del cobre) permitan su recuperación (por ej., de cobre en botaderos de Chuquicamata). El artículo de amplio enfoque de Bridge (2: 175-201) revisa el conjunto de los desafíos que implica la protección de la calidad del agua de los riesgos asociados a la operación y al cierre de operaciones de lixiviación de botaderos. Bridge considera de especial seriedad los riesgos que implica la contaminación del agua subterránea, la dificultad que implica remediar esa contaminación y los costes de su monitoreo a largo plazo. Ello, aparte de la grave responsabilidad que implican los daños a la salud y el ambiente.

Respecto a los riesgos para el agua subterránea, ellos se refieren a la ausencia de una superficie aislante que brinde una efectiva protección a los cuerpos de agua subterránea. En Arizona (E.E.U.U.) se reconoce tal situación y sólo se exige que esa contaminación no tenga una extensión importante, lo que se maneja a través del control de gradientes hidráulicos. En zonas áridas, la alta tasa de evaporación puede permitir que el mismo rajo abierto de la mina actúe como un receptáculo para el agua subterránea contaminada.

En los Estados Unidos (E.E.U.U.) el cierre de operaciones de lixiviación en botaderos se había completado a fines de la década de los '90 para varias operaciones auríferas, pero no aún para operaciones cupríferas. Típicamente han incluido la neutralización de la mena y los residuos, la eliminación de líquidos libres, la estabilización geotécnica, erosiva y química del sitio y la restauración y cubierta de la superficie. Las características del sitio influyen mucho en el éxito o falla de lo realizado y es importante considerarlas al seleccionar las tecnologías a aplicar. En general, se reconocen dos categorías de técnicas de tratamiento, las que procuran reducir la contaminación a través del tratamiento previo de los contaminantes potenciales, y las que buscan lograrlo reduciendo su potencial de migración y aislando la fuente de contaminantes.

Aparte del riesgo de contaminación acrecentado que implica la lixiviación de botaderos, este tipo de depósitos, por su sola presencia, interfiere con la hidrología del sitio y favorece la contaminación del agua subterránea. Al respecto, Williams y Rohde (34: 521-532) describen el efecto del botadero en la reducción de la evaporación del drenaje superficial original. A ello se agrega la alta permeabilidad de estos depósitos, que facilita la infiltración de las precipitaciones atmosféricas y su almacenamiento en la base del depósito, así como la lixiviación de sus materiales solubles, facilitada por la progresiva oxidación de los fragmentos acumulados. En condiciones desfavorables, como fuertes lluvias o una continua acumulación de agua, se puede generar un flujo casi continuo de agua contaminada hacia el drenaje subterráneo. Ello hace necesario cubrir los botaderos con un material que reduzca efectivamente la infiltración, después de aplanar su parte superior (y que ofrezca garantías de "durabilidad" en las condiciones climáticas del sitio). Sin embargo, si esa cubierta se coloca tardíamente (vale decir, sólo en el momento del cierre), el botadero puede seguir percolando aguas contaminadas durante varios años. De ahí la necesidad de cerrar los botaderos progresivamente durante la etapa operacional activa de la explotación.

El Manual del ITGME (= IGME) (1) analiza la estabilización física de los botaderos y la necesidad de asegurarla en la etapa de abandono (pp 40-43). Entre los factores que intervienen está el tamaño, peso específico y angularidad de los bloques. Si ellos son favorables (bloques grandes, angulares, de rocas ígneas poco alteradas, su resistencia al corte puede ser bastante alta, incluso frente a las vibraciones generadas por eventos sísmicos. En todo caso conviene analizar esta materia cuidadosamente (Al respecto, la Universidad de La Serena dispone de un equipo de gran tamaño para medir la resistencia al corte de agregados de bloques de tamaño decimétrico).

9.5

La Estabilidad a Largo Plazo de las Cubiertas Protectoras.

El concepto básico de los planes de cierre de explotaciones mineras se enmarca en los del desarrollo sustentable y la equidad intergeneracional. Ello implica considerar horizontes de tiempo que exceden en mucho la hoy cada vez más corta vida de las empresas mineras. Lo segundo obedece a su vez a dos causas principales. Por una parte, los análisis financieros recomiendan (y las tecnologías permiten) completar las explotaciones en el plazo más breve posible. Por otra, las empresas mineras han entrado en una vorágine de adquisiciones y fusiones que hace difícil incluso su seguimiento y cuyos propietarios y ejecutivos están en permanente cambio.

Algo parecido ocurre en los Estados, cuando se les confunde, como es frecuente, con los Gobiernos, también en cambio permanente. En los países con mayor solidez institucional, como Inglaterra o Francia, ello se resuelve a través de sistemas administrados por funcionarios muy estables y competentes, que van moldeando políticas "de Estado", al margen de los vaivenes de los cambios de gobierno. No ocurre así, sin embargo, en nuestros países, donde cada elección suele significar una diferente política minera, ambiental, etc. (y en Chile eso ocurre ahora cada cuatro años...).

En consecuencia, cada vez se aleja más la toma de decisiones de la responsabilidad por sus consecuencias, tanto para los proponentes por parte de la empresa minera como para las que deben autorizar o rechazar tales proposiciones.

Por otra parte, si bien las fallas de un cierre pueden hacerse patentes pocos años después de realizado, su éxito sólo puede comprobarse décadas o siglos después. En consecuencia es necesario lograr una razonable seguridad de que lo propuesto tiene efectivas probabilidades de no fracasar en los aspectos más importantes. Puesto que los cierres de minas planificados datan sólo de las últimas dos décadas, (y las EIAs de proyectos mineros de las últimas tres),

es temprano aún para recoger los frutos de las experiencias positivas y negativas, excepto en casos de desastres ambientales como los de Panguna, Ok Tedi, Summittville, etc.

Sin embargo, si buscamos orientación en disciplinas como la geomorfología, que estudia procesos a escala de tiempo adecuadas a estas materias, podemos hacer algunas proyecciones básicas. Consideremos, por ejemplo, tres situaciones características, dos extremas y una intermedia para el caso de un yacimiento sulfurado con potencial de generación de drenaje ácido situado en: a) Topografía montañosa, en condiciones de alta pluviosidad; b) Topografía intermedia, en clima templado moderadamente lluvioso; c) Topografía suave, en condiciones de clima árido.

En el primer caso, la erosión hídrica y los procesos de remoción en masa serán los principales problemas, y si no se manejan adecuadamente (lo cual es difícil) se puede llegar a desastres como los de Panguna u Ok Tedi. Tanto el manejo del drenaje como el de las pendientes será esencial, pues la remoción en masa no respeta ni las laderas mejor vegetadas. Mientras el drenaje ácido que llegue a liberarse será diluido por el medio, el material en suspensión puede dañar seriamente la calidad del agua de los ríos. Por otra parte éste es un ambiente muy dinámico y cambios importantes pueden ocurrir en cortos intervalos de tiempo.

En el segundo caso, cuyas condiciones se aproximan a las de Montana (E.E.U.U.), el drenaje ácido puede constituir el principal problema. En cambio, se puede esperar un buen comportamiento de la estabilidad de los depósitos de desechos sólidos si fueron morfológicamente restaurados y bien cubiertos y vegetados. Ello, puesto que existen las condiciones para el sustento de una vegetación permanente, que incluya el desarrollo de hierba junto a arbustos y árboles.

En el tercer caso, el drenaje ácido puede o no ser un problema mayor, dependiendo de la ubicación del yacimiento respecto a poblaciones, cultivos y la red de drenaje. Aunque la

evaporación ayuda a minimizar el drenaje, a su vez incide en la concentración de metales pesados. Por otra parte, los ríos de zonas áridas tienden a tener menor flujo, por lo cual la contaminación ejerce mayor efecto. Sin embargo, el mayor riesgo puede estar ligado a la erosión eólica, en particular si quedan grandes superficies de depósitos de relaves, si la zona está afectada por fuertes vientos y si hay poblaciones o cultivos que pueden ser alcanzados por esos materiales.

Este último caso es importante en Chile, donde la mayoría de sus explotaciones se encuentra en zonas áridas, al igual que los nuevos proyectos en construcción o evaluación. La observación del paisaje natural sometido al efecto del viento muestra la vulnerabilidad de los materiales de baja granulometría en el norte de Chile. En tales condiciones, un gran depósito de relaves pasa a ser una anomalía geomorfológica que, tarde o temprano será corregida por el efecto del viento o de las esporádicas (pero a veces muy intensas) precipitaciones.

Como señalan Ginocchio et al (3: 465-474), los esfuerzos por detener la erosión de depósitos de relaves abandonados mediante forestación no han logrado una implantación sustentable, la cual requiere "más que trasplantar las especies adecuadas de plantas". Por otra parte, es fácil observar como las sequías prolongadas en esta zona transicional (Chile norte-central) terminan incluso con la vegetación natural bien implantada. Con mayor facilidad entonces lo lograrán sobre un depósito de relaves, que es análogo a una gran duna. Ello no implica que las operaciones mineras no puedan mostrar bonitos ejemplos de relaves vegetados, pero ellos requieren riego y otros cuidados que no estarán presentes décadas después del cierre (especialmente considerando, aparte de los problemas logísticos, la creciente escasez y coste del agua).

En suma, se requiere diseñar soluciones tecnológicas que aseguren a los depósitos de relaves situados en zonas áridas una protección de largo plazo respecto a la erosión eólica e hídrica. Ello es especialmente importante si se encuentran en una posición topográfica elevada

que favorezca su dispersión eólica, como es el caso de los voluminosos y extensos depósitos de relaves que generará el proyecto Andacollo Hipógeno en la Región de Coquimbo, Chile.

Capítulo 10

Aspectos Socioeconómicos de un Plan de Cierre

10.1

Experiencias y Desafíos en el Manejo de Aspectos Socioeconómicos.

Como es natural, la materia de este capítulo es especialmente compleja y cambiante. A ello contribuyen varias e importantes razones. En primer lugar, se trata de seres humanos, cuyo comportamiento puede ser muy difícil de comprender y prever, porque responde a causas de distinta índole, algunas de las cuales escapan bastante a las posibilidades del método científico. Un solo ejemplo: la “fijación” de los mineros del carbón por un oficio cuyo peligro, dureza, mala remuneración etc., son los primeros en reconocer! De ello se desprende una segunda razón, relacionada con el distinto medio cultural, social y económico en que se realiza la explotación. El clima, la topografía, las rocas, el yacimiento, su método de explotación y la empresa pueden ser los mismos, pero si la explotación se ha realizado en continentes distintos, el impacto socioeconómico del cierre puede diferir mucho. Una tercera razón: en las últimas décadas la minería ha cambiado drásticamente en sus relaciones con las comunidades vecinas. El último gran campamento – ciudad minera, el de El Salvador, fue construido en Chile en los ‘60. Después, todas las nuevas explotaciones han preferido contar con instalaciones destinadas sólo al alojamiento del personal de turno. Puesto que los turnos son de varios días y están separados también por varios días de descanso, las remuneraciones son relativamente altas y hay buena disponibilidad para viajes aéreos o en buses modernos, muchos trabajadores residen en ciudades alejadas de su sitio de labor (elegidas por razones familiares o de calidad de vida). En cambio, se han fomentado los “clusters” o encadenamientos productivos

regionales, de manera que las empresas vitalicen el desarrollo general de la región respectiva.

En suma, la materia es compleja y cambiante. Desde luego debe ser evaluada desde antes de la implantación del proyecto, pero aún así puede ser que la situación cambie mucho durante los años de la explotación. Aparte de eso, hay que considerar el hecho de que en muchas culturas las palabras no significan lo que parecen decir, por lo cual encuestas o consultas a la población local pueden entregar resultados engañosos.

Warhurst et al (2: 81-98) resumen su visión al respecto en los siguientes puntos:

- Es necesario realizar Evaluaciones de Impacto Social (EIS) a través de todas las etapas de la vida de la explotación y considerarlas al formular el plan de cierre final.
- El plan de cierre debe considerar efectos y soluciones no sólo para los trabajadores formales o informales de la empresa, sino que también para las comunidades cercanas o lejanas involucradas directa o indirectamente en sus actividades.
- La política de recursos humanos de la empresa debe considerar el futuro laboral de los trabajadores (tanto de aquellos cesados por razones de producción como por el cierre final de la explotación).
- La empresa debe prevenir, tanto durante la explotación como después del cierre, cualquier daño a otras actividades productivas de la zona, como la agricultura (efectos del drenaje ácido, de la contaminación particulada, etc.).
- El plan de cierre puede considerar usos alternativos para las instalaciones de la empresa, con el objeto de apoyar el trabajo de redes comunitarias de protección social.
- Es necesario procurar la mayor participación posible y prudente de la comunidad en la preparación del futuro cierre.
- Es necesario asegurar la disponibilidad de recursos para enfrentar los aspectos socioeconómicos del cierre.
- Es necesario continuar la investigación de estas materias, en particular establecer las lecciones que entregan éxitos y fracasos.

- La investigación debería establecer qué tipo de capacidad y experticias deben ser desarrolladas para alcanzar el éxito, así como establecer indicadores de la calidad y probabilidad de éxito en materias socioeconómicas del plan de cierre.

Desde luego, el cierre de una explotación minera puede variar en sus efectos sociales, entre ser una experiencia traumática y socialmente destructiva por un extremo, y no tener efectos sociales significativos por otro. Por ejemplo, el cierre de la actividad carbonífera en Lota y Coronel (Región del Bío-Bío, Chile) ha tenido prolongados efectos. En cambio, actualmente (2008) el cierre de cualquier explotación cuprífera o aurífera mediana del dinámico mundo minero del norte de Chile pasaría socialmente inadvertida. No solamente sus trabajadores residen en diferentes ciudades, sino que serían rápidamente absorbidos por otras faenas. Naturalmente, en esto influye mucho el ciclo de oferta-demanda de los productos mineros, así como la actitud del trabajador, en especial su preparación, confianza en sí mismo y disposición al cambio (en general, bastante altas en los trabajadores de empresas modernas, que destinan muchos recursos a capacitación).

En lo que resta de esta sección, consideraremos la experiencia del manejo de aspectos socio-económicos en cierre de explotaciones mineras en distintos continentes.

Los aspectos sociales del cierre de explotaciones carboníferas en la República Checa están reseñados en un trabajo de Dvoracek (3: 123-127). En el caso descrito, no se trató de un cierre en sentido estricto, sino del cese del 80 % de los trabajadores de la mayor empresa minera carbonífera del País en un período de 16 años (1990-2006), la cual había llegado a tener unos cien mil empleados en los '70 y debió reestructurarse en 1989. Por tratarse de una empresa estatal en curso de privatización y ocurrir el cierre de sus actividades menos productivas en una época de transición política-económica, los trabajadores en exceso no fueron forzados a dejar la empresa. Eso sí, se establecieron distintas causales de cese, como

faltar a la disciplina, obtención de un nuevo empleo satisfactorio, jubilación pactada anticipada, etc. En consecuencia, el cierre parcial no tuvo repercusiones sociales graves. En cambio, la empresa perdió parte de su status frente a la población y actualmente tiene dificultades para contratar nuevos trabajadores para sus labores subterráneas. Los costes de las medidas de mitigación fueron asumidos por el Estado.

Considerando la menor magnitud de las operaciones carboníferas de Lota-Coronel en Chile, su cierre presentó mayores problemas. También en este caso el Estado financió jubilaciones anticipadas, así como capacitación para la reconversión laboral de los trabajadores. Sin embargo, se presentaron dos dificultades principales. La primera, el sentimiento de los mineros de una pérdida de status, al dejar su oficio de minero del carbón. Ella se unió a su resistencia a desplazarse en busca de nuevas oportunidades laborales. Probablemente, contribuyó también la falta de adecuación de la capacitación recibida, así como el hecho de que la economía de ambas ciudades colindantes (Lota y Coronel) estaba centrada en el carbón y presentaba escaso dinamismo.

Weber y Brandt (3: 129-138) presentan una metodología de planificación para enfrentar los aspectos socio-ambientales del cierre de minas en Brasil. Sin embargo, esa metodología está centrada en los usos post-cierre del sitio de la explotación y su entorno. Por lo tanto, será tratado en el Capítulo 15, destinado a considerar esa materia específica.

El impacto socioeconómico del cierre de minas en Ghana (NW de Africa) fue analizado por Nyamekye (2: 397-413). En general, la situación descrita por dicho autor es muy negativa. El sector minero opera como un enclave, con muy poca relación con la economía local y un 60 – 80 % del valor de los minerales exportados queda ajeno a ello y es manejado por las empresas a través de cuentas privadas. Tampoco el País cuenta con políticas para la restauración de sitios mineros, lo que queda a la libre decisión de las empresas. En lo referente a cierre de minas, el Estado ha optado por

mantener en operación algunas minas cerradas por las empresas, a fin de proteger el sustento de los trabajadores y la actividad de los pueblos mineros.

El punto de vista de un consultor en materia de evaluación de impacto social (EIS) aplicada al cierre de minas en Australia fue presentado por Ferguson (3: 139-144). El autor, preocupado por la falta de estándares definidos para la EIS y los consiguientes riesgos en calidad y credibilidad, presenta una serie de proposiciones. Ellas parten de la definición de la EIS como: "El proceso de evaluar o estimar anticipadamente las consecuencias sociales que probablemente se derivarán de políticas específicas de acción o del desarrollo de proyectos".

Ellas incluyen:

- Mantener conversaciones entre los responsables del proyecto, especialistas de distintas disciplinas involucradas y científicos sociales sobre el proyecto, antes de su presentación, centrándose en las consecuencias sociales deseadas.
- Ser claros y transparentes sobre el mismo propósito ante las comunidades afectadas, sin temer la implicación de todas las partes interesadas desde el principio.
- Seleccionar cuidadosamente el enfoque de la EIS y apreciar debidamente el aporte de los científicos sociales y los planificadores.
- Seleccionar las propuestas de los especialistas con un enfoque de manejo de riesgos.

El autor señala finalmente que un enfoque de este tipo minimizará sorpresas desagradables en materias como gastos por sobre el presupuesto, interferencias y agitación política, vencimiento de plazos y procesos legales.

De la breve revisión realizada, se desprende la gran variedad de escenarios en los cuales se puede realizar el cierre de una mina. Desde luego los casos de Ghana y Australia representan situaciones polares, en cuanto las empresas mineras forman parte de un mundo

por completo ajeno al medio local en el primer caso, y plenamente identificado con él, en el segundo. Naturalmente, aun suponiendo la mejor buena fe de ambas partes (empresa y comunidad local), lo que se puede y conviene hacer será distinto en cada situación, y deberá ser objeto de un cuidadoso análisis.

10.2

¿Cómo Dejar un Legado Sustentable de la Explotación Minera y Minimizar los Impactos Socioeconómicos de su Cierre?

Las consideraciones de la presente sección se centrarán en aquellas explotaciones mineras que se realizan en zonas en las cuales existen otros tipos de actividad económica y en las cuales la empresa minera desempeña un papel importante. En esas condiciones se espera que la empresa desarrolle iniciativas propias del campo de la "Responsabilidad Social Corporativa", y se involucre en el desarrollo y progreso de su área geográfica de influencia.

Es lógico que su primera responsabilidad se refiera al cuidado ambiental de sus operaciones, procurando que éstas no dañen las posibilidades de desarrollo de otras actividades económicas, como la agricultura, agroindustria, pesca, turismo, etc. Sin embargo, la empresa puede ir más lejos en las mismas materias, contribuyendo con mesura y criterio técnico a su puesta en valor. Al respecto, varias iniciativas de Cía. Minera Los Pelambres en el valle del Río Choapa, Región de Coquimbo ilustran esta posibilidad, las cuales pusieron en valor "subproductos" de sus estudios de impacto ambiental (por ej., observatorio de aves en una laguna litoral cercana al puerto de embarque de minerales, museo de sitio arqueológico, aprovechando los hallazgos de la EIA etc.). En materia de agricultura, una empresa minera puede contribuir a desarrollar mejores prácticas agrícolas en una estación experimental (como CMP en el Valle del Huasco, Región de Atacama) ojalá adelantándose a eventuales protestas justas o injustas de los agricultores por descensos de productividad.

Otro, y seguramente el principal campo de responsabilidad corporativa, es el de la educación. Al respecto, la empresa minera moderna maneja inteligencia, conocimientos, tecnologías y recursos que pueden hacer mucho por el cambio cualitativo de la educación en su área de influencia. No se trata aquí de asumir responsabilidades que no le competen. La idea es distinta: se trata de apoyar o llevar a cabo iniciativas que permitan a la comunidad el acceso a ese "presente" que puede estar tan lejano en la práctica. Al respecto, la empresa puede actuar a través del "efecto demostración" promoviendo la incorporación de conceptos y tecnologías educacionales avanzadas, en cooperación con los sistemas educativos locales.

El objetivo de las actividades descritas a modo de ejemplo debería ser el de buscar la máxima independencia de la comunidad respecto a la empresa, preparando el momento del cierre de sus labores. Esto implica lo opuesto de la situación histórica tradicional, donde todo dependía de la empresa, y su desaparición equivalía al desplome de la comunidad ligada a ella. Tal independencia, confianza en sí misma, disposición a enfrentar nuevos desafíos, constituyen el mejor y más sustentable legado que una empresa puede entregar al momento de su cierre.

Capítulo 11

Aspectos Legales y Normativos de los Cierres Mineros.

11.1

Aspectos Legales y Normativos de PCM en Diversos Países.

India: Dhar (2: 295-310) describe el estado de las políticas y sistemas de manejo ambiental minero en India a la fecha de su publicación (2000). Aunque el autor citado no menciona una legislación específica para el cierre de minas, algunos de sus requerimientos están implícitos en las Reglas para la Conservación y Desarrollo de los Minerales de 1957, modificadas en 1958, 1988 y 1994. Bajo dicha regulación el operador está obligado, entre otras cosas, a la

rehabilitación de los terrenos afectados, a la prevención de la contaminación y a la restauración de la flora. Por otra parte, la Política Nacional sobre Minerales de 1993 incluye la necesidad de resguardar el uso alternativo del territorio para fines forestales, ecológicos y de desarrollo ambiental en general, la revegetación de las áreas afectadas en acuerdo con normas específicas, así como la necesidad de evitar explotaciones mineras en zonas biológicamente ricas, pero ecológicamente frágiles. Por otra parte, la misma Política dispone que en caso de cierre, éste debe ser realizado de modo ordenado y sistemático y que en la rehabilitación respectiva deben participar los trabajadores de la empresa y los miembros de la comunidad afectada por el cierre. En general, las condiciones climáticas de ese continente son favorables para reforestar los terrenos afectados por las explotaciones mineras, lo que ha facilitado ese aspecto del cierre de minas.

En otro artículo de la misma obra (2: 481-496), Noronha señala que 95% de la actividad minera en India corresponde a minería a cielo abierto, mayoritariamente de hierro, lo cual ha contribuido a degradar tanto la tierra como el drenaje y ha requerido mucho espacio para botaderos de estéril. En cambio, ellas implican menos riesgos de contaminación por metales pesados y drenaje ácido que los depósitos de tipo sulfurado. Los principales daños producidos se refieren al efecto del drenaje de botaderos y rajos (= cortas) inundados. Puesto que la minería se ha efectuado en áreas forestadas, cubiertas de suelos gruesos, ello ha implicado una erosión importante (aunque en parte mitigable a través de reforestación).

Sudáfrica: La información resumida aquí proviene de un artículo de Sutton y Weiersbye (3: 89-102). Los autores citados señalan que la ley básica destinada a prevenir los impactos de la actividad minera y petrolera es la Ley para el Desarrollo de los Recursos Minerales y Petroleros (MPRDA) del año 2002, y revisan la legislación aplicable a cierre de minas para verificar su consistencia con las exigencias de dicha ley. También consideran las provisiones de otras leyes relacionadas, como la Ley de Gestión Ambiental Nacional (NEMA), de 1998 y la Ley Nacional del Agua (NWA). Un requerimiento

básico de la MPRDA es la obligación de las empresas de presentar un estudio de costes del futuro cierre, así como hacer la correspondiente provisión de fondos, conforme a las guías establecidas por el Departamento de Minerales y Energía (DME). También la MPRDA ha establecido una "ruta de salida", a través de la cual empresas que han demostrado un buen cumplimiento ambiental pueden transferir sus responsabilidades al Estado o a otra empresa, junto con los respectivos fondos. Si estos últimos se demostraran como insuficientes, la empresa minera, sus directores y empleados deben asumir la responsabilidad (incluso a nivel personal). Los principales problemas pendientes se refieren a la reutilización de los sitios de anteriores explotaciones cerradas y a las restricciones que deben formularse al respecto (por ej., cuando ellas implican el uso agrícola de terrenos potencialmente contaminados). Los autores estiman que la rehabilitación de minas abandonadas o muy deterioradas podría costar al Estado unos 100 mil millones de rands (cerca de 15 mil millones de dólares al cambio del 2007).

Un aspecto notable de la legislación sudafricana es el alto grado de responsabilidad personal que se asume por las fallas en materia ambiental. Por ejemplo, bajo las disposiciones del Departamento de Asuntos Ambientales y Turismo (DEAT): "Corresponde a las siguientes personas remediar las fallas totales o parciales de cumplimiento de disposiciones ambientales o asumir los costes respectivos:

- Cualquier persona responsable de contaminación o degradación ambiental o que haya directa o indirectamente contribuido a ella.
- El dueño de la tierra afectada en el momento en que el daño ocurrió, o su sucesor.
- La persona en control de la tierra o que tenía el derecho a utilizarla cuando se produjo el daño.
- Cualquier persona que, por negligencia, falló en prevenir la actividad o proceso causante del daño.

Por otra parte, la responsabilidad por infracciones serias a los compromisos o normas ambientales, por ejemplo, del Programa de Manejo Ambiental (EMP), puede ser condenada

a una multa de hasta 500 mil rands (unos 70 mil dólares) o a una pena de cárcel de hasta 10 años.

Finalmente, incluso después del otorgamiento del certificado de cierre conforme, entregado por el DME, las disposiciones de otras leyes (por ejemplo, conectadas con la NWA) siguen prevaleciendo frente a futuros daños ambientales. Como antes se mencionó, persiste sin embargo cierta debilidad de la legislación en material de los futuros usos de los sitios de anteriores explotaciones mineras, en particular lo referente al efecto de la contaminación minera o metalúrgica en los suelos destinados a uso agrícola.

Australia: Como señala Clark (2: 441-454), el desarrollo de las prácticas de cierre en Australia se inició a principios de los '70 siguiendo el desarrollo de la sensibilidad despertada en esa década respecto al tema ambiental. Antes de esa década "la sociedad no atribuía valores a los recursos hasta que eran explotados, ni valorizaba el ambiente natural". Sin embargo, la toma de conciencia pública sobre el ambiente desarrollada en los '80 y '90, ha dado lugar al crecimiento de un vigoroso movimiento conservacionista. Ello condujo a la realización de EIAs para los nuevos proyectos, junto con la conceptualización de que "la minería constituye un uso temporal de la tierra", lo que implicaba que ésta debería ser retornada a su uso original al término de la explotación. La misma consideración fue otorgada a las explotaciones en operación, con énfasis en la necesidad de su posterior rehabilitación. Por su parte, los gobiernos tomaron interés en labores abandonadas y destinaron grandes sumas de dinero a su limpieza ambiental (por ej., en el caso de una mina de uranio abandonada en los Territorios del Norte, que estaba contaminando con metales pesados el drenaje local).

Aunque al menos hasta el año 2000 no existía legislación gubernamental específica referente al cierre de minas, el Departamento del Ambiente, Deporte y Territorios estableció guías específicas para el cierre de explotaciones que involucran minerales radioactivos. Por otra parte, en cada uno de los estados y territorios de

Australia hay un cierto número de agencias involucradas en el cierre de minas (por ej., 6 en Victoria, 3 en New South Wales, 1 en los Territorios del Norte). En cada estado y territorio hay también una norma minera que sitúa la seguridad como elemento principal del cierre minero. En la mayoría de los casos, la agencia minera desempeña el rol regulador principal, secundada por las agencias del agua, de la protección ambiental y de la conservación. Puesto que Australia es un continente con variadas características de clima y tipos de suelos, no existen criterios o estándares ambientales generales, aunque sí guías amplias, así como documentación más detallada para estados en particular, como Queensland y Western Australia. El criterio básico es que el sitio quede en condiciones apropiadas para el futuro uso acordado. Naturalmente, aspectos como la preservación de la calidad del agua por contaminación ácida y metálica son temas centrales. En Western Australia, no se consultan trabajos de rehabilitación en tierras de propiedad privada, y los reguladores sólo tienen autoridad respecto a impactos externos al sitio del proyecto. En cambio, en Queensland se incluyen criterios relativos al tipo y densidad de la vegetación a implantar, así como a la prevención de la erosión de los suelos (control de pendientes, drenaje, etc.). En general, los distintos estados y territorios concuerdan en que los objetivos del cierre deben centrarse en:

- Seguridad física del sitio.
- Estabilidad del sitio.
- Condición de la tierra apta para el futuro uso acordado.
- Prevención de la contaminación, en particular del drenaje superficial y subterráneo.
- Sustentabilidad de la restauración realizada.

En cuanto a las responsabilidades, ellas varían bastante entre los diferentes estados y territorios. En la mayoría de los casos, completado satisfactoriamente el cierre, se extingue la responsabilidad de la empresa minera y ésta pasa a ser asumida por el dueño de la tierra (estatal o privado). Respecto a los plazos no hay mínimos o máximos fijados. En cuanto a la sustentabilidad de la cubierta vegetal implantada, ella debe automantenerse al menos unos 20 años (New

South Wales) mientras en Western Australia los periodos de evaluación del éxito del cierre van de sólo 5 a 10 años. Como se ve, una amplia diversidad de criterios!. Finalmente, Clark señala cinco áreas en las que quedan problemas importantes por resolver, los que requieren más investigación y mejores soluciones:

- Criterios de "completación" de la rehabilitación.
- Problemas con las cavidades de los rajos abiertos y su posible uso (almacenamiento de agua, vertederos, humedales).
- Botaderos.
- Depósitos de relaves.
- Drenaje ácido de minas.

En un artículo algunos años posterior (2007), Lobby (3: 103-110) describe la aproximación del estado de Western Australia a la aprobación de nuevas explotaciones y al cierre de minas. Ellas incluyen recientes enmiendas (2006 y 2007) y políticas administrativas destinadas a mejorar la eficiencia, transparencia y responsabilidad de estas decisiones. También se han elaborado guías, incluida la Western Australian Mine Closure Planning Guidelines (WAMCPG) y una serie de guías del gobierno australiano referentes a cierre, rehabilitación de minas, manejo de relaves, manejo de drenaje ácido, y participación y desarrollo comunitario. También se observa un desplazamiento desde un enfoque regulador tradicional a otro basado en el manejo de riesgos.

El nuevo enfoque descrito partió de cambios y desarrollos en tres áreas claves, a saber:

- Un criterio más centrado en la planificación del cierre.
- Revisión de los costes por daños que podrían revertir al Gobierno.
- Logro de mayor claridad y certeza respecto a estándares de cierre.

En cuando al segundo punto, los costes por rehabilitación de sitios mineros en Western Australia se incrementaron 40% entre 2005 y 2006, mientras las garantías financieras

entregadas por las empresas mineras representan menos del 25% de los costes totales efectivos de las rehabilitaciones comprometidas. En consecuencia, se han fijado estándares más exigentes para los cálculos que realizan las propias empresas respecto a esos costes (Australian Accounting Standard Board 137).

Finalmente, un artículo de Grounds et al (3: 619-629) ilustra el desarrollo de un cierre de mina en North Queensland, así como la devolución de la garantía financiera entregada, 11 años después del cese de la explotación de la mina de oro Mount Hogan en 1995. Dicho cierre requirió la resolución de varios y serios problemas (drenaje ácido, calidad de agua en un rajo abierto y percolación de soluciones desde los botaderos rehabilitados). Las acciones de remediación y rehabilitación fueron completadas en 2003, a lo que siguieron dos años de monitoreo, obteniéndose la aprobación del plan de manejo del sitio (SMP) en marzo 2006, el que considera los posibles problemas futuros asociados a cualquier contaminación residual. Ello permitió la liberación de la garantía económica (equivalente a unos 124 mil dólares). Aunque se trató de un proyecto de reducida magnitud, que sólo llegó a procesar unas 200 mil t/año de mena entre 1992 y 1995, la reseña de Grounds et al ilustra la característica principal de la legislación australiana: flexibilidad dentro del cumplimiento de objetivos básicos. Lo anterior, unido a cierto grado de confianza en los procedimientos y la responsabilidad de la empresa respecto al SMP y expresado en el corto plazo de monitoreo exigido.

Canadá y E.E.U.U.: Como señala Isnor (2: 463-480) Australia, Canadá y E.E.U.U. comparten ciertos rasgos comunes en su aproximación al manejo ambiental de los asuntos mineros. Ellos tienen su origen en distintos factores, como una cultura común, que tiende a desconfiar de las legislaciones rígidas y de los gobiernos poderosos, el aprecio por la iniciativa privada y la fe en la capacidad de la tecnología para resolver los problemas. Los tres países fueron originalmente colonias británicas (con la excepción del estado "francófono" de Québec en Canadá) y se organizaron como estados federados, que dejan espacio a un amplio grado

de libertad y posibilidades de diferenciación local (aunque ello se ha ido reduciendo progresivamente, en particular en E.E.U.U.).

Por otra parte, en los tres países se ha contado con agencias técnicas responsables del desarrollo y transferencia de tecnología, que han promovido la búsqueda en común con las empresas mineras de soluciones tecnológicas. Esta aproximación es importante porque también marca una diferencia con aquella de los estados de inspiración europea continental" (reproducidos en Latinoamérica) donde la autoridad se sitúa sobre y aparte del privado, provista de una rígida y nutrida legislación de control. Así, en E.E.U.U. el Bureau of Mines (USBM) hoy desaparecido, en Canadá el CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology) y el CSIRO – IMEC (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation Institute of Minerals, Energy and Construction) en Australia, han desempeñado roles importantes en la búsqueda de soluciones prácticas a los principales problemas. Sin embargo, Isnor distingue rasgos característicos que diferencian a la política minero-ambiental de estos países. Así, Canadá, respecto a E.E.U.U.:

- Muestra un menor grado de fragmentación en agencias técnicas federales.
- Sus agencias estatales, provinciales o territoriales son más importantes.
- Presenta un mayor grado de coordinación intergubernamental.
- Los grupos aborígenes tienen mayor influencia local.

En materia de investigación, los departamentos de minería de Canadá que cuentan con cátedras de investigación industrial desarrollan una importante investigación financiada por el gobierno en materias relativas al cierre de minas. Por otra parte, los científicos e ingenieros de CANMET participan activamente en el programa MEND (ya descrito en la sección 4.2 de este curso) y la misma institución es responsable de los principales programas de investigación relativos al cierre de minas. Parte de estos programas se realizan en colaboración con las empresas mineras, unas 20 de las cuales

participan en el programa MEND. Además, el gobierno nacional se ha esforzado – y ha sido exitoso – en asociar a los investigadores del gobierno (incluidos los de CANMET y de las universidades), con las empresas mineras, para buscar soluciones prácticas a los problemas planteados por los cierres de minas.

En suma, más allá de las reglamentaciones, principalmente elaboradas a nivel de cada estado, el rasgo esencial de la aproximación canadiense a esta materia se basa en tres principios básicos.

- Colaboración entre las entidades de gobierno (central o estatal), las empresas y las universidades; en la búsqueda de soluciones prácticas.
- Confianza en la capacidad de la investigación científica y tecnológica para desarrollar las soluciones requeridas.
- Flexibilidad en el enfoque caso a caso, sin el peso de una legislación rígida que la dificulte.

La aproximación en E.E.U.U. al tema minero ambiental ha variado después del cierre del USBM (cuyas funciones fueron distribuidas entre el US Geological Survey y el Department of Energy). El USBM había llegado a tener 77 proyectos relativos a materias de minería-ambiente en 1991 y colaboraba estrechamente con EPA en estas materias. En cambio, se han desarrollado requerimientos más precisos, complicados por los muchos diferentes sistemas de cierre de minas existentes en ese país. Sin embargo, de acuerdo con Danielson y Nixon (2: 311-350), todos ellos comparten los siguientes elementos en común:

- Exigencia de contar con un plan de cierre.
- Estándares en continua evolución, basados en los resultados de anteriores experiencias y que consideran factores como clima, geografía y otras operaciones mineras en el área.
- Necesidad de aprobación del plan propuesto.
- Flexibilidad del plan. Considerando el carácter dinámico de las operaciones mineras, se acepta que éste pueda ser reformulado (sujeto a aprobación de los cambios) en el curso de las mismas.

- Necesidad de una garantía financiera de cumplimiento del plan.
- Necesidad de efectuar monitoreos, informes, inspecciones y acciones de las agencias reguladoras que aseguren el cumplimiento.

Una experiencia importante se refiere a los problemas que implica el hecho de que los cierres de minas tienden a ocurrir en “oleadas”, por ejemplo los de minas de uranio en los ‘60 y ‘80, lo que implica una seria presión sobre las agencias reguladoras.

Danielson y Nixon destacan la diversidad de respuestas que los distintos estados de E.E.U.U. dan a la importante pregunta de los objetivos fundamentales del cierre de minas. Así, en Colorado, ellos se definen como “restaurar las tierras afectadas por las operaciones mineras de modo que puedan ser de beneficio al pueblo del Estado”. Otros estados lo definen en términos como “prevenir la degradación indebida e innecesaria del ambiente” o “proteger la salud y seguridad”, “lograr un ecosistema autosustentable después del cierre”, etc.

Los mismos autores señalan que los problemas que más preocupan a las empresas mineras en E.E.U.U. no se refieren a la legislación relativa al cierre de minas, la cual ha operado satisfactoriamente, sino a la legislación nacional relativa a la calidad del agua (Clean Water Act) y a la limpieza de sitios (CERCLA y legislación del superfondo). Ellas implican serios riesgos de responsabilidad a largo plazo, en materias como el drenaje ácido que puede ocurrir “a perpetuidad” sin que existan tecnologías capaces de detenerlo en el tiempo. A ello se agrega el principio de la responsabilidad retroactiva, que puede obligar a una empresa minera que hoy inicia una explotación a pagar por la limpieza de contaminación generada en la década de 1980.

Los dos problemas recién señalados pueden comprometer seriamente la competitividad de la industria minera en E.E.U.U., que ya en la práctica está reducida a unos pocos Estados. En este aspecto, los Estados Unidos se ha ido aproximando más a las naciones europeas

occidentales, que conceden una alta prioridad a la protección y calidad del ambiente y en los cuales la minería ha sido severamente restringida.

Brasil: Como destacan Flores et al (3: 79-88), Brasil carece aún (2007) de legislación o normas específicas relativas al cierre de minas.

En consecuencia, la evaluación de impacto ambiental (EIA), que incluye los requerimientos de un plan de rehabilitación de tierras degradadas, se utiliza para manejar lo relativo al cierre minero. Hasta el año 2001, la obligación básica del poseedor de la concesión minera consistía en rehabilitar el área explotada de acuerdo con un "plan para la rehabilitación de áreas degradadas" (PRAD) aprobado por la agencia ambiental competente. El año 2001, el Departamento Nacional de Producción Mineral (DNPM) estableció normas de regulación minera (NRM-20) para manejar lo relativo a la suspensión o el cierre de una explotación minera. Al respecto, corresponde a la empresa comunicar su intención, justificarla y presentar un plan de cierre. Sin embargo, no establece plazos para hacerlo ni para su evaluación por parte del DNPM.

El estudio de Flores et al analiza la calidad y especificidad de los PRAD presentados en el estado de Minas Gerais, donde se sitúa la mayoría de los cierres mineros, y que corresponden a explotaciones de Fe, Mn y Au. En general, su calidad fue deficiente. Rara vez se observa en ellos un enfoque interdisciplinario y en cambio parece haber mucho "copiar y pegar" y poca especificidad a las condiciones propias de cada situación por parte de las firmas consultoras que los realizaron. Tampoco parece haber existido mayor análisis crítico por parte de las agencias gubernamentales, afectadas por falta de financiación y de recursos humanos. La mayoría de los PRAD analizados enfocaron la rehabilitación sólo en términos de un proceso de revegetación y no incluyeron monitoreos ni acciones de mantenimiento post-cierre. Por otra parte, puesto que se carece de criterios respecto al cierre, tampoco las empresas mineras pueden obtener una certificación de su cumplimiento ni una liberación de su responsabilidad ambiental por futuros daños.

Lo anterior no implica que no hayan habido cierres de minas exitosos en Brasil, pero ello ha sido fruto más bien de la responsabilidad corporativa empresarial que de la acción del gobierno o de la calidad de la legislación y de la normativa respectiva. Por otra parte, el hecho de que muchas explotaciones cerradas se encuentren en áreas remotas permite que su impacto ambiental pase inadvertido para la opinión pública. En las conclusiones de los autores "se necesita de una legislación clara y transparente, que proteja los intereses de las partes involucradas. El sistema de regulación debería ser de fácil acceso, imprescriptible, específico en sus objetivos y contar con la fuerza de la ley".

En otro estudio, relativo específicamente al "estado del arte" de los cierres de minas en el estado de Minas Gerais, Lima et al (3: 413-424) señalan que: "Muchas compañías mineras procuran aún adoptar las mejores prácticas y enfrentan el desafío de cerrar la mina adecuadamente, ante la opción de simplemente cumplir la actual legislación o abandonar el sitio de la explotación". Esto, frente a la ausencia de regulaciones para el cierre de minas en Brasil. Los autores describen, en cambio, el ejemplo exitoso del cierre de la mina de hierro de Aguas Claras, que ha pasado a ser una referencia técnica por su calidad. En contraste, mencionan los riesgos que corren los cierres de varias explotaciones de uranio, oro, hierro y otras sustancias, debido a la forma en que han sido enfrentados, posibilitada por una legislación escasa, imprecisa y permisiva.

11.2

El Cierre de Minas en Chile. Una Legislación Postergada.

La legislación ambiental de Chile debió buena parte de su impulso inicial a las empresas mineras transnacionales que llegaron al país en los '70 y '80.

Esas empresas organizaron, a mediados de los '80, el primer seminario sobre los aspectos ambientales de la minería (al cual CODELCO concurre sólo en calidad de observador,

manifestando los riesgos que esta temática presentaba para el país). El interés por contar con una legislación formal se relacionaba con su necesidad de "reglas claras", en materias como propiedad minera, tributación, etc., a lo cual se agregaba el tema ambiental, las que se requerían para planificar con tranquilidad su futuro desarrollo. Por otra parte, lo ambiental había pasado ya a formar parte de sus políticas corporativas en el exterior, por lo cual no buscaban situaciones permisivas que pudieran afectar sus propios estándares y su prestigio internacional. Cuando en 1994 se contó con la Ley 19.300 que estableció el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, las primeras EIAs correspondieron a proyectos mineros, los que mantuvieron su predominio por varios años y permitieron el desarrollo de las primeras firmas consultoras ambientales en Chile.

Sin embargo, aunque se empezó a hablar tempranamente (ya en los '80) de contar con una legislación reguladora específica del cierre de minas, ella ha sido postergada por los sucesivos gobiernos. De ahí que el primer cierre minero importante (Compañía Minera El Indio, ver Robledo y Meyer 3: 53-65, mencionado en Capítulos 4, 6, 7 y 8) fuera en buena parte estructurado conforme a la iniciativa y criterios de la propia empresa.

Las disposiciones reguladoras chilenas respecto a planes de cierre minero están contenidas en el Decreto Supremo D.S. N° 132/04, el cual comprende 23 artículos. Estos incluyen la obligación de presentar un proyecto de cierre, el cual debe "determinar las medidas a implementar para prevenir, minimizar y/o controlar los riesgos o efectos negativos que puedan surgir o continuar surgiendo después del cierre de la mina, respecto a la vida e integridad de las personas que trabajen en ella, o puedan estar bajo circunstancias específicas y definidas asociadas a ellas, en sus instalaciones e infraestructura". Como señala Quiroz (3: 313-324), esta definición está centrada en el tema de la seguridad y no establece obligaciones legales de considerar los riesgos ambientales al desarrollar el plan de cierre conceptual. Sin embargo, la idea de operaciones mineras sustentables contenida en el mismo reglamento las incluiría indirectamente, aunque en términos poco precisos.

Puesto que el D.S. N° 132/04 está orientado esencialmente en términos de seguridad de las faenas mineras, tarea que le compete al Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), es natural que esa institución desempeñe un rol central en materia de cierre de minas. Otros servicios o instituciones que tienen intereses y atribuciones importantes en la materia son CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente), los COREMA (Comisiones Regionales del Medio Ambiente), y la Dirección General de Aguas (DGA). En el caso de los COREMA, les corresponde analizar y autorizar el plan de cierre propuesto (considerado como un proyecto en sí mismo), y a la DGA fiscalizar el efecto de sus acciones en la calidad de las aguas. Otra participación de los COREMA puede ser ejercida a través de la evaluación de los EIA de los proyectos mineros (D.P. N° 95/01), los que deben, al menos, esbozar un futuro plan de cierre (pese a que la dinámica de los proyectos mineros hace muy difícil predecir la situación final).

Específicamente para los fines de la pequeña minería, SERNAGEOMIN ha elaborado guías para la planificación y ejecución de las acciones de cierre que siguen las prácticas normales en estos casos (retiro de instalaciones, cierre de accesos, estabilización de taludes, protección de depósitos de relaves, bloqueo de ingreso a labores subterráneas, uso de calizas para neutralizar aguas ácidas, etc.). Igualmente le corresponde a ese Servicio aprobar y fiscalizar lo propuesto por la empresa.

Al respecto, SERNAGEOMIN distingue entre cierre temporal (que implica la obligación a notificarlo a dicho servicio, así como de ejecutar un plan de cuidado y mantenimiento), cierre total, cuando involucra a toda la faena y cierre parcial, cuando implica a sólo parte de ella.

Por otra parte, la Corporación del Cobre de Chile, CODELCO, que controla y explota los grandes yacimientos de cobre porfirico de propiedad estatal, ha desarrollado su propia estrategia para enfrentar el cierre de sus operaciones. Ésta ya se está implementando en la mina de El Salvador, cuyas explotaciones de minerales oxidados y sulfurados cesarían (aunque en

minería nunca se sabe...) en los años 2010 y 2011, respectivamente. Como señalan Marshall y Domínguez (3: 207-210), las explotaciones mineras de CODELCO tienen un amplio rango de antigüedad, que llega hasta 105 y 110 años respectivamente, en Chuquicamata y El Teniente. Todas ellas se sitúan en ambiente cordillerano (El Teniente, Andina) o precordillerano (El Salvador – Potrerillos, Gabriela Mistral y el complejo CODELCO Norte, que incluye Chuquicamata y otras operaciones). Mientras las primeras se encuentran en Chile central, las segundas están en los territorios áridos del norte del país. La estrategia de CODELCO considera la relativamente escasa normativa existente: el reglamento de seguridad minera D.S. N° 132/04 y el de Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Presas de Relaves (Decreto Presidencial N° 248/06). Por otra parte, el Decreto Presidencial N° 95/01 completa las provisiones de la Ley 19.300 en cuanto a la necesidad de presentar el efecto del cierre de las operaciones como parte de la EIA de una nueva explotación minera. Aunque por su antigüedad las principales explotaciones de CODELCO no fueron objeto de un EIA previo, es posible considerar el cierre como un proyecto minero en sí mismo, y por lo tanto someterlo a evaluación como tal.

La estrategia de CODELCO descrita por Marshall y Domínguez consulta medidas a corto y mediano – largo plazo. Aparte del complemento de las normas existentes citadas y del reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos, CODELCO ha decidido incorporar las consideraciones relativas al cierre en todas las fases de sus operaciones, desde su etapa de diseño. Por otra parte, los planes de cierre de todas sus operaciones serán periódicamente revisados y actualizados. Esto y otras acciones complementarias, con el objeto de ir más allá del cumplimiento de las normas, de modo de asegurar tanto la seguridad como la salvaguardia del medio ambiente al enfrentar un cierre minero. En todo caso, los autores citados señalan que la mayoría de los expertos coinciden en la necesidad de que el país cuente con normas específicas más completas relativas al cierre de minas.

En un reciente seminario de capacitación sobre “Planes de Cierre de Faenas Mineras” (La Serena, 4/07/08), SERNAGEOMIN expuso las obligaciones derivadas del D.S. N° 72 de 1985, así como lo referente al Proyecto de Ley sobre Cierre de Faenas”, aplicable a faenas con capacidad de extracción superior a 5.000 t/mes. Dicho proyecto implica auditorías periódicas del plan de cierre (cada 5 años) por empresas externas, así como una garantía financiera de cumplimiento.

En cuanto al Reglamento de Seguridad Minera (D.S. N° 72) se entiende que su objetivo principal es la “prevención, minimización y/o control de los riesgos y efectos negativos que se generen o continúen presentándose con posterioridad al cese de las operaciones de una faena o instalación minera, sobre la salud y seguridad de las personas y/o sobre el medio ambiente”. Para facilitar su implementación SERNAGEOMIN elaboró una detallada Guía (19), elaborada sobre la base de las normas del D.S. 72, cuyo texto refundido y sistematizado fue incorporado al D.S. n° 132/04 del Ministerio de Minería. Tanto de lo expuesto en la Guía como de las explicaciones complementarias entregadas en el Seminario, se desprende que el énfasis de SERNAGEOMIN está en la seguridad y estabilidad física del sitio afectado por las explotaciones mineras.

Capítulo 12

Costes, Financiación y Garantías de los Planes de Cierre.

12.1

Costes y Financiación de los Cierres Mineros.

El Manual del ITGME (= IGME) (1: 305-316) presenta una descripción pormenorizada de la evaluación económica de los proyectos de restauración. Sin embargo, dicha descripción no incluye aspectos centrales (y de alto coste) de cierres mineros, como los referentes al drenaje ácido, y se presta más bien para situaciones simples, como el cierre de canteras.

Wilde (3: 383-391) resume las “lecciones del pasado” relativas al coste de cierres de minas y proyectos de restauración. En primer término, ellos dependen en alto grado de la ubicación del cierre y la vulnerabilidad ambiental de su entorno, de la edad de la explotación, los métodos mineros y metalúrgicos utilizados, los minerales explotados, las características de los desechos mineros y los costes laborales. En particular, problemas relativos a desechos generadores de acidez y aguas de minas pueden ser de larga y costosa solución. Por otra parte, también los aspectos socioeconómicos pueden implicar altos costes (en particular para el Estado, que debe hacer frente a los disturbios y compensaciones cuando la explotación minera representa la principal o única fuente de ingresos para una gran población, como en el cierre de grandes explotaciones carboníferas).

El autor citado divide su análisis en cuanto a los aspectos internos y al coste externo. Respecto a los primeros, señala los problemas que implican las explotaciones mineras iniciadas con anterioridad a la práctica de evaluaciones de impacto ambiental, cuyo diseño y operación careció de acciones de prevención y mitigación de impactos. Por otra parte, las antiguas tecnologías implicaban impactos ambientales que las modernas procuran minimizar. Al respecto, menciona el hecho de que en el Reino Unido (Gran Bretaña) aún se sufren los impactos ambientales de minas cerradas hace 150-200 años. Otro factor central es la química de la mena explotada, en particular el contenido de pirita (FeS_2), que favorece la producción de drenaje ácido, así como los efectos tóxicos de los metales pesados presentes en ella.

En materia del contexto externo, hay situaciones particularmente difíciles (y por lo tanto costosas), como el cierre de minas en el Ártico, al que podríamos agregar aquellos en topografías montañosas con alta pluviosidad, como Papúa – Nueva Guinea. También pueden representar costes muy altos los aspectos relativos a fragilidad social antes citados, en particular cuando la explotación había llegado a ser la única fuente de ingreso para una numerosa y económicamente aislada población. Una situación de este tipo es tratada por Loayza (2: 351-356), quien describe el efecto social del

cierre de las operaciones mineras de estaño en Catavi, Bolivia.

Wilde revisa finalmente varios cierres mineros, sus características y sus costes. Ellos incluyen una provisión equivalente a US\$ 40.8 M (millones) para enfrentar problemas de drenaje ácido posteriores al cierre de las operaciones de British Coal (que afectaba a unos 100 km lineales del drenaje superficial). A ello se agregan otros US\$746 M del sector público para la restauración y reconversión de terrenos (1.946 hectáreas) de anteriores explotaciones carboníferas, y otros costes menores. En el caso de Minera Alumbreira (Catamarca, Argentina), cuyo rajo abierto tiene unas 280 ha de superficie y 530 m de profundidad, se han provisto unos US\$30 M, que no incluyen el coste de la protección de los botaderos, una cifra que se estima con una incertidumbre de $\pm 50\%$. Otro sitio (no especificado por razones de confidencialidad) corresponde a una explotación de mineral de hierro a cielo abierto en Australia, que requiere el relleno de una serie de rajos, así como desmantelar una compleja infraestructura. El coste estimado (con $\pm 40\%$ de seguridad) se estima en este caso en US\$156 M, incluidos los de orden social.

Finalmente, el autor destaca que los costes del cierre tienen una alta dependencia de factores específicos, lo que hace muy difícil entregar cifras estimativas generales.

Por otra parte, la mejor manera de enfrentar la financiación de dichos costes es incorporarlos gradualmente a las operaciones mineras, en lugar de dejarlos para el final, cuando los recursos pueden ser muy insuficientes por diversas razones.

La necesidad de mantener un plan de cierre actualizado es resaltada por Peralta – Romero y Dagdelen (3: 393-404). Ello, porque la estimación realista de sus costes permite estimar las responsabilidades financieras que la empresa enfrentará al cerrar sus operaciones y que pueden llevar a su quiebra por la incapacidad de haber identificado y mitigado aquellas situaciones más costosas de remediar.

A lo anterior se agregan grandes diferencias en la manera de calcular o estimar los costes, y por lo tanto en las cifras que resultan. Los autores citados proponen una metodología de cálculo que permite modelar distintos escenarios, de manera de efectuar a tiempo los ajustes necesarios, para evitar posteriormente acciones de remediación de alto coste. La metodología propuesta parte con un "mapa de actividades", basado en las actividades más relevantes que han sido identificadas para los fines de cierre de la explotación. Cada actividad de cierre se compone a su vez de tareas individuales o procedimientos, relativos a cuatro categorías: 1) Movimiento de tierras; 2) Revegetación; 3) Manejo del drenaje; 4) Tratamiento de aguas, cada uno de ellos con su propio sistema de monitoreo. El "Mapa" se completa con una declaración de inventarios y con las actividades de movilización y desmovilización de equipos. El modelo computacional, que opera con los costes a través de un flujo de información lógico y estructurado, dispone de una interfase gráfica y de unas 50 hojas de trabajo.

Un procedimiento temprano de evaluación de los costes de cierre incorporados al diseño de rajos (= cortas) mineros abiertos, está descrito por Ramírez – Rodríguez y Rozgonyi (3: 357-363). La idea básica es que el diseño del rajo debe considerar no sólo la eficiencia económica operacional, sino también los costes que involucrará su posterior cierre. Naturalmente, la diferencia entre las circunstancias ambientales del sitio implica que este último factor presente un peso muy diferente en distintos contextos (de clima, drenaje, topografía, etc.).

12.2

Distribución de Costes del Cierre Durante la Operación.

El ejemplo de la Cía. Minera Río Tinto de Australia (RTCA) es reseñado por Grimshaw (3: 289-300), como ilustración de una empresa que incorpora las acciones de cierre y su coste desde la etapa de diseño de sus operaciones. Río Tinto desarrolla y opera un conjunto de minas de carbón, tanto subterráneas como a cielo abierto. La estimación temprana de dichos costes permite incluirlos (en sus aspectos sociales,

ambientales y económicos) en los estudios de factibilidad. Sin embargo, enfrenta la "paradoja" de evaluar el cierre de algo que aun no existe (excepto en cuanto a su contexto). En consecuencia se ha preferido incluirlo como parte del "plan de vida de la mina". Aparte de la ventaja de incluir esta materia en las evaluaciones de factibilidad económica de nuevos proyectos, se obtiene la posibilidad de estudiar las mejores soluciones técnicas para enfrentar los principales problemas que se visualicen.

Una aproximación similar, pero concerniente a la minería metálica, es descrita por Lang et al (3: 283-288), quienes señalan que la mejor "filosofía del cierre" consiste en manejar todas las operaciones con dicho cierre en la mente. Ello implica, entre otras cosas, contar con un sistema de gestión ambiental comprensivo, realizar un cuidadoso manejo de las aguas y optimizar las posibilidades y precauciones que implican las condiciones naturales del sitio. Lo anterior, agregado a un programa proactivo de relaciones con las partes interesadas (y las afectadas...) y un buen uso de la mejor ciencia y tecnología disponibles. Esto último, en materias como balance de aguas y materiales, geoquímica ambiental, hidrogeología e hidrología. Las proposiciones de Lang et al no sólo son económicamente lógicas, sino que constituyen la mejor manera de evitar daños que pueden llegar a ser irreparables, particularmente en lo referente a la generación de drenaje ácido. Se podría agregar que tal enfoque es necesario desde el diseño y evaluación del proyecto, lo que podría evitar la realización de explotaciones que terminan siendo un desastre para todos (como la reapertura de Summittville, en Colorado, E.E.U.U.).

El mismo tema es analizado también en un artículo de Morrey (2: 243-256), que sitúa los costes de cierre y restauración como los más significativos a través del ciclo de vida de la explotación, y que por lo tanto deben ser incluidos en el análisis de factibilidad del proyecto minero. El artículo señala también la oportunidad de reducir los costes del futuro cierre y restauración a través de su progresiva incorporación a las operaciones mineras en curso. También analiza las incertidumbres y

riesgos como factores que deben ser considerados en el diseño y en el manejo de los costes. En lo fundamental, el autor destaca que los componentes más costosos de un plan de cierre se refieren a la rehabilitación física del sitio, así como a la eliminación de los factores de mayor riesgo post-cierre (como el drenaje ácido). Al respecto, una planificación cuidadosa, el uso de tecnología adecuada y un buen diseño pueden reducirlos mucho, especialmente si las acciones de restauración requeridas se realizan preferentemente durante la etapa de operación del proyecto minero.

12.3

Planes de Cierre de Minas y Garantías Financieras.

Esta materia, junto a la referente a los plazos de responsabilidad post-cierre de las empresas son, seguramente, las más controvertidas en relación a la gestión del cierre de explotaciones mineras. Su tratamiento en esta sección está basado en un artículo de Anderson (2: 283-293).

En los conceptos de Anderson, las garantías o seguros financieros constituyen un instrumento económico "híbrido", en el sentido que su implementación debe ser complementada por otras medidas, como evaluaciones de impacto ambiental, inspecciones y fiscalización (incluidas penalidades por incumplimiento). Su objetivo es asegurar que los costes del cierre y restauración de explotaciones mineras será pagado directa o indirectamente por la empresa minera. Esos costes están destinados a asegurar la seguridad de las personas, la protección del ambiente y las futuras posibilidades de uso del sitio de la explotación y su entorno.

Existen diversos mecanismos para entregar esta seguridad financiera, incluidos los depósitos (bonds), fondos de seguridad (trust bonds), planes de seguridad (insurance plans) etc. Entre ellos, los planes de responsabilidad ambiental (environmental liability insurance plans) son provistos por pocos agentes financieros y entregan una cobertura muy limitada. También existen las garantías emitidas por la corporación

de la que depende la empresa en cuestión, que no son incluidas en el artículo de Anderson.

Los depósitos en forma de seguros (surety bonding) implican que un consorcio asegurador se hace responsable por los costes que conllevan los fallos en el logro de los objetivos del plan de cierre. Su objetivo es que tales costes sean pagados por un privado en lugar de serlo por el Estado (y en último término por los contribuyentes). Desde luego, la idea es que la suma comprometida por el seguro será invertida en restaurar el daño causado o en completar las actividades no realizadas. Por su parte, la entidad aseguradora puede exigir al asegurado que asuma un coste colateral, correspondiente a un porcentaje de la suma asegurada. Puesto que también la aseguradora puede fallar financieramente, esta debería considerar el mecanismo de los reaseguros (donde otras firmas comparten el riesgo). Por otra parte, la firma aseguradora debería tener un positivo interés en verificar que la empresa minera hace bien las cosas, lo cual es bueno para todos.

Depósitos en común (bond pools) tienen por objeto garantizar el pago de los gastos de cierre de pequeñas empresas, en el caso de que alguna del grupo (una especie de "mutual") sufra la quiebra u otro problema mayor. Esas asociaciones se forman voluntariamente y los nuevos miembros son aceptados (o rechazados) considerando sus antecedentes de cumplimiento y los riesgos que implican, tanto por dichos antecedentes como por la magnitud y complejidad de sus operaciones. En todo caso, estos riesgos implican pagos diferenciados (según su nivel) a la asociación que los respalda.

Auto depósito o pruebas financieras (self-bonding or financial tests) se basan en la evaluación de la "salud financiera" de la misma empresa y consisten en apartar una suma que puede ser depositada a interés para responder por sus obligaciones de cierre. Su riesgo radica en la posible quiebra de la empresa, cuya solidez debe ser evaluada cuidadosamente para aceptar esta forma de garantía.

En cualquier caso, es importante calcular la magnitud del seguro financiero sobre la base de los costes probables del plan de cierre, así como

revisar periódicamente la situación de la explotación. Esto último implica considerar muchos factores, como expansión de la vida de la mina debido al descubrimiento de nuevas reservas, cambios en los precios del producto y de los insumos de producción (en particular energía), cambios tecnológicos y reguladores, cambios en el estado financiero de la empresa, etc.

En la sección 11.1 reseñamos un artículo de Grounds et al (3: 619-629) que relata la liberación de una garantía después del cierre exitoso de una mina de oro en Australia. También un trabajo de Mc Kenzie et al (3: 365-374) describe un proceso de liberación progresiva de reducción de responsabilidades y recuperación de garantías financieras en Western Australia, proceso basado en el reconocimiento de éxitos en las operaciones de rehabilitación. Los autores citados exponen el caso como demostración de que el ente regulador “responde positivamente a las empresas mineras que presentan evidencias claras y utilizan herramientas de monitoreo de calidad respecto al cumplimiento de los criterios de rehabilitación”.

Capítulo 13

Seguimiento y Control de los Cierres Planificados

13.1

Metodologías de Seguimiento y Control.

Un artículo de Nichols y Latham (3: 789-801) considera la evaluación del éxito de las actividades de rehabilitación en ambientes semiáridos, difíciles de prever en su comportamiento, así como la importancia de esta materia en los criterios de finalización satisfactoria del cierre. En efecto, en estos ambientes (en los cuales se desarrolla parte importante de la minería chilena) es difícil prever el curso de la rehabilitación ecológica procurada, dado el riesgo de prolongadas sequías, incendios forestales, etc. En tales condiciones, la suerte de la vegetación implantada es dudosa, y con ella sus funciones de protección de la erosión de los

desechos mineros sólidos. Como señalan los autores, en áreas donde no se ha perturbado el ambiente, se encuentran importantes extensiones desprovistas de vegetación (en particular después de algunos años secos). Por lo tanto habría que pensar sobre por qué la vegetación implantada tendrá mejor suerte que la natural, que ha tenido mayor tiempo y mejores oportunidades (por ej., fracturas en las rocas con mayor humedad) para sobrevivir.

Edraki (3: 821-828) describe una metodología desarrollada en Australia para evaluar el éxito de la rehabilitación de sitios mineros. La metodología, basada en una gran base de datos de monitoreo ambiental correspondientes a varios sitios mineros rehabilitados, fue elaborada por el Centre for Mined Land Rehabilitation (CMLR) de la Universidad de Queensland. Se basa en el análisis de tendencias en el tiempo de la información monitoreada, relacionándola con el manejo ambiental post-cierre del sitio. En particular se considera la carga de contaminantes, ya sea en forma soluble o insoluble que sale del sitio, como una medida cuantitativa central de la rehabilitación realizada. En consecuencia, va más allá del enfoque común, centrado en la concentración (no en la cantidad) de los contaminantes monitoreados. La metodología propuesta es interesante, porque el efecto de los contaminantes depende más de la cantidad que llega al drenaje que de la concentración con la que lo hace. Por otra parte, el material en suspensión transportado por las aguas da una buena idea de la tasa de erosión que se produce. Sin embargo, queda fuera lo relativo a la erosión eólica de material particulado, que puede ser muy importante en zonas áridas o semiáridas. Por otra parte, en zonas semiáridas es común una cierta ciclicidad del clima (por ej., Ciclo ENOS entre el norte de Chile y Perú), lo cual debe ser considerado en el análisis de tendencias. En todo caso, la metodología propuesta es muy útil para el seguimiento de fenómenos como el drenaje ácido, una de las mayores fuentes de preocupación en la minería del oro y de los metales de base.

La evaluación post-cierre de la calidad del agua percolada desde una pila de lixiviación de oro agotada de la mina Landusky, Montana (E.E.U.U.) es descrita en un artículo de Shaw (3: 803-813). Puesto que el operador de la mina

quebró en 1995, la responsabilidad por el manejo del sitio fue asumida por el Montana Department of Environmental Quality (DEQ), usando fondos de garantía depositados por el operador. Muchas de las decisiones concernientes a la rehabilitación se basaron en predicciones geoquímicas y en el análisis del potencial contaminante del material agotado de la mayor pila de lixiviación. Ello, debido a que ese material había mostrado cierta tendencia a generar acidez lo que podía facilitar la lixiviación de metales pesados. En consecuencia, dicho material no fue utilizado para fines de relleno. En cambio fue dejado in situ sobre el revestimiento aislante y su evolución vigilada, lo que permitió estudiarla desde el cese de su operación, a través de los años de rehabilitación (2000-2002) y post-cierre (2003 en adelante, hasta 2010). Lo realizado ha sido importante para contrastar las predicciones con los resultados efectivos, lo cual puede ser útil para futuras tomas de decisión en otros proyectos de cierre. En cuanto a los resultados obtenidos, se confirmó la tendencia a generación de acidez y a la lixiviación de metales pesados. La predicción de concentración de estos últimos fueron acertadas en algunos casos y erróneas en otras (como en el caso del hierro, que alcanzó concentraciones muy superiores a las estimadas).

- Un artículo de Didier y Daupley (3: 179-190) describe el método normalmente utilizado en Francia para evaluar los riesgos potenciales subsistentes en sus antiguas explotaciones mineras (la mayoría de los sitios mineros de Francia están definitivamente cerrados). El método MRPP (plan de prevención de riesgos mineros) está centrado en la prevención de riesgos para fines de planificación urbana y construcción. Comprende cuatro etapas:
 - Recolección de información, basada en revisión de archivos y en visitas al terreno, así como en investigaciones suplementarias si se estima necesario.
 - Evaluación de peligros para localizar zonas que por distintas razones puedan presentar ese potencial y representarlas en mapas.
 - Evaluación de intereses presentes (por ej., establecimientos públicos) o futuros (proyectos de construcción) en las áreas de peligro. Igualmente se representan en un mapa.

- Definición reguladora de zonas homogéneas en términos de las prohibiciones, obligaciones o recomendaciones para el uso de tierras por los actuales y nuevos proyectos situados en ellas.

En la evaluación del riesgo, se considera tanto la magnitud del peligro (muy baja, baja, moderada, alta) como la probabilidad de que él se materialice (iguales calificaciones), las que cruzadas determinan riesgos bajos, moderados o altos.

Un riesgo de la etapa post-cierre que puede ser pasado por alto es la penetración de mineros artesanales de las localidades vecinas a las faenas cerradas. En países en desarrollo, esto es muy difícil de impedir y ciertamente implica un alto riesgo de accidentes, así como un deterioro de las obras de rehabilitación. Este tema es analizado en un trabajo de Reichardt y Reichardt (3: 145-152) que describe graves situaciones en varias operaciones de cierre en Africa.

En Chile hemos tenido experiencias de este tipo durante el cierre (posteriormente revertido) de las faenas auríferas de la compañía minera Dayton, en Andacollo. Por otra parte, puesto que estas situaciones involucran siempre un aspecto social y por lo tanto político, ello dificulta la acción de las autoridades. El resultado final puede implicar, aparte de graves accidentes para los mineros furtivos, el fracaso, al menos parcial, del cierre ejecutado.

13.2

El Problema de los Horizontes de Tiempo.

¿Cuánto tiempo se necesita seguir y monitorear los resultados de un cierre, para asegurarse de su conformidad y corregir las desviaciones observadas? ¿Cuánto tiempo se requiere para afirmar que un cierre ha sido exitoso? Desde luego no puede haber respuestas definidas para ninguna de las dos preguntas. Por una parte, ambas dependen de muchos factores que han sido considerados a lo largo de este curso: Tipo y magnitud del yacimiento, mineralogía, contexto litológico y estructural, métodos y tecnologías de explotación minera y beneficio metalúrgico, clima, altitud, topografía, posición en la red de

drenaje, relación con centros poblados y cultivos, fragilidad ecológica o ambiental, etc. Ello, sin contar la complejidad del ambiente humano, que puede presentar serios e interminables problemas.

Sin embargo, las empresas mineras requieren, en su situación contractual con el Estado, contar con cifras definidas en años, al cabo de las cuales, si el cierre ha sido razonablemente exitoso, puedan verse liberadas de ulteriores responsabilidades (y recuperar la correspondiente garantía financiera).

Existen, entonces, dos clases de plazos. Unos de naturaleza física o biológica, que pueden ser efectivamente muy largos y que necesariamente deberían ser asumidos por el Estado, como "guardián de la equidad intergeneracional". En Alemania, este tipo de plazos se ha situado en unos 500 años, lo que puede parecer muy exagerado en nuestro Continente. Sin embargo, obedece a razones geológico-geomorfológicas fundadas. Al respecto un artículo reciente (2008) de Gandy y Younger (20) describe la aplicación de un modelo predictivo a la capacidad de generación de drenaje ácido de una pila de estériles con piritita de la minería del carbón en el norte de Inglaterra, y concluye que ella puede durar varios siglos. En particular, la estabilidad física de los desechos mineros puede requerir un largo tiempo de evaluación, en especial si se trata de materiales finos en zonas áridas o semiáridas, sometidos a esporádicas precipitaciones torrenciales y a la acción erosiva del viento, sin el resguardo de una cubierta vegetal efectivamente sustentable.

Este tema fue analizado por Erskine et al (3: 211-216) respecto al criterio de finalización de la rehabilitación forestal de anteriores explotaciones mineras en Australia. Dichos autores señalan que "hay pocas esperanzas de que los sitios rehabilitados presenten composiciones florísticas similares a las de sitios no explotados dentro de unas pocas décadas" y que ello no debe sorprender, dado que los sitios de referencia "no han sido expuestos al grado de trastorno de un sitio antes explotado, donde un material altamente dispersivo, no consolidado y salino, cubierto por un suelo delgado, retarda y limita el reestablecimiento de vegetación".

En consecuencia puede ser razonable distinguir entre costes ambientales a corto (o mediano) y a largo plazo. Los primeros (desde años a 2 a 3 décadas) deberían ser asumidos por la empresa, a través de acciones de rehabilitación aseguradas mediante garantías financieras, mientras los últimos necesariamente tendrían que ser de cargo del Estado (y de las generaciones próximas). Correspondería a la etapa de evaluación de impactos ambientales del proyecto considerar seriamente esos costes ambientales y el valor monetario que implica su rehabilitación o manejo (por ej., el tratamiento permanente del drenaje ácido). De esa evaluación surgiría para la empresa o el Estado la conveniencia o no de realizar el proyecto. En cierto modo, países europeos como Francia y algunos estados de E.E.U.U. que en la práctica han renunciado a la minería metálica, han realizado una evaluación de ese tipo, que arrojó resultados negativos. Otros países en cambio, como Chile, necesitan y desean continuar realizando minería. Lo importante es que lo hagan con los ojos bien abiertos y una efectiva responsabilidad intergeneracional.

Capítulo 14

Reutilización de los Sitios e Instalaciones.

14.1

Aspectos a Considerar en la Reutilización de Sitios.

Como señala Skinner (17), la minería ocupa un espacio reducido de la superficie de la Tierra, y buena parte de ella se realiza en sitios que son inadecuados para otras actividades productivas. En ese sentido, se podría pensar que la reutilización de sitios de anteriores explotaciones mineras podría tener escaso interés, especialmente considerando sus posibles riesgos residuales. Sin embargo, hay razones importantes para considerar esa reutilización. En primer término, hay muchas labores mineras realizadas en terrenos que hoy se sitúan en áreas de alto valor económico. Este es un caso frecuente en Europa, donde la minería se situó cerca (o debajo) de las antiguas ciudades, y donde la tierra para habitar o cultivar

tiene una alta plusvalía. También lo es en antiguos distritos mineros de E.E.U.U., como Colorado, donde la belleza del paisaje ha favorecido la implantación de resorts turísticos de montaña así como de cabañas de “fin de semana”. El trabajo de Didier y Daupley reseñado en la sección 13.1 considera justamente la necesidad de asegurar la adecuación de los antiguos sitios mineros a los nuevos usos propuestos. Similar objetivo tiene la cartografía geoquímica polaca a distintas escalas, que se utiliza para asignar posibilidades de uso industrial, poblacional o agrícola a los suelos, considerando su grado de contaminación por metales pesados.

En Brasil, se ha desarrollado una metodología (Weber y Brandt, 3: 129-138) para asignar posibles usos a los sitios rehabilitados desde el punto de vista socioambiental. Los autores presentan una metodología enfocada en el desarrollo a largo término de la respectiva región, a través del impulso al desarrollo humano y ambiental, creando condiciones favorables a la paz social y a la inclusión de grupos culturales y étnicos diversos. La metodología consta de cinco etapas, a saber:

- Mapeo (= cartografía) de factores múltiples (ambientales, uso de la tierra, etc.) a escala 1:10.000, como base multidisciplinaria de diagnóstico.
- Análisis y discusión de la información obtenida, en términos del posible uso económico del territorio posterior al cierre de la explotación.
- Comparación de las distintas posibilidades de uso, desde el punto de vista de los costes que implica cada una de dichas posibilidades, así como de los beneficios que ellas implican.
- Presentación de las proposiciones a las partes interesadas para su evaluación.
- Refinamiento y modelación de los efectos de la (o las) soluciones seleccionada(s), con vistas a su maduración.

El trabajo completa su exposición con la descripción de varios casos. En uno de ellos (mina de hierro en Minas Gerais), se optó por destinar el sitio a proyectos comerciales y residenciales y en parte a hoteles y turismo ecológico, en otro (también una mina de hierro), a un proyecto ecoturístico, etc.

El Manual del ITGME (= IGME) (1:210) propone la consideración de los siguientes factores culturales geoambientales para evaluar futuros usos de los terrenos rehabilitados:

Culturales:

- Localización
- Accesibilidad
- Tamaño y forma
- Propiedad del terreno
- Limitaciones legales
- Características de la población
- Intereses de la empresa minera

Geoambientales:

- Relieve (topografía)
- Altitud y pendiente
- Drenaje
- Exposición al sol
- Temperatura y precipitaciones
- Características de los estériles
- Características de los suelos.

Desde luego habría que agregar a los primeros los factores de orden económico, y a los segundos, lo referente a los riesgos producto de las anteriores labores mineras (metales pesados, riesgos de subsidencia, etc.). El mismo Manual propone (p 201) una matriz de compatibilidad entre los distintos usos que se podrían asignar a diferentes sectores del sitio rehabilitado.

El riesgo de que el uso asignado al terreno rehabilitado sea equivocado y llegue a dañar la restauración realizada, fue analizado por Hattingh et al (3: 261-271), basados en experiencias de Sudáfrica. A modo de ejemplo, se cita la agricultura en condiciones de secano, que puede llevar a la erosión de los suelos rehabilitados. Los mismos autores proponen una aproximación probabilística para enfrentar este problema, el que, sin embargo, puede ser

afectado por la presión de factores socioeconómicos que se impongan a los criterios técnicos.

14.2

Principales Tipos de Reutilización de Sitios Rehabilitados.

Agrícola o Forestal: El uso agrícola de terrenos restaurados es uno de los más comunes, en particular cuando la explotación se situaba en terrenos originalmente destinados a tal uso. La opción es buena, a condición de que no implique riesgos de contaminación de los productos agrícolas ni efectos erosivos serios. Por otra parte, los suelos no deben ser ácidos (1: 205-206) y deben ser adecuadamente acondicionados con nutrientes y materia orgánica. La pendiente máxima para uso agrícola es 10 % (5°) y para pastizales 25 % (15°). Si ella es superior, se puede considerar un uso forestal (hasta 70 % o 35°). Si no se dispone de agua para riego (agricultura de secano), crecen los riesgos de erosión, puesto que es necesario roturar la tierra, sin que exista seguridad de suficiente lluvia. Una alternativa de cultivo en el caso de suelos ricos en metales pesados, es el de flores, practicado con éxito en Chile en el contaminado distrito de La Higuera, al norte de La Serena.

Un especial tipo de agricultura es el cultivo de hongos en galerías de minas abandonadas, que ha sido realizado con cierto éxito en las antiguas explotaciones carboníferas de la Región del Bío-Bío, Chile.

Urbanístico o Industrial: Para estos fines es necesario descartar riesgos relativos a la presencia de sustancias tóxicas, incluidos metales pesados como Pb, Cd y As (21), a fenómenos de remoción en masa, subsidencia y erosión, así como a problemas de drenaje (1: 202). Desde luego, la ubicación geográfica del sitio rehabilitado tiene especial importancia para este fin. Ella es muy atractiva, cuando el sitio se encuentra en el entorno de una ciudad o en un lugar apto para fines recreacionales (montaña, costa, etc.).

Recreativo, Deportivo o Educativo: Un sitio minero rehabilitado puede ser apto para estos usos, a condición de que no presente riesgos serios y sus características topográficas, geológicas, históricas, etc. le agreguen valor. Por ejemplo, puede ser interesante como "parque de aventuras", para moto o bicicross (= mountainbike), escaladas, etc. (1: 202-203). Lo importante es que exista equilibrio, de manera de no agregar mucho riesgo a dichas actividades recreativas.

Conservación de la Naturaleza y Refugio Ecológico: En los fondos oceánicos, los buques naufragados, los restos de plataformas petroleras, etc., se convierten en hábitat privilegiados para la flora y fauna marinas. Análogamente, un sitio minero rehabilitado puede constituirse en un valioso refugio para las cada vez más acorraladas flora y fauna silvestres. Desde luego, este uso requiere protección y es poco rentable (salvo a través del turismo). Sin embargo, constituye una buena manera de devolver algo a la naturaleza... después de haber extraído su riqueza mineral.

Turístico-histórico: La minería ha desempeñado un rol importante en la historia, y cuando se han conservado restos significativos de su actividad, ellos pueden constituir un valioso atractivo turístico, aparte de su mérito cultural. En la puesta en valor de estos atractivos se destacan países como Polonia y España. Al respecto, un artículo de Popielak y Zieba (3: 869-877) describe la mina subterránea de sal de Bochnia, en el sur de Polonia, que ha sido explotada continuamente entre 1248 y principios de la década de los '90. Esta mina, cuya pique central original es aún accesible y puede ser visitada por los turistas, cumple actualmente el rol de un museo, así como el de un spa y sanatorio para pacientes con enfermedades respiratorias. En términos económicos, sus actuales funciones contribuyen de modo importante a la economía local, dado que la mina atrae anualmente decenas de miles de turistas.

En España, donde la minería data desde antes de los tiempos del Imperio Romano, se ha conservado un rico patrimonio histórico, que incluye restos arqueológicos de dispositivos

hidráulicos, utilizados en la minería del oro aluvial. Estos y muchos otros museos de sitio no solamente enriquecen la historia del país, sino que generan ingresos importantes por concepto de turismo. Igual cosa ocurre en Francia, Alemania, Inglaterra, y otros países de Europa así como en E.E.U.U. y Canadá. En Chile, se han rescatado algunos sitios histórico-mineros, como Sewell, y algo se ha procurado salvar de las antiguas salitreras, que durante años fueron objeto de saqueo continuo. Igualmente se ha procurado resolver parte de la cesantía de la antigua zona carbonífera de Lota habilitando algunas labores para visitas turísticas. Sin embargo, distintos factores han limitado el éxito de estas iniciativas.

Depósitos de agua: En Nevada (E.E.U.U.) muchas cavidades correspondientes a explotaciones a cielo abierto se utilizan como depósitos de almacenamiento de aguas. Como señala el Manual del ITGME (= IGME) (1: 210), este tipo de uso puede servir a fines diversos: regulación hidráulica, riego, abastecimiento de agua, recarga de acuíferos, deporte, fines ornamentales, etc. Desde luego, ello requiere que el depósito no implique riesgos de contaminación del drenaje.

Depósitos de hidrocarburos: Su uso es más restringido pero puede ser importante en el caso de minas subterráneas de sal, que por la impermeabilidad y plasticidad de sus paredes ofrecen condiciones favorables para el almacenamiento de petróleo. (Este uso imita el rol de los domos de sal en los reservorios naturales de petróleo).

Vertederos y Depósitos de Seguridad: Un uso frecuente para excavaciones a cielo abierto cercanas a áreas urbanas e industriales es su uso en vertederos de estériles y basuras (1: 203-204). Naturalmente, ello requiere condiciones hidrogeológicas, climáticas, geográficas y topográficas propicias y puede exigir una previa impermeabilización de la cavidad.

Por otra parte, algunas minas subterráneas pueden ofrecer condiciones propicias para su uso como depósitos de seguridad de sustancias

peligrosas. Este tema ha sido estudiado por centros de investigación de Alemania, como la Universidad Técnica de Berlín. Por supuesto exige condiciones favorables en aspectos tales como la litología, estructura y mineralogía del lugar, siendo los aspectos hidrogeológicos y las estructuras presentes (fallas, diaclasas) de especial importancia.

Científico: Una explotación minera cerrada puede ofrecer notable interés científico. En E.E.U.U. existe un proyecto para convertir la gran mina subterránea de Urad – Henderson en un centro de investigaciones. Aparte de temas de frontera, como el estudio de penetración de partículas de origen cósmico como los neutrinos, una mina de esas características se presta para estudiar mecánica de sólidos, flujo térmico, comportamientos biológicos, etc. Al respecto, el complejo de El Indio (Coquimbo, Chile) podría ser un centro privilegiado para estudiar el proceso de generación de drenaje ácido y materias relacionadas.

Capítulo 15

Los Pasivos Mineros Abandonados

15.1

Consideraciones Generales Sobre el Problema.

Al igual que “el tema ambiental” y su influencia en la legislación y en la predicción y control de impactos sobre el medio, la preocupación por los efectos ambientales del cierre de minas data sólo de las últimas décadas del recién pasado siglo. Antes, existía una cierta idea de que la naturaleza absorbería paulatinamente los posibles efectos negativos de esa actividad, a los cuales tampoco se concedía mayor importancia. Un caso ilustrativo de esta mentalidad es la acumulación en la Bahía de Chañaral, de relaves procedentes de la explotación del pórfido cuprífero de El Salvador, los que eran transportados por el Río Salado. A lo largo de ese río se habían instalado una serie de faenas que recuperaban parte de los sulfuros transportados. Cuando la empresa minera decidió construir tranques de relaves, los

propietarios de las faenas de recuperación la demandaron ante la justicia, aduciendo un cierto "derecho de propiedad" sobre las aguas y sedimentos del río, y obtuvieron un fallo favorable. Finalmente, la situación se resolvió, pero ya entonces se había formado una especie de "yacimiento secundario" de cobre de decenas de Mt y ley cercana al 0.3%, constituido por un material endurecido, que eliminó toda forma de vida marina en y bajo su superficie. El autor de estas líneas, recorrió más de una vez la zona, y no observó mayor preocupación al respecto. En cambio, compartió con científicos extranjeros el interés por el proceso metalogénico artificial que estaba ocurriendo, y que presentaba cierta analogía con el origen natural atribuido a los grandes yacimientos sedimentarios de cobre del cinturón africano. Ello se explica porque la irrupción del tema ambiental constituyó un verdadero cambio de paradigma, que modificó rápida y radicalmente la visión de nuestra relación con la naturaleza. En consecuencia no cabe protestar por la irresponsabilidad que caracterizó esa época (que todos compartimos), sino encontrar soluciones prácticas a aquellos problemas efectivamente graves. Por lo tanto, es necesario evaluar para priorizar, así como buscar soluciones efectivas del menor coste posible, para resolver dichos problemas.

En Canadá (Tremblay y Hogan, 3: 43-52) existen más de 10.000 sitios mineros abandonados que requieren distintos grados de restauración. En el año 2002 se estableció la Nacional Orphaned/Abandoned Mines Initiative (NOAMI), que tiene la calidad de un programa cooperativo. En su dirección participan la industria minera, instancias federales, provinciales y locales de gobierno, organizaciones ambientalistas (ONGs) y representantes de los aborígenes canadienses. Su dirección, tiene el carácter de un comité consultivo y debe evaluar la importancia de los distintos aspectos implicados y establecer recomendaciones que guíen la colaboración y sus objetivos de remediación a través de todo el país. Un objetivo principal de NOAMI fue el desarrollo de capacidades para desarrollar un inventario compatible para cada provincia o territorio, vale decir una base de datos realizada conforme a criterios comunes de clasificación y jerarquización. Al respecto, la mayor dificultad estaba en la diversa manera de describir hechos

y peligros, así como en establecer qué peligros debían ser considerados en el inventario (situación complicada por la diversidad de agencias participantes, así como por la diversidad territorial y política de la nación canadiense. Al respecto se optó por un sistema de alto nivel disponible en la red (web) que incluye todos los sitios inactivos, provisto de una interfase de mapas y que actúa como un portal respecto a los inventarios locales y de las agencias. El Programa debió enfrentar algunas barreras legislativas respecto a la colaboración, así como la tarea de identificar posibles fuentes de financiación para los estudios y trabajos de restauración, generando manuales sobre ambos temas (como "Potential Funding Approaches for Orphaned/Abandoned Mines in Canada). También NOAMI se ocupa de la transferencia de tecnología respecto a limpieza y restauración de sitios. Considerando lo reciente de la iniciativa, el trabajo de Tremblay y Hogan se centra en las tareas de planificación y estructuración de esta vasta iniciativa y no incluye información respecto al avance concreto ya logrado en materia de rehabilitación de sitios mineros.

En cambio, el estudio de Nahir y David (3: 777-785) concierne a un programa más concreto, circunscrito a tres territorios del norte de Canadá, ejecutado por el "Northern Affairs Contaminated Sites Program" (CSP) del Gobierno de Canadá. El CSP ha inventariado unas 25 minas abandonadas en los territorios de Yukón, Northwest Territories y Nunavut. Las tierras públicas de esos territorios tienen carácter federal y son manejadas por el Departamento Federal de Asuntos Indios y del Norte. Las 25 minas abandonadas implican responsabilidades financieras por rehabilitación del orden de mil millones de dólares canadienses. Hasta la fecha, el CSP ha colocado 247 millones, sobre la base de una evaluación científica de los riesgos y su jerarquización, establecida por el Federal Contaminated Sites Action Plan. Por su parte, el Gobierno Federal anunció en el 2003 la financiación de un programa a 15 años, que implica una inversión del orden de 3.500 millones de dólares canadienses (cotizados en paridad con US\$). El sitio de mayor prioridad es el Giant Mine Project, situado en Yellowknife, Northwest Territories, a unos 5 km de la ciudad del mismo nombre. La mina explotó oro asociado a minerales ricos en

arsénico, y la metalurgia de la mena incluyó un proceso de tostación (análogo al utilizado por Cía. Minera El Indio en Chile), que llevó a la acumulación de 237.000 t de trióxido de As en labores subterráneas de la mina, entre 20 y 75 m bajo la superficie. Inicialmente se pensó que no existía mayor riesgo de percolación del compuesto, debido al sello que implicaba el permafrost en superficie. Sin embargo, éste se fundió progresivamente y el agua que percola de la explotación contiene unos 4.000 mg/L (siendo la norma para agua potable 0.025 mg/L). El sitio presenta también otros riesgos como contaminación difusa de arsénico, pérdidas desde depósitos de relaves, edificios contaminados con arsénico, asbesto, etc., así como 8 rajos (= cortas) abiertos y 35 accesos a labores subterráneas, que igualmente presentan peligros. El río Baker Creek fluye a través del sitio por un canal "acomodado para permitir las operaciones mineras y tanto sus aguas como sedimentos están contaminados con arsénico". Lo notable y preocupante es que esto ocurrió en un país desarrollado, que cuenta con ciencia y tecnología avanzada – no en un "país en desarrollo" y que la producción minera del sitio cesó hace sólo ocho años.

En cambio, el Gobierno de Canadá está colaborando con el de Perú (Canadian International Development Agency – CIDA – Ministerio de Energía y Minas de Perú – PMEM) a través del Programa PERCAN. Dicho programa busca priorizar las numerosas minas abandonadas en Perú conforme a criterios científicos de evaluación de riesgos respecto a su necesidad de medidas de rehabilitación y limpieza. El Programa utiliza información de un esfuerzo anterior (1995-2003) y realiza sus análisis a nivel de cuenca, considerando:

- Grado de desarrollo humano de los alrededores del sitio.
- Sensibilidad ambiental de la cuenca.
- Probabilidad de impactos por descargas históricas o actuales.

Lo anterior se enfoca en cada cuenca, analizando las posibles consecuencias de las actuales, o de futuras condiciones adversas, en la salud humana y en los componentes ecológicos más valiosos del ambiente.

Naturalmente se trata de un esfuerzo valioso y bien dirigido, pero que para ser exitoso en sus frutos deberá contar con fondos suficientes en la etapa de realizaciones concretas (lo que puede representar un paso difícil de dar en nuestros países en eterno desarrollo).

En suma, las explotaciones mineras abandonadas representan un muy costoso pasivo, que para la mayoría de los países será muy difícil de asumir. En término del tema de los planes de cierre, cabe esperar al menos que su éxito permita que no se conviertan a mediano o largo plazo en otros pasivos que se añadan a la ya larga lista.

15.2

Los Pasivos Ambientales Mineros en Chile: ¿Cómo Resolver al Menos los Casos más Graves?

A principios del año 2008, la prensa de la ciudad de Coquimbo informaba sobre un posible caso de cáncer en el vecino pueblo de La Higuera, situado unos 45 km al norte. La Higuera es un típico pueblo minero y el médico local relacionaba el caso diagnosticado con la posible presencia de asbesto en un depósito de relaves cercano a la residencia de la persona afectada. Cuando visitamos el sitio con el objeto de tomar algunas muestras para verificar lo señalado por el médico, nos encontramos con la sorpresa de que el depósito en cuestión se encontraba al frente, y a menos de 50 m del centro de salud local (una moderna y bien decorada construcción). Aunque no contamos aun con las determinaciones precisas, el material del relave presenta efectivamente fibras microscópicas y corresponde al tipo de mineralogía rica en actinolita, cuya alteración puede generar asbesto del tipo más peligroso. El punto es qué hacía ese relave en medio del pueblo y por qué se construyó un centro de salud frente a él, sin removerlo o cubrirlo previamente.

Cuando se llega a la ciudad de Andacollo, la vista desde el camino es impresionante: la gran basilica, las explotaciones mineras a cielo abierto, las pilas de lixiviación de Carmen y Dayton, y las casas del pueblo con los

numerosos restos de relaves y pilas de otros desechos mineros en medio de ellas. Sin duda, representa una atracción turística por la fusión entre pasado y presente y los cerros multicolores que rodean esta cuenca, situada a unos 1.000 m de altura. El problema es que Andacollo está a punto de ser declarada zona saturada por el polvo en suspensión y que es difícil convencer a los visitantes extranjeros de nuestra seriedad en materias de protección ambiental ante tal abundancia de desechos mineros en medio de una ciudad.

Al respecto, nos han explicado que se ha procurado mitigar el problema a través de iniciativas como vegetar esos desechos, pero que los propietarios de ellos se oponen, y cuentan con los derechos legales para hacerlo. Si ello es efectivo, habría que partir modificando la legislación. Parece de sentido común el que un desecho minero deba ser considerado como un residuo peligroso si se encuentra en el radio urbano, de modo que la responsabilidad por aislarlo o removerlo recaiga en el propietario. Por otra parte, son muchas las situaciones de descuido a este respecto presentes en distintas ciudades del norte de Chile, como para pensar en cambiar la actitud puramente legalista o modificar leyes equivocadas por otras de efectiva protección de la salud y la calidad de vida de las personas. En consecuencia, no hace falta un largo y sofisticado estudio para concluir que se debe partir por el problema de los desechos mineros en el radio urbano y que el aspecto legal debería ser resuelto en primer lugar.

Al priorizar entre los pasivos mineros situados fuera del radio urbano es importante considerar tanto sus posibles efectos contaminantes sobre el agua cómo sobre el aire. En el caso del agua, interesa en particular lo relativo a su flujo subterráneo, por la mayor dificultad de su monitoreo, así como por el consumo directo que de ella se hace en el medio rural. En cuanto al aire, es igualmente importante lo relativo al tamaño de las partículas como a su composición química y su estructura mineralógica (por ej., posible presencia de asbesto en relaves ricos en actinolita, mineral abundante en yacimientos de la Cordillera de la Costa del norte de Chile). Otras consideraciones pueden perfectamente ser adaptadas de las metodologías de priorización desarrolladas en Canadá y aplicadas

también en Perú (ver 15.1). Lo esencial en todo caso es pasar lo antes posible a la acción, simplificando los estudios, para hacerlos lo más prácticos que sea posible y privilegiando las acciones concretas que resuelvan, al menos, los problemas más serios. Ello, de modo realista y sustentable, vale decir, considerando el contexto de cada sitio.

Referencias

Nota: El presente Curso está basado sobre tres obras principales, correspondientes a las citas 1 a 3, cuya adquisición se recomienda para un estudio más detallado de las respectivas materias. Complementariamente, se citan otros trabajos, en parte correspondientes a los resultados obtenidos por el grupo de estudios geoquímica-ambientales integrado por investigadores de las Universidades Complutense y Rey Juan Carlos de Madrid, de Castilla – La Mancha (Escuela de Minas de Almadén), España y de La Serena, Chile, así como por tesis de la carrera Ingeniería Civil Ambiental de esta última Universidad.

1-ITGME (1989). Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 321.

2- Washurst, A. y Noronha, L. (2000). Environmental Policy in Mining. Corporate Strategy and Planning for Closure. Lewis Publishers, Boca Ratón, Florida, USA, 513 P.

3-Fourie, A., Tibbett, M. y Wiertz, J. Eds. (2007). Mine Closure 2007. Proceedings of the Second International Seminar on Mine Closure, Santiago, 16-19 Octubre 2007, 880 p.

4-Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J. y Maturana, H. (2004). Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio – Tambo district) vs. Geologic processes. *Journal of Geochemical Exploration* 84: 53-64.

5-Galleguillos, G., Oyarzún, J., Maturana, H. y Oyarzún, R. (2008). Retención de arsénico en embalses: caso del río Elqui, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23, 3: 29-36.

6- Oyarzún, J. (2003). Los riesgos de contaminar aguas con metales pesados. *Sustentare*, pp 1-4, en *Minería Chilena* 266.

7-Oyarzún, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H. e Higuera, P. (2007). Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion – contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile. *Environmental Geology*, 53: 283-294.

8-Guevara, S., Oyarzún, J. y Maturana, H. (2006). Geoquímica de las aguas del Río Elqui y de sus tributarios en el período 1975-1995: factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu y As. *Agricultura Técnica, Chile*, pp 57-69.

9-Kleinmann, B. y Booth, C., Eds. (2006). Special Issue N° 2, v 25 de *Mine Water and the Environment* (Springer) dedicado a la hidrología y drenaje ácido del área de Butte, Montana, USA, incluye 8 artículos, 69 p.

10-Blanco, R., Watson, R., Carvajal, A. y Chávez, M. (2004). Zonificación preliminar del área del Casco Urbano de Zaruma, según el grado de riesgo geodinámico, p 465 a 476 en *Actas I Semana Ibero-Americana de Ingeniería de Minas*. Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, 689 p.

11-Galleguillos, G. (2004). Efecto de la actividad minera y de las obras hidráulicas en la calidad de las aguas del Río Elqui y de sus afluentes. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, 247 p.

12-ITGME (1995). Contaminación y Depuración de Suelos. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid, 330 p.

13-Araya, F. (2005). Cuantificación y remediación de suelos contaminados del Distrito El Indio. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental, Universidad de La Serena, 150 p y anexos.

14-Molina, J., Oyarzún, R., Esbrí, J. e Higuera, P. (2006). Mercury accumulation in soils and plants in the Almadén district Spain, one of the most contaminated sites on Earth. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 487-498.

15-Aliste, N., Moraga, A. y Alvarez, L. (1966). Efectos del sismo de Marzo de 1965. Provincias de Aconcagua y Valparaíso. Instituto de Investigaciones Geológicas (actual SERNAGEOMIN) Boletín N° 20, 71 p y anexos.

16-de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid, 715 p.

17-Skinner, B.J. (1994). Mineral myopia pp 10-16, en: Maintaining Compatibility of Mining and the Environment Brimhall G. y Gustafson, L. Eds. Society of Economic Geologists, 72 p.

18-Oyarzún, J., Maturana, H., Paulo, A. y Pasieczna, A. (2003). Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean basin. *Mine Water and the Environment* 22: 155-161.

19-SERNAGEOMIN (2008). Guía para la presentación de Proyectos de Planes de Cierre de faenas mineras. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, 26 p.

20-Gandy, C. J. y Younger, P. L. (2008). Predicting long-term contamination potential of perched groundwater in a mine-waste heap using a random-walk method. *Hydrogeology Journal*, 16: 447-459.

21-Oyarzún, J. (2001). Algunos metales y metaloides con propiedades tóxicas o carcinogénicas: distribución natural y riesgos por contaminación en Chile. *Revista Chilena de Salud Pública* v 5; 2-3: 96-101.



El Potencial de Neutralización de Acidez de los Silicatos: Un Factor Subvalorado en la Evaluación del Drenaje Acido de Yacimientos Metálicos Sulfurados.

Jorge Oyarzún, Hugo Maturana y Ricardo Oyarzún

Depto. Ing. Minas, Universidad de La Serena y Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Chile.

Resumen

La hidrólisis de los silicatos y el H_2CO_3 son los principales controles del equilibrio básico-ácido en las aguas naturales, induciendo condiciones básicas y ácidas respectivamente. Sin embargo, la capacidad de los silicatos para neutralizar la acidez disminuye por efecto de la alteración hidrotermal y es anulada cuando ella alcanza los grados de argílica y argílica avanzada. La generación de drenaje ácido de rocas (DAR) es un factor clave a considerar en la evaluación y gestión ambiental de proyectos mineros, así como en los planes de cierre de yacimientos metálicos sulfurados. En consecuencia existe una abundante literatura sobre la evaluación, prevención y manejo del DAR. Sin embargo, en esa literatura el rol de los silicatos en de las rocas ígneas máficas e intermedias en la neutralización del DAR tiende a ser subvalorado. Probablemente ello se debe a que las reacciones entre los silicatos y los hidrogeniones son lentas y en consecuencia más difíciles de medir mediante las pruebas estáticas o dinámicas usadas en la evaluación del DAR.

Este trabajo presenta dos casos de la Región de Coquimbo, Chile norcentral, que ilustran el probable rol principal que jugaron las rocas intermedias a máficas en el control de la generación de DAR, que de otra manera pudo ser muy alta. El primero corresponde al yacimiento Río del Medio, situado 7 km al norte del depósito de El Indio, en un distrito minero que ha sido una fuente de drenaje ácido al menos desde hace 10 mil años. Sin embargo, las aguas de esa explotación presentaron débil acidez. El segundo caso compara el efecto del DAR en la dispersión de cobre desde los distritos

de El Indio y Los Pelambres. Aunque El Indio es un yacimiento entre uno y dos órdenes de magnitud menor que el pórfido cuprífero de Los Pelambres, los ríos Turbio y Elqui, sometidos a la contaminación procedente de El Indio, presentan más de 0.1% de Cu en sus sedimentos finos, unas 5 veces más que los presentes en los sedimentos finos del Río Choapa, que está bajo la influencia de Los Pelambres. Tanto en el caso de Río del Medio como de Los Pelambres, existen rocas andesíticas máficas cuya moderada alteración hidrotermal (propilítica, potásica) ha preservado su capacidad neutralizante, la cual está en gran parte agotada en el Distrito El Indio, debido a la alteración argílica y argílica avanzada dominante.

Introducción

La meteorización química desempeña roles relevantes en el Ciclo Geológico. En primer término permite una renovación constante del flujo de nutrientes a los suelos y aguas, el cual es esencial para los organismos vivos. En segundo lugar, la meteorización de silicatos y carbonatos implica la captura de CO_2 y, por lo tanto contribuye a regular el contenido atmosférico de este "gas invernadero" a largo término. Un tercer efecto es la captura de H^+ , lo que permite que la mayoría de las aguas naturales mantengan valores moderados de pH, a pesar del efecto de una atmósfera relativamente rica en CO_2 y de la actividad volcánica y hidrotermal generadoras de acidez.

El drenaje ácido ocurre normalmente cuando la capacidad natural de los silicatos y carbonatos

para neutralizar los H^+ en exceso es sobrepasada por el efecto de la meteorización de los minerales sulfurados, en particular de pirita (FeS_2). El drenaje ácido constituye un problema principal para la minería de metales pesados y metales preciosos ricos en pirita (14). Aunque su efecto puede afectar seriamente las operaciones mineras, como en el conocido caso de Summitville (Colorado), sus peores consecuencias generalmente aparecen después del cierre de dichas operaciones (1). Un caso extremo es el del distrito de Butte, Montana, donde en términos prácticos el drenaje ácido deberá ser controlado "por siempre" (5,8). En Chile, el bien planificado y ejecutado cierre de las faenas del distrito de Au-Cu-As de El Indio no ha conseguido, sin embargo, detener la generación de drenaje ácido (7). La evaluación de los riesgos de generación de DAR (13) se basa en general en determinaciones estequiométricas de las relaciones sulfuro /carbonato y en pruebas estáticas y dinámicas, pero se concede escasa atención a las asociaciones de minerales silicatados. El presente trabajo expone dos casos que ilustran la importancia que pueden tener dichas asociaciones, especialmente en la evaluación de los riesgos de DAR de nuevos proyectos mineros.

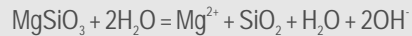
Meteorización de los silicatos y los sulfuros.

La meteorización de los silicatos puede ocurrir en ambiente ácido o neutro. En el primer caso, los silicatos neutralizan esa acidez a través de reacciones como:



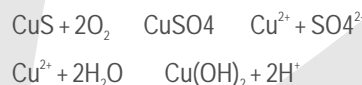
Esta reacción ocurre igualmente en el caso de los feldespatos, aunque en ese caso se forma también un mineral del grupo de las arcillas. Por otra parte, el número de H^+ neutralizados disminuye, de 4 por átomo de Si en la olivina, a 2 en los piroxenos y a sólo 1 por cada 3 átomos de Si en el feldespato sódico o potásico. En consecuencia, los silicatos ferromagnesianos poseen una capacidad neutralizante muy superior.

En un medio neutro, la misma reacción implica la liberación de un grupo OH^- y por lo tanto la solución pasa a ser alcalina:

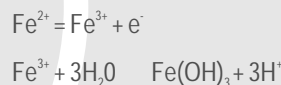


Respecto a la meteorización de los sulfuros (6), dos casos principales deben ser considerados. El primero corresponde a los sulfuros normales, en los cuales el número de átomos de azufre de sus moléculas corresponde a la relación estequiométrica considerando el número y valencia de los metales que la integran, como ocurre en FeS (pirrotina), $CuFeS_2$ (calcopirita) y MoS_2 (molibdenita). El segundo caso es el de pirita (FeS_2), cuya fórmula anormal (puesto que se trata de Fe^{2+} debería haber sólo un S) se explica porque átomos de S ocupan lugares cristalinos correspondiente a Fe.

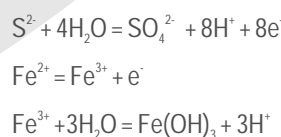
La meteorización por oxidación de los sulfuros normales no implica generación directa de acidez, aunque ella puede ocurrir como consecuencia de la hidrólisis producto del carácter metálico débil de sus metales:



En el caso del Fe, este efecto se magnifica debido al contraste entre su forma Fe^{2+} y la más oxidada Fe^{3+} , dado que la segunda presenta una electronegatividad marcadamente superior y se hidroliza rápidamente (como se observa en las vertientes de aguas ferruginosas):



En el caso de pirita, una primera y gran causa de generación de H^+ es la oxidación del sulfuro en presencia de agua del S suplementario de ese sulfuro:



En consecuencia, la oxidación e hidrólisis de una

sola molécula de FeS_2 puede entregar 11H^+ al medio acuoso.

Las propiedades amortiguadoras de acidez de las rocas ígneas y sedimentarias y los efectos de la alteración hidrotermal.

Las rocas ígneas están constituidas por silicatos, sílice y óxidos metálicos menores. Como se señaló antes, los silicatos desempeñan un rol principal en la neutralización de los hidrogeniones, y esa capacidad es mayor en el caso de los ferromagnesianos, en particular de los situados en la parte superior de la Serie de Bowen., como los piroxenos. Este hecho explica, por ejemplo, por qué los yacimientos tipo pórfido cuprífero emplazados en rocas volcánicas máficas (basaltos, andesitas basálticas) generalmente carecen de zonas sericiticas o ellas presentan un pobre desarrollo, dado que dichas zonas se forman en condiciones hidrotermales de mayor acidez, la cual es neutralizada por los minerales ferromagnesianos de esas rocas.

Los procesos de alteración hidrotermal implican reacciones que ocurren principalmente en el rango de $100^\circ\text{-}500^\circ\text{C}$. En términos de adición de H^+ , ellas pueden ser divididas en dos grupos. El primero incluye la alteración potásica, que no involucra metasomatismo de H^+ , y la alteración propilítica, donde la adición de H^+ es pequeña y fuerte en cambio la de Mg^{2+} , Na^+ y CO_3^{2-} , de manera que se forman minerales como clorita, carbonatos de Mg, Fe y Ca y albita (feldespato sódico) (12). El segundo grupo está formado por la alteración cuarzo-sericitica, la argílica y la argílica avanzada, en orden de creciente metasomatismo de H^+ . En consecuencia, las rocas afectadas por estos tipos de alteración, en especial por los dos últimos, pierden su capacidad original de neutralizar hidrogeniones. En el caso de la alteración argílica avanzada, la roca puede llegar a ser fuente de ellos, debido a la presencia de alunitas (que contienen sulfato de aluminio hidrolizable):

Feldespato + H^+ Me^+ , Me^{2+} + sericita + SiO_2 (Alteración cuarzo-sericitica)

Sericita + H^+ = Me^+ , Me^{2+} + arcilla + SiO_2 (Alteración argílica intermedia)

Arcilla + H^+ + SO_4^{2-} = Alunita + SiO_2 (Alteración argílica avanzada)

En consecuencia, una roca ígnea máfica o su equivalente piroclástico, como un basalto o andesita basáltica, afectada por alteración potásica o propilítica, retendrá una alta capacidad para neutralizar la acidez. En cambio la perderá en parte si sufre alteración sericitica y casi completamente en el caso de la alteración argílica, o peor aún, argílica avanzada. Por otra parte, si la roca tiene carácter félsico, sus capacidades como buffer serán limitadas y más fáciles de perder por efecto de la alteración hidrotermal del segundo tipo.

Respecto a las rocas sedimentarias, se presentan dos casos principales. El primero correspondiente a las rocas clásticas producto de los procesos de meteorización, erosión, depósito y litificación, cuya capacidad neutralizante es generalmente baja o muy baja, puesto que la perdieron durante los procesos de meteorización química. El segundo, totalmente opuesto, es el de las rocas carbonatadas como calizas y dolomitas y, en menor medida, de las margas o lutitas calcáreas, que poseen la capacidad de reaccionar y neutralizar rápidamente la acidez cuando se produce el contacto agua-roca.

En la evaluación del DAR (1) se reconoce ampliamente el importante rol neutralizador desempeñado por los carbonatos, pero en general se subvalora o se omite la capacidad de neutralización de las rocas máficas, probablemente debido a la cinética más lenta de sus reacciones, que dificulta su medición a través de tests. Sin embargo, la generación de DAR es igualmente un proceso lento y extendido en el tiempo, por lo que no debería ser excluida. Este argumento será sostenido a través del análisis de dos casos.

Río del Medio, en el Distrito de El Indio (11).

Río del Medio se localiza en $29^\circ 46' \text{ S} / 69^\circ 59' \text{ W}$,

7 km al norte de la mina de El Indio y 300 m al sur del río del mismo nombre, en las alturas andinas próximas al límite con Argentina. Su explotación minera se centró en cinco vetas masivas de cuarzo con Au y Ag, con piritas abundantes y sulfuros de Pb, Zn y Cu, cuya potencia va de 1 a 12 m y su corrida de 80 a 400 m. Las vetas cortan una secuencia de andesitas máficas N-S / 30°-40°W del miembro Escabros de la Formación volcánica Doña Ana (Terciario medio). Las andesitas están afectadas por alteración hidrotermal propilítica, que incluye clorita, calcita, esfeno, epidota y magnetita y da a las rocas un color verde grisáceo, que contrasta con otras rocas de los alrededores afectadas por alteración argílica, cuyo color va de amarillento a rojizo.

La mineralización está controlada por estructuras NE y E-W, probablemente relacionadas con fallas de rumbo NNW. El yacimiento está cortado por una falla central N25°E de 2-12 m de potencia, que lo conecta con el río, aumentando el riesgo de contaminación. Por otra parte, conforme al test ABA realizado (balance ácido-básico), las 24 muestras tomadas en la Mina entregaron una relación piritas-carbonato favorable a la generación de DAR. Sin embargo, los test de pH en pasta realizados en las mismas muestras, que presentaban distintos grados de alteración y oxidación, no entregaron reacción ácida. Más aún, las muestras de agua de la Mina dieron valores de pH comprendidos entre 5.5 y 6.5, que excluyen generación significativa de DAR. En contraste, aguas de vertientes de las cercanías, tomadas en rocas no mineralizadas afectadas por alteración argílica, dieron valores de pH entre 2 y 3, típicos de DAR. Los autores del informe citado (11) interpretaron la información reseñada en términos del rol amortiguador de la acidez desempeñado por las andesitas máficas con alteración propilítica, que albergan la mineralización sulfurada del yacimiento de Río del Medio.

Los distritos de El Indio (Au, Cu, As) y Los Pelambres (Cu-Mo) y su efecto en la contaminación por Cu de los ríos Elqui y Choapa.

El segundo caso que ilustra el rol de buffer desempeñado por las rocas ígneas máficas en la limitación del DAR corresponde a la comparación de la contaminación por Cu asociada a la presencia de ambos distritos en las cabeceras andinas de las cuencas de dos ríos principales de la Región de Coquimbo (18). El Indio se sitúa en el extremo NE de la cuenca del Río Elqui, en latitud 30°S mientras Los Pelambres lo hace en el extremo E, a pocos km del límite con Argentina y en latitud 31°46' S, central respecto a la cuenca del Río Choapa. El distrito de El Indio incluye varios depósitos epitermales, mayoritariamente vetiformes. Aunque su alteración hidrotermal varía entre propilítica (Río del Medio) y argílica avanzada (Tambo), en su conjunto se encuentran en una faja N-S de alteración argílica a argílica avanzada, con notables anomalías de color. En conjunto, el Distrito contó con reservas iniciales del orden de $nx10$ Mt, una cifra dos órdenes de magnitud menor que las 3.000 Mt de Los Pelambres. Sin embargo, Los Pelambres presenta una zona potásica central rodeada por alteración cuarzo-sericitica de las rocas intrusivas y por una gran zona de alteración propilítica desarrollada en andesitas máficas.

El Departamento Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena, en colaboración con investigadores de instituciones de España y Polonia, así como con el apoyo de la Dirección Regional de Aguas (Coquimbo), inició un programa de estudios geoquímicos en 1999. Su objetivo central fue investigar el efecto de los yacimientos minerales, las zonas de alteración hidrotermal y las operaciones mineras en la geoquímica de las tres cuencas hidrográficas de la Región de Coquimbo, vale decir las de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Los estudios partieron en la cuenca del Río Elqui, afectada principalmente por la presencia del distrito de El Indio y su faja de que incluye unas 30 zonas de alteraciones hidrotermales. Otra área minera importante de la cuenca es la del Distrito Talcuna, en Quebrada Marquesa, situada en el curso medio del Río Elqui, la cual muestra escasa influencia en los

contenidos metálicos de las aguas y sedimentos del río.

El distrito de El Indio (10) (29°46` S/ 69°59` W) cuyos principales depósitos son El Indio y Tambo, drena a través de los ríos Malo y Vacas Heladas, respectivamente, hacia el Río Toro, afluente del Río Turbio, que entrega sus aguas al Río Elqui. Como resultado de su paragénesis rica en enargita, así como de la amplia distribución de As en su zona de alteración, las aguas del Río Toro son ricas en As, Cu, así como en Zn (alrededor de 1mg/L de As y 10mg/L de Cu y 2mg/L de Zn) (15,18). El Río Toro tiene escaso caudal (0.5 a 1.0 m³/s) y su contribución metálica va experimentando sucesivas diluciones por efecto de la confluencia con ríos mayores y de bajo contenido metálico (Toro + La Laguna = Turbio; Turbio + Claro = Elqui). El Río La Laguna aporta 0.7-4.5 m³/s y el Río Claro 3.5 – 9.0 m³/s de aguas pobres en metales pesados. Sin embargo, el aporte del Río Toro es suficiente para enriquecer notablemente los contenidos de As, Cu y Zn de los sedimentos finos de los ríos Turbio. Debido a que Cu y en menor grado Zn requieren pH bajo para ser transportados en solución (4), cuando las aguas del Río Toro (pH 4-5) se unen a las del Río La Laguna (pH 7.5-8.5) se produce la transferencia de ambos metales del agua a los sedimentos finos. De esta manera el Cu, que alcanza unos 10mg/L en las aguas del Río Toro y 360 mg/kg en sus sedimentos (respectivamente 2 y 1 órdenes de magnitud sobre los promedios mundiales, 15, 23), pasa a una concentración de 0.5 a 1.0 mg/L en las aguas del Río Turbio y a 1.000-2.000 mg/L en sus sedimentos finos, producto del ascenso del pH a valores superiores a 7.0. Ello representa un elevadísimo contenido de cobre en los sedimentos respecto a cualquier estándar de comparación, sin que exista ninguna otra fuente del metal que la transferencia descrita. Al mismo tiempo, Zn cae de 2.0-2.2 mg/L en las aguas del Toro a 0.2-0.9 mg/L en las del Turbio, mientras su contenido en los sedimentos finos sube de 105 mg/kg a 305 y 610 mg/kg (las dos primeras muestras del Río Turbio). En cambio, As, que no está controlado por el pH de las aguas, disminuye gradualmente de unos 200 mg/kg en sedimentos finos del Río Toro, a 80-150 mg/kg en los del Turbio y a 130-30 mg/kg en los del Elqui.

Aunque la actividad minera de El Indio (1975-2000) contribuyó a incrementar la contaminación por Cu y As (9, 18), el efecto de la generación natural de DAR puede ser trazado al menos hasta unos 10 mil años atrás. En efecto, el análisis de un nivel sedimentario con materia orgánica y cristales de yeso presente en los restos de una terraza del curso superior del Río Turbio, entregó contenidos promedio de 3.950 mg/kg de Zn, 750 mg/kg de As y 700 mg/kg de Cu. Su edad obtenida por C14 es de 9.640 años y probablemente representa los sedimentos evaporíticos de un lago temporal, formado durante el deshielo de la última glaciación, y que ya recibía los aportes metálicos de la zona alterada y mineralizada (16). En consecuencia, un distrito metalífero de moderado tamaño, pero asociado a intenso fracturamiento y a una intensa y extensa alteración hidrotermal, puede ser causa de un caso mayor de contaminación del drenaje por DAR y As.

El Indio ejecutó su plan de cierre entre 2002 y el 2005. Durante ese período, un embalse de relaves fue adaptado exitosamente para abatir los contenidos de As. Sin embargo, no se ha logrado reducir ni la acidez ni el contenido de Cu del Río Toro. Por el contrario, en 2006 el pH de ese río bajó a 3.5 y el contenido de Cu subió a 10 mg/L, mostrando que la generación de DAR rico en Cu seguía activa, pese a los serios esfuerzos desplegados por el plan de cierre del distrito.

Un caso opuesto es el del yacimiento porfirico de Cu- Mo de Los Pelambres (31° 43` S/ 70°29` W, a 3.500 m de altura), cuyas reservas minerales sobrepasan los 3 mil Mt, vale decir son dos órdenes de magnitud superiores a las de El Indio. El yacimiento está asociado a una diorita cuarcifera parcialmente porfirica perteneciente a la unidad de edad miocena Infiernillo, vale decir la misma asociada al distrito de El indio. Esta roca se emplaza en la formación volcánico-sedimentaria cretácica Lo Pelambres (22). El fracturamiento es más bien moderado, así como la alteración hidrotermal (potásica, rodeada de un anillo de alteración cuarzo-sericitica en las rocas intrusivas y de una extensa alteración hidrotermal en las andesitas). Un pequeño río, Los Pelambres (comparable al río Malo del distrito El Indio) pasa por el centro del depósito y entrega sus aguas al Río Cuncumén, afluente del

principal río de la cuenca, el Choapa.

Tanto las aguas como los sedimentos del Río Cuncumén, así como aquellas del curso superior y medio del Río Choapa presentan sólo moderados contenidos de cobre. Así, Cu alcanza valores medios de 0.47 mg/L en las aguas del Río Cuncumén, 0.72 mg/L en el curso superior del Choapa y sólo 0.03 mg/L en su curso inferior (21) Respecto a los sedimentos (21), el contenido de Cu llega a 560-580 mg/kg en sedimentos del Río Cuncumén, pero todas las muestras de sedimentos finos del curso superior y medio del Río Choapa se sitúan entre 155 y 55 mg/L, los cuales son valores normales conforme a estándares nacionales e internacionales. Estos datos, procesados por Parra (op. Cit.), fueron obtenidos por la DGA (Dirección General de Aguas) durante el período 1980-2004, y los sedimentos fueron muestreados el 2005, vale decir durante la operación de la mina Los Pelambres.

Conclusiones

La evaluación del DAR es un factor clave al considerar los riesgos de impactos ambientales de proyectos mineros así como en la estimación de la efectividad y de los costos de los futuros planes de cierre de las actuales y las futuras operaciones mineras. Si las propiedades neutralizadoras de acidez de las rocas ígneas máficas no alteradas o alteradas por alteración potásica o propilítica (abundantes en la geología chilena y andina en general) no son tomadas en cuenta, los riesgos de drenaje ácido pueden ser sobreestimados, así como los respectivos costos. Por el contrario, rocas muy fracturadas, afectadas por alteración argílica avanzada pueden implicar un riesgo principal y un problema permanente de DAR y de contaminación por metales pesados, cuya movilidad es favorecida por éste, lo que se agrava cuando las operaciones mineras se sitúan en la cabecera de cuencas hidrográficas. Los dos casos presentados en este trabajo ilustran el uso de los criterios expuestos para: a) Discriminar entre diferentes condiciones de riesgo al interior de un mismo distrito b) Comparar riesgos entre dos distritos situados en contextos geológicos y geográficos similares,

pero que presentan diferentes condiciones de fracturamiento y alteración hidrotermal. El hecho de que un pórfido cuprífero rico en pirita, y extremadamente grande como Los Pelambres, haya producido escasa contaminación de su cuenca de drenaje, ilustra el peso de los factores discutidos en el presente trabajo.

Reconocimientos

Esta contribución se elaboró en el marco del proyecto CAMINAR, Comisión Europea, 6th Framework Programme, contrato N° INCO-CT2006-032539 (La información entregada es provista como tal, sin garantías de que ella sea adecuada para algún propósito en particular. En consecuencia, su usuario puede usarla a su propio riesgo y consecuencias. Este documento no representa las políticas o visiones oficiales de la Comisión Europea, su Parlamento o su Consejo.

La presente contribución fue presentada al Primer Seminario Internacional de Geología para la Industria Minera (Antofagasta, 10-12 de Junio 2009) y publicada en sus proceedings (Aracena, I., Holmgren, C. y Kuyvenhoven, R., eds.). Su organizador GECAMIN autorizó la reproducción de la contribución en esta publicación.

Acidity Neutralization Potential of Silicate Minerals: a Neglected Factor in Acid Drainage Assessment of Sulfide Metallic Deposits.

Jorge Oyarzun, Hugo Maturana, and Ricardo Oyarzún

Depto. Ing. Minas, Universidad de La Serena, Chile and Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Chile

Abstract

Silicate mineral hydrolysis and H_2CO_3 are the major controls of basic-acid equilibria in natural waters, inducing low and high H^+ activity respectively. However, the natural capacity of silicate minerals to neutralize acidity is hampered by advanced degrees of hydrothermal alteration, such as the argillic or advanced argillic types. Generation of acid rock drainage (ARD) is a key factor to consider in mining projects environmental assessment and management, as well as in the closure plans for metallic sulfide deposits. Therefore, an abundant literature exists on the assessment, prevention and treatment of ARD. In this literature, the role of the silicate minerals of intermediate to mafic igneous rocks in neutralizing ARD is generally downplayed. Probably, this is due to the fact that silicate minerals – hydrogen ions reaction rates are slow, and therefore more difficult to assess by the standard static or dynamic ARD tests.

This paper presents two cases in the Coquimbo Region, north-central Chile, illustrating a likely major role played by intermediate to mafic igneous rocks in controlling otherwise high rates of ARD generation. The first one corresponds to a deposit (Rio del Medio, 4 km north from El Indio mine) that produced very low rates of ARD at the interior of a district (El Indio) that has been a major source of acid drainage and Cu dispersion for at least 10,000 years. The second one compares the effect of ARD-related Cu dispersion in the sediments of the Turbio-Elqui and the Choapa rivers. Although the Los Pelambres porphyry copper deposit on the headwaters of the Choapa river basin is between one and two orders of magnitudes bigger than El

Indio, water and sediments under the influence of the Los Pelambres deposit present significantly lower copper contents than those of the Turbio and Elqui rivers affected by El Indio district. In both cases, mafic andesitic volcanic rocks presenting low H/Me hydrothermal alteration assemblages (propilitic in Rio del Medio; propilitic-sericitic-potassic in Los Pelambres) are dominant.

Therefore their host rocks have preserved its potential to react and neutralize ARD, preventing in the case of Los Pelambres a widespread copper pollution of the Choapa river water and sediments.

Introduction

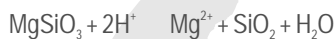
Chemical weathering is a relevant process of the geological cycle, which has several important roles. First, it guarantees a permanent renewal of nutrients flow to soils and waters, which are essential for living organisms. Second, silicate and carbonate minerals weathering involve capture of CO_2 and therefore, contribute to regulate the atmospheric contents of this greenhouse effect gas on the long term. Third, silicate and carbonate weathering also implicates a take up of H^+ , which helps to maintain moderate pH values in most natural waters, in spite of the acidifying effect of a CO_2 rich atmosphere and the volcanic and hydrothermal activity.

Acid drainage normally occurs when the natural capacity of silicate and carbonate minerals to neutralize the H^+ excess is locally surpassed by the weathering of sulphide minerals, in

particular pyrite (FeS_2). Acid drainage is a major liability for sulphide-rich base and precious metals mining. [14] Although their effect may hamper the mining operation (e.g. the Summitville case), its worst consequences normally arise after the closure of the districts. [1] A well-known case is that of the Butte district in Montana, where, in practical terms, acid drainage generation will need to be controlled *for ever*. [8] In Chile, the well planned and executed closure of El Indio Au-Cu-As district has not been able so far to stop acid drainage from the closed mine. [7] Assessing acid drainage risks [13] is general based on stoichiometric determination of the sulphide/carbonate minerals ratio and static or dynamic tests, but limited attention, if any, is given to the silicate minerals associations. This paper present two cases, illustrating the importance of the late factor and its consideration in assessing acid drainage risks of new mining projects.

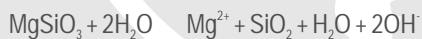
Weathering of silicate and sulphide minerals

Weathering of silicate mineral may proceed in acid or in neutral chemical media. In the first case, a neutralization of the acid solution occurs, which is represented by the following reaction:



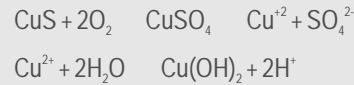
The reaction is similar for alumino-silicate minerals, but in this case, a clay mineral will be also formed.

In a neutral media, the reaction involves an OH^- release, and therefore, the solution becomes alkaline:



Regarding sulfide minerals weathering [6], two main cases should be addressed. The first one concerns *normal* sulfides, in which the number of sulphur atoms of their molecules corresponds to that of its metallic elements, such as CuS or CuFeS_2 . The second one is that of pyrite, where there are two sulphur atoms for only one Fe.

The weathering of *normal* sulfides involves no generation of acidity, except for the effect of the cation hydrolysis:



In the case of iron, this effect is enhanced by oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+} , due to the larger electronegative character of the Fe^{3+} iron:

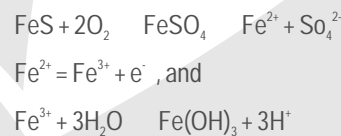


In the case of pyrite, a first and larger cause for H^+ generation is the oxidation and reaction with H_2O of one of the sulphur atoms of the FeS_2 molecule:



The H_2SO_4 is a strong acid and therefore, the principal responsible for water acidity.

Additionally, the rest of the FeS_2 molecule also experiment oxidation and more H^+ is produced by the hydrolysis of FeSO_4 :



The buffering properties of igneous and sedimentary rocks and the hydrothermal alteration effects.

Igneous rocks are made up of silicate minerals, quartz, and minor oxides. As stated in the previous section, silicates play a major role in neutralizing hydrogen ions, and this property is greater for mafic silicates of the higher part of the Bowen series, like pyroxenes. This fact explains, for instance, why porphyry copper deposits emplaced in mafic volcanic rocks generally lacks- or have a poorly developed- quartz-sericitic hydrothermal alteration zone, which demands a higher hydrogenion activity. The reason for the enhanced buffering properties of these silicates lies both on their high metal to silicate ratio (2:1 in olivine, 1:1 in

pyroxene) and their thermodynamic instability regarding low-temperature alteration processes (being high temperature minerals).

Hydrothermal alteration processes involve water-rock reactions occurring mainly in the range of 100° C – 500° C. In terms of H⁺ addition, they can be divided in two groups. A first one includes the potassic alteration, that involves no H⁺ metasomatism and the propylitic assemblage, where H⁺ addition is small, but that of Mg²⁺ and Na⁺ may be strong, *resulting in replacement of even alkali feldspars by chlorite or magnesium and iron carbonate or by soda-rich alkali feldspars*. [12] A second group is formed by the sericitic, intermediate argillic and advanced argillic assemblages, named in growing order of H⁺ take up, and therefore of progressive decrease of the capacity of the silicate minerals to neutralize acidity (which is null or negative in the case of the later one):

Feldspar + H⁺ Me⁺, Me²⁺ + sericite + SiO₂ (sericitic)

Sericite + H⁺ Me⁺, Me²⁺ + clay mineral + SiO₂ (argillic)

Clay mineral + H⁺ + SO₄²⁻ alunite + SiO₂ (advanced argillic)

Therefore, a mafic igneous rock (or its pyroclastic equivalent), like a basalt or basaltic andesite affected by potassic or propylitic alteration, will retain a high capacity to neutralize acidity, but will progressively lose it as a consequence of sericitic and argillic ones. In the opposite side, a felsic igneous rock presents lower buffering properties, which will be easily cancelled by the same alteration processes.

Regarding sedimentary rocks, two cases should be considered. A first one corresponds to clastic rocks, resulting from weathering, sediment transport, deposition, and lithification. Normally, these rocks have a small or null buffering capacity, as they are commonly formed by minerals like clays and quartz, which are the weathering products of one or more geological cycles. A second, opposite case, is that of carbonate sediments, like limestones or dolostone, which easily react and neutralize H⁺ and involves no risk of acid drainage when they are the best host rock of sulphide rich ore deposits.

In assessing acid drainage risks [1], the importance of carbonate rocks is widely recognized, but the capacity of mafic silicate minerals is generally overlooked. This fact is probably due to the experimental difficulties to include this factor in the static or dynamic laboratory tests, due to its slower reaction rates. However, acid drainage generation rates are also slow, and such an important process as silicate-H⁺ reaction should not be excluded of acid drainage assessment. This argument will be sustained by the following two case analyses.

Río del Medio mine, in the El Indio District. [11]

Río del Medio, in the Andean heights, at 29°46' S / 69°59' W, is located some 7 km NNE of El Indio Au-Cu-As deposit and 300 m south of the Río del Medio river. The mining operations of this deposit were focused on five Au-Ag massive quartz veins 1-12 m wide and 80-400 m in strike, with minor Pb, Zn, and Cu sulfides, arranged in a fan shape, opened to the NW and covering 4 hectares. The mineralization [3], which includes abundant pyrite, is hosted by a N-S/30°- 40° W unit of the Escabroso member of the Doña Ana middle Tertiary volcanic formation. In the Río del Medio deposit area, these rocks are mafic andesites, affected by propylitic hydrothermal alteration, presenting chlorite, calcite, esphene, epidote, and magnetite, and exhibiting a gray-green color. They contrast with other rocks units surrounding this sector, which present yellow to reddish colors, typical of phyllic hydrothermal alteration zones.

The mineralization is controlled by NE and E-W structures, probably related to strike-slip NNW faults. The deposit is affected by a central 2-12 m wide fault (Río del Medio) that connects it to the river, enhancing the risk of acid drainage pollution. Besides, according to the performed ABA test (acid-basic balance), all the 24 mine samples had a pyrite/carbonate ratio favourable for acid drainage generation. However, the pH in paste tests performed on the same mine samples, which presented different degrees of alteration and oxidation, were not indicative of acid reaction. Moreover, the field determination

of pH in the mine water produced values in the 5.5-6.5 range, which excluded acid drainage activity. In contrast, spring water from neighbour, non-mineralized but hydrothermally altered (argillic) zones, produced pH values of 2-3, that is, typical of acid drainage. The authors of the report [11] interpreted the results obtained in terms of the buffering role accomplished by the propylitic mafic andesites hosting the Au-Ag-(Pb, Zn sulfides) in the Río del Medio deposit.

El Indio (Au, Cu, As) and Los Pelambres (Cu-Mo) districts and their footprints in the Cu-pollution of the Elqui and Choapa drainage.

The second case sustaining the important role played by mafic igneous rocks in limiting generation of acid drainage involve the comparison of Cu-pollution related to El Indio and Los Pelambres districts. [18] Both districts are emplaced at the head of their respective watersheds: El Indio at the Elqui basin at 30° S and Los Pelambres at the Choapa basin, at 31°46' S. El Indio district includes a number of epithermal vein deposits ranging between the sericitic (El Indio) and advanced argillic types (El Tambo) in terms of hydrothermal alteration. The whole district had reserves before mining in the order of $n \times 10$ Mt, a figure two orders of magnitude lower than the 3000 Mt of Cu reserves of Los Pelambres. However, the El Indio district is related to a large N-S hydrothermal alteration zone, presenting advanced argillic alteration assemblages, with kaolinite, alunite, and silica jaspers. In contrast, Los Pelambres has a central potassic alteration core, surrounded by quartz-sericitic alteration of the intrusive rocks and a large propylitic zone developed in mafic andesites.

The Mining Eng. Dept. of the University of La Serena, with the collaboration of several researchers from universities of Spain and Poland, began in 1999 an environmental geochemical research programme. The aim of this research, also supported by the regional branch of the Chilean water authority (DGA), was to establish and understand the geochemistry of the three drainage basins of the Coquimbo Region, from N to S, those of the

Elqui, Limarí and Choapa valleys. Naturally, the effects of the ore deposits, hydrothermal alteration zones and mining operation were a major target of this research. The studies began at the Elqui basin, submitted to the major influence of the El Indio district, located on a large N-S belt of hydrothermal alteration zones. Another mining area, Quebrada Marquesa, in the middle course of the Elqui river, presented little if any influence on the metallic (Cu, As, Zn) contents of the water and sediments of this river.

El Indio Au-Cu-(Ag)-As district [10] (29°46' S / 69°59' W; 3500-400 m) gathers a number of vein type deposits, being El Indio the major one, followed by Tambo and smaller deposits, like the already mentioned Río del Medio. Their host rocks present different types of hydrothermal alteration, which is advanced argillic at Tambo, sericitic at El Indio, and propylitic at Río del Medio. Besides, more than 30 hydrothermal alteration zones are displayed on the N-S belt that encloses the ore deposits, several of these zones of the advanced argillic type. El Indio district drains to the Malo and Vacas Heladas rivers, both affluents to the Toro River. As expected from the enargite-rich mineralogy of El Indio deposit and the widespread As distribution, the water of the Toro River is rich in As, about 1 ppm (mg/l). Also, Cu attains a high content, averaging 10 ppm and Zn is about 2 ppm. [15, 18]. The Toro river has a small discharge (0.5 to 1 m³/s) and the water that contributes experiment the effect of a number of confluences (Toro + La Laguna Turbio; Turbio + Claro Elqui). Both La Laguna and the Claro rivers present normal to low metallic contents but an important discharge (0.7 to 4.5 m³/s, La Laguna; 3.5-9 m³/s, Claro River) and therefore play an important effect of dilution. However, the metallic input of the Toro River is large enough to produce remarkably high Cu, As, and Zn contents in the Turbio and Elqui river pelitic sediments. For Cu and Zn, the transference from water to sediments is controlled by pH. [4] Thus, Cu attains about 10 ppm in water and 360 ppm (mg/kg) in sediments of the Toro River, figures that are, respectively, 2 and 1 order of magnitude above World's averages [15,23]. When the Toro waters (pH 4-5) mix with those of La Laguna River (pH 7.5-8.5), Cu is transferred to the sediments, attaining 1000 to 2000 ppm in the Turbio river and the upper part of the Elqui

course. Meanwhile, Cu water contents drop to 0.5-1.0 ppm. No other known Cu source is responsible for this extreme case of Cu pollution. In the meantime As steadily decrease in the sediments from some 200 ppm (Toro river) to 80-150 ppm (Turbio river) and 130-30 ppm (Elqui river). The case for Zn is parallel although subtler than that of Cu. It attains an average 2.0-2.2 ppm in water of the Toro rivers and 105 ppm in its sediments. After mixing with La Laguna, its water contents drop to 0.2-0.9 ppm and increase in the sediments to 369 and 610 ppm (first two sampling stations of the Turbio river). Then, it decreases steadily, attaining only 170-160 ppm in the sediments of the lower course of the Elqui river.

Although mining operations at El Indio district (1975-2000) contributed to increase Cu and As drainage pollution [9, 18], the activity of acid drainage processes can be traced at least to 10,000 years ago. In fact, the analysis of relict terrace sediments at the upper part of the Turbio river, dated at 9,640 years B.P. and probably deposited during a temporary embankment of the river, present high average contents of Zn (3,950 ppm), As (750 ppm) and Cu (700 ppm), as well as abundant gypsum crystals. [16]

In consequence, a rather small ($n^{\circ}10$ Mt) Au-(Ag)-Cu-As district, but related to highly fractured [20] and hydrothermally altered host rocks, has been responsible for a major case of Cu and As pollution.

El Indio developed its closure plan between 2002 and 2005. During this period, a tailing dam was successfully adapted for As abatement. However, no decrease in Cu content nor in acidity of the Toro river water was registered. On the contrary, Cu surpassed 10 ppm and pH decreased to 3.5 in 2006, implying that Cu-rich, acid drainage was fully active, in spite of the serious efforts of the El Indio mine closure plan. [7]

An opposite case is that of Los Pelambres Cu(Mo) porphyry copper deposit (31°43' S/70°29' W) [2] which has Cu(Mo) ore reserves for 3,000 Mt, that is two order of magnitude

those of El Indio. Los Pelambres is also located at the Andean heights, at 3,500 m altitude. The deposit is hosted by a quartz diorite belonging to the Infiernillo Miocene unit (the same unit responsible for the El Indio district). The partly porphyric quartz diorite is emplaced in the Cretacic Los Pelambres volcanic-sedimentary formations. [22] Fracturing is rather moderate at Los Pelambres, as well as hydrothermal alteration (potassic, surrounded by a ring of quartz-sericitic alteration in the intrusive rocks, and propylitic alteration in the andesites). A small river, Los Pelambres, flows through the central part of the deposit and contribute to the Cuncumen river, a tributary to the main Choapa River.

Both water and sediments samples of the Cuncumen River, as well as those of the upper and middle course of the Choapa River present only moderate average Cu contents. Cu in water averages 0.474 ppm in the Cuncumen River; 0.72 ppm in the upper course, and 0.030 ppm for the middle course of the Choapa River. [21] Concerning drainage sediments [21], Cu attains 560-580 ppm in the Cuncumen river, but all sediment samples of the upper and middle course of the Choapa river presented Cu contents between 155 and 55 ppm, which are rather normal values according to Chilean or World's averages for river sediments. The data processed by Parra (op. cit.) was obtained by the DGA (Chilean Water Authority) during the 1980-2004 period, and the sediments were sampled in year 2005, that is, during the operation of the Los Pelambres mine.

Conclusions

Acid drainage generation is a key factor in assessing the environmental impact of mining projects as well as in the estimation of future cost and effectiveness of closure plans of current and new mining operations. If the buffering properties of mafic igneous rocks affected by propylitic alteration (which are widespread in the Chilean and Andean geology) is neglected, acid drainage assessment risks may be overestimated, and therefore the costs and focus of its control. On the contrary, highly fractured rocks affected by advanced argillic

alteration could implicate a major and permanent problem in terms of acid drainage, especially when located at the headwaters of river basins. The two cases presented in this paper illustrate how this simple principle may be used a) to discriminate different risks condition at the interior of a district; b) to compare risks between two districts located at similar geological and geographical contexts, but displaying opposite fracturing and hydrothermal alteration conditions. The fact that a pyrite-rich extremely large porphyry copper deposit like Los Pelambres had produced a so moderate Cu pollution of its drainage basin stresses the importance of the factors discussed in this paper.

Aknowledgements

This contribution is presented in the frame of the CAMINAR Project, European Commission, 6th Framework Programme, contract number INCO-CT2006-032539 (The information in this document is provided as it is and no guarantee or warranty is given that the information is fit for any particular purpose. The user thereof uses the information at its sole risk and liability. This document does not represent the official policy or views of the European Commission, Parliament or Council).

This work was presented to the First Seminar of Geology Applied to the Mining Industry (Antofagasta, June 10-12, 2009) and published on its proceedings (Aracena, I., Holmgren, C., and Kuyvenhoven, R., eds.). Its organizer, GECAMIN authorized the reproduction of the contribution on the current publication.

Referencias

References

- Adams, R., Ahlfeld, D. and Sengupta, A. (2007). *Investigating the potential for ongoing pollution from an abandoned pyrite mine*. *Mine Water and the Environment* 26, 1: 2-13. [1]

- Atkinson, W.W., Souviron, A., Vehrs, T.I., and Faunes, A. (1996). *Geology and mineral zoning of the Los Pelambres porphyry copper deposit, Chile*. In Camus et al. (Eds), *Society of Economic Geologists Special Publ. 5*: 131-155. [2]

- Bonilla, S. (1991). *Informe geológico yacimiento Río del Medio, Distrito Minero El Indio*. Compañía Minera San José Ltda., informe inédito, 30 p. [3]

- Brooks, D.G. (1988). *Eh-pH Diagrams for Geochemistry*. Springer Verlag, Berlin, 176 p. [4]

- Diamond, J. (2005). *Collapse*. Viking, New York, 575 p. [5]

- Fleet, M.E. Ed. (1984). *Short Course in Environmental Geochemistry*. Mineralogical Assoc. Canada. London (Ontario), 306 p. [6]

- Galleguillos, G., Oyarzún, J., Maturana, H and Oyarzún, R. (2008). *Retención de arsénico en embalses: El caso del río Elqui, Chile*. *Ingeniería Hidráulica en México*, 23, 3: 29-36. [7]

- Gammon, C. Ed. (2006). *Special Issue of Mine Water and the Environment*, 25, 2: 70-129 on the Berkeley Pit, Butte, Montana. [8]

- Guevara, S., Oyarzún, J., and Maturana, H. (2006). "Geoquímica de las aguas del río Elqui y de sus tributarios en el periodo 1975-1995. Factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu, y As". *Agricultura Técnica* 66, 1: 57-69. [9]

- Jannas, R., Bowers, T.S., Petersen, U., and Beane, R.E. (1999). *High sulfidation deposit types in the El Indio district, Chile*. In Skinner, B.J. (Ed). *Society of Economic Geologists Spec. Publ. 7*: 219-266. [10]

- Maturana, H., Oyarzún, J., Valencia, W. (1995). *Estimación del potencial de drenaje ácido de la Mina Río del Medio y sus desmontes*. Unpublished report of the Mining Eng. Dept., Universidad de La Serena, to Cia. Minera El Indio. 50 p. plus Anexes. [11]

- Meywer, C., and Hemley, J. (1967). *Wall rock alteration*. In Barnes, H. (Ed.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Holt, Rinehart and Winston, New York, pp: 166-235. [12]

- Mitchell, P. (2000). *Prediction, prevention, control and treatment of acid rock drainage*. In Warhurst, A. and Noronha, L. (Eds). *Environmental Policy in Mining: Corporate Strategy and Planning for Closure*. Lewis Publ., Florida, pp. 117-143. [13]

- Modis, K. and Komnitsas, K. (2007). *Optimum sampling density for the prediction of acid mine drainage in an underground sulphide mine*. *Mine Water and the Environment* 26, 4: 237-242. [14]

- Oyarzún, J., Maturana, H., Paulo, A., and Pasieczna, A. (2003). *Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean basin*. *Mine Water and the Environment* 22: 155-161. [15] Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P.

- Oyarzún, J., and Maturana, H. (2004). *Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: Industrial (gold mining at El Indio-Tambo district) vs. geologic processes*. *Journal of Geochemical Exploration* 84: 53-64. [16]

- Oyarzún, R., Guevara, S., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., and Higuera, P. (2006). *The As-contaminated Elqui river basin: A long lasting perspective (1975-1995) covering the initiation and development of Au-Cu-As mining in the high Andes of Northern Chile*. *Environmental Geochemistry and Health* 28, 5: 431-443. [17]

- Oyarzún, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., and Higuera, P. (2007). *The As-contaminated Elqui river basin: A long lasting perspective (1975-1995) covering the initiation and development of Au-Cu-As mining in the high Andes of Northern Chile*. *Environmental Geochemistry and Health* 28, 5: 431-443. [18]

- Oyarzún, R., Oyarzún, J., Lillo, J., Maturana, H., and Higuera, P. (2007). *Mineral deposits and Cu-Zn-As dispersion-contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo Region, Chile*. *Environmental Geology* 53: 283-294. [19]
- Oyarzún, R., Lillo, J., Oyarzún, J., and Higuera, P. (2007). *Plate interactions, evolving magmatic styles, and inheritance of structural paths: Development of the gold-rich, Miocene El Indio epithermal belt, North Chile*. *International Geology Review* 49, 9: 844-853. [20]
- Parra, A. (2006). *Influencia de la actividad minera en la calidad de las aguas del río Choapa y de sus afluentes*. Memoria de Título Ing. Civil Ambiental, Universidad de La Serena, pp. 191 and annex. [21]
- Rivano, S., and Sepúlveda, P. (1991). *Hoja Illapel, Región de Coquimbo*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, 132 p. and a 1:250.000 geological map. [22]
- Sparks, D.L. (1995). *Environmental Soil Chemistry*. Academia Press, New York, 267 p. [23]

Léxico de geología económica*

Jorge Oyarzún M., Geol. Dr. Sc.
Universidad de La Serena (Chile)



Antigua mina a cielo abierto de Parys Mountain (Pb-Zn-Cu) en Gales. <http://www.cemaes-bay.co.uk/attractions/parysmountain.htm>



* Nota del Autor

La Geología Económica implica una especial complejidad por la amalgama de conceptos científicos, tecnológicos y económicos que ella implica. De ahí los diversos enfoques con que ha sido abordada, que van desde los estrictamente científicos: *ore petrology* o en español: *petrología de menas*, que considera las menas como un caso especial de rocas, hasta los de geología económica propiamente tal, pasando por el enfoque intermedio de depósitos minerales. Este léxico está orientado hacia el enfoque intermedio, vale decir, el entendimiento de los depósitos minerales como tales. Esto es, en términos de su naturaleza y origen, y de la aplicación de esa comprensión a su explotación, así como a la exploración de nuevas reservas y nuevos yacimientos. Por otra parte, está centrado en los yacimientos metalíferos. En este documento se presenta un léxico de términos fundamentales elaborado como material docente auxiliar para asignaturas de geología e ingeniería. Su redacción pretende ir más allá de las simples definiciones, incluyendo explicaciones básicas de cada término y su importancia y aplicaciones.

A

ACTINOLITA: Mineral del grupo de los anfíboles (= anfíboles). Se forma en torno a los 450°C y es característico de algunos yacimientos hidrotermales, como los de Fe y de Fe-Cu-(Au) de la Cordillera de la Costa del norte de Chile y del sur del Perú. La actinolita puede dar lugar a fases asbestiformes que revisten especial peligrosidad para la salud humana.

ACTIVIDAD: Parámetro termodinámico que corresponde a la concentración "corregida" de una sustancia. Se utiliza para incluir en los cálculos el efecto de otras sustancias presentes en la solución, que pueden afectar las relaciones de equilibrio químico. La actividad (*a*) se expresa en términos de la concentración (*c*) multiplicada por el respectivo coeficiente.

ACUÍFERO: Cuerpo de aguas subterráneas, presentes en estructuras primarias (poros interconectados), secundarias (fracturas) o cavidades (karst) de las rocas o sedimentos. En el caso de acuíferos "libres", el acuífero está comprendido entre el nivel freático y una zona impermeable en profundidad. Las explotaciones mineras a cielo abierto y subterráneas interactúan con los acuíferos, lo cual implica problemas que deben resolverse durante su operación y que pueden complicar gravemente su futuro cierre (generación y transporte de drenaje ácido, etc.). Ver además nivel freático.

ADULARIA: Es un feldespató potásico (KAISi_3O_8) de igual composición que la ortoclasa (= ortosa). Sin embargo, la adularia se forma por efecto de soluciones hidrotermales y es común en las asociaciones mineralógicas del ambiente epitermal (yacimientos epitermales del tipo sericita-adularia).

AGREGACIÓN DE VALOR: Toda actividad económica (fabril, comercial, extractiva, etc.) tiene por objeto la creación de valor, vale decir, el producto de la actividad debe tener un mayor valor que lo existente inicialmente más los costos que la actividad implica. En minería moderna, este concepto se ha extendido a todas las fases de la operación, siendo tarea de los geólogos e ingenieros maximizar la agregación de valor que implica su actividad específica. La más obvia y directa es el descubrimiento de nuevos depósitos económicos, donde las empresas obtienen las más altas rentabilidades. Al descubrimiento de un cuerpo mineralizado explotable le siguen actividades como la expansión de reservas y recursos, la información litológica y estructural que permite optimizar las labores mineras, el apoyo a las operaciones de beneficio metalúrgico a través de información geometalúrgica (mineralógica, litológica y estructural), la evaluación hidrogeológica del distrito, en términos de nuevas fuentes de agua, de riesgos geotécnicos asociados a cambios del nivel freático y de la posible dispersión de drenaje ácido por las aguas subterráneas. Igualmente, los geólogos pueden suministrar valiosa información para la preparación del futuro plan de cierre de las faenas mineras (= labores mineras), tarea que hoy se inicia desde la etapa de diseño de las operaciones.

ALCALINOS: Elementos químicos del Grupo 1A: Li, Na, K, Rb, Cs y Fr. Son elementos fuertemente reactivos, tanto con el oxígeno del aire como con el agua. Sus hidróxidos presentan una elevada disociación en agua y por lo tanto fuerte reacción básica o "alcalina". Na y K, y en menor concentración Rb, desempeñan un papel principal en los procesos de alteración hidrotermal.

ALBITIZACIÓN: Proceso de alteración hidrotermal que implica un reemplazo del contenido de calcio de la plagioclasa por sodio. Si ese reemplazo ocurre en presencia de Fe, la albita formada puede presentar un color rosado (que puede llevar a confundirla con ortoclasa = ortosa). También se ha encontrado (Distrito Punitaqui) una "albita negra", resultado de microinclusiones de magnetita. La albitización es un proceso importante de la alteración propilítica.

ALBITÓFIRO: Roca volcánica o subvolcánica que presenta un fuerte metasomatismo alcalino, que implica reemplazo del Ca original de la plagioclasa (albitización). En Chile, existen cuerpos de este tipo en varios distritos cupríferos, como el de Punta del Cobre, al sur de Copiapó.

ALCALINO TÉRREOS: Elementos químicos del Grupo 2A, al que pertenecen Be, Mg, Ca, Sr, Ba y Ra. Su reactividad es menor que la de los elementos del Grupo 1A, pero de todas maneras considerable. Al igual que los elementos del Grupo 1, forma cloruros solubles, y las inclusiones fluidas salinas de los minerales (por ej. cuarzo, calcita, y otros) pueden contener cloruros de Na, Ca y Mg.

ALINEAMIENTO (en inglés: *Lineament*): Se denomina así a una faja estrecha y alargada de yacimientos metalíferos. Los alineamientos están controlados por grandes zona de falla o líneas de contacto geológico. En Chile y en general en la Cadena Andina, los alineamientos facilitan mucho la exploración minera. Así, yacimientos como los pórfidos cupríferos, los depósitos ferríferos cretácicos y los yacimientos epitermales del norte de Chile, presentan notables alineamientos controlados por megazonas de falla como las de Atacama (Fe) y Domeyko (Cu-Mo).

ALTERACIÓN ARGÍLICA (en inglés: *Argillic alteration*): Alteración hidrotermal, que destruye los feldespatos, dando lugar a la formación de caolinita y/o montmorillonita (según la mayor o menor intensidad del metasomatismo de H⁺). En los pórfidos cupríferos se desarrolla en una etapa hidrotermal tardía y de menor temperatura, junto con el depósito de pirita. También se la denomina alteración argílica intermedia. Los minerales de arcilla se forman también por efecto de la acidez que genera la oxidación de los minerales sulfurados, en especial de la pirita.

ALTERACIÓN ARGÍLICA AVANZADA (en inglés: *Advanced argillic alteration*): Es un tipo de alteración hidrotermal propio de niveles cercanos a la superficie o muy tardíos en la evolución de un pórfido cuprífero. Es propia de yacimientos epitermales de alta fugacidad de azufre y de oxígeno. Implica un elevado metasomatismo de H⁺, que destruye completamente los feldespatos y la sericita, dando lugar a la formación de alunita (sulfato de Al y K), acompañada por caolinita y sílice. En Chile está presente en yacimientos epitermales cordilleranos, como Tambo, La Coipa y Pascua (Proyecto Pascua-Lama). En España aparece asociada a yacimientos epitermales como los de El Cinto (Rodalquilar). Esta alteración implica especiales riesgos de generación de drenaje ácido, dado que la roca pierde toda posibilidad de neutralizar la acidez (H⁺) a través de la hidrólisis de sus silicatos. Genera un importante blanqueo (*bleaching*) de las rocas, lo que facilita la exploración de los depósitos en los que está presente. La alteración argílica avanzada debilita mucho los macizos rocosos, lo cual puede dificultar su explotación, y en algunos casos dificulta las labores de sondeo (= sondajes).

ALTERACIÓN CALCO-SÓDICA: Es la alteración hidrotermal característica de los yacimientos ferríferos del tipo Kiruna o *Volcanic Hosted Magnetite*. Incluye una fuerte albitización de las rocas presentes en los niveles basales del sistema (muy bien expuesta en el distrito de Great Bear Lake, Canadá), así como clinopiroxeno, actinolita, clorita, escapolita y epidota. En los yacimientos del norte de Chile, el depósito de la magnetita fue acompañado por el de actinolita y apatito (= apatita), a unos 500°-450°C de temperatura.

ALTERACIÓN FÍLICA (en inglés: *Phyllic alteration*): También se denomina alteración cuarzo-sericitica. Es un tipo de alteración hidrotermal moderada, caracterizada por razones Metal/H⁺

intermedias. En ella los feldespatos se convierten en una variedad fina de muscovita (= moscovita), mientras se libera SiO_2 que cristaliza como cuarzo. En los pórfidos cupríferos se desarrolla en una etapa intermedia de su evolución, cuando las aguas meteóricas penetran en el sistema hidrotermal y removilizan parte de su mineralización temprana. Es frecuente que sea acompañada por turmalina fina. En Chuquicamata, la zona filica se sitúa próxima a la Falla Oeste y está acompañada de mineralización de Cu y Mo importante, pero rica en sulfosales de As-Sb. Es una alteración muy común en yacimientos tipo chimenea de brecha. Su temperatura se sitúa en torno a los 500°C .

ALTERACIÓN HIDROTERMAL (en inglés: *Hydrothermal alteration*): Las soluciones hidrotermales (vale decir, de aguas calientes) tienen variados orígenes. Junto con su capacidad para transportar metales de interés económico, interactúan con las rocas, alterando su mineralogía y composición química. Su interés en geología económica se deriva de su asociación con determinados tipos de mineralización. Por ejemplo, la alteración potásica se relaciona con la principal mineralización hipógena (= hipogénica) de los pórfidos cupríferos. En general, los tipos de alteración hidrotermal se pueden agrupar en dos principales: 1) Alteraciones por metasomatismo de elementos alcalinos o alcalino-térreos: alteración potásica, alteración calco-sódica y alteración propilítica. 2) Alteraciones por metasomatismo de hidrogeniones (H^+): alteración filica, alteración argílica y alteración argílica avanzada. El estudio de la alteración hidrotermal desempeña un papel central en la exploración de yacimientos metalíferos.

ALTERACIÓN POTÁSICA (en inglés: *Potassic alteration*): Es una alteración de origen hipógeno (= hipogénico) y de alta temperatura (600°C - 400°C), que da lugar a la formación de minerales propios de las últimas etapas de la cristalización magmática, como feldespato potásico (ortoclasa = ortosa) y biotita, a expensas de plagioclasa y de piroxeno o anfíbol respectivamente. La relación K^+/H^+ es alta. A ella se asocia la principal mineralización hipógena de los pórfidos cupríferos. Normalmente está acompañada por el depósito de anhidrita (CaSO_4).

ALTERACIÓN PROPILÍTICA (en inglés: *Propylitic alteration*): Se caracteriza por minerales como clorita, epidota, albita, calcita y hematita (= hematites). En los pórfidos cupríferos constituye una alteración contemporánea a la potásica, pero externa al sistema mineralizador, y contiene solamente pirita. En cambio, alberga la mineralización principal en yacimientos cupríferos tipo manto (en especial, en sus facies ricas en clorita-albita, con transición a sericita). A mayor temperatura (450°C - 500°C) gradúa a alteración calco-sódica, que acompaña la mineralización principal de los yacimientos ferríferos cretácicos del norte de Chile y sur del Perú.

ALUNITAS: Grupo de minerales característicos de la alteración argílica avanzada, pero que también pueden tener origen supérgeno (= supergénico). La alunita es un sulfato de Al y K ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y el grupo de las alunitas tiene una composición general de $\text{AB}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, donde A puede ser K, Na, Ca, Pb, Ag, o NH_4^+ , y B puede ser Al, Cu o Fe. Las alunitas están presentes en la roca ornamental combarbalita (norte de Chile). Las alunitas son importantes en la exploración de yacimientos epitermales de alta fugacidad de azufre y de oxígeno.

ALUVIAL: Se refiere a los sedimentos clásticos que han sido arrastrados por corrientes de agua. En esos sedimentos se pueden producir concentraciones de minerales con alto peso específico, como casiterita (SnO_2), oro y platino, dando lugar a los yacimientos tipo "placer". Cuando el transporte ha

sido limitado (como en el caso de un cono que recibe sedimentos provenientes del regolito del cerro), se utiliza el término coluvial. Debido a su transporte, los sedimentos aluviales presentan mejor selección granulométrica y redondeamiento que aquellos de carácter coluvial.

AMALGAMACIÓN: Amalgama es una solución sólida formada por dos o más metales. Puesto que el mercurio se presenta en estado líquido y tiene la capacidad de amalgamar el oro y otros metales se ha utilizado en la recuperación del oro presente en finas partículas. Así, el oro es amalgamado por el mercurio, del cual se separa posteriormente mediante destilación por calentamiento del Hg. Este método, que implica problemas ambientales debido a la toxicidad del Hg, fue reemplazado en la minería moderna por el de cianuración del oro (algo más segura aunque no exenta de riesgos ambientales). Sin embargo, ha sido y continúa siendo utilizado por la minería artesanal, con los problemas ambientales y de salud que ello implica. Este ha sido el caso, por ejemplo, de Andacollo en la Región de Coquimbo (Chile).

AMBIENTE DE SEDIMENTACIÓN: El término se refiere al conjunto de características físicas (energía cinética, temperatura), químicas (pH, Eh, composición de soluciones) y biológicas, de un sitio en el que se depositan sedimentos. Los ambientes de sedimentación tienen cierta importancia en la exploración de algunos tipos de yacimientos metalíferos (como los de uranio tipo *roll-front*, placeres aluviales, etc.). Sin embargo, su mayor importancia radica en la exploración de depósitos de combustibles fósiles (petróleo, esquistos bituminosos, carbón), genéticamente asociados a sedimentos de grano fino depositados en ambientes reductores.

ANATEXIA: Proceso de formación de magmas de composición granítica-riolítica por fusión parcial de rocas corticales. Los granitos de anatexia se caracterizan por la presencia de muscovita (= moscovita) (granitos de dos micas).

ANDESITA: Roca ígnea de composición intermedia y textura afanítica, microcristalina o porfírica, de emplazamiento extrusivo o intrusivo sub-volcánico. Su mineralogía incluye plagioclasa calco-sódica, piroxeno y anfíbola. Corresponde a la diorita como roca fanerítica. Las andesitas son rocas muy abundantes en los arcos magmáticos de tipo andino así como en los arcos de islas. La asociación andesita-dacita/diorita-granodiorita es muy rica en mineralizaciones de Cu, Mo, Au, Fe y otros metales.

ANFÍBOLAS (ANFÍBOLES): Son inosilicatos de cadena doble. En las rocas ígneas se presentan normalmente como hornblenda. En la alteración hidrotermal están generalmente bajo la forma de actinolita (de aspecto fibroso). Ver además actinolita.

ANOMALÍA: Rasgo o conducta de un sistema que se aparta del comportamiento normal o esperado. En exploración minera las anomalías geoquímicas y las anomalías geofísicas son muy importantes, como indicadoras de la presencia de yacimientos no aflorantes. Ver, además, geofísica y geoquímica.

ARCILLAS (en inglés: *clay minerals*): Grupo de minerales del grupo composicional de los aluminosilicatos, con estructura de filosilicatos. Generalmente se forman por meteorización o alteración hidrotermal de feldespatos o micas. Las arcillas están constituidas por capas de Si-O con coordinación tetraédrica (T) y capas Al-O con coordinación octaédrica (O). Existen dos tipos principales: el de la caolinita y el de la montmorillonita o esmectita. El primero presenta alternancia de capas T-O, las

cuales se atraen fuertemente. En el segundo, se presenta una configuración TOT-TOT, siendo débiles los contactos T-T. Ello conlleva que las esmectitas presenten una gran superficie interna, que les permite intercambiar cationes, así como incorporar moléculas de agua y expandirse. Ambas características pueden tener graves consecuencias, tanto en la lixiviación en pilas de minerales de cobre (que se dificulta mucho por la pérdida de permeabilidad y por la incorporación del cobre a la arcilla), como en la estabilidad de obras de ingeniería (suelos expansivos). Sin embargo, tienen también aplicaciones útiles, como en el caso de los barros (= lodos) utilizados en sondajes (= sondeos). Las arcillas son importantes minerales industriales y tienen uso diagnóstico en exploración minera. Ver además alteración hidrotermal.

ARCO MAGMÁTICO: Se denomina así a la faja de generación de magma situada sobre una zona de subducción. Ese magma se emplaza a distintos niveles de profundidad: Plutónico, hipabisal, subvolcánico y volcánico y está asociado a distintos tipos de yacimientos metalíferos, como pórfidos cupríferos (a nivel hipabisal) y epitermales (a nivel subvolcánico). La Cadena Andina incluye un importante arco magmático, que en Chile migró de W a E entre el Jurásico y el Terciario Superior y que hoy coincide aproximadamente con la posición de la Cordillera de los Andes. En el sureste de España se reconoce un arco magmático del Mioceno con similitudes a la Cadena Andina aunque diferente en cuanto origen (ausencia de subducción). Se trata de la Faja Volcánica de Almería-Cartagena (Mioceno Medio-Superior), que se formó durante el colapso gravitacional del orógeno alpino. Tiene escasa longitud y ancho (~ 160 x 20 km), sin embargo es extremadamente rica en variedades petrográficas y series magmáticas (calcoalcalina, calcoalcalina de alto K – shoshonítica, y lamproítica) y alberga interesantes yacimientos epitermales de Au (Rodalquilar), Pb-Zn (Mazarrón, Cabezo Rajao), y Sn (La Crisoleja).

ARENAS ALQUITRANADAS (ARENAS BITUMINOSAS) (En inglés: *Tar sands*): Cuando los yacimientos de petróleo son despojados por la erosión de su techo impermeable protector, los constituyentes de menor peso molecular, y por lo tanto más volátiles, abandonan las rocas almacenadoras. En consecuencia, éstas conservan solamente las fracciones pesadas semi-sólidas tipo alquitrán o asfalto. Estos yacimientos pueden ser explotados por métodos mineros, seguidos de molienda y destilación del material. Posteriormente el destilado es sometido a *cracking* (fraccionamiento molecular), obteniéndose un producto similar al petróleo. En la región de Alberta en Canadá existen enormes yacimientos en explotación de este tipo. Sin embargo, explotarlos plantea serios problemas ambientales, entre ellos la generación de grandes volúmenes de arenas que es necesario disponer y estabilizar.

B

BANDEAMIENTO (BANDEO): Estructura o textura que presentan algunas menas que han sido depositadas en un medio abierto y en un proceso “por etapas”, por ejemplo, en un plano de falla que se fue abriendo por pulsos sucesivos, cada uno de los cuales dio origen a una banda de minerales. Los minerales sulfurados de cobre del Distrito Talcuna (Chile: Quebrada Marquesa, Región de Coquimbo) presentan atractivas estructuras bandeadas.

BESSHI: Tipo de yacimiento definido en Japón, constituido por capas finas, con estructura masiva o

bien laminada, de pirita, pirrotina (= pirrotita) y calcopirita, con contenidos variables de oro. Se sitúan en rocas sedimentarias clásticas, intercaladas con lavas y rocas piroclásticas andesítico-basálticas. Incluyen óxidos de Fe y jaspe (= chert). Su origen se atribuye a fuentes termales submarinas situadas en medios reductores, en ambientes tectónicos tipo rift, situados en arcos de islas o en cuencas trasarco. Este tipo de yacimiento presenta ciertas analogías con algunos yacimientos tipo manto de edad cretácica en Chile central.

BIF: Del inglés: *Banded iron formation* (formación ferrífera bandeada = formación bandeada de hierro): Son depósitos constituidos por bandas intercaladas de sílice y magnetita (Fe_3O_4) que alcanzan gran magnitud (cientos a miles de Mt). Se trata de depósitos antiguos, en general de edad precámbrica, que presentan metamorfismo y se encuentran normalmente en regiones de escudo, como los de Norte América, Australia y Brasil. Las BIFs se clasifican en dos tipos principales según estén o no asociadas a rocas volcánicas. En el primer caso tenemos las BIF del tipo Algoma y en el segundo las BIF del tipo Lago Superior. En Chile existen depósitos pequeños de este tipo (< 100 Mt) en la Cordillera de Nahuelbuta, que fueron acrecionados al continente en un episodio tectónico ocurrido durante el Paleozoico. Los yacimientos tipo BIF aportan la mayor parte del hierro de mina producido en el mundo.

BITUMINOSO: Carbón mineral de calidad intermedia caracterizado por su mayor contenido de hidrocarburos sólidos (bitumen).

BOXWORKS: Ver celdillas residuales.

BONANZA: La parte más ancha y más rica en minerales de valor económico de un filón (= veta). En filones polimetálicos, es también la más enriquecida en plata. Una zona de bonanza puede originarse por la intersección de dos fallas mineralizadas ("clavo de bonanza").

BRECHA: Roca constituida por clastos angulares de tamaño centimétrico, decimétrico o métrico (megabrecha), que contiene un material más fino (matriz) y un cemento que los une. Las brechas tienen distintos orígenes: sedimentarias, piroclásticas, magmáticas, tectónicas (brechas de zona de falla), hidrotermales, etc. En depósitos como los del tipo "chimenea de brecha" pueden contener parte importante de la mineralización del yacimiento.

C

CALCOPIRITA: Es el sulfuro primario de cobre más importante. Su fórmula es CuFeS_2 y pertenece al sistema cristalino tetragonal. Su color es amarillo bronceado, con menor brillo que la pirita. A diferencia de ésta, rara vez exhibe su forma cristalina externa.

CALCOSINA: Es el sulfuro más rico de cobre. Su fórmula es Cu_2S y pertenece al sistema cristalino monoclinico o hexagonal dependiendo de la temperatura de formación. Generalmente se forma por enriquecimiento supérgeno (= supergénico) o hipógeno (= hipogénico) de otros sulfuros primarios. Su color es gris y su brillo moderado lo que lo hace poco notable. Cuando se iniciaron las exploraciones de

cobre en las secuencias sedimentarias del cinturón cuprífero africano (*Copper Belt* de Zambia-Katanga), la calcosina presente en rocas sedimentarias finas de color gris oscuro pasó inicialmente inadvertida.

CALDERA: Es una gran depresión de origen volcánico, de forma elíptica o circular, que puede alcanzar decenas de km de diámetro. Se forma cuando el magma sale bruscamente, dejando un espacio bajo la estructura volcánica, la cual colapsa formando la caldera. Estructuras de este tipo se encuentran (por ejemplo) en Condoriaco, al NE de La Serena (Chile) o en Rodalquilar (España). La erupción de material por una caldera no genera condiciones favorables para la formación de yacimientos metalíferos (pérdida masiva de volátiles). Sin embargo, si una nueva masa magmática se sitúa bajo ella generando una "caldera resurgente", las fallas normales presentes en su borde así como en el interior de estas (calderas "anidadas") son adecuadas para la localización de depósitos epitermales.

CÁMARAS Y PILARES (en inglés: *Room and pillar*): Es un método de explotación especialmente adecuado para yacimientos tabulares horizontales o moderadamente inclinados, como los depósitos cupríferos del tipo manto (estratiformes) encajados en rocas competentes. A medida que el cuerpo mineralizado va siendo extraído, se van dejando pilares entre su base y su techo para asegurar la estabilidad de la explotación. Tanto el diámetro como el espaciamiento de los pilares dependen de las propiedades geomecánicas de las rocas encajantes, así como de la potencia del cuerpo explotado. Los mantos cupríferos en rocas volcánicas, así como los depósitos tipo skarn del centro y norte de Chile, se adaptan muy bien a este método.

CAOLINITA: Mineral del grupo de las arcillas. Su estructura cristalina está configurada por capas tetraédricas Si-O y octaédricas Al-O alternadas, lo que asegura una unión estrecha entre las capas (y dificulta el intercambio de bases y la incorporación de agua). Por lo tanto no es una arcilla expansiva. Se forma por meteorización química de las rocas en condiciones de clima lluvioso, así como por alteración hidrotermal con fuerte metasomatismo de H⁺. Ver además alteración argílica y alteración argílica avanzada.

CARBÓN: Combustible fósil sólido, formado mayoritariamente por carbono. Los yacimientos de carbón se forman principalmente en ambientes transicionales (p.ej. deltas) subsidentes y clima húmedo, donde repetidos episodios de hundimiento cubren de agua y luego de sedimentos clásticos finos una abundante vegetación. Tanto por efectos bioquímicos (bacterias anaeróbicas) como geoquímicas (T° y P), la materia orgánica vegetal pierde su contenido de hidrógeno y oxígeno, enriqueciéndose en carbono. A diferencia del caso del petróleo, la presión o la temperatura alta no dañan sino que mejoran la calidad del carbón, el cual tampoco es afectado por procesos estructurales. En consecuencia, los mejores carbones son los más antiguos (Carbonífero-Pérmico), que se distribuyen principalmente en los continentes del hemisferio norte y que corresponden a los tipos de hulla y antracita (en España: cuencas mineras de Asturias y León). Son aptos para la producción pirolítica de coque, utilizado en la metalurgia del hierro y constituyen una fuente principal para la generación de energía eléctrica en plantas térmicas. Los carbones de menor calidad de tipo lignito (generalmente de edad terciaria, como los de Lota y Magallanes en Chile) se utilizan principalmente en producción de energía eléctrica. En términos ambientales, el carbón presenta dos problemas mayores. Uno es la generación de SO₂ debida a la oxidación de la pirita presente en el carbón, la cual ocurre durante su combustión, y que es causa de la producción de "lluvia ácida". El otro es la emisión de CO₂

(gas de efecto invernadero) por combustión del carbón. Otro problema del carbón radica en los contenidos de elementos metálicos de sus cenizas (importantes en los carbones más jóvenes). Por otra parte, su explotación es peligrosa para los mineros debido a las explosiones de metano (CH_4 : gas grisú) que se encuentra adsorbido en el carbón. Un aspecto favorable del carbón radica en la cuantía de sus reservas conocidas, que podrían abastecer las necesidades de varios siglos, aunque el problema del calentamiento global asociado al efecto invernadero plantea serias objeciones en este aspecto.

CARBONATITAS: Rocas alcalinas formadas por magmas constituidas principalmente por carbonatos de Ca, Mg y Fe, con débil participación de silicatos. A las carbonatitas se asocian importantes yacimientos de elementos de las tierras raras, de uranio y otros elementos asociados al magmatismo alcalino, así como de magnetita, apatita (= apatito) y ocasionalmente cobre (p.ej. yacimiento de Palabora en Sudáfrica). Las carbonatitas son características de ambientes tectónicos corticales tipo escudo y aparecen bajo la forma de chimeneas de brecha. También existen ejemplos en el vulcanismo de islas como Canarias y Cabo Verde (Atlántico Central).

CARLIN: Modelo de yacimiento aurífero representado por los depósitos del distrito del mismo nombre en el Estado de Nevada (E.E.U.U.). Los depósitos tipo Carlin son de carácter diseminado y se encuentran emplazados en rocas pelíticas (clásticas de grano fino) ricas en materia orgánica reductora y con presencia de facies carbonatadas. Están asociados a una alteración hidrotermal que silicifica la roca, pero que cambia poco su apariencia externa, lo que dificulta su detección mediante imágenes satelitales. En Chile, se asemejan a esta tipología los yacimientos de El Hueso y Agua de la Falda en Atacama. Un blanco adecuado en Chile para la exploración de este tipo de depósitos puede ser la presencia de afloramientos de rocas pelíticas jurásicas en la faja de alteraciones hidrotermales de El Indio y otros depósitos epitermales terciarios.

CÁTODOS: La producción de cátodos electrolíticos de alta pureza (99.99% Cu) ha correspondido tradicionalmente a la etapa final de la pirometalurgia del cobre. Por otra parte, el tratamiento mediante extracción por solventes (de las soluciones provenientes de la lixiviación en pila de minerales de cobre) y posterior electrorrecuperación (SX-EW) también produce cátodos de cobre electrolítico de elevada calidad, que pueden ser comercializados en términos ventajosos. Este ha sido el caso en el norte de Chile de Carmen de Andacollo, Radomiro Tomic (RT) y otras explotaciones modernas de lixiviación o biolixiviación en pila. Ver, además, lixiviación en pila.

CELDAS DE CONVECCIÓN: La convección (transporte de energía térmica con la materia) es una de las tres formas de transmisión de calor (junto con la conducción y la radiación electromagnética de baja frecuencia). La convección juega un rol esencial en el manto terrestre y en la corteza, tanto en la forma de ascenso de magmas como de las celdas de convección de manto astenosférico (que explican el movimiento de las placas tectónicas). La convección también es muy importante en los niveles corticales superiores cuando se emplaza un cuerpo magmático e interactúa con los niveles profundos de aguas subterráneas. Esta juega un papel principal en la génesis de yacimientos hidrotermales, así como en los sistemas geotérmicos (utilizados en la producción de energía eléctrica). El concepto de celdas de convección se refiere a la configuración de patrones de flujo ordenados de fluidos ascendentes de mayor temperatura y fluidos descendentes de temperatura menor (y por lo tanto, de mayor densidad).

CELDILLAS RESIDUALES (FANTASMAS) (en inglés: *Boxworks*): Estructuras tipo celdillas que quedan en las rocas cuya mineralización sulfurada fue oxidada y lixiviada. A partir de la forma de las celdillas (vacías o rellenas por goethita u otras limonitas) los geólogos expertos en su estudio pueden deducir el contenido mineralógico original (por ej. pirita, calcopirita, esfalerita, etc.), lo que es muy útil en exploración minera. Las celdillas residuales (también llamadas "fantasmas" en España) se encuentran en la zona superficial de los yacimientos sulfurados oxidados y meteorizados, también denominada gossan o "sombrero de hierro". Esta zona destaca por la presencia de sílice y de óxidos de hierro, que le dan colores llamativos como el rojo, amarillo, marrón rojizo y violáceo, según la proporción de jarosita (sulfato de Fe y K), goethita y hematita (= hematites). El color resultante de la proporción de los distintos minerales oxidados de Fe del gossan tiene valor diagnóstico en exploración, en particular de pórfidos cupríferos.

CHERT (en español: Jaspe): Precipitado silíceo de origen sedimentario o hidrotermal. Si es rico en Fe se denomina jaspe ferruginoso. Puede presentar variada coloración, siendo el rojo un color frecuente y es normal que presente bandeo (con bandas de distinto color).

CHIMENEA DE BRECHA (en inglés: *Breccia pipe*): También se denominan diatremas. Se trata de estructuras de origen eruptivo, formadas por fluidos de alta presión que generan estructuras cilíndricas profundas. Las chimeneas de brecha están constituidas por clastos angulares de la roca encajadora, desplazados por la presión de los fluidos y corroídos por la acción de los soluciones hidrotermales. Las chimeneas de brecha presentan frecuentemente turmalina (etapa neumatólica) y alteración hidrotermal filica (cuarzo-sericítica) así como mineralización de Cu, Cu-Mo, Au, polimetálica, etc. Esta última se encuentra en forma de matriz en la brecha, así como en fracturas circulares periféricas. La distribución de la mineralización al interior del cuerpo de brecha puede ser muy irregular. Aparte de las chimeneas de brecha menores, que se pueden presentar en enjambres (p.ej., Inca de Oro, Atacama), hay un tipo de depósitos del modelo pórfido cuprífero al cual pertenece el gran distrito Los Bronces-Río Blanco (Chile central). Un fenómeno análogo a las chimeneas de brecha es el de los diques de guijarros (*pebble dikes*), consistentes en cuerpos tabulares verticales compuestos por clastos de la roca encajadora que han ascendido y experimentado redondeamiento por el efecto de fluidos de alta presión. Se encuentran estructuras de este tipo en el pórfido cuprífero de El Salvador (Región de Atacama), así como en la caldera de El Cinto en Rodalquilar (España).

CHIPRE (yacimientos cupríferos tipo Chipre): Es un tipo de yacimiento definido conforme a sus manifestaciones en la Isla de Chipre (donde se realizaron las primeras explotaciones de cobre del mundo). Estos depósitos, constituidos por mineralizaciones de pirita y calcopirita emplazadas en rocas basálticas ofiolíticas ("rocas verdes") se forman en dorsales oceánicas, e integran el amplio grupo de los yacimientos tipo sulfuros macizos (= sulfuros masivos). Comparten con los depósitos cupríferos tipo manto de Chile el carácter básicamente cuprífero de su mineralización, así como su asociación a rocas volcánicas máficas alteradas.

CIANURACIÓN: Por su carácter de metal noble el oro tiene dificultad para oxidarse y, por lo tanto, para disolverse en forma iónica simple, la que sólo es posible en presencia de mezclas ácidas muy oxidantes, como la del agua regia (HCl + HNO₃). Sin embargo, el oro puede disolverse en condiciones de oxidación menos energéticas si lo hace como ión complejo. Este es el caso del ión Au(CN)₂⁻² que se

forma por reacción del oro con cianuro de sodio (NaCN) en medio alcalino: $2\text{Au} + 4\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Au}[(\text{CN})_2]^{2-} + 2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}_2$. La cianuración en pila, es un método barato y muy efectivo, a condición de que el oro esté libre (vale decir, no encapsulado en otro mineral) y que no haya otros metales abundantes que compitan con el oro por el cianuro. Por otra parte, evita la amalgamación con mercurio, que ofrece dificultades ambientales por la toxicidad del Hg. Sin embargo, también la cianuración ofrece riesgos que deben ser manejados con prudencia. Desde luego, si baja el pH se forma HCN (el mismo compuesto que se usa para ajusticiar condenados a muerte en la cámara de gases en E.E.U.U.). También el CN^- puede contaminar el agua subterránea (y se trata de un veneno potente). Ello explica que las comunidades vecinas tiendan a resistir este método de beneficio de minerales, a veces enérgicamente (caso del yacimiento de Esquel, Argentina, de la empresa Meridian Gold). Pero a diferencia del mercurio, el cianuro tiende a descomponerse naturalmente en sustancias inofensivas. Por otra parte, tampoco se trata de un tóxico acumulativo (como el Hg o el As). Sin embargo, desastres como el de la mina de oro de Baia Mare (Rumanía; Febrero de 2000) llevaron al derrame de 100.000 m^3 de solución cianurada al río Tisza (un tributario del Danubio,) lo que ocasionó un desastre ecológico de gran magnitud, con la muerte masiva de peces a lo largo del río.

sustancias inofensivas. Por otra parte, tampoco se trata de un tóxico acumulativo (como el Hg o el As). Sin embargo, desastres como el de la mina de oro de Baia Mare (Rumanía; Febrero de 2000) llevaron al derrame de 100.000 m^3 de solución cianurada al río Tisza (un tributario del Danubio,) lo que ocasionó un desastre ecológico de gran magnitud, con la muerte masiva de peces a lo largo del río.

CIELO ABIERTO (CORTA) (en inglés: *Open pit, open-cut mining*): Se denominan así las explotaciones mineras no subterráneas, las cuales corresponden a dos tipos principales: el rajo abierto común (*open pit*: Chuquicamata, El Romeral, etc.) y la explotación en la pared del cerro, al estilo de una cantera (*open-cut*: La Coipa). Estas operaciones se denominan corta en España. Las explotaciones a cielo abierto ofrecen ventajas económicas claras si el cuerpo mineralizado se extiende en tres dimensiones (XYZ) o en la horizontal (XY) y no tiene una gran cubierta de estéril. En condiciones de clima húmedo o semiárido moderado, el rajo (= corta) puede albergar un lago al fin de la explotación, que debe ser monitoreado en términos ambientales, especialmente por el riesgo de contaminación de aguas subterráneas por metales asociados al drenaje ácido. Esta solución final suele ser particularmente atractiva en el caso de explotaciones de carbón o arcillas, donde el riesgo de drenaje ácido es mucho menor (o inexistente en el caso de arcillas) que en los yacimientos metálicos ricos en pirita.

CLORITA: Filosilicato afín con los minerales micáceos, que se forma por alteración hidrotermal de otros minerales ferromagnesianos de mayor temperatura (piroxenos, anfíbol, biotita). Es característico de la alteración propilítica y de la alteración transicional propilítica-fílica. En la mayoría de los yacimientos cupríferos tipo manto, la asociación clorita-sericita, junto con la albita, presentan la relación más directa con la mineralización.

COLOFORME: Textura de depósito de los minerales de una mena cuyo aspecto es similar al que presenta una sustancia de origen coloidal. Es propia de condiciones de depósito lentas y de baja temperatura.

COMPETENTE (en inglés: *Competent*): Roca cuyo comportamiento es tanto resistente como elástico y frágil. Frente a un esfuerzo, tienden a deformarse conforme a la Ley de Hooke y a recuperarse

si no se sobrepasa su resistencia. En cambio, su dominio de comportamiento plástico es reducido, por lo cual la roca tiende a fracturarse rápidamente después de sobrepasada su resistencia elástica. Las rocas ígneas de grano fino, no alteradas ni fracturadas son muy competentes. En cambio, las rocas clásticas pelíticas, ricas en minerales de arcilla, son muy poco competentes (rocas plásticas). Sin embargo, el comportamiento de una roca depende también de la temperatura y presión que la afectan, de su contexto litológico-estructural, así como de la brusquedad o gradualidad con la que se le aplica un esfuerzo.

COMPLEJOS METÁLICOS SOLUBLES: Ver iones metálicos complejos.

CONTACTO: Plano o volumen recto o curvo que separa dos unidades geológicas. Puede corresponder a planos nítidos y objetivos, como las paredes de un dique que corta rocas estratificadas. También puede corresponder a un volumen, en el caso de un contacto transicional, difuso. El término metamorfismo de contacto se refiere a los efectos mineralógicos producidos en rocas estratificadas por una intrusión ígnea que las corta. Estos efectos se localizan en la aureola de contacto que rodea a dicha intrusión.

CONTROL: Se denomina así al efecto regulador de un agente o parámetro sobre la evolución de un sistema o proceso. En el estudio de los yacimientos metalíferos es esencial determinar el control ejercido por la litología (control litológico) y por las estructuras (control estructural) en la distribución de la mineralización económica. De igual manera, ambos controles influyen en la distribución de los cuerpos mineralizados a escala local, distrital, regional y de fajas metalíferas a escala continental. En consecuencia son factores claves en la exploración geológico-minera.

CORRI DA (en Chile): Se denomina así a la extensión del afloramiento de un cuerpo mineralizado a lo largo de su dimensión mayor, por ejemplo, la corrida de una veta.

CRATÓNICO: Ambiente continental cortical. Por ejemplo, un escudo es un cratón de gran dimensión. Los ambientes cratónicos son propicios para determinados tipo de mineralizaciones, como las chimeneas diamantíferas (diatremas kimberlíticas) o las asociadas al magmatismo alcalino, como las carbonatitas con uranio y tierras raras. También se presentan en ambientes cratónicos los yacimientos de cromita y platinoides, relacionados con intrusiones estratificadas lopolíticas máficas-ultramáficas, como el Complejo de Bushveld en Sudáfrica.

CUENCA DE SEDI MENTACIÓN: Dominio geológico deprimido y generalmente subsidente, que recibe sedimentos provenientes de la erosión de otros dominios situados a mayor altura. Las cuencas de sedimentación pueden ser continentales, transicionales, como el ambiente de los deltas o bien marinas. La plataforma marina es un ambiente de sedimentación muy importante para la formación de yacimientos de petróleo, así como lo son los ambientes transicionales subsidentes de zonas húmedas para la formación de depósitos de carbón.

D

DECOLORACIÓN (BLANQUEO) (en inglés: *Bleaching*): Efecto de blanqueo (en Chile:

blanqueamiento) de las rocas debido a la alteración y disolución de sus minerales ferromagnesianos por efecto de soluciones hidrotermales o por la meteorización de rocas ricas en pirita (cuya oxidación genera condiciones ácidas). La decoloración es una guía utilizada en las primeras etapas de la exploración minera, debido a su fácil detección en el terreno o en imágenes aéreas o satelitales.

DEPÓSITO MINERAL: Ver yacimiento mineral

DESARROLLO: Se denomina desarrollo a las labores de preparación de la explotación de un yacimiento, como la construcción de piques (= pozos) y galerías. Generalmente es una etapa que implica más gastos que provecho económico directo. Sin embargo, si la mena extraída en esa etapa es rica, el desarrollo puede ser directamente rentable, como ocurrió en el caso del yacimiento aurífero de El Indio (Región de Coquimbo, Chile).

DESMONTES (ESCOMBRERAS) (en inglés: *Mineral dumps, mine wastes*): Son acumulaciones de rocas estériles o con concentraciones subeconómicas de minerales, que podrían ser susceptibles de tratamiento futuro a través de métodos complementarios. Es muy importante asegurarse de que el sitio de depósito de los desmontes (en España: escombreras) no contenga mineralizaciones que obliguen a su posterior remoción (como en el distrito de Chuquicamata, Chile). También es necesario separar los depósitos de desmontes conforme a su ley y mineralogía. Los desmontes deben ser considerados cuidadosamente con relación al futuro cierre de las explotaciones, puesto que pueden ser focos de generación de drenaje ácido.

DESPOLIMERIZACIÓN: En un magma, los futuros minerales existen bajo la forma de estructuras moleculares polimerizadas, a partir de las cuales se forman los cristales al descender la temperatura. Sin embargo, una sustancia como el agua disuelta en el magma produce la rotura de los enlaces polimerizados (efecto despolimerizador), lo cual genera mayor fluidez y retarda su proceso de cristalización, permitiendo su ascenso hasta niveles corticales superiores.

DESproporción: Es un proceso simultáneo de oxidación y reducción que desempeña un rol esencial en el comportamiento del azufre en las etapas neumatolítica e hidrotermal de la cristalización magmática. Su importancia deriva del hecho de que el azufre de los magmas necesita pasar de la forma S^{2-} a la forma S^{4+} (SO_2) para pasar a la fase neumatolítica y participar en los procesos de mineralización (de ahí la importancia de los magmas oxidados, como los de la serie con magnetita de Ishihara. Sin embargo, el depósito de minerales sulfurados requiere la presencia del ión S^{2-} . Ello se logra a través del mecanismo de desproporción, que implica la oxidación y reducción simultánea del S^{4+} , conforme a la ecuación: $4S^{4+} \rightarrow S^{2-} + 3S^{6+}$ lo que da lugar a la formación conjunta de los iones sulfuro y sulfato. En los niveles hipotermales el ion sulfato se presenta como anhidrita (sulfato de calcio), mineral abundante de la zona potásica de los pórfidos cupríferos. Ver además: Oxidación.

DIAGENÉTICO: Se dice de un mineral formado o removilizado durante la etapa diagenética de un sedimento (vale decir, aquella durante la cual se produce su compactación y litificación). Durante esa etapa se pueden formar notables estructuras, como las de tipo cebrá presentes en algunos yacimientos estratiformes de blenda (= esfalerita): Bandas claras y oscuras mineralizadas alternadas. La diagénesis desempeña un papel principal en la formación de yacimientos de Pb-Zn en rocas carbonatadas, como los de tipo Mississippi Valley.

DIAPIRO: Cuerpo intruido de manera forzada, por el efecto de fuerzas que generan un impulso vertical hacia la superficie, de manera que el cuerpo corta las rocas que encuentra en su camino. Un diapiro puede haber intruido en estado fundido o bien en estado sólido-fluido. Este último es el caso de los domos de sal, donde la presión vertical sobre un estrato salino produce su intrusión vertical a través de una zona de debilidad. También se genera un efecto diapírico cuando rocas ultramáficas (peridotitas) son comprimidas entre dos placas tectónicas por efecto de la acreción de un terreno a una placa continental. Este es el caso de los cuerpos ultramáficos con débiles contenidos de cromitas podiformes de la Cordillera de Nahuelbuta (Chile).

DIATREMA: Ver chimenea de brecha.

DI FUSI ÓN: Fenómeno físico-químico en el cual la materia migra a través de un sólido, líquido o gas por efecto de un gradiente de concentración, temperatura o presión. La difusión obedece a la tendencia natural de los sistemas a alcanzar su equilibrio termodinámico.

DIGENI TA: Forma isométrica (= cúbica) de la calcosina, también llamada calcosina azul. Su presencia en estructuras de desmezcla con covelita (= covellina) (CuS) o calcosina indica que cristalizó a más de 80°C y, por lo tanto, es de origen primario, endógeno (y no se debe al enriquecimiento secundario de otros sulfuros). Ver además: Calcosina.

DIQUE (en inglés: *Dike*): Cuerpo intrusivo tabular y discordante, de origen ígneo, emplazado a lo largo de una fractura. Puede ocurrir que el mismo plano de fractura controle primero el emplazamiento de un dique, y posteriormente el de una veta (= filón) adyacente.

DIQUE DE GUIJARROS: Ver chimeneas de brecha.

DIQUE ANULAR: Dique presente en una estructura volcánica circular subsidente. Son especialmente notables en el caso de las grandes calderas volcánicas, donde en la periferia se emplazan diques anulares. La presencia de estos diques puede coincidir con la de los canales de circulación de soluciones hidrotermales posteriores si se mantienen las condiciones extensionales que permitieron su emplazamiento. En la Caldera de Condoriaco (Región de Coquimbo, Chile) existen diques anulares fuertemente silicificados.

DI SEMI NADA: Tipo de textura en la cual la mineralización se presenta bajo la forma de una fina impregnación de la roca mineralizada. Su presencia indica que la roca encajadora permitió el paso de la solución hidrotermal a través de su permeabilidad primaria o de una red muy fina de fracturas.

DISPERSIÓN: Proceso por el cual una sustancia concentrada en un volumen limitado pasa a distribuirse en un volumen mayor, disminuyendo proporcionalmente su concentración. El concepto de dispersión secundaria alude a aquella que se produce cuando un yacimiento mineral es afectado por meteorización y erosión, permitiendo la migración de sus constituyentes. Esto genera anomalías geoquímicas y mineralógicas secundarias en torno al área mineralizada, lo cual es utilizado en exploración minera. Especialmente importante es aquella dispersión realizada por el drenaje. La dispersión debe ser considerada también en términos ambientales, puesto que ella implica

contaminación. Al respecto, tanto las actividades mineras como las metalúrgicas pueden acelerar los procesos naturales de dispersión, lo cual debe ser considerado durante la explotación y el posterior cierre de las explotaciones mineras.

DI STAL: Posición alejada de un cuerpo mineralizado respecto a la fuente primaria a la que se atribuye la mineralización. Se opone a la de una posición cercana o proximal. Estos conceptos se han utilizado principalmente en el estudio de yacimientos sulfurados del tipo sulfuros macizos (= masivos) depositados en el fondo marino respecto a las fuentes (por ej. chimeneas hidrotermales = *black smokers*).

DI STRI TO MI NERO: Se denomina así a un conjunto de minas presentes en un área geográfica de extensión limitada (algunos km). Ejemplos de distritos de la Región de Coquimbo en Chile son los de Condoriaco (Ag-Au), Talcuna (en Quebrada Marquesa, Cu), El Indio-Tambo (Au-Cu-As) y Andacollo (Au-Cu). En España son famosos los distritos de La Carolina (Pb-Zn-Cu-Ag) o La Unión (Pb-Zn-Ag).

DOMINIOS METALOGÉNICOS: Concepto propuesto por el metalogenetista francés P. Routhier, según el cual existen dominios geográficos en forma de bandas (provincias) en los distintos continentes, definidos por la presencia de determinados metales que aparecen reiteradamente en dichos dominios en yacimientos de distinta edad y tipología. Por otra parte, la presencia de yacimientos se relaciona con la existencia de cuerpos magmáticos, fallas u otros elementos geológicos que intersectan el dominio, los cuales son considerados como reveladores de su potencial metalogénico (atribuido a la concentración anormal de esos metales en los niveles corticales subyacentes).

DOMO: Cuerpo o estructura en forma de champiñón o bombilla (= ampollita). Existen cuerpos ígneos volcánicos o subvolcánicos, formados por magmas ricos en sílice, que adoptan esta forma. Algunos domos subvolcánicos están asociados a mineralización epitermal en relleno de fracturas que cortan radialmente al domo. En el ambiente volcánico, el colapso de un domo puede acompañar a una erupción catastrófica (riesgo actual, Febrero de 2009, en el Volcán Chaitén, Chile). También existen domos estructurales, correspondientes a pliegues tipo anticlinal, que en planta presentan forma circular.

DRENAJE ÁCI DO (en inglés: *Acid drainage*): Se denomina así al drenaje superficial o subterráneo procedente de rocas ricas en piritita afectadas por procesos de oxidación. Puesto que la piritita tiene un átomo de azufre "extra" en su composición (FeS_2), al oxidarse en presencia de agua da lugar a la formación de sulfato ferroso y ácido sulfúrico. La posterior oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} y la correspondiente hidrólisis del sulfato ferroso a férrico, agrega acidez a aquella producida por la ionización del H_2SO_4 . Otros sulfuros metálicos pueden contribuir a la generación de acidez, pero solamente como consecuencia de su oxidación a sulfatos y la posterior hidrólisis de estos últimos. El efecto contaminante del drenaje ácido no se debe solamente a su acidez, sino que principalmente a la posibilidad de transporte en solución de metales como Cu, Zn, Cd, etc. La generación de drenaje ácido puede ser mitigada si existen rocas carbonatadas en el área mineralizada (puesto que el carbonato neutraliza los iones H^+). También es mitigada por la presencia de rocas ígneas poco alteradas, que igualmente reaccionan con los hidrogeniones (H^+) a través de la hidrólisis de sus silicatos. En cambio, la alteración argílica o argílica avanzada elimina esta posibilidad. El distrito de El Indio, actualmente cerrado, continúa siendo un centro generador de drenaje ácido y las características del distrito Pascua-

Lama (nacientes del Río Huasco, Atacama, Chile), próximo a ser explotado, son igualmente favorables a la producción de acidez. En el Estado de Montana (E.E.U.U.) algunas operaciones de Cu y polimetálicos ya cerradas serán centros de generación indefinida (a la escala humana) de drenaje ácido, lo que obligará a su control permanente. El drenaje ácido, también puede ser generado por yacimientos de carbón, debido a los contenidos de pirita de este combustible fósil (lo cual complica el cierre de sus explotaciones).

E

EBULLICIÓN (en inglés: *Boiling*): La ebullición, vale decir, el paso brusco de un componente de una fase líquida a una gaseosa se produce cuando la presión de vapor sobrepasa la presión externa ejercida sobre el líquido. La ebullición tiene mucha importancia en términos metalogénicos. En etapas tempranas, durante el ascenso de un cuerpo magmático, la ebullición del agua contenida en el magma puede determinar su cristalización, puesto que el agua deja de desempeñar su papel despolimerizante (efecto fundente). También la ebullición de sustancias volátiles controla el desarrollo de la etapa neumatolítica, que pasa a la etapa hidrotermal al condensarse el agua por la disminución posterior de la temperatura. Durante la etapa hidrotermal también pueden ocurrir etapas de ebullición controladas por cambios de la presión que actúa sobre la solución. Tales fenómenos afectan la estabilidad de los metales disueltos como iones complejos (al modificar el pH y las fases sulfuradas en solución) y tienen como consecuencia la precipitación de minerales económicos y de ganga. Puesto que la presión sobre los sistemas neumatolíticos e hidrotermales está controlada en parte por la permeabilidad y por las estructuras presentes en las rocas, los cambios litológicos y estructurales abruptos favorecen la ebullición y por lo tanto el depósito de masas ricas de mineralización metálica (como las de la zona de bonanza de los filones o vetas).

ECONOMIC GEOLOGY (en castellano: Geología Económica): Es el nombre de la principal publicación científico-profesional periódica internacional sobre yacimientos minerales (en particular de carácter metalífero). Es editada por la sociedad científico-profesional *Society of Economic Geologists* (SEG). Otra revista importante, editada por especialistas europeos, es *Mineralium Deposita*.

Eh: Es el potencial de reducción-oxidación (potencial redox) de un ambiente (por ejemplo, las aguas superficiales de un lago, un río, un cuerpo de aguas subterráneas muestreado en un pozo, el agua de una fuente termal, etc.). Es el resultado de la influencia de todas las reacciones de reducción-oxidación en que están implicadas las sustancias disueltas. El oxígeno disuelto (O_2) juega un papel determinante en las condiciones de Eh de un medio. Tiene gran importancia en la formación de los yacimientos metalíferos, puesto que controla, por ejemplo, las formas químicas del azufre (S^{2-} , S^0 , S^{4+} , S^{6+}). En el caso del uranio, interviene en la formación de depósitos tipo *roll front*, donde el uranio precipita al pasar de una zona oxidante, donde migra como U^{6+} , a otra reductora, donde precipita como U^{4+} en forma de UO_2 . Este potencial determina igualmente la posibilidad de formación de depósitos de combustibles fósiles (carbón, petróleo, etc.), los que solamente se forman bajo condiciones reductoras. Las bacterias de tipo anaeróbico, cuyo desarrollo se favorece en presencia de grandes concentraciones de materia orgánica poco oxigenada, contribuyen al desarrollo y preservación de ambientes reductores.

ELECTRUM: Amalgama natural, constituida principalmente por oro y plata. Es común en los granos de oro presentes en placeres aluviales.

ELUVIAL: Se denominan así aquellos yacimientos, generalmente detríticos, que deben la concentración de sus minerales económicos a la erosión de constituyentes estériles del depósito original. Por ejemplo, así se forman los yacimientos de cromita (óxido de Fe y Cr), cuando los silicatos de las rocas ultramáficas son meteorizados y erosionados.

EMPÍRICO: En general se denomina así al conocimiento que es principalmente fruto de la experiencia directa. Se denomina modelos metalogénicos empíricos a aquellos de carácter descriptivo, en oposición a los modelos metalogénicos conceptuales. En la formulación de estos últimos tiene un papel importante la proposición de los procesos de formación de los yacimientos, así como la estimación cuantitativa de las principales variables fisicoquímicas. Ver además: Modelos metalogénicos.

ENARGITA: Mineral de cobre de fórmula Cu_3AsS_4 , de color gris a negro y brillo metálico, perteneciente al sistema ortorrómbico. Es abundante en las etapas tardías o en los niveles superiores de los pórfidos cupríferos, así como en algunos yacimientos epitermales de Au-Cu, como El Indio en Chile o Rodalquilar en España. En Chile es especialmente abundante en los pórfidos cupríferos de Chuquicamata, MM (actual A. Hales) y El Teniente. Por su contenido de As, la enargita implica serios problemas ambientales, especialmente en términos de las emisiones de As_2O_3 por las chimeneas de las fundiciones, así como al posterior almacenamiento del As_2O_3 recuperado. Tampoco se ha encontrado un procedimiento económico de biolixiviación que permita substituir su tratamiento pirometalúrgico. Las emisiones de As_2O_3 revisten gravedad debido a que el As es un tóxico acumulativo y cancerígeno. En el norte de Chile, este problema se une a las concentraciones naturales altas de As que presentan algunos ríos y aguas subterráneas.

ENDÓGENO: El término significa generado internamente. En geología económica se denomina minerales endógenos y yacimientos endógenos a aquellos relacionados directa o indirectamente con procesos ígneos y metamórficos. El término se opone al de exógeno. Ver además: Exógeno.

ENDOSKARN: En un yacimiento tipo skarn alude a aquella mineralización presente en el cuerpo intrusivo, en su zona de contacto con la roca encajadora. Ver además: Skarn.

ENERGÍA LIBRE: Es un concepto termodinámico que mide la energía efectivamente asociada a una reacción química. Su valor corresponde al del calor generado (reacciones exotérmicas) o absorbido (reacciones endotérmicas), menos la energía perdida por efecto de la entropía: $F = H - T S$. Si F es negativo, la reacción debería ocurrir espontáneamente y generar calor. Si es positivo, no es espontánea y requiere calor para producirse. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la termodinámica nos indica cuales deben ser los estados de equilibrio, pero no la velocidad con la que éstos se alcanzan (tema de la cinética química). Por lo tanto, una reacción espontánea de acuerdo a los parámetros termodinámicos puede ocurrir a una velocidad muy lenta y ser prácticamente imperceptible.

ENRIQUECIMIENTO SUPÉRGENO (SUPERGÉNICO) (en inglés: *Supergene enrichment*): El término alude a todo enriquecimiento de la concentración de minerales económicos (y por lo tanto de la ley) de un yacimiento, debido a los procesos de meteorización y erosión. También se le denomina enriquecimiento secundario. Puede ocurrir por efecto de la remoción de constituyentes estériles, lo cual incrementa la concentración de aquellos económicamente valiosos. Sin embargo, el término se refiere

principalmente al proceso de enriquecimiento que ocurre en yacimientos de cobre y de plata, y que implica la oxidación de los minerales sulfurados presentes sobre el nivel freático. El metal liberado, mantenido en solución por efecto del ambiente ácido generado por la oxidación de pirita, desciende hasta más abajo del nivel freático y reacciona con los sulfuros primarios de los cuales desplaza los elementos menos valiosos. Así se forma, en el caso del cobre, el mineral calcosina (Cu_2S), a expensas de bornita, calcopirita o pirita. En el caso de la plata, se forma argentita a partir de minerales como blenda (= esfalerita) (ZnS). Sin embargo, no todos los enriquecimientos de minerales sulfurados son de carácter supérgeno (en España: supergénico). También puede desarrollarse en la etapa hidrotermal o por efecto de procesos análogos posteriores. Recientemente, R. Sillitoe ha planteado la posibilidad de que el enriquecimiento de plata en Chañarcillo, considerado un ejemplo clásico, sea hipógeno (hipogénico) y no supérgeno (supergénico). Lo que está fuera de discusión es la gran importancia económica que ha tenido el enriquecimiento supérgeno en yacimientos como La Escondida y Chuquicamata. En este último, aparte de la zona de sulfuros enriquecidos se formó otra de óxidos ricos en cobre al bajar el nivel freático y oxidarse los sulfuros previamente enriquecidos. Factores favorables al enriquecimiento supérgeno (o secundario) de yacimientos cupríferos son un clima semiárido (vale decir, con lluvias estacionales moderadas), adecuada fracturación, tectónica de ascenso de bloques a una tasa también moderada, y suficiente presencia de pirita.

ENTROPÍA: Es un concepto termodinámico fundamental, que tiene diferentes connotaciones e implicaciones. En primer término se refiere a la energía que no es posible utilizar en un proceso y que por ello se considera degradada. Por ejemplo, una máquina térmica necesita entregar parte del calor generado al medio externo, lo que limita su rendimiento (Principio de Carnot). También la entropía debe ser sustraída a la energía libre de una reacción para evaluar su estado de equilibrio termodinámico. Otra connotación de entropía se refiere al estado de orden-desorden y de probabilidad-improbabilidad de un sistema. Con el incremento de entropía, los sistemas evolucionan de estados de orden (menos probables) a otros desordenados (más probables). Si bien esto no ocurre en los seres vivos, se debe a que el estado de orden se conserva mediante la extracción de energía del medio, de manera que la entropía total aumenta de todas maneras. El concepto de muerte térmica del Universo alude a un estado final en que toda la energía disponible será de carácter térmico y estará distribuida de manera homogénea. Los procesos de contaminación ambiental así como los de dispersión geoquímica pueden ser analizados como procesos de crecimiento de entropía.

EPIGENÉTICO (en inglés: *Epigenetic*): Se dice que un yacimiento es epigenético respecto a su roca encajadora (en inglés: *host rock*) si la roca encajadora se formó bastante tiempo antes que ocurriera su mineralización. El término se contrapone a diagenético y a singenético (ver definición de ambos).

EPI TERMAL (en inglés: *Epithermal*): El término se refiere a aquellos yacimientos hidrotermales formados a baja temperatura ($200^\circ\text{-}50^\circ\text{C}$; según Lindgren) y a relativamente poca profundidad. Sin embargo, no existe una relación estricta entre profundidad y temperatura en el interior de la Tierra, lo que puede complicar la aplicación de la segunda condición señalada. Por otra parte, en el caso de yacimientos de gran extensión vertical, como los pórfidos cupríferos, el depósito puede incluir una zona epitermal (la envolvente argílica del pórfido) una mesotermal ($300^\circ\text{-}200^\circ\text{C}$, la zona filica del pórfido) y una hipotermal ($500^\circ\text{-}300^\circ\text{C}$, la zona potásica del depósito). Otros autores amplían el rango de temperatura epitermal a los 300°C . La mayoría de los depósitos de oro y de plata son epitermales (tipos Carlin, Bonanza, Hot Spring), aunque también existen depósitos auríferos de mayor temperatura, como los del tipo Bendigo, emplazados en estructuras de rocas plegadas antiguas.

ÉPOCAS METALOGÉNICAS: En un orógeno (como la cadena Andina) o en un escudo (como el escudo Brasileño) se distinguen determinados intervalos de tiempo durante los cuales se formaron yacimientos de ciertos metales. Esos intervalos, según su duración, se denominan épocas (mayor duración) o pulsos (= episodios) metalogénicos (menor duración). Por ejemplo, la mayoría de los pórfidos cupríferos de Argentina, Chile y Perú se formaron entre fines del Cretácico y fines del Terciario, lo cual podría representar una época metalogénica, dentro de la cual hay tres pulsos principales, uno Cretácico tardío (norte de Chile, sur de Perú); otro Eoceno-Oligoceno (norte de Chile) y un tercero Terciario Superior (Chile central y Argentina). Otra época metalogénica importante es la del Carbonífero Inferior en el sur de España-Portugal, que dio lugar a la formación de yacimientos volcanogénicos exhalativos de Cu: la Faja Pirítica Ibérica. Yacimientos de esta provincia metalogénica son entre otros río Tinto, Aznalcollar, y Neves-Corvo.

ESCOMBRERAS: Ver desmontes.

ESCUDOS: Se denomina así a dominios lito-estructurales corticales de dimensiones continentales. Aunque sus terrenos experimentaron procesos orogénicos en el pasado, los escudos se han comportado como bloques tectónicos estables desde fines del Precámbrico hasta la actualidad. Mineralizaciones típicas de los escudos son las chimeneas diamantíferas, los grandes cuerpos máficos lopolíticos con Cr-Ni y platinoides, las carbonatitas con tierras raras, yacimientos ferríferos tipo BIF, etc. Ello no excluye, sin embargo, que los escudos no puedan presentar mineralizaciones propias de las fajas orogénicas (como pórfidos cupríferos), pero generalmente ellas han sido metamorfozadas o removilizadas.

ESMECTITAS: Arcillas del tipo montmorillonita, en las que dos grupos tetraédricos Si-O rodean a un grupo octaédrico Al-O, repitiéndose indefinidamente esta estructura. Ello implica que dos capas tetraédricas quedan en contacto, generando un enlace débil. En esa posición se producen cambio de bases (por ejemplo de H^+ por Me^+ o Me^{2+}). En la mina Radomiro Tomic (RT; distrito Chuquicamata, norte de Chile), se ha encontrado una esmectita rica en Cu. Aparte de este fenómeno, que puede dificultar la lixiviación en pilas de minerales de cobre, se agrega la incorporación de H_2O , que genera una expansión del volumen de la arcilla, lo cual también es causa de problemas (suelos expansivos). Ver además: Arcillas.

ESPECULARITA: Hematita (= hematites) brillante, con estructura hojosa tipo mica. Acompaña a distintos tipos de mineralizaciones. Su color en agregados cristalinos mayores es negro, pero al disgregarse finamente se manifiesta el color rojo sangre del mineral.

ESQUISTOS BITUMINOSOS (en inglés: *Oil shales*): Se trata de rocas pelíticas (clásticas de grano fino) notablemente enriquecidas en hidrocarburos (varias decenas de %). A diferencia del caso del petróleo, donde la fracción orgánica migró hasta llegar a la roca almacenadora, en estos depósitos permaneció en la roca madre. Los yacimientos de hidrocarburos de este tipo encierran enormes reservas, pero su explotación ha permanecido puntual debido a razones económicas y ambientales (en Lonquimay, Región del Bío Bío, Chile, llegaron a explotarse a escala reducida a fines de los años '30). Su explotación puede realizarse mediante dos procedimientos. El primero implica la extracción de la roca mediante minería convencional, seguida por su molienda y posterior destilación. Esto implica la

necesidad de disponer y estabilizar el material clástico residual, lo cual es difícil y costoso. El segundo consiste en su destilación *in situ*, que se realiza después de preparar la mina y quemar (controlando la cantidad de aire) parte del material, facilitando el escurrimiento hacia la superficie del material fundido no afectado. Es un método complejo, que implica riesgos y obliga a sacrificar una parte importante de las reservas. Pese a las dificultades señaladas, la explotación de estos depósitos estuvo a punto de iniciarse en E. E. U. U. en los años '70, aprovechando sus grandes reservas, en particular las situadas en el Estado de Colorado. Esto por fin no sucedió debido a que los precios del petróleo bajaron (después del alza asociada a la crisis iraní). En todo caso, considerando la explotación en curso de las arenas alquitranadas de Alberta (Canadá), es previsible que su aprovechamiento se realice en un mediano plazo. Ver además: Arenas alquitranadas.

ESTÉRIL (en inglés: *Barren*): Material que no contiene concentraciones económicas ni sub-económicas de los metales que son objeto de la explotación (aunque podrían tener un valor posterior, por ejemplo, por un mineral de ganga recuperable). Ver desmontes (= escombreras).

ESTRATIFORME (en inglés: *Stratiform*): Cuerpo mineralizado concordante, cuya morfología sigue la forma de las capas de una secuencia estratificada.

ESTRATOLIGADO (en inglés: *Stratabound*): Mineralización cuya distribución está ligada a determinados estratos de una secuencia volcánica o sedimentaria. Esta mineralización puede ser o no estratiforme. Ver además: Estratiforme.

ESTRATOVOLCÁN: Volcán compuesto de estratos alternados de lavas y de material piroclástico. Es una forma típica del volcanismo calcoalcalino, caracterizada por variaciones del contenido de sílice del magma en torno a una composición intermedia. Al aumentar ligeramente el contenido en sílice se producen episodios explosivos con emisión de piroclastos (aumento de viscosidad). Al disminuir los contenidos en sílice los episodios son más tranquilos dando lugar a la emisión de lavas fluidas, produciéndose así una alternancia de lavas y piroclastos. Este es el tipo de volcán más abundante en la Cadena Andina y en arcos de islas. Implica peligros importantes por su explosividad, pero sus cenizas aportan nutrientes para los suelos hasta grandes distancias, y en sus niveles sub-volcánicos puede estar asociado a valiosos tipos de mineralización. Ver además: Magmatismo calcoalcalino.

ESTRUCTURAS (en inglés: *Structures*): Se refiere a rasgos morfológicos asociados al proceso de formación de una roca o un macizo rocoso (por ej., de un volcán, una colada de lava, un estrato sedimentario, un batolito) o al posterior efecto de procesos tectónicos deformativos (plegamiento, diaclasamiento, fallamiento, metamorfismo dinámico). Las estructuras, junto a la litología, ejercen un control principal en la distribución de las mineralizaciones a sus distintas escalas.

EUTÉCTICO: Mezcla de dos o más componentes cuyo punto de fusión es inferior al de cualquiera de ellos considerado separadamente. Las pegmatitas poseen la composición aproximada del eutéctico ternario: Ortoclasa-albita-cuarzo.

EVAPORITAS (en inglés: *Evaporites*): Yacimientos de minerales salinos, formados por la saturación de las soluciones debida al proceso de evaporación en cuencas de regiones áridas o hiperáridas. En ellos se encuentran sales muy solubles, como cloruros y sulfatos de Na, Mg y Ca. Los

yacimientos de nitratos del norte de Chile representan un caso especial de depósito evaporítico. Otro ejemplo notable son los yesos del Mioceno de la Cuenca de Sorbas en el sureste de España.

EXHALATIVO: Yacimiento formado por emanaciones de origen volcánico. Las acumulaciones de sulfuros polimetálicos descubiertos en las dorsales oceánicas, asociadas a las fuentes de emisiones de sulfuros en forma de chimeneas (*black smokers*) son propiamente yacimientos exhalativos.

EXÓGENO: Proceso o depósito que tiene su origen en la superficie de la Tierra, ligado a fenómenos climáticos e hidrológicos que controlan la meteorización y la erosión de las rocas. Corresponde al concepto de supérgeno (= supergénico). Por ejemplo, el enriquecimiento supérgeno, es un proceso exógeno particular, como lo son los procesos exógenos generales de meteorización, remoción en masa y erosión. Yacimientos como los de placeres aluviales, los depósitos exóticos de cobre y las evaporitas de los salares son de origen exógeno.

EXOSKARN: Parte principal de un yacimiento de tipo skarn, correspondiente a la mineralización depositada en la roca estratificada afectada por el metamorfismo de contacto y el metasomatismo neumatolítico-hidrotermal producido por el cuerpo intrusivo.

EXÓTICO (en inglés: *Exotic*): El término designa un yacimiento exógeno originado por la erosión y transporte (mecánico y/o químico) de parte de un depósito preexistente. Se aplica básicamente a yacimientos de minerales oxidados de cobre depositados por efecto del drenaje ácido subterráneo procedente de la oxidación de un pórfido cuprífero situado en una posición topográfica más alta, a unos pocos km de distancia. En algunos casos como en el del yacimiento Mina Sur (ex Exótica) situado al sur de Chuquicamata, se conoce perfectamente el paleocanal que utilizaron las soluciones ácidas con cobre. A medida que la solución avanza, su reacción con las rocas y sedimentos genera un efecto de alteración sobre estas mientras la solución gradualmente se va neutralizando. Así se libera SiO_2 , Mn^{2+} (que se oxida a MnO_2) y otras sustancias y elementos de las rocas, que junto con iones presentes en la solución transportadora, dan lugar a la precipitación de minerales de cobre. Los principales minerales son crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), atacamita (oxicloruro de Cu), Cu-Wad (MnO_2 rico en Cu), Cu-pitch (óxidos de Cu con MnO_2), etc. Aunque el carácter oxidado de los minerales de Cu ofrece algunas ventajas metalúrgicas, la presencia de minerales de arcilla y MnO_2 puede dificultar su lixiviación obligando a pre-tratar la mena. La presencia de estos yacimientos es muy probable en el entorno de pórfidos cupríferos meteorizados bajo condiciones de clima semiárido y en situación topográfica positiva respecto a las rocas y sedimentos de sus alrededores.

EXPLORACIÓN MINERA (en inglés: *Mining exploration, mineral exploration*): El término designa diversas actividades y etapas de trabajo destinadas al descubrimiento, evaluación y estimación de recursos y reservas de minerales de interés económico. Va desde una etapa inicial de detección de posibles prospectos, vale decir, áreas de interés para la realización de estudios ulteriores, hasta campañas de sondajes (= sondeos) destinados a la estimación de reservas. La exploración minera puede ser centrifuga, vale decir, partir de un depósito conocido hacia su entorno geológico en búsqueda de nuevas reservas o nuevos yacimientos (en Chile: caso del descubrimiento de El Salvador desde Potrerillos o el de Candelaria, desde un yacimiento menor del distrito Punta del Cobre). También puede ser centrípeta, vale decir, partir de una gran superficie para localizar uno o más yacimientos en su interior (en Chile: caso del descubrimiento de La Escondida). Puede ser realizada para encontrar

prospectos o yacimientos para ser vendidos a otras empresas (caso de las compañías *junior* canadienses), o bien para reponer o expandir reservas de la misma empresa que explora y explota yacimientos. La exploración minera utiliza conocimientos, criterios, métodos y tecnologías de carácter geológico, mineralógico, geoquímico y geofísico, además de variados tipos de sensores remotos. Sin embargo, la experiencia de terreno, la imaginación, tenacidad y disposición al riesgo de los geólogos es esencial en el logro de éxitos. En suma, la exploración minera sigue siendo un arte (y en parte una aventura) pese a la ciencia y tecnología que la apoyan. El término prospección minera se utiliza a veces como sinónimo de exploración minera, y otras para designar solamente sus primeras etapas.

EXTRANJERO: Término utilizado para indicar que la mineralización que alberga un yacimiento tiene una fuente diferente del material del que proceden sus rocas encajadoras. Se opone al término familiar. El término fue propuesto originalmente por G. C. Amstutz y modificado por P. Routhier.

F

FACIES: Término que denota tanto el singular como el plural (la facies, las facies). Indica rasgos distintivos de una unidad sedimentaria, de rocas ígneas, o metamórficas. Por ejemplo: Facies carbonatadas marinas fosilíferas, la facies metamórfica de esquistos azules (con jadeíta + glaucofano). Las características de la facies son indicativas de las condiciones específicas de formación de la roca. El concepto es muy útil en exploración minera de yacimientos emplazados en rocas sedimentarias así como en determinadas facies metamórficas (por ej., en las zonas de contacto de intrusivos con rocas estratificadas pelítico-carbonatadas).

FAMILIAR: Designa una mineralización cuyo origen se atribuye a la misma fuente de la roca encajadora. Por ejemplo, en un pórfido cuprífero, la mineralización presente en el pórfido es familiar respecto a éste (puesto que proceden del mismo magma). Ver además: Extranjero.

FASE: Concepto físico-químico que designa una porción homogénea de un sistema termodinámico. El número de grados de libertad (L) de dicho sistema (vale decir, de las variables que es posible modificar sin alterar el estado de equilibrio de las fases del sistema) es igual al número de sus componentes (C) menos el número de fases (F) más dos, que se expresa de la siguiente manera: $L = C - F + 2$ (regla de las fases de Gibbs). Este concepto se aplica en temas como la cristalización de los silicatos, el estudio de las soluciones hidrotermales, las inclusiones fluidas de los minerales, etc.

FÉLSICO: Se dice de los magmas o las rocas ígneas cuya composición es rica en feldespatos y en sílice, por ejemplo, un magma riolítico o una granodiorita. Se opone al término máfico. El término felsita se utiliza para designar en general a rocas félsicas. El término *félsico* es equivalente al de *ácido* (p.ej., un granito es una roca ácida).

FILÓN (VETA) (en inglés: *Lode, vein*): El término se utiliza para designar a cuerpos emplazados en planos de falla. En cierto grado es análogo al de veta. Sin embargo, el concepto de filón es más amplio, y se puede aplicar a masas mineralizadas más irregulares y menos definidas que una veta, por ejemplo, el *Mother Lode* (Filón Madre) al que se asociaban numerosas mineralizaciones auríferas en California.

En España filón denota un cuerpo mineralizado tabular emplazado a lo largo de una falla u otro accidente estructural.

FISURA: Fractura.

FLOTACIÓN (en inglés: *Flotation*, menos común: *Floatation*): En general el término designa cualquier proceso de concentración o purificación de un mineral (en sentido amplio) que se realiza aprovechando su menor densidad o bien su capacidad para adherirse a una burbuja de aire. El primer caso corresponde, por ejemplo, a la flotación de carbón mineral para eliminar algunas impurezas. El segundo procedimiento es de gran uso en el tratamiento de minerales sulfurados. Consiste en la molienda fina de la mena, seguida de la separación de los sulfuros de la ganga mediante la adherencia de los primeros a burbujas de aire, lograda con la ayuda de sustancias surfactantes (espumantes y colectores). En España se ha utilizado históricamente el término lavado para el proceso y lavadero, para la planta de flotación. Modificando otros parámetros como el pH, es posible obtener la depresión de algunos sulfuros como piritita, logrando así concentrados de mejor ley y menor contenido de impurezas. La flotación puede ser realizada en celdas rectangulares o cilíndricas de variado tamaño, así como en columnas (flotación columnar).

FLUIDO: El término se aplica a sustancias líquidas o gaseosas, cuya baja coherencia intermolecular permite su flujo. Los fluidos desempeñan un papel esencial en la segregación y transporte de los metales en las etapas pegmatítica, neumatolítica e hidrotermal que siguen a la cristalización de los magmas. También son esenciales en la formación de yacimientos de origen sedimentario y metamórfico.

FORMAS (MORFOLOGÍA) (de los yacimientos minerales): Bajo el punto de vista de la forma (morfología) los yacimientos minerales se pueden clasificar en uni, bi y triextendidos. En los uniextendidos (= morfología tubular discordante) se encuentran los yacimientos tipo chimenea de brecha de pequeño diámetro y gran extensión vertical, así como las intersecciones de dos vetas (clavos de bonanza). Los biextendidos son propios de las vetas (= morfología tabular discordante) y de los depósitos estratiformes (= morfología concordante), mientras que los triextendidos (= morfología irregular discordante) incluyen los pórfidos cupríferos. En un yacimiento puede haber combinaciones de formas, por ejemplo, un *stockwork* triextendido (= morfología irregular discordante) con una chimenea de brecha uniextendida (= morfología tubular).

FRACTURA (en inglés: *Fracture*): El término incluye tanto a las diaclasas como a las fallas. En el primer caso los planos de ruptura implican una simple apertura de la roca, sin desplazamiento relativo paralelo a dichos planos, mientras que en las fallas existe desplazamiento relativo. Ambos fenómenos implican una conducta frágil de la roca (rotura). Tanto los planos de diaclasas como los de fallas pueden albergar mineralizaciones hidrotermales, aunque las mineralizaciones de mayor magnitud se desarrollan en planos de falla por la mayor extensión que éstos alcanzan. También es común que los planos de falla corten y desplacen masas mineralizadas preexistentes, lo que puede facilitar la erosión de aquellas situadas en el bloque ascendente.

FREÁTICO: Se denomina nivel freático a aquel situado en una roca o sedimento que separa el acuífero saturado de la zona vadosa superior no saturada. Bajo el nivel freático, todos los poros y fracturas

interconectadas están saturados de agua. Sobre el nivel freático puede haber agua subterránea en descenso, pero parte de los espacios contienen aire. Como consecuencia de ello, la zona de oxidación de los yacimientos sulfurados se desarrolla sobre el nivel freático (zona rica en oxígeno) y en cambio, la de cementación o formación de sulfuros enriquecidos se sitúa bajo él (zona pobre en oxígeno). Cuando una explotación minera corta el nivel freático, puede ser necesario bombear el agua que ingresa a las labores subterráneas o superficiales. Por otra parte, la posición del nivel freático al término de una explotación minera es un factor muy importante a considerar en el plan de cierre.

FREATOMAGMÁTICA: Designa un tipo de erupción (*maar*) así como a sus productos, por ejemplo, la brecha generada en condiciones explosivas debido a la interacción del magma con las aguas subterráneas.

FUENTE TERMAL (en inglés: *Hot spring*): Es un afloramiento de aguas subterráneas calientes. Generalmente se encuentran en zonas de alto gradiente geotérmico, producto de la presencia de cuerpos magmáticos en curso de enfriamiento o de una corteza continental adelgazada por un proceso extensional de *rifting*. Su interés práctico se relaciona con la posible presencia de sistemas geotérmicos explotables (para energía geotérmica), de mineralizaciones hidrotermales o, caso más común, de su aprovechamiento médico-recreacional (termas). Con respecto a esto último, resulta curioso que la gente acuda de manera masiva y pagando para beber aguas que en otras condiciones serían consideradas no aptas para el consumo por su elevado contenido en metales pesados y metaloides.

FUGACIDAD: Parámetro termodinámico correspondiente a la presión parcial corregida de un gas (de manera de acercar los cálculos al comportamiento de un gas ideal). La fugacidad es un parámetro importante en el estudio de sistemas mineralizadores neumatolíticos. Tres parámetros importantes en dichos estudios son: la fugacidad de azufre, la del oxígeno y la del cloro.

FUMAROLA: Punto de la superficie terrestre del cual escapan gases a alta temperatura, el que puede estar bajo aire o bajo agua. Las fumarolas son comunes en áreas volcánicas y a ellas se asocia la formación de depósitos de azufre nativo, por reacción de anhídrido sulfuroso con ácido sulfhídrico: $\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{S} \rightarrow 3\text{S}^0 + 2\text{H}_2\text{O}$.

FUNDENTE: Sustancia que tiene la propiedad de disminuir el punto de fusión de otras, facilitando dicho proceso o retardando su cristalización. Por ejemplo, el agua actúa como un fundente respecto a rocas y magmas silicatados, debido a su efecto despolimerizante. De ahí que el mayor contenido de agua favorezca el emplazamiento más cercano a la superficie de los magmas ricos en sílice (cuya viscosidad dificulta en principio su ascenso).

G

GABRO: Roca Ignea máfica plutónica constituida por plagioclasa cálcica, piroxeno y olivino (= olivina), vale decir, similar a un basalto (su equivalente volcánico) en términos composicionales. Los gabros están asociados a mineralizaciones de elementos siderófilos, como cromo, níquel y platinoides.

GALERÍA (en inglés: *Drift* y si es de acceso: *Adit*): En minería subterránea corresponde a un túnel, esto es, se trata de una labor horizontal. Se complementa con los piques (en inglés: *shaft* o *raise*) (= pozos) y con labores inclinadas (*inclined shafts*). Estas labores permiten el acceso a la mina, y a los cuerpos mineralizados, así como su ventilación y la extracción de los minerales explotados.

GANGA (en inglés: *Gangue*): Minerales constituyentes de la mineralización de un yacimiento que no tienen interés económico para quienes explotan el yacimiento. Generalmente el término se utiliza para silicatos o minerales no metálicos, como la calcita. Los minerales de ganga de una explotación pueden llegar a adquirir valor económico, por ejemplo, la baritina (= barita) de una explotación de plata. Esto depende del precio que alcancen, de la existencia de un poder de compra local, de las inversiones requeridas para su concentración, etc. En situación intermedia se encuentran los minerales integrantes de la mena, que pueden o no ser recuperados. Por ejemplo, recientemente se inició la concentración de magnetita en el yacimiento cuprífero de Candelaria (Copiapó, Chile), mineral que antes no era aprovechado económicamente. Esto se facilita porque el proceso de molienda (etapa intensiva en costos) debe realizarse de todas maneras para separar el mineral principal. En todo caso, siempre que se explote un yacimiento debería considerarse en su totalidad mineralógica y separar los desechos sólidos del proceso con vistas a posibles recuperaciones futuras de subproductos. Ver además: Mena.

GEOESTADÍSTICA (en inglés: *Geostatistics*): Los métodos tradicionales de evaluación de reservas de yacimiento asumen un carácter isótropo de la distribución de sus leyes. En consecuencia estiman la ley de los puntos no muestreados sobre la base de sus distancias a aquellos de ley conocida por haber sido muestreados y analizados. Para esto se utilizan los criterios de los inversos de las distancias (ID) o de los inversos de los cuadrados de las distancias (ID²). Esto implica que la validez de la estimación disminuye con la distancia o el cuadrado de ésta. Alternativamente, las leyes pueden ser estimadas por áreas de confianza. Así, en una sección podemos extrapolar las leyes medias de un sondeo (= sondaje) hasta la distancia media que existe entre éste y el sondeo siguiente. En cambio la geoestadística (ciencia fundada por el matemático francés G. Matheron) considera no sólo la posición de los puntos conocidos en el espacio sino que, además, la isotropía-anisotropía de los datos mediante el estudio de la función $\gamma(h)$, esto es, el variograma: $\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2$, donde h es la distancia entre las muestras, X_i es la posición de cada muestra, Z es el valor de la muestra en el punto X_i y n el número de pares considerados. A partir de esta función, se puede estudiar el sistema en términos de la variación espacial, determinando el *alcance* (distancia máxima de confiabilidad) en función de la anisotropía de los datos. Así, puede que los datos presenten una mayor continuidad N-S que E-W (el *alcance* sería mayor en el primer caso). Una vez establecido el modelo de variograma (modelización espacial de la anisotropía del sistema) se puede interpolar los datos espacialmente mediante la técnica de *kriging*. En otras palabras, el *kriging* incorpora la anisotropía determinada por el variograma posibilitando una estimación espacial mucho más confiable. Por otra parte el *kriging* permite conocer *a priori* la varianza de los errores que se cometerán en la estimación. Según el cuerpo mineralizado presente límites difusos o bien límites geológicos netos, se utiliza el *kriging* convencional o bien *kriging* bajo restricción geológica.

GEOFÍSICA (en inglés: *Geophysics*): En exploración minera se utiliza una amplia gama de métodos geofísicos. En términos básicos, se trata de conocer la expresión o la respuesta de las rocas no expuestas y los posibles yacimientos asociados a ellas en términos de sus propiedades físicas. Estas propiedades incluyen: a) densidad (en términos de masa gravitacional), b) magnetismo, c) reflexión y refracción de ondas sísmicas, d) conductividad eléctrica, e) respuesta a ondas electromagnéticas, f)

conductividad térmica, etc. Algunos métodos geofísicos, como gravimetría, magnetometría, etc. implican simplemente realizar mediciones. En otros casos, como la sísmica, conductividad eléctrica, etc. es necesario producir un efecto (por ej., una explosión, la generación de corrientes eléctricas, ondas electromagnéticas, etc.) para registrar la correspondiente respuesta. Los métodos basados en radioactividad son un tipo especial de métodos de exploración, situados a medio camino entre la geofísica y la geoquímica (puesto que permiten detectar indirectamente los isótopos radioactivos presentes). Realizadas las mediciones y su corrección, así como el proceso matemático de la información, se elabora un modelo geofísico que explica la anomalía detectada (lo cual puede ser realizado por varios modelos alternativos). Dicho modelo se utiliza en conjunto con el resto de la información modelizada (geológica, geoquímica, mineralógica, etc.) para seleccionar los blancos de sondajes (= sondeos), o bien detener por el momento la exploración, o descartar el área estudiada si los resultados son negativos. La geofísica es una herramienta de apoyo, y no una técnica definitiva. Esto quedó comprobado durante la exploración del yacimiento de Neves Corvo (Portugal), donde sin la modelización tectónica habría sido imposible orientar adecuadamente los sondajes (= sondeos) por los datos gravimétricos, como se comprobó después de algunos errores preliminares.

GEOQUÍMICA (en inglés: *Geochemistry*): La geoquímica es la ciencia que estudia la distribución de los elementos químicos en la Tierra y en otros planetas, y elabora las leyes que describen dicha distribución y las hipótesis que la explican. Puesto que los yacimientos minerales constituyen concentraciones anómalas de elementos minerales o sustancias (como el carbón o el petróleo), la detección de las anomalías superficiales de estos permite la detección de yacimientos profundos ocultos o bien de depósitos superficiales situados a cierta distancia de las muestras analizadas. El segundo caso corresponde, por ejemplo, al de un yacimiento que aflora en el área de nacimiento de un río, cuyos contenidos metálicos contaminan sus aguas y sedimentos y permiten, por lo tanto, su detección a distancia. Los métodos geoquímicos de exploración minera se clasifican según el material muestreado y su origen. Tenemos así a) geoquímica de rocas, b) geoquímica de suelos, c) geoquímica de aguas y sedimentos (de la red de drenaje, de lagos, etc.), y d) biogeoquímica (normalmente de plantas). Un método asociado, que no es propiamente geoquímico es la geobotánica, basado en la observación de cambios de color o morfología en las plantas, que pueden ser interpretados en términos de altas concentraciones de metales o metaloides en los suelos. Los notables avances en las técnicas analíticas instrumentales para metales y metaloides permiten hoy trabajar con análisis de decenas de elementos químicos en cada muestra a costos (= costes) muy bajos. La exploración (= prospección) geoquímica ha sido notablemente efectiva en el descubrimiento de nuevos yacimientos y es utilizada en todo tipo de exploraciones mineras. También tiene aplicaciones importantes en la exploración de hidrocarburos. Por otra parte, similares criterios y procedimientos son utilizados por la geoquímica ambiental, que investiga concentraciones anormales de elementos o sustancias que pueden tener efectos tóxicos, ya sea debidas a procesos naturales o a actividades humanas (mineras, industriales, agrícolas, etc.).

GEOTECNIA (en inglés: *Geotechnics*): La geotecnia es una disciplina profesional dedicada a las aplicaciones ingenieriles de la geología, la geomecánica y la hidrogeología. Por ejemplo, al planificar la construcción de un túnel que atraviesa una montaña, se parte con: a) un modelo geológico que describe las rocas presentes y sus estructuras, b) un modelo hidrogeológico que muestra el comportamiento del agua subterránea y c) un modelo geomecánico. Este último describe los parámetros físicos de las rocas presentes y su conducta frente a la activación de sus estructuras por los cambios de magnitud y dirección de los esfuerzos que implica la obra de ingeniería a realizar.

Corresponde a la geotecnia utilizar esta información en la elaboración de un modelo predictivo, tanto del comportamiento del macizo rocoso y sus aguas subterráneas durante la excavación del túnel, como de la situación del sistema una vez completada la obra.

GEOTERMOMETRÍA: El término se refiere a la determinación de la temperatura de formación de minerales, ya sea mediante el estudio de inclusiones fluidas, del grado de algunos reemplazos diadócicos (por ejemplo, el contenido de Fe en esfalerita es directamente proporcional a su temperatura de formación) o de la presencia de estructuras de desmezclas de minerales (cuya presencia permite fijar temperaturas mínimas de formación). Las inclusiones fluidas representan una muestra de las soluciones hidrotermales a partir de las cuales se formaron los minerales. En consecuencia, en el caso de inclusiones fluidas que incluyen dos o más fases, la temperatura a la cual se homogenizan es indicativa de su temperatura de formación.

GOSSAN: Se denomina así a la cubierta oxidada y lixiviada desarrollada sobre un yacimiento sulfurado aflorante meteorizado. El estudio de los minerales oxidados de hierro presentes (goethita, hematita, jarosita) así como el de las celdillas residuales dejadas por la oxidación de los minerales sulfurados, constituyen criterios diagnósticos valiosos en la evaluación preliminar del yacimiento subyacente. Ver además: Celdillas residuales.

GRANATES (en inglés: *Garnet*): Son nesosilicatos, cuya fórmula general es: $Me_3^{2+} Me_2^{3+} Si^3 O_{12}$, donde Me^{2+} puede ser Ca, Mn, Fe^{2+} o Mg y Me^{3+} puede corresponder a Al o Fe. Según su catión Me^{2+} , se clasifican en granates cálcicos, de Mn, etc. Cristalizan en la clase hexaquisoctaédrica del sistema cúbico. Son minerales característicos del metamorfismo de contacto de secuencias pelíticas, carbonatadas y volcánicas y junto a piroxeno y anfíbolos (= anfíboles), son los minerales de ganga principales de los yacimientos tipo skarn. En términos generales, los skarn de Cu y Mo están asociados a granates de $Ca^{2+} Fe^{3+}$ (andradita). En dichos depósitos, la coloración del mineral puede indicar la proximidad al cuerpo intrusivo, al adquirir éste una coloración rojiza intensa. Aparte de su valor diagnóstico, los granates tienen valor como minerales industriales debido a sus propiedades abrasivas, recuperándose como minerales aluviales de depósitos tipo placer, formados por meteorización y erosión de rocas afectadas por metamorfismo de contacto.

GRANITOIDE (en inglés: *Granitoid*): Término de uso general para designar rocas plutónicas de composición ácido-intermedia (como granodiorita, tonalita, monzonita, etc.).

GRANODIORITA: Roca ígnea plutónica formada por plagioclasa sodico-cálcica, feldespato potásico, hornblenda, biotita y cuarzo. Su equivalente volcánico es la dacita. La composición de los pórfidos cupríferos de la cadena andina es granodiorítica, a diferencia de la composición diorítico cuarcífera – andesítica de los pórfidos cupríferos de arcos de islas oceánicas.

GREISSEN: Tipo de alteración neumatolítica-hidrotermal típica de algunos yacimientos asociados a intrusiones graníticas como los de Sn-W. La mineralogía del greissen incluye muscovita (= moscovita), feldespato (de Na o K), cuarzo, topacio, turmalina y fluorita.

H

HALOGENUROS: Minerales que incluyen un elemento del grupo 7A de los halógenos (F, Cl, Br, I). Por ejemplo, la querargirita (AgCl) (= clorargirita) es un halogenuro.

HETEROCRÓNICOS: Término usado por P. Routhier para denominar a yacimientos de los mismos metales, pero de distinta edad presentes en un dominio metalogénico.

HETEROTÍPICOS: Yacimientos de los mismos metales principales, pero de distinta tipología presentes en un dominio metalogénico (P. Routhier).

HERENCIA: En metalogénesis se refiere a la hipótesis de que el contenido metálico de algunos yacimientos presentes en un dominio o provincia metalogénica pudo provenir de otros depósitos más antiguos de los mismos metales principales, que enriquecieron niveles inferiores subyacentes del mismo dominio o provincia.

HIDROCARBUROS (en inglés: *Hydrocarbons*): Son compuestos de carbono e hidrógeno que integran el gas natural, el petróleo, los esquistos bituminosos y las arenas alquitranadas. El tipo más común es el de la serie alifática, y tiene por fórmula general C_nH_{2n+2} . Los más livianos de la serie son gaseosos a presión atmosférica normal, como los constituyentes del gas natural (CH_4 a C_3H_8 : metano a propano) o del gas licuado (C_3H_8 y C_4H_{10} : propano a butano), luego siguen los líquidos (como el octano C_8H_{18} , que define el octanaje de la bencina, y los hidrocarburos de las parafinas). Finalmente, los de mayor peso molecular son sólidos. La combustión de los hidrocarburos genera más energía por unidad de emisiones de CO_2 que el carbón, debido a la contribución del H, cuya oxidación $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ entrega energía adicional a la producida por la oxidación del carbono.

HIDRÓLISIS: El agua pura a $25^\circ C$ se encuentra débilmente ionizada a través del siguiente equilibrio: $H_2O = H^+ + OH^-$, y el producto de equilibrio (K_w) es $[H^+][OH^-] = 10^{-14}$ moles/litro. Así $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ (la concentración de hidrogeniones es igual a la de oxidrilos = 10^{-7}). Por esto el pH del agua pura es 7 ($pH = -\log [H^+] = -\log (10^{-7}) = 7$). Etimológicamente la hidrólisis no es más que la descomposición de una sustancia por la acción del agua. El término proviene de un período antiguo de la química, en el que se pensaba que el agua podía dividir una sal en un ácido y una base, por ejemplo: $CaCO_3 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + H_2CO_3$. La realidad es diferente, más compleja, y lo que muestra son equilibrios y reequilibrios a medida que el carbonato de calcio (ejemplo de arriba) reacciona con los hidrogeniones (H^+) del agua: $CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$ (a). La reacción implica un consumo de hidrogeniones, lo cual lleva a que se ionice más agua para mantener el equilibrio: $H_2O = H^+ + OH^-$ (b). Si combinamos las reacciones (a) y (b) tendremos: $CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + OH^- + HCO_3^-$, la cual representa de manera más adecuada el proceso de hidrólisis, pudiéndose observar el carácter alcalino que adopta el sistema. La hidrólisis juega un papel principal en la destrucción de los feldespatos, tanto en procesos hidrotermales como supergénicos. Por ejemplo: $3KAlSi_3O_8 + 2H^+ \rightarrow KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$ (paso de feldespato potásico a sericita) y $2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 2H^+ + 3H_2O \rightarrow 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K^+$ (paso de sericita a caolinita).

HIDROMETALURGIA (en inglés: *Hydrometallurgy*): La hidrometalurgia incluye una amplia gama de tecnologías de procesos metalúrgicos, que tienen en común el hecho de que las reacciones se realizan en un medio acuoso. Aunque la mayoría de los procesos hidrometalúrgicos se realizan a

temperatura ambiente y en espacios abiertos (ya sea estanques o pilas) también existen procesos en caliente, que se realizan en autoclaves. Por otra parte, se ha considerado (y realizado en algunos casos) la hidrometalurgia *in situ* de depósitos oxidados y fracturados, recuperando las soluciones enriquecidas en metales mediante bombeo o túneles. Los procesos hidrometalúrgicos de mayor uso son los de lixiviación de minerales oxidados de cobre en medio ácido (ácido sulfúrico diluido), lo que conlleva la formación de sulfatos solubles de cobre ($\text{CuSO}_4 = \text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$). Por ejemplo:

- Crisocola: $\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CuSO}_4 + \text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
- Brochantita: $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 4\text{CuSO}_4 + 6\text{H}_2\text{O}$
- Atacamita: $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{CuSO}_4 + \text{HCl} + 3\text{H}_2\text{O}$

Además se realiza la lixiviación de oxidados y sulfuros ricos de cobre (calcosina, bornita, covelina = covellina) con apoyo bacteriano (biolixiviación). También es muy importante la lixiviación cianurada de oro en medio alcalino, que reemplazó al nivel industrial el método tradicional de amalgamación mercurial del oro, por ejemplo:

- $2\text{Au}^0 + 4\text{CN}^- + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Au}[(\text{CN})_2]^{2-} + 2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}_2$

La hidrometalurgia ofrece importantes ventajas económicas y puede ser acompañada de la obtención directa del metal puro (en el caso del Cu, por extracción con solventes orgánicos seguida de electrolisis). Por otra parte, es menos exigente en materia de molienda que la flotación de sulfuros y evita la contaminación del aire que implica la posterior pirometalurgia de los minerales sulfurados concentrados. En cambio, implica algunos riesgos de contaminación, en particular de las aguas subterráneas. Las exigencias ambientales respecto a limitar las emisiones de SO_2 de las fundiciones de sulfuros de cobre han llevado a su recuperación bajo la forma de ácido sulfúrico. En Chile, esto ha producido una beneficiosa sinergia, al generar grandes cantidades de ácido sulfúrico de bajo costo, las que han sido utilizadas en la hidrometalurgia del cobre.

HI DROSTÁTICA: Ver presión hidrostática.

HI DROTERMAL (en inglés: *Hydrothermal*): El término se aplica a toda solución acuosa caliente de origen natural. Las soluciones hidrotermales pueden tener distintos orígenes, entre los principales: a) agua contenida en solución en un magma y liberada en el curso de su cristalización, b) agua contenida en sedimentos, que se separa en el curso de la diagénesis y litificación de la secuencia, c) agua liberada en el curso del metamorfismo de rocas, d) aguas subterráneas calentadas por efecto de un alto gradiente geotérmico debido a un cuerpo magmático en cristalización, al desarrollo de un rift, etc. Las soluciones hidrotermales salinas (*brines*) tienen un especial potencial para lixiviar metales de las rocas, así como para transportarlos, debido a su capacidad para formar iones metálicos complejos con los aniones que contienen (p.ej. complejos clorurados). La etapa hidrotermal constituye la última fase de la cristalización de un magma, después de la cristalización principal, la etapa pegmatítica y la neumatolítica.

HI PABISAL: Nivel de cristalización de un cuerpo magmático comprendido entre el nivel plutónico o profundo, propio de un batolito (4-5 km) y el nivel subvolcánico, próximo a la superficie (menos de 2 km). A este nivel corresponde el emplazamiento de los pórfidos cupríferos (2-3 km).

HI PÓGENO (HI POGÉNICO): El término indica el origen de un mineral o de una solución en el sentido de que proviene de la profundidad. Por ejemplo, un mineral depositado por una solución hidrotermal procedente de la cristalización de un cuerpo ígneo se considera hipógeno (al igual que la solución respectiva). El término se opone a supérgeno (= supergénico), proveniente de la superficie, por ejemplo, los minerales secundarios de la zona de cementación (= enriquecimiento) de sulfuros.

HI POTERMAL (en inglés: *Hypothermal*): En la clasificación de los yacimientos hidrotermales propuesta por Lindgren, denomina a aquellos formados a mayor temperatura, entre 500° y 300°C. En el proceso de cristalización de un magma, corresponde a aquellos formados por las soluciones hidrotermales tempranas, de mayor temperatura. Es importante considerar el hecho de que en grandes yacimientos, de larga y compleja evolución como los pórfidos cupríferos o los yacimientos ferríferos tipo Kiruna, el proceso de formación puede incluir las etapas hipotermal, mesotermal y epitermal (tardía). Esto se expresa tanto en la mineralización como en la alteración hidrotermal asociada (por ej., la mineralización principal asociada a la zona potásica de un pórfido cuprífero es hipotermal, pero aquella relacionada con la zona fílica es mesotermal).

HORNFELS: Ver rocas corneanas (= córneas).

HOT SPRING: En términos literales corresponde a fuente o manantial caliente. En la terminología de los tipos de yacimientos epitermales, designa a aquellos depósitos, generalmente de oro diseminado asociados a antiguos campos geotérmicos, esto es, muy próximos a la superficie. Otros tipos principales de depósitos epitermales son los denominados Bonanza (filones) y Carlin (oro diseminado en rocas pelíticas carbonatadas, ricas en materia carbonosa).

HUNDIMIENTO DE BLOQUES (en inglés: *Block caving*): Método de explotación subterránea aplicado a grandes yacimientos de formas triextendidas, como los pórfidos cupríferos. A medida que los bloques diseñados van siendo hundidos y sus rocas mineralizadas extraídas, y el proceso progresa hacia niveles más profundos, se va formando un cráter de subsidencia en la superficie de la explotación. Se trata de un método de importante utilización, que puede ser empleado solo (por ej., El Teniente, Chile) o en combinación con explotaciones a cielo abierto (por ej., Río Blanco; Chile).

IGME: Instituto Geológico y Minero de España. Es la institución encargada de la cartografía del territorio nacional por mandato del Estado. Entre las funciones del IGME se encuentran las siguientes: a) elaborar y publicar la cartografía geológica nacional (Plan MAGNA) así como las cartografías temáticas para los programas y planes nacionales, las obras de infraestructura y la ordenación del territorio, y para otros fines dentro del ámbito de actividad del IGME; y b) estudiar el terreno continental, insular y el fondo marino en cuanto sea necesario para el conocimiento del medio geológico e hidrogeológico, en sus múltiples vertientes, tales como sus recursos, los procesos naturales, la vulnerabilidad de la actividad humana y sus implicaciones medioambientales, entre otras, así como realizar las correspondientes observaciones, controles e inventarios. Ver además SERNAGEOMIN.

INCLUSIONES FLUIDAS: Son aquellas presentes en cavidades presentes en un cristal (por ej. de cuarzo), producto de un defecto en su proceso de crecimiento que dejó ese vacío. Las inclusiones pueden estar formadas por varias fases: líquida, gaseosa y sólidos cristalinos (generalmente cloruros de Na o Ca). Se considera que el fluido que rellena las cavidades corresponde a la composición de la solución hidrotermal homogénea de la que se formó el cristal. La salinidad de la inclusión fluida se puede determinar mediante criometría, vale decir, el descenso de la temperatura de cristalización del agua producido por efecto de su mayor contenido de sales. Respecto a su utilización para determinar la temperatura de formación del cristal, ver Geotermometría.

INDICADAS: Ver reservas.

INFERIDAS: Ver reservas.

INTRUSIVO: Se dice de un cuerpo geológico, normalmente de origen magmático (también hay diapiros salinos intrusivos y cuerpos peridotíticos de emplazamiento tectónico intrusivo) que se emplazó en un macizo rocoso preexistente. Dicho emplazamiento ocurre ya sea: a) hundiendo y asimilando las rocas en la que se intruye (caso de los batolitos); b) aprovechando y expandiendo zonas de debilidad (por ej., un dique en una zona de falla); c) abriéndose espacio entre dos estratos (filones mantos y lacolitos); o d) emplazándose de modo forzado generando deformación. El primer mecanismo (a) (en inglés *magmatic stoping*), desempeña un papel principal en el emplazamiento de los batolitos de tipo andino. Los cuerpos magmáticos intrusivos desempeñan un papel principal en la formación de la mayoría de los yacimientos metalíferos hidrotermales, tanto como fuente térmica para activar celdas de convección, como por su aporte de metales y de elementos mineralizadores (S, Cl, etc). En algunos casos el intrusivo es también importante por su contribución de agua magmática y su participación en el desarrollo de estructuras de origen explosivo.

IOCG: Es un término muy amplio y por lo tanto poco preciso y ambiguo. Se trata de un acrónimo a partir de las iniciales de *iron ore, copper, gold*. Designa los yacimientos cuya mineralización de cobre y oro está asociada a óxidos de Fe: magnetita y/o hematita. El interés por estos yacimientos surgió a raíz del descubrimiento en 1975 del yacimiento de Olympic Dam en el sur de Australia, que alberga varios miles de millones de toneladas de minerales de cobre, oro, uranio y tierras raras asociados a óxidos de Fe. En Chile, están representados (de alguna manera) por el yacimiento de Candelaria, en Copiapó. Según se asocien con magmas más o menos alcalinos estos depósitos presentan o no enriquecimiento en U, Y y elementos de las tierras raras. En Chile la faja con mejores expectativas para encontrar este tipo de yacimientos corresponde a los afloramientos de secuencias cretácicas intruidas por granitoides de 120-100 Ma, que incluye depósitos ferríferos del tipo Kiruna, así como yacimientos de Cu-Au-(Fe) con ganga de actinolita o de tipo skarn.

IONES METÁLICOS COMPLEJOS: En las soluciones hidrotermales sulfuradas, los metales pesados (Cu, Zn, Ni, Cd, Ag, Au, Hg, etc.) no se encuentran disueltos en forma iónica simple (lo que no es factible, por el bajísimo producto de solubilidad de sus sulfuros), sino formando iones complejos con elementos no-metálicos o metaloides. Por ejemplo, el Au se disuelve bajo la forma de $Au(HS)_2^-$, Hg bajo la forma de HgS_2^{2-} etc., mientras Cu, Zn, Pb y otros metales se disuelven formando iones complejos clorurados. Estos iones complejos son tanto más estables cuanto más pesado es el elemento metálico. Su precipitación ocurre cuando se desestabilizan por cambios bruscos de T, P o composición química.

Por ejemplo, en el caso del $\text{Au}(\text{HS})_2^-$, su pH ideal es ligeramente ácido (alrededor de pH 5.5). Si el pH disminuye, entonces: $\text{HS}^- + \text{H}^+ = \text{H}_2\text{S}$; si aumenta, $\text{HS}^- + \text{OH}^- = \text{S}^{2-} + \text{H}_2\text{O}$. Por lo tanto, al disminuir la concentración de HS^- el complejo se desestabiliza y precipita Au. La lixiviación cianurada de oro, en la cual el metal es disuelto en forma de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ constituye una aplicación industrial del mismo mecanismo. En general, existe concordancia entre los patrones de zonación de minerales en un yacimiento complejo y la estabilidad de los iones complejos que forman los respectivos metales. Ver además: hidrometalurgia, hidrotermal, zonación.

IONI ZACIÓN: Se denomina así al proceso por el cual un elemento o grupo de elementos (por ej., SO_4^{2-}) pierde o gana electrones. Por ejemplo, al disolver H_2SO_4 en agua $\text{H}_2\text{SO}_4 = 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ (donde los electrones de los H^+ han sido transferidos al grupo SO_4^{2-}). La ionización ocurre generalmente en soluciones acuosas, facilitada por el carácter eléctrico bipolar de la molécula de agua. Sin embargo, también puede ocurrir en un gas (plasma).

ISÓTOPOS (en inglés: *Isotopes*): El modelo simple de átomo propuesto por E. Rutherford en 1919, aún válido para muchos propósitos, considera que el átomo está constituido por tres clases de partículas: protones (masa 1, carga +1), neutrones (masa 1, carga 0) y electrones (masa 0,0005, carga -1). Los neutrones se comportan como si estuvieran formados por la unión de un protón y un electrón (ver radioactividad). Protones y neutrones se encuentran en el núcleo del átomo, mientras los electrones se sitúan en órbitas en torno al núcleo, y las más externas definen la valencia del respectivo elemento. La naturaleza del elemento químico, (es decir, de qué elemento se trata) está determinada por el número de protones que éste posee, mientras que la masa del átomo depende de la suma de sus protones y neutrones. Cuando dos átomos del mismo elemento poseen diferente masa, se dice que son distintos isótopos de ese elemento. Por ejemplo, existe un isótopo de oxígeno de masa 16 (8 protones y 8 neutrones: ^{16}O) que es el más abundante y uno muy poco abundante de masa 18 (8 protones y 10 neutrones: ^{18}O). Los isótopos pueden ser estables o radioactivos (ver radioactividad). Los isótopos estables poseen similares propiedades químicas, pero propiedades físico-químicas y bioquímicas ligeramente diferentes. Esto se utiliza para diversos e importantes propósitos, como paleodeterminaciones de la temperatura atmosférica y de las aguas oceánicas; determinación del origen geoquímico o bioquímico del azufre de la pirita y otros sulfuros; estimación del origen cortical o sub-cortical del Pb de yacimientos minerales y del grado de contaminación cortical de magmas, considerando las razones isotópicas de Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$); determinación del origen químico o bioquímico de los nitratos, etc.

ISÓTROPO: Se dice de un cuerpo cuyas propiedades físicas, físico-químicas o químicas no presentan diferencias sistemáticas según la dirección en la cual se miden dichas propiedades o sus variaciones.

J

JASPE (en inglés: *Jasper, chert*): Es un sinter silíceo, vale decir, un precipitado de sílice formado por evaporación del agua (y/o descenso de su temperatura) sobre o cerca de la superficie de la Tierra. Es común en manantiales calientes y campos geotérmicos. El jaspe rojo ferruginoso es denominado *carneola* por los mineros en Chile.

JAROSITA: Sulfato hidratado de Fe y K ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) perteneciente al grupo de la alunita. Es un mineral secundario de color amarillo que se presenta formando costras o recubrimientos en zonas de oxidación de minerales sulfurados ricos en pirita. Ver además: Alunita.

K

KARST: El término designa la topografía de hundimientos, formación de cuevas, y drenaje subterráneo que se producen en terrenos de afloramientos de rocas carbonatadas, en regiones de clima lluvioso. Estos rasgos morfológicos e hidrológicos son consecuencia de la disolución del carbonato de calcio: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$. Aunque los yacimientos estratoligados de Pb-Zn del tipo *Mississippi Valley* se formaron debido a la acción de extensos sistemas hidrotermales, parte de la mineralización se asocia a rasgos de probable origen kárstico en las rocas carbonatadas que albergan la mineralización sulfurada.

KIMBERLITAS: Se denominan así las rocas presentes en estructuras tipo chimeneas de brecha (= diatremas) profundas constituidas por material peridotítico originado en el manto, en las cuales se puede encontrar mineralización diseminada de diamantes. La parte superficial de la brecha, oxidada, presenta un color amarillento (*yellow ground*) y la inferior no oxidada, un color azulado (*blue ground*). La erosión de las chimeneas (= pipas) kimberlíticas da lugar a la formación de depósitos secundarios de diamantes del tipo placer, ya sea situados en sedimentos aluviales o en sedimentos marinos costeros (p.ej., en Namibia SW de África).

KIRUNA: Kiruna Vaara es un gran yacimiento de hierro (magnetita) de origen magmático, situado en el norte de Suecia. Define un tipo de yacimiento de hierro (= fierro) denominado *Kiruna*, equivalente al de *volcanic hosted magnetite* (magnetita en rocas volcánicas). Estos yacimientos se caracterizan por su asociación con magmas sub-volcánicos calcoalcalinos o alcalinos y una mineralogía que incluye piroxenos fibrosos o actinolita, apatita (= apatito), escapolita y contenido menores de sulfuros, así como menores contenidos en V y Ti. Los yacimientos ferríferos cretácicos de la Cordillera de la Costa de Chile y del sur del Perú pertenecen a este tipo, así como el yacimiento plioceno de El Laco (Antofagasta, Chile).

KUROKO: Son yacimientos del tipo sulfuros masivos (= macizos) formados en un ambiente submarino. Los depósitos tienen una raíz consistente en una mineralización tipo stockwork de pirita-calcopirita y una parte superior formada sobre la superficie del fondo marino contemporáneo, constituida por agregados finos de sulfuros polimetálicos (Cu, Pb, Zn). Estos sulfuros presentan una fina textura y color negro (*kuroko* es una palabra japonesa que significa *mena negra*) si los sulfuros de Pb y Zn dominan la mineralización. También pueden observarse rasgos típicamente sedimentarios en las menas masivas depositadas sobre el fondo marino. Estos yacimientos son abundantes en Japón, donde fueron descritos y caracterizados tipológicamente. En Chile, los yacimientos cupríferos estratiformes del distrito Punta del Cobre presentan ciertas analogías con este tipo de depósitos. Quizás si el ejemplo más notable de este tipo se encuentre en España: río Tinto, que es el principal yacimiento de una provincia metalogénica (Faja Pirítica Ibérica) que se extiende de España a Portugal, y que incluye otros yacimientos como Tharsis, Aznalcollar, La Zarza, Aljustrel, y Neves Corvo (entre otros).

L

LAMPRÓFIROS: Se denomina así a rocas de afinidad alcalina, constituidas exclusivamente por minerales ferromagnesianos, y generalmente presentes en forma de diques. Investigadores de la ULS (Universidad de La Serena, Chile) encontraron en el distrito Los Mantos de Punitaqui (Cu-Au-Hg, Región de Coquimbo, Chile) pseudolamprófiros. Estos están constituidos por andesitas porfíricas cuyas plagioclasas albitizadas presentan color negro brillante y aspecto de anfíoblas (= anfíboles) debido a la presencia de finas inclusiones de magnetita. En consecuencia, puede que algunos lamprófiros presentes en distritos mineros tengan similar origen.

LATERITA: Los suelos lateríticos se desarrollan bajo climas cálidos lluviosos y pueden alcanzar en condiciones topográficas favorables varias decenas de metros de espesor. Estos suelos se caracterizan por presentar color rojo. Diversos tipos de yacimientos se pueden formar durante la laterización de las rocas ígneas:

- Rocas félsicas aluminosas (ricas en feldespato) yacimientos de bauxita: gibbsita: $\text{Al}(\text{OH})_3$, boehmita: $-\text{AlO}(\text{OH})$, y diáspora: $-\text{AlO}(\text{OH})$.
- Rocas máficas ricas en Fe óxidos de Fe.
- Rocas máficas magnesianas ricas en Ni óxidos de hierro y garnierita (mena verde de Ni).

LEY (en inglés: *Grade*): El término denota el porcentaje de un elemento químico o de un mineral industrial, ya sea en una muestra, en un bloque mineralizado o en un yacimiento (ley media). La ley media de un depósito depende de la parte de él que se considere, y naturalmente desciende en la medida que se incluyen zonas más pobres en el cálculo de sus reservas. En consecuencia es normal que se genere una relación inversa entre la magnitud de las reservas calculadas y su ley media, a menos que el crecimiento de las reservas se deba al descubrimiento de un nuevo cuerpo mineralizado más rico, ya sea en el mismo yacimiento o en sus inmediaciones.

LEY DE CORTE (en inglés: *Cut off grade*): El término designa aquella ley bajo la cual el mineral extraído no es enviado a la planta para su beneficio metalúrgico. Puesto que esa ley puede variar conforme a factores económicos o tecnológicos, el mineral de ley inferior a la de corte, pero que presenta contenidos apreciables de mineral, debe ser apilado separadamente por su posible valor futuro.

LIMONITA (en inglés: *Limonite*): Agregado de óxidos, óxidos hidratados, hidróxidos de hierro y sulfatos de Fe y K que se forman durante la oxidación de los sulfuros en la parte superior de un yacimiento (gossan). Las limonitas incluyen minerales tales como la goethita, jarosita, y hematita (= hematites), entre otros. El tipo más común es la goethita, que se forma de la siguiente manera (ecuación simplificada): $\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}^+$. Las limonitas de los gossans son utilizadas por su valor diagnóstico para estimar el probable interés de la mineralización subyacente. La limonita forma un compuesto de baja solubilidad con molibdeno (ferromolibdenita), que dificulta la migración de ese metal. De ahí que el análisis geoquímica por Mo sea mejor indicador de la mineralización principal que el análisis por Cu, elemento que migra fácilmente. Esto es especialmente pertinente en exploración de pórfidos cupríferos. Las mezclas de limonitas con minerales enriquecidos en Cu reciben el nombre de *almagre* (Chile). En España el término *almagre* denota un agregado de sulfatos en los que predomina la alunita con óxidos de Fe (de ahí su color rojo). Ver además: Gossan, celdillas residuales.

LITOLÓGIA (en inglés: *Lithology*): El término abarca todo lo referente a las rocas, incluido su metamorfismo y alteración hidrotermal. Junto con la estructura (control estructural), la litología ejerce un control principal sobre la distribución de la mineralización en un yacimiento

LITOSTÁTICA: Ver presión litostática.

LIXIVIACIÓN (en inglés: *Leaching*): Efecto de disolución ejercido por una solución sobre los materiales a través de los cuales circula. La lixiviación desempeña un papel muy importante en la formación de yacimientos metalíferos. Por ejemplo, los metales contenidos en secuencias sedimentarias pueden ser lixiviados por soluciones salinas durante su diagénesis, y depositados en contextos favorables. Otro tanto hacen las soluciones hidrotermales al atravesar secuencias volcánicas o sedimentarias. También la lixiviación desempeña un papel principal en la formación de sulfuros secundarios y de depósitos exóticos de cobre a expensas del metal lixiviado desde la zona de oxidación. La lixiviación es un proceso fundamental en las operaciones hidrometalúrgicas (por ej., lixiviación en pila).

LOPOLITO: Cuerpo ígneo intrusivo y concordante que presenta una forma de embudo y alcanza decenas de km de diámetro. Los lopolitos se encuentran en ambientes tectónicos de escudo, y a ellos se asocian importantes yacimientos de Cr, Ni y platinoideos (Pt, Os, Ir, etc.), como Bushveld, en Sudáfrica. El lopolito de Sudbury, en Canadá, es rico en minerales de Ni y Cu.

M

MAAR: Depresión formada en el afloramiento de una diatrema, chimenea de brecha asociada a un sistema volcánico. Esta depresión puede albergar un pequeño lago, cuyos sedimentos pueden a su vez ser mineralizados por la actividad fumarólica-hidrotermal del sitio. Los maares se forman como consecuencia de una erupción freatomagmática. Excelentes ejemplos de este tipo de vulcanismo se pueden encontrar en la provincia volcánica de Ciudad Real (España) y en el Macizo Central Francés (Auvernia)

MACIZA (MASIVA) (en inglés: *Massive*): Denota un tipo de textura maciza (= masiva) de la mineralización. El término designa igualmente una clase de yacimientos: depósitos sulfurados macizos (= sulfuros masivos).

MACIZO (en inglés: *Stock*): Designa un cuerpo intrusivo de menor tamaño que un batolito. Normalmente los macizos constituyen apófisis de los batolitos, desde los cuales se elevan unos 2 km para situarse a una profundidad similar respecto a la superficie. Los pórfidos cupríferos corresponden a macizos, aunque su relación respecto a los batolitos puede ser más compleja. En España y Francia el término tiene connotación morfológica, para designar a una montaña o conjunto de montañas (cadena), por ejemplo, Macizo Ibérico, Macizo Central Francés.

MACIZO ROCOSO (en inglés: *Rock mass*): El término se refiere al enfoque geomecánico o geotécnico de la masa rocosa *in situ* para su intervención ingenieril (labores subterráneas, corrección

de taludes, etc.). Dicho enfoque considera tanto las propiedades físicas de la roca como el efecto de las estructuras que presenta (fracturas, pliegues) y de los cuerpos de aguas subterráneas respecto a su probable comportamiento geomecánico y geotécnico.

MÁFICA (en inglés: *Mafic*): Se denomina rocas máficas a aquellas rocas ígneas ricas en minerales ferromagnesianos (olivino, piroxenos, anfíbolos = anfíboles), tales como los gabros, basaltos y andesitas basálticas. Las rocas máficas presentan colores oscuros, a diferencia de las félsicas, caracterizadas por colores gris claro. No obstante, el color es también función de la textura y en general texturas finas comunican a la roca un color más oscuro. La presencia de rocas máficas poco alteradas, o con alteración hidrotermal potásica o propilítica, constituye un factor favorable para neutralizar el drenaje ácido.

MAGMATISMO CALCOALCALINO: Es el tipo de magmatismo característico de los márgenes tectónicos con subducción de placa oceánica (ya sea bajo corteza continental: tipo Andino o bajo corteza oceánica: arcos de islas). Se trata de un magmatismo oxidado, rico en azufre, lo que favorece el desarrollo de yacimientos metálicos sulfurados. Es un magmatismo empobrecido en Fe respecto al magmatismo toleítico. Sin embargo, importantes yacimientos de hierro se asocian a él (en especial de tipo Kiruna). Rocas características de este magmatismo son andesitas y dacitas entre las volcánicas, y dioritas y granodioríticas entre las plutónicas. Sin embargo, el carácter calcoalcalino de una serie magmática no puede ser considerado como un rasgo diagnóstico de subducción. Por ejemplo el vulcanismo mioceno del sureste de España es calcoalcalino, pero no relacionado con subducción.

MANTO (terrestre): El manto de la Tierra se extiende entre la corteza (5 a 70 km de espesor) y los 2.270 km de profundidad, donde limita con el núcleo externo. Se distingue entre un manto superior o litosférico rígido, un manto astenosférico de menor rigidez y un manto inferior, nuevamente rígido. Algunos yacimientos minerales tienen su origen directo en el manto, como los de las chimeneas diamantíferas, los de cromita de carácter podiforme o de lopolitos (con Pt y platinoides).

MANTO (yacimientos): Designación tipológica estructural de yacimientos utilizada en Chile y Perú para depósitos estratiformes en secuencias volcánico-sedimentarias, cuya inclinación es moderada (del orden de 40° o menor). Generalmente, estos yacimientos se explotan por el método caserones (= cámaras) y pilares (*room and pillar*).

MASH (del inglés: *Melting, Assimilation, Storage and Homogenisation*): El término designa los procesos de fusión, asimilación, almacenamiento y homogenización de materiales magmáticos que se desarrollan en las zonas de subducción bajo la corteza, en el manto sublitosférico. Los magmas generados en esta zona ascienden hacia los niveles corticales superiores, experimentando distintos grados de diferenciación y asimilación en su trayecto. Se supone que la participación de la placa litosférica en este proceso aporta agua y sustancias mineralizadoras y metales, los que favorecen la capacidad metalogénica de los magmas formados en la zona MASH.

MEDI D A S: Ver reservas.

MENA (en inglés: *Ore*): Se entiende por mena un conjunto de minerales de los cuales uno o más de ellos (generalmente de carácter metálico) presenta valor económico. Los minerales sin valor económico que acompañan a la mena (normalmente de carácter no metálico) constituyen la ganga. Mena y ganga son términos ambiguos. Por ejemplo, un sulfuro integrante de la mena, sin interés económico en una mina (p.ej., pirita) no será denominado ganga, mientras que un no metálico (p.ej., baritina = barita) que puede llegar a tenerlo, generalmente se considera como tal. Digamos que el término mena se asocia a la mineralización metálica (con o sin valor económico) y el término ganga a la mineralización no metálica (con o sin valor económico), aunque esto escape a la definición estricta de ambos términos. Ver además: Ganga.

MENA BRECHOSA: Se califica así a una estructura y/o textura de origen hidrotermal y/o mecánico que confiere a la roca mineralizada el aspecto de una brecha.

MENSURA (DEMARCACI ÓN): Operación de delimitación topográfica de una propiedad minera con fines legales.

MESOTERMAL (en inglés: *Mesothermal*): Conforme a la clasificación de Lindgren de los yacimientos hidrotermales sobre la base de su temperatura de formación, corresponde a aquellos cuya mineralización principal se depositó entre 300° y 200° C.

METAL DE BASE (METAL BÁSICO) (en inglés: *Base metal*): Se denomina así a un grupo de metales que incluye al Cu, Zn, Pb, Cd, Sn y Hg, considerados básicos para la industria. Otras agrupaciones de metales son las de metales para ferroaleaciones (Cr, Co, Mo, Ni, W y V), metales preciosos (Au, Ag, Pt y Pd) y metales especiales (Sb, As, Be, Bi, Ga, Ge, In, Nb, Ta, Zr y tierras raras).

METALOGÉNESIS (en inglés: *Metallogenesis*): Disciplina del campo de la geología económica que estudia la formación de los yacimientos metalíferos en un contexto geológico integral. La metalogénesis como tal se desarrolló originalmente en Europa y resaltó la importancia de los procesos sedimentarios y diagenéticos en la formación de yacimientos, así como la posible *herencia* de contenidos metálicos en determinados dominios geológicos. El término (*métallogénie*) fue propuesto por L. de Launais en 1913 y une los de metal (*metallon*) y génesis (*genesis*), ambos del griego clásico.

METALOTECTO: Término propuesto por P. Routhier para aquellos factores o contextos geológicos responsables de la formación de determinados tipos de yacimientos que pueden ser utilizados en exploraciones mineras. Por ejemplo, la Falla de Domeyko es un metalotecto para pórfidos cupríferos en el norte de Chile.

METAMORFISMO (en inglés: *Metamorphism*): Modificación profunda de los rasgos mineralógicos y estructurales de una roca debido al efecto de elevadas temperaturas y presiones. Se reconoce un metamorfismo regional progrado, generado por una elevación sistemática de la temperatura y presión, que afecta fuertemente la mineralogía y estructura de las rocas. Este metamorfismo se origina durante los grandes procesos orogénicos. También existe el metamorfismo de contacto, de carácter térmico, generado por contacto con cuerpos magmáticos intrusivos, cuyos efectos son especialmente mineralógicos. Finalmente, hay un metamorfismo de bajo grado, cuyos efectos son similares a los de la alteración hidrotermal propilitica. Con respecto a este último, aunque en teoría el metamorfismo es

isoquímico (vale decir, no implica intercambios importantes de materia con el medio externo), en la práctica está acompañado de metasomatismo y se entremezcla en parte con la alteración hidrotermal. Así, por ejemplo, en las rocas volcánicas mesozoicas de Chile es difícil distinguir el metamorfismo de bajo grado de la alteración hidrotermal propilítica regional (= alteración regional). Este metamorfismo de bajo grado (*low-grade metamorphism*) fue originalmente definido por D. Coombs en Nueva Zelanda el año 1954, mientras estudiaba la gran secuencia de 8.500 m de grauvacas y tobas en las colinas de Taringatura.

METASOMATISMO (en inglés: *Metasomatism*): Se entiende por metasomatismo el proceso de reemplazo de los minerales de una roca por otros a través de reacciones que también incluyen el reemplazo de componentes químicos (a diferencia de la concepción "isoquímica" que implica el metamorfismo, en términos teóricos). El metasomatismo se produce por efecto de fluidos neumatolíticos o hidrotermales. En el caso de yacimientos tipo skarn, dichos depósitos no podrían formarse sin un efecto metasomático superpuesto al metamorfismo de contacto, efecto que aporte los metales y metaloides que constituyen la mineralización económica.

METEÓRICAS: Se denomina aguas meteóricas (o de origen meteórico) a aquellas provenientes de la superficie terrestre. Las aguas meteóricas participan en distinto grado en la formación de la mayoría de los yacimientos hidrotermales en conjunto con aguas de origen magmático. Por otra parte, las aguas meteóricas son responsables de la formación de las zonas de oxidación y de enriquecimiento secundario (cementación de sulfuros), y de la generación de yacimientos exóticos.

METEORIZACIÓN: Proceso de alteración y destrucción *in situ* de las rocas, producto de los agentes atmosféricos (agua, aire, temperatura) y biológicos (efectos físicos, químicos y bioquímicos de plantas, hongos, microorganismos y animales). La meteorización produce una fragmentación de la roca, así como cambios químicos y mineralógicos. En términos termodinámicos, constituye una aproximación a un estado de equilibrio respecto a las condiciones ambientales de presión, temperatura y composición química en que se encuentra la roca en la superficie de la Tierra. El producto final de la meteorización es el desarrollo de un suelo. En general, se distingue entre meteorización química, física y biológica, cuya importancia relativa es función del clima, de la altura, de la topografía y de la cubierta vegetal. La meteorización desempeña un papel esencial en la formación de yacimientos del carácter residual, vale decir, enriquecidos por la disolución y migración de los componentes sin valor económico de la roca. También desempeña un papel importante en la formación de las zonas de oxidación de los yacimientos sulfurados e indirectamente, en el depósito de sulfuros enriquecidos de cobre, así como en la de yacimientos exóticos de cobre y de uranio tipo *roll front*.

MINERALES INDUSTRIALES (en inglés: *Industrial minerals*): Este término incluye una amplia gama de minerales que tienen aplicaciones industriales o son utilizados para la síntesis de compuestos inorgánicos o la obtención de elementos como los de carácter alcalino. Algunos minerales industriales tienen múltiples y muy variados usos: por ejemplo la halita (NaCl) se utiliza como condimento, para fundir la nieve de los caminos, para la fabricación de carbonato de sodio (*soda*), para la obtención de Na y Cl, etc. En algunos casos, los productores de un mineral industrial ofrecen numerosos tipos de él, cada uno adecuado a un fin específico (caso de las arcillas). El procesamiento físico, químico o físico-químico de un mineral industrial, así como el valor económico respectivo, pueden ser muy diferentes según el uso al que se destina. Por ejemplo, es muy distinto vender CaCO₃ para la industria cementera

que CaCO_3 precipitado para la fabricación de pasta dental. Se estima que el consumo y las exigencias de calidad respecto a los minerales industriales son un buen índice del grado de desarrollo de un país. Efectivamente estos minerales participan en todos los ámbitos (vidrios, fabricación de papel, cosméticos, medicamentos, procesos químicos, incluso en el procesamiento metalúrgico de los minerales metálicos). Chile no es un gran productor de minerales industriales, con la notable excepción de las sales del Norte Grande: caliche salitrero (nitratos, iodatos y sulfatos), cloruro de sodio del Salar Grande, sales de litio y potasio del Salar de Atacama, etc. Por el contrario, España lo es, y en casi todos los ámbitos de la minería y procesamiento de minerales industriales, destacando en este apartado las arcillas especiales. La casi segura evolución de la industria automotriz hacia la fabricación de *híbridos* (motor convencional + motor eléctrico) y automóviles eléctricos, puede dar un elevado valor al litio del Salar de Atacama (Chile), dado el uso de ese elemento en la elaboración de acumuladores eléctricos de alto rendimiento. Los minerales industriales son también denominados no metálicos.

MINERALIZACIÓN (en inglés: *Mineralization*): El término denota el proceso de formación de minerales y generalmente se utiliza para minerales de interés económico. Por extensión, el término se utiliza también para designar una concentración de minerales ya formados, por ejemplo: *Existen indicios de mineralizaciones de cobre en Quebrada Grande.*

MINERALIZADORA: Sustancia que facilita un proceso de mineralización. Por ejemplo, las sustancias volátiles como los compuestos de azufre y de halógenos, desempeñan junto con el agua un importante papel como agentes mineralizadores.

MODELO (en inglés: *Model*): Es una representación idealizada y simplificada de la realidad, que se utiliza para describir o explicar un fenómeno físico o proceso, o para caracterizar los rasgos comunes que presenta un conjunto de objetos naturales. Por ejemplo, el modelo del interior de la Tierra, el modelo del ascenso de cuerpos magmáticos en la corteza, el modelo de yacimientos cupríferos de tipo porfírico, etc. Los modelos acompañan y completan la elaboración de hipótesis. Pueden ser de carácter conceptual y utilizar ecuaciones (generalmente diferenciales) en la descripción de sus distintos componentes, o bien ser de carácter empírico (descriptivos, más que interpretativos). Los modelos metalogénicos, que describen y explican los principales tipos de yacimientos minerales (en particular los de carácter metalífero), desempeñan un papel principal en su estudio y exploración. Los modelos empíricos consisten en una descripción de los atributos básicos de un determinado tipo de yacimiento mineral, por ejemplo, morfología, litología, mineralogía, estructura. No importa entender cómo se relacionan estos atributos más allá del mero hecho de saber que están presentes. Por su parte, los modelos conceptuales (= teóricos) intentan relacionar dichos atributos a través de procesos geológicos y físico-químicos. Adicionalmente, se puede agregar información sobre las anomalías geofísicas y geoquímicas generadas por la presencia del yacimiento tipo.

MODELO DE BLOQUES (en inglés: *Block model*): Se denomina así a la representación del yacimiento a través de su división en múltiples bloques, cuyo tamaño se relaciona con las características del método de explotación a utilizar. Cada uno de los bloques así definidos contiene la información geológica, mineralógica, de leyes, etc., que es necesaria para la toma de decisiones durante las etapas de planificación y explotación.

MODELO GEOMECÁNICO (en inglés: *Geomechanical model*): Este modelo presenta las

características geomecánicas de las rocas de un yacimiento en un modelo de bloques, que se utiliza para predecir su comportamiento durante la explotación minera del depósito.

MODELO GEOMETALÚRGICO (en inglés: *Geometallurgical model*): La geometalurgia tiene por objeto utilizar toda la información disponible (mineralógica, litológica, estructural, de leyes, etc.) para predecir el comportamiento de las menas durante sus procesos de tratamiento metalúrgico, información que se integra al modelo de bloques.

MOLIBDENITA (en inglés: *Molybdenite*): Junto con las mayores reservas mundiales de cobre, Chile posee igualmente las de molibdeno, también presentes en sus yacimientos porfíricos de cobre. El molibdeno se presenta como molibdenita (MoS_2), mineral gris claro brillante que cristaliza en el sistema hexagonal y deja una raya gris análoga a la del grafito. La baja dureza del mineral se explica por su estructura cristalina que facilita el desprendimiento de *hojas* del mineral y que permite su uso como lubricante en casos especiales. La molibdenita de los pórfidos cupríferos presenta contenidos importantes de renio, debido a la similitud cristaloquímica de ambos elementos (que permite el reemplazo de Mo por Re).

MVT (del inglés: *Mississippi Valley type*): Tipo de yacimientos de Pb-Zn emplazado en rocas carbonatadas marinas de la plataforma continental (calizas alteradas en parte a dolomías). Sus distritos son extensos, cubriendo cientos e incluso miles de km^2 , aunque los depósitos individuales son pequeños (generalmente $< 2 \text{ Mt}$). Normalmente el zinc supera al plomo, y la ley conjunta es inferior al 10%. Estos yacimientos se formaron con posterioridad al depósito de las rocas carbonatadas, ya sea durante la etapa diagenética o una posterior, por efecto de soluciones salinas originadas en la propia secuencia sedimentaria, y con aportes de aguas meteóricas.

N

NATIVO: Se dice de un elemento presente en un yacimiento en su forma metálica pura, por ejemplo, Cu nativo (Cu^0), Ag nativa (Ag^0). Excepto en el caso del oro o de los platinoides, los metales nativos se depositan por un proceso de oxidación del mineral sulfurado, seguido por una reducción química que reduce el catión al estado metálico.

NEUMATOLÍTICA: Etapa tardía de la cristalización de un magma, que es posterior a la pegmatítica, y se desarrolla entre unos 600° y 400°C . Para esto tiene que existir una gran concentración de volátiles que dan lugar a la formación de minerales como la turmalina. En la etapa neumatolítica, se forman minerales por reacción entre fases gaseosas, por ejemplo, $\text{SnF}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SnO}_2 + 4\text{HF}$.

NIVEL FREÁTICO: Es aquel nivel debajo del cual todos los espacios interconectados están saturados de agua. Sobre el nivel freático se encuentra la zona vadosa, donde el agua se encuentra de paso en su desplazamiento hacia el nivel freático. El nivel freático separa la zona de oxidación de la zona de cementación (= enriquecimiento secundario) en los yacimientos de cobre sometidos a oxidación. Esto es así porque debajo del nivel freático dominan las condiciones reductoras (niveles muy bajos de O_2). El nivel freático también desempeña un papel importante en la química de las soluciones durante la

formación de depósitos epitermales porque al sobrepasarlo las soluciones encuentran un ambiente oxidante (niveles altos de O_2) que inducen el paso del ion sulfuro a sulfato. Esto se traduce en la precipitación del oro y un fuerte aumento de la acidez por la formación de ácido sulfúrico (a expensas de sulfuro o sulfidato: S^{2-} , HS^-). Las explotaciones mineras, ya sean subterráneas o a cielo abierto pueden perturbar el nivel freático local. Al situarse bajo este pueden requerir importantes inversiones de energía para evacuar las aguas que ingresan a las labores en explotación mediante bombeo. Por su parte el bombeo induce la formación de un cono de depresión del nivel freático (impacto ambiental). Por otra parte, las aguas subterráneas pueden ser un importante vehículo de contaminación entre la mina y el drenaje local y regional (impacto ambiental).

NÓDULOS: Los nódulos de manganeso forman extensos yacimientos, enriquecidos en Cu, Ni y otros metales, dispuestos sobre la superficie del fondo oceánico profundo. Pueden alcanzar el tamaño de una pelota de tenis y se distribuyen a razón de varios nódulos por m^2 . Se han considerado como una futura fuente de metales, aunque su extracción es costosa y difícilmente competitiva con las explotaciones continentales de manganeso y otros metales en las actuales condiciones.

NO METÁLICOS: Ver Minerales Industriales.

NORITA: Roca de composición gábrica, presente en yacimientos de cromita y platinoideos del tipo Bushveld (lopolitos de regiones tectónicas tipo escudo). Ver lopolito.

O

OFIOLITAS: Secuencias de rocas volcánicas máficas submarinas fuertemente alteradas. Estas rocas alteradas se generan principalmente en las dorsales oceánicas, donde magmas basálticos toleíticos sufren hidratación durante su proceso de cristalización. Los complejos ofiolíticos acompañan la presencia de yacimientos volcanogénicos de sulfuros macizos (VMS), p.ej. del tipo Chipre.

ONZA TROY (en inglés: *Troy ounce*): Unidad de peso inglesa que ha sobrevivido a la adopción del sistema métrico y continúa utilizándose para expresar las reservas de metales preciosos, en particular del oro. Una onza troy equivale a 31.1 g.

OROGENO: Se denomina así a una cadena montañas producto de esfuerzos compresivos horizontales en una faja de inestabilidad tectónica (por ejemplo, los Andes, los Himalayas). El proceso tectónico que da lugar a la formación de esa cadena es complejo y se denomina orogénesis. Los procesos orogénicos se interpretan en términos de la teoría de la tectónica de placas. Los orógenos de tipo Andino, que implican la subducción de corteza oceánica bajo un borde continental presentan ricas mineralizaciones de elementos sulfófilos (Cu, Mo, Pb, Zn, etc), así como de hierro y metales preciosos (Au y Ag).

ORTOMAGMÁTICA: Etapa de la cristalización de un magma durante la cual se forman las rocas ígneas propiamente tales, a temperaturas superiores a $800^{\circ}C$. Esta etapa es seguida por la etapa pegmatítica ($800^{\circ}-600^{\circ}C$), la neumatolítica ($600^{\circ}-400^{\circ}C$) y la hidrotermal ($400^{\circ}-50^{\circ}C$). Durante esta etapa se forman yacimientos como los de cromita y platinoideos en cuerpos lopolíticos.

OXIDACIÓN: Se entiende por oxidación de un elemento químico la cesión de uno o más electrones a otro elemento (el cual se reduce). El oxígeno desempeña un papel principal en los procesos de oxidación en la atmósfera y la hidrósfera, y uno importante (aunque más complejo) en los de diferenciación magmática. Al respecto, la oxidación reviste especial importancia en la formación de las series magmáticas oxidadas con magnetita y series reducidas con ilmenita (propuestas por S. Ishihara). A las primeras, presentes en el arco magmático más cercano a la fosa oceánica, se asocian yacimientos sulfurados de Cu, Mo, etc., depósitos ferríferos y epitermales de Au-Ag, en tanto que los de Sn y W acompañan a un magmatismo menos oxidante, más alejado de la fosa oceánica. Es el caso de Chile (Cu-Fe-Au) y Bolivia (Sn-W), que se repite con una notable simetría especular en el margen del Pacífico Occidental.

P

PALEOSUPERFICIE: El término alude a la superficie (hoy erosionada) que existía cuando un yacimiento se formó o se enriqueció por efectos secundarios.

PALLACO: Término utilizado en Bolivia para designar concentraciones detríticas de minerales acumuladas en los faldeos de cerros mineralizados, como Cerro Rico de Potosí (Sn-Ag). Su equivalente en Chile son los *papeos* de minerales de hierro presentes en los faldeos de Desvío Norte y otros yacimientos.

PARAGENESIS: Designa la secuencia de minerales depositados en un yacimiento, indicando su relación de tiempo mediante un diagrama que muestra los nombres de los minerales en el eje Y (ordenada) y sus relaciones temporales en el eje X (abscisa). La paragénesis se determina en muestras que son estudiadas macroscópicamente y microscópicamente: si un mineral corta a otro, el que corta es más joven; si uno reemplaza a otro, el reemplazante es más joven, igual que el que rodea a otro; si están interdigitados son contemporáneos, etc. Puesto que la paragénesis refleja el efecto de un pulso mineralizador, nuevos pulsos pueden llevar a la repetición, al menos parcial, de la secuencia paragenética inicial. Es importante considerar que la paragénesis ilustra lo que ha ocurrido en un yacimiento a lo largo del tiempo, mientras que la zonación describe el efecto del proceso mineralizador en el espacio. Ver zonación.

PEGMATITAS (en inglés: *Pegmatites*): Son rocas constituidas por grandes cristales de tamaño centimétrico a métrico, que deben su desarrollo a la movilidad iónica producto de una alta concentración de sustancias volátiles. Las pegmatitas están constituidas por minerales de cristalización tardía (eutéctico ternario); cuarzo, micas, feldespato K y de Na, y otros minerales secundarios (turmalina, topacio, etc.). Las pegmatitas se forman a partir de fluidos residuales de la cristalización y se sitúan en una posición intermedia entre los magmas normales, los fluidos neumatóliticos y las soluciones hidrotermales. Las pegmatitas de Chile no presentan minerales secundarios de interés, sí en cambio los presentan las de Argentina, asociadas a magmas más alcalinos.

PERIDOTITAS (en inglés: *Peridotites*): Son rocas ultramáficas constituidas por olivino y piroxeno,

típicas de la composición del Manto. Cuando ocurren procesos de acreción de terrenos exóticos al continente, se puede producir ascenso diapírico de materiales del Manto. Este es el caso de las peridotitas presentes en la Cordillera de Nahuelbuta (Cordillera de la Costa, en el sur de Chile), que presentan contenidos subeconómicos de cromitas de tipo podiforme. En España existen importantes afloramientos de peridotitas en Galicia (por ej, Macizo de Herbeira) y Andalucía (por ej., afloramientos de Ronda).

PERTENENCIA (en inglés: *Mining property*): El término designa una unidad de propiedad minera que cuenta con respaldo legal. El conjunto de pertenencias que integran una propiedad minera queda delimitado en el terreno mediante hitos establecidos por un topógrafo autorizado a cargo de la mensura. En Chile, la propiedad minera es registrada por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

pH (POTENCIAL DE HIDRÓGENO): Es una medida de la concentración de hidrogeniones $[H^+]$ en una solución acuosa y se expresa como $pH = -\log [H^+]$. El agua pura a 25°C se encuentra débilmente ionizada a través del siguiente equilibrio: $H_2O = H^+ + OH^-$, y el producto de equilibrio (K_w) es $[H^+][OH^-] = 10^{-14}$ moles/litro. Así $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ (la concentración de hidrogeniones es igual a la de oxidrilos = 10^{-7}). Por esto el pH del agua pura es 7 ($pH = -\log [H^+] = -\log (10^{-7}) = 7$). Sin embargo, por efecto de la adición de un ácido o de un hidróxido (base) dicha relación se altera y la solución se vuelve más ácida o más alcalina. Por ejemplo, una solución de HCl de concentración molar (moles/litro) 10^{-3} tendrá $pH = 3$ ($pH = -\log [H^+]$). Esto es así porque el ácido está casi completamente dissociado (ácido fuerte) y la concentración inicial de H^+ (10^{-7}) es tan baja que puede ser despreciada frente a 10^{-3} . En este caso, la concentración de OH^- baja a 10^{-11} para mantener el equilibrio ($K_w = [H^+][OH^-] = 10^{-3} \times 10^{-11} = 10^{-14}$). También la hidrólisis de una solución formada por un ácido fuerte-base débil o de un ácido débil-base fuerte produce un cambio del pH, que se hará más ácido en el primer caso y más alcalino (básico) en el segundo. Por ejemplo, la reacción de hidrólisis $CaCO_3 + H^+ \rightarrow Ca^{2+} + HCO_3^-$ consume hidrogeniones y por lo tanto, sube el pH de la solución (el pH se hace más alcalino). El pH tiene un importante papel en el control de las soluciones hidrotermales (disolución-precipitación de metales), así como en el enriquecimiento secundario de yacimientos sulfurados y en la formación de yacimientos exóticos. La evaluación de este parámetro es también esencial en la evaluación del riesgo de generación de drenaje ácido desde explotaciones mineras, así como en operaciones de tratamiento metalúrgico y en la estimación del riesgo ambiental que implican los desechos sólidos de las operaciones mineras y metalúrgicas.

PIQUE (POZO) (en inglés: *Vertical shaft o raise*): Es una faena (= labor) minera vertical. En inglés se usa el término *vertical shaft* para un pique (= pozo) excavado desde la superficie, que permite la entrada a la mina subterránea y su ventilación, y *raise*, para la labor vertical interna excavada desde una galería, para unir dos niveles de la mina.

PIRITA (en inglés: *Pyrite*): Es un sulfuro de hierro (= fierro) de fórmula FeS_2 (a diferencia de la pirrotina: $Fe_{(1-x)}S$). Cristaliza en sistema cúbico, en formas características como el cubo mismo o el pentadodecaedro (*piritoedro*). Es el mineral sulfurado más abundante. Se explotó como mena de azufre para la fabricación de ácido sulfúrico (por ej. en río Tinto; Huelva, España), pero hoy es raramente usado para ese fin. La pirita es un mineral con brillo metálico intenso, de color amarillo pálido, y normalmente bien cristalizado. Su fórmula química expresa una anomalía de sus cristales,

puesto que hay átomos de azufre extra en espacios que corresponden a Fe^{2+} . Al oxidarse en presencia del agua, forma FeSO_4 (aporte de Fe^{2+}) y H_2SO_4 (aporte de H^+):

- $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$
- $4\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$

A su vez, la formación de ión férrico (Fe^{3+}) contribuye también a la oxidación de la pirita:

- $\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$

Esto de por sí genera fuerte acidez, a la que se une la producida a continuación por la oxidación e hidrólisis del hierro y formación de la goethita:

- $\text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}^+$

Este efecto de acidez en el medio favorece la migración de metales en la zona de oxidación de yacimientos de cobre, y por lo tanto, la formación de sulfuros ricos en profundidad (zona de cementación). También posibilita la formación de yacimientos exóticos de cobre, debido al ambiente ácido que genera. Igualmente, es un factor dominante en la producción de drenaje ácido contaminante. Otra forma de FeS_2 , de baja temperatura, es la marcasita. Ver además: pH.

PIROMETALURGIA (en inglés: *Pyrometallurgy*): Conjunto de procedimientos metalúrgicos de liberación y refinación de metales, que implican procesos de elevada temperatura, como la fusión de minerales y el refinado a fuego. El llamado cobre blister es un producto de ambos procesos. El principal problema de la pirometalurgia (utilizada en el tratamiento de concentrados sulfurados de cobre) son sus emisiones aéreas. Estas incluyen SO_2 (que en la atmósfera forma ácido sulfúrico, principal responsable de la lluvia ácida) y pueden incluir también As_2O_3 , si el concentrado contiene enargita (Cu_3AsS_4).

PIRROTINA (en inglés: *Pyrrhotite*): Sulfuro de hierro de fórmula $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ($x = 0$ a 0.2). Posee cierto grado de magnetismo (débil comparado con el de la magnetita). Su aspecto es metálico, de color amarillo pálido y cristaliza en el sistema monoclinico (variedad pobre en hierro) o hexagonal (variedad rica en hierro), aunque generalmente presenta aspecto masivo. Es un mineral frecuente en yacimientos de tipo skarn de cobre.

PLACERES (en inglés: *Placers*): Yacimientos secundarios de minerales formados por erosión diferencial o por depositación diferencial (durante el transporte de sedimentos). Los minerales que forman estos yacimientos son resistentes al ataque químico así como a la abrasión, y su alta densidad les permite sedimentar cuando otros minerales son transportados por la corriente. Se distingue los siguientes tipos de placeres:

- Eluviales: el mineral económico permanece en el sitio mientras otros materiales de la roca o sedimento son disueltos o transportados.

- Aluviales: concentraciones en sitios favorables de una cuenca de drenaje donde hay obstáculos, disminución de velocidad de la corriente, efecto de la fuerza centrífuga.
- Litorales: formados por efecto del oleaje y las corrientes marinas.

El oro y los platinoides forman yacimientos tipo placer (aluviales) importantes. Debido, a su propiedad de amalgamarse se pueden desarrollar pepitas de oro. También forman placeres la casiterita (SnO_2), los diamantes y muchos minerales no-metálicos, como circón, granate, rutilo, etc. Los placeres auríferos de Chile se explotaron ya en tiempos incaicos y fueron el principal recurso económico que financió la conquista de Chile. En la Región de Coquimbo fueron notablemente importantes los de Andacollo, explotados ya en tiempos prehispánicos.

PLATINOIDES (en inglés: *Platinoids*): Elementos metálicos del Grupo del Platino, como Ir, Rh, Pd y Os. Ver Iopolito.

PLIEGUE (en inglés: *Fold*): Estructura formada por estratos deformados en formas arqueadas, siguiendo la figura de una onda mecánica. Se producen por el efecto de presiones horizontales sobre estratos que se comportan de manera plástica. La parte estructuralmente positiva del pliegue (en arco) se denomina anticlinal y la negativa sinclinal. El plegamiento desarrolla espacios en las zonas axiales anticlinales o sinclinales de los pliegues por diaclasamiento, fracturas que luego pueden albergar mineralizaciones hidrotermales. La mayor parte de los yacimientos minerales en Chile se encuentra en rocas no plegadas o suavemente plegadas debido al carácter competente de las secuencias volcánicas. En cambio, algunos distritos metalíferos del Perú presentan importante plegamiento, lo que se explica por la mayor participación de rocas sedimentarias de grano fino en sus secuencias estratificadas.

PLUMA (PENACHO) (en inglés: *Plume*): Este término denota una especie de *penacho* de una sustancia fluida que asciende en un medio sólido o fluido. Por ejemplo, la pluma de contaminación de SO_2 emitida por la chimenea de una fundición o la pluma formada por un fluido neumatolítico-hidrotermal que sale desde un magma en cristalización y se moviliza a través de las rocas en las que dicho magma se emplaza. Nota: la traducción de *plume* por pluma no es la más correcta, dado que el término en inglés denota un penacho, constituido por un conjunto de plumas paralelas, cuya forma se asemeja efectivamente a la que adopta el fenómeno en cuestión.

PLUNGE: Es un término inglés de amplio uso, que puede ser traducido como buzamiento axial. Se refiere a la dirección, sentido y ángulo de inclinación que presenta un elemento estructural axial. Por ejemplo, la inclinación = buzamiento del eje de un pliegue que indica la vergencia del mismo. También puede aplicarse en el caso de cuerpos mineralizados fusiformes (en forma de huso).

PLUTÓN: Cuerpo ígneo emplazado a varios km bajo la superficie. Puede ser un stock, macizo o un batolito. La palabra deriva del nombre del dios de los infiernos conforme a la mitología romana. Según las condiciones de cristalización, la naturaleza de las rocas que corta y las estructuras presentes, un plutón puede dar lugar a distintos tipos de mineralizaciones.

PODIFORME (en inglés: *Podiform*): La palabra describe un tipo de estructura en que la mineralización se presenta en cuerpos pequeños lenticulares. Se aplica principalmente a yacimientos

de cromita en peridotitas, como las de la Cordillera de Nahuelbuta, en el sur de Chile o las de Herbeira en el norte de España. Los cuerpos podiformes aparecen distribuidos al azar, separados entre sí por varios metros, lo cual dificulta la explotación de este tipo de depósito (en comparación con las capas continuas de cromita de los lopolitos).

POLÍMERO: Un polímero es una molécula gigante constituida por la repetición indefinida de una molécula simple pequeña. Los hidrocarburos parafínicos son estructuras polimerizadas construidas por la repetición del grupo CH_2 , las que a su vez pueden ser transformados en moléculas gigantes como las de los plásticos. Los silicatos (excepto los nesosilicatos) son estructuras polimerizadas del grupo SiO_4^{4-} , ya sea en cadenas (inosilicatos), planos (filosilicatos) o redes tridimensionales (tectosilicatos). En un magma, los silicatos presentan cierto grado de polimerización, la que es un preludio de su cristalización. El agua contenida por un magma tiene un efecto despolimerizante. En consecuencia tiende a retardar su cristalización.

POLIMETÁLICO (en inglés: *Polymetallic*): El término designa yacimientos que incluyen diversos metales sulfurados, principalmente Pb (galena) y Zn (blenda = esfalerita). Entre éstos están los de Casapalca, Cerro de Pasco, Morococha, Yauricocha, Huarón y San Cristóbal en Perú. Chile es relativamente pobre en esta clase de yacimientos, localizándose la mayoría de ellos en la Región de Aysén (por ej., Toqui) donde se asocian a una faja Patagónica, que continúa hacia el NNE en Argentina. Ejemplos españoles de yacimientos polimetálicos son los de La Unión y Mazarrón en Murcia, y Reocín en Cantabria.

PORFÍRICA, PÓRFIDOS (en inglés: *Porphyric, porphyries*): Porfírica es una textura típica de las rocas volcánicas, subvolcánicas o cuerpos hipabisales de ascenso rápido. Se caracteriza por la presencia de cristales de tamaño milimétrico a centimétrico, inmersos en una masa fundamental afanítica o microcristalina. Dicha textura se forma porque el magma experimenta una cristalización inicial en un nivel profundo (durante la cual se forman los cristales mayores), seguida de un rápido ascenso a un nivel más superficial, donde cristaliza la masa fundamental. Se denomina pórfidos a cuerpos de nivel hipabisal tipo stock o macizo, que presentan una masa fundamental microcristalina y cristales mayores de feldespato.

PÓRFIDOS CUPRÍFEROS (en inglés: *Porphyry copper*): Estos yacimientos están asociados a stocks porfíricos que pueden albergar o no la parte principal de la mineralización. Los pórfidos cupríferos tienen en común una serie de rasgos que incluyen: a) la magnitud de su mineralización (unos cientos a miles de Mt de roca mineralizada); b) su ley primaria relativamente baja (dado el predominio de los sulfuros pirita y calcopirita), la cual se sitúa bajo 1% Cu; c) la presencia de Mo u Au (raramente los dos en contenidos significativos) acompañando los contenidos de Cu; d) la capacidad para formar importantes zonas enriquecidas secundariamente con calcosina (Cu_2S), favorecida por la presencia de pirita y siempre que se den condiciones litológicas, estructurales y climáticas favorables; y e) la distribución en fajas coincidentes con bordes de subducción de placas oceánicas. La subducción puede ocurrir bajo corteza continental (tipo Andino) o bajo corteza oceánica (arcos de islas). En ese ambiente se generan los magmas calcoalcalinos (series con magnetita de Ishihara). Según el tipo de estructura que alberga la mineralización se distinguen dos subtipos:

- Stockwork (redes de finas fracturas mineralizadas) con o sin mineralización diseminada asociada importante.

- Chimenea de brecha (*breccia pipe*), con mineralización en la matriz junto (comúnmente) con turmalina.

La alteración hidrotermal puede disponerse concéntricamente de acuerdo a los modelos de:

- Lowell y Guilbert (de adentro hacia afuera): potásica filica argílica propilítica. Modelo característico de los ambientes de tipo Andino, con intrusiones granodioríticas asociadas.
- Hollister (de adentro hacia afuera): potásica propilítica. Este modelo es típico de rocas encajadoras máficas, generalmente en contextos tipo arcos de islas, con intrusiones dioríticas asociadas.

Los pórfidos cupríferos de cadenas de tipo Andino encierran las mayores reservas de Cu y Mo del mundo, y existen importantes reservas de oro en los pórfidos cupríferos de los arcos de islas volcánicas (Nueva Guinea, Indonesia, Filipinas, etc.). Los principales pórfidos cupríferos de Chile (cada uno con reservas de miles de Mt de rocas mineralizadas con Cu-Mo) son los de: Collahuasi (Tarapacá), yacimiento complejo que incluye varios tipos estructurales de mineralización; Chuquicamata (Antofagasta), gran depósito tipo stockwork, cuya zona superior oxidada fue notablemente rica; La Escondida (Antofagasta), caracterizado por la magnitud y ley de su zona de sulfuros secundarios; Los Pelambres (Coquimbo), yacimiento tipo stockwork; Río Blanco-Los Bronces (Valparaíso y Región Metropolitana), donde predomina la mineralización en chimeneas de brecha; y El Teniente (Región del Libertador), gran depósito tipo stockwork, cortado por una chimenea de brecha estéril.

POTASIO-ARGÓN: Método de datación radiométrica de rocas ígneas que utiliza la conversión del isótopo ^{40}K en ^{40}Ar quedando este gas noble atrapado en la red cristalina de los minerales. Es un método de datación de amplio espectro de edades, que puede ser usado desde unos 100.000 años hasta cientos y miles de millones de años. Sin embargo, si la roca experimenta metamorfismo (o sus minerales se alteran) el ^{40}Ar puede escapar de la roca, en cuyo caso la datación indica la edad del evento metamórfico. Este método ha sido muy utilizado en la datación de pórfidos cupríferos.

POTENCIAL REDOX: Ver Eh.

POTENCIAL IÓNICO: Este parámetro indica la relación entre el radio iónico de un elemento y su valencia positiva (vale decir Fe^{2+} , S^{6+} , etc.). Representando los distintos elementos con su respectiva valencia y radio iónico en un diagrama de dos ejes, ellos se agrupan en distintos campos, que se corresponden con sus propiedades químicas en solución: 1. Alto radio iónico, baja valencia (como Na, K, Ca, Mg, Fe^{2+}). Estos iones no se hidrolizan en soluciones acuosas. 2. Radio iónico y valencia intermedios (Al^{3+} , Fe^{3+}). Estos iones experimentan hidrólisis, precipitando los respectivos hidróxidos. 3. Pequeño radio iónico; alta valencia (como C^{4+} , P^{5+} y S^{6+}). No son solubles como iones simples, pero sí como iones complejos con oxígeno: CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} .

PRESIÓN HIDROSTÁTICA: Se denomina presión hidrostática a aquella ejercida por el peso de la columna de agua, suponiendo que ella no está cortada por niveles de rocas impermeables entre la superficie del terreno y el punto considerado.

PRESIÓN LITOSTÁTICA: La ejercida por la columna de rocas situada sobre el nivel considerado.

PRESIÓN SUPRAHIDROSTÁTICA: Cuando la columna de agua, que se desarrolla a través de las fracturas y espacios interconectados de rocas y sedimentos, es interrumpida por un nivel de rocas impermeables, el agua situada bajo ese nivel se encuentra a una presión intermedia entre la hidrostática y la litostática. Dicha presión recibe el nombre de presión suprahidrostática. Ver además: válvula activada.

PROCESO: El concepto de proceso involucra la consideración de las distintas fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial. En el caso de los procesos geológicos, esto implica la consideración de las causas y contextos físicos, químicos y biológicos que intervienen en cada una de esas fases y en la evolución y resultado de los fenómenos geológicos. Ejemplos de procesos geológicos son la formación de una cadena de montañas, el desarrollo de una caldera volcánica, la meteorización de un macizo rocoso, etc. En geología económica revisten especial importancia los procesos metalogénicos, los de enriquecimiento secundario de yacimientos sulfurados, los de generación de aureolas geoquímicas primarias y secundarias, etc.

PROSPECCIÓN: Ver exploración minera.

PROSPECTO (en inglés: *Prospect*): Se denomina así a una zona que presenta un cierto potencial para albergar mineralizaciones de carácter económico para su posible explotación. Este potencial puede ser de carácter geológico, mineralógico, geoquímico, geofísico, etc. El particular o la empresa que han reconocido el prospecto como tal pueden o no haber realizado trincheras de exploración (= calicatas) o sondajes (= sondeos), pero seguramente han invertido en el estudio de su geología y mineralogía y realizado muestreos geoquímicos preliminares (p.ej., geoquímica de suelos). Es posible que pretendan venderlo en esa etapa (tal vez reteniendo un porcentaje de su propiedad) o bien busquen asociarse para avanzar en su estudio. Según la información presentada y las características geológicas del sitio, un prospecto puede venderse por unos miles hasta cientos de miles de dólares-euros. Si cuenta con labores de reconocimiento o sondajes (= sondeos) positivos, ese valor puede subir hasta algunos millones de dólares. Al respecto, cuando se produjo la *fiebre del oro* generada por el descubrimiento de El Indio (Región de Coquimbo, Chile) un prospecto en la faja de interés llegó a venderse sin sondajes en 20 millones de dólares, pero fue un caso muy raro y el comprador no tuvo éxito en su apuesta.

PROVINCIAS METALOGÉNICAS (en inglés: *Metallogenic provinces*): Son áreas geográficas, generalmente en forma de fajas, que pueden alcanzar extensiones de hasta nivel subcontinental. Se caracterizan por la presencia de yacimientos recurrentes de uno o varios metales asociados. Por ejemplo, en la región Andina de Sudamérica, se distinguen de W a E las siguientes provincias metalogénicas:

- Ferrífera: norte de Chile y sur de Perú.
- Cuprífera-aurífera: toda la Cadena Andina, con un máximo en el norte de Chile y en Perú.
- Polimetálica: principalmente en Perú.
- Estannífera: con W o Ag, en Bolivia.

PROXIMAL: Denominación relacionada con los yacimientos tipo sulfuros macizos (= masivos) de asociación volcánica depositados en el fondo oceánico. El término alude a su proximidad relativa a la fuente de la mineralización. La denominación opuesta es distal, que indica su mayor lejanía respecto a ella. La presencia de rasgos magmáticos y de minerales de mayor temperatura, son criterios que indican el carácter proximal de un yacimiento. Ver además: Distal.

PULL-APART: Cuencas estructurales descomprimidas por efecto de la intersección y desplazamiento de fallas de desgarre (= rumbo), cuya geometría da lugar a condiciones locales extensionales y por lo tanto, subsidencia. La presencia de estas condiciones estructurales facilita también el emplazamiento de cuerpos ígneos intrusivos.

Q

QUERATOFIROS: Son rocas volcánicas alteradas de composición intermedia y de aspecto córneo (= corneano), emplazadas en medios subacuáticos, y que presentan enriquecimientos metasomáticos en sodio. Pueden ser considerados análogos de las espilitas, aunque de litología intermedia y de ambiente marino de plataforma. En Chile son frecuentes en las secuencias volcano-sedimentarias del Cretácico inferior.

R

RECURSOS: Es toda concentración natural de un sólido, líquido, o gas en la corteza terrestre, y cuya extracción es actual o potencialmente factible. En su aplicación minera (ambigua muchas veces), el término alude a estimaciones del probable volumen que alcanzan las rocas mineralizadas por uno o más metales en un distrito o yacimiento. Dicha estimación incluye recursos subeconómicos y está basada en inferencias geológicas. Las estimaciones de recursos son útiles cuando se va a comprar o vender una propiedad minera o una mina en explotación, así como cuando se planifica una nueva operación minera. Al respecto, hay que considerar el hecho de que en el caso de grandes yacimientos sería un error económico serio el realizar al principio todos los sondeos (= sondeos) necesarios para determinar sus reservas. Ello sería innecesario y demandaría una enorme inversión que representaría un capital inmovilizado. En consecuencia, se miden las reservas requeridas para sustentar un determinado proyecto de explotación y se continúa con la operación de agregar nuevas reservas a medida que avanza la explotación o se plantea la posibilidad de expandir el proyecto. Sin embargo, es conveniente contar en todo momento con una estimación de los recursos, para pensar en el largo plazo o hacer frente a situaciones coyunturales (por ejemplo: una oferta de otra empresa para una asociación o compra).

RESERVAS (en inglés *Reserves*): Son los tonelajes medidos de rocas mineralizadas con indicación de sus leyes, presentes en un yacimiento o distrito. En términos de su factibilidad económica de explotación se clasifican en económicas y marginales. Si son subeconómicas, se las denomina recursos (en vez de reservas). Las reservas económicas se pueden clasificar en:

- Medidas (= probadas): Se denomina reservas medidas a aquellas calculadas sobre la base de un número suficiente de muestras, separadas entre sí por una distancia igual o menor a la del alcance (ver Geoestadística). En su concepto más clásico, se habla de mineral medido cuando disponemos de una información directa tomada de un muestreo detallado de trincheras (calicatas), labores, sondeos (= sondajes). El tonelaje real no puede diferir en más de un 15% con respecto al calculado.
- Indicadas (= probables): Se denomina reservas indicadas de minerales de un yacimiento a aquellas cuyo cálculo está basado en un número suficiente de muestras, pero éstas están espaciadas a una distancia mayor que el alcance estimado (ver Geoestadística). Las cifras de las reservas indicadas se calculan como proyecciones razonables considerando la incertidumbre implicada por el mayor espaciamiento de las muestras.
- Inferidas (= posibles): Las reservas inferidas corresponden a cifras estimadas sobre la base del conocimiento geológico del yacimiento. Por ejemplo, si se constata la asociación de la mineralización de cobre con una zona de alteración de albita-clorita, se podría inferir que la mineralización continúa en zonas con la misma alteración, aunque carezcan de muestreo de leyes. Naturalmente, el acierto de estas estimaciones dependerá de la regularidad de la asociación entre la mineralización y los rasgos litológicos y estructurales del depósito, así como de la experiencia y criterio del profesional responsable.

RESURGENTE: Se denomina así a una caldera volcánica en cuyo interior se ha emplazado un nuevo magma a cierta profundidad, lo cual genera un ligero *doming* o arqueamiento interno. Las calderas resurgentes son sitios propicios para el emplazamiento de yacimientos epitermales de metales preciosos.

REVELADORES: En la terminología propuesta por P. Routhier, son factores geológicos como el emplazamiento de magmas intrusivos o el desarrollo de fallas que permiten la expresión del potencial de un dominio metalogénico en términos de la formación de yacimientos.

RIFT: Valle alargado de origen tectónico, que puede representar la etapa inicial en la formación de una nueva dorsal oceánica. Por ejemplo, el Rift de África. Es común que la formación de un rift vaya acompañada de la extrusión de magmas alcalinos.

ROCA ALMACENADORA: En geología del petróleo, es la roca porosa y permeable que alberga los depósitos de hidrocarburos líquidos o gaseosos.

ROCAS CORNEANAS (CÓRNEAS) (en inglés: *Hornfels*): Término aplicado a las rocas de la aureola de metamorfismo de contacto producido por un cuerpo magmático de considerable magnitud, que intruye a una secuencia de rocas estratificadas. Las rocas metamorizadas reciben también el nombre de rocas corneanas (= córneas). Los depósitos tipo skarn se sitúan en este contexto.

ROCAS ENCAJADORAS (en inglés: *Host rocks*): Son las rocas que albergan la mineralización de un yacimiento.

ROCA MADRE: En geología del petróleo es la roca generalmente formada en una plataforma marina de

carácter pelítico y reductor cuya etapa sedimentaria-diagenética dio lugar a la evolución de la materia orgánica a petróleo. Dicha evolución fue seguida por la posterior migración de los hidrocarburos hasta su emplazamiento en las rocas almacenadoras.

S

SALBANDA (en inglés: *Gouge*): Es el material fracturado presente en una falla. Incluye desde fragmentos mayores hasta fino material molido que presenta un aspecto lodoso (= gredoso) si hay agua presente. En inglés el término *fault gouge* (= harina de falla) hace mención al material fino que se encuentra en las zonas de falla.

SALMUERA (en inglés: *Brine*): Solución muy salina, que contiene principalmente Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . Las salmueras pueden tener variados orígenes: a) producto de la evaporación de cuerpos de agua dulce o de mar; b) a partir de la evolución de aguas *connatas* presentes en sedimentos en proceso de diagénesis; y c) de la cristalización de magmas, seguida de fenómenos de ebullición, etc. Las salmueras tienen especial interés en geología económica por dos razones principales. Una de ellas es su contenido en elementos valiosos. Por ejemplo, las salmueras del Salar de Atacama (norte de Chile) son fuente de potasio y de litio entre otros productos. Además son precursoras de yacimientos salinos. La segunda razón es su capacidad para disolver y transportar metales en forma de iones complejos, principalmente de tipo clorurado que desempeñan un papel importante en la formación de algunos tipos de yacimientos metalíferos de origen diagenético (por ej., MVT de Pb-Zn), así como en la de aquellos directamente relacionados con la cristalización magmática en la etapa hidrotermal (p.ej., pórfidos cupríferos), como muestran las inclusiones fluidas de alta salinidad encontradas en estos yacimientos.

SEDEX: El término constituye una combinación de los términos sedimentario y exhalativo. El término denomina los yacimientos emplazados en secuencias sedimentarias en cuya formación participaron soluciones hidrotermales de origen diagenético o relacionadas con manifestaciones ígneas. Los yacimientos de este tipo son característicos de ambiente de plataforma (marino-continental) y presentan carácter polimetálico, con Pb-Zn como metales principales.

SENSORES REMOTOS (en inglés: *Remote sensing*): Conjunto de metodologías de exploración (imágenes satelitales, geofísica aeroportada, espectrografía infrarroja, etc.) utilizadas en exploración minera, que tienen en común la obtención de información a distancia del sitio estudiado (cientos de m a cientos de km). Una de las aplicaciones más importantes de la teledetección en el campo de la geología es el análisis de las regiones del espectro correspondientes al infrarrojo de onda corta (SWIR: *Short Wave Infrared*) y el infrarrojo térmico (TIR: *Thermal Infrared*). Estas técnicas permiten cartografiar zonas de alteración hidrotermal. Los sensores pueden estar montados en un satélite (por ej., sistema ASTER en el satélite Terra: cooperación entre USA y Japón) o en aviones (sistema AVIRIS). Con la aparición de ASTER: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* la utilización de los sensores de la serie LANDSAT en estudios de caracterización litológica quedó relegada a un segundo plano. La razón es que tanto TM como ETM+ no cuentan con la necesaria resolución espectral como para poder distinguir compuestos mineralógicos importantes. Por su parte el sistema AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*) se monta en aviones y es un concepto desarrollado por el *Jet Propulsion Laboratory* (NASA). El equivalente europeo es HyMap, de origen alemán. Aparte

de la exploración minera, estos sensores permiten estudiar la mineralogía de zonas contaminadas por la actividad minera en estudios ambientales.

SERICITA: Muscovita (= moscovita), mica blanca en finos cristales que se produce principalmente por alteración de feldespatos. Es un mineral principal de la alteración cuarzo-sericítica de la zona filica de los pórfidos cupríferos y es especialmente abundante, junto con turmalina en aquellos de tipo chimenea de brecha. Se distingue por el carácter sedoso que presenta la roca alterada (si se la frota con la mano, se observa en ella el brillo de los finos cristales de sericita). Ver además: Alteración filica y pórfidos cupríferos.

SERIES MAGMÁTICAS: Ver oxidación (series de rocas ígneas con magnetita y series con ilmenita).

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería del Estado de Chile. Es responsable de la elaboración de la Carta Geológica de Chile. Además elabora otras cartas temáticas y realiza estudios en diversos campos de la geología y la geología aplicada, incluida la volcanología. En aspectos mineros, tiene a su cargo el registro de la propiedad minera del país, así como la seguridad de las operaciones mineras, incluidos los aspectos comprendidos en el cierre de explotaciones mineras. Ver además: IGME.

SIDERÓFILOS: El término designa aquellos elementos que presentan afinidad geoquímica con el Fe, como V, Ti, Ni, Co, etc.

SILICIFICACIÓN: Alteración hidrotermal consistente en la adición de sílice (SiO_2) a una roca. La sílice es un componente común de las soluciones hidrotermales. En su mayor parte se origina en la destrucción total de los silicatos por efecto de la acidez, por ejemplo: $\text{MgSiO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$. La solubilidad de la sílice se facilita si el pH es alcalino: $\text{SiO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HSiO}_3^-$. También se incrementa con la temperatura. El proceso de silicificación de una roca aumenta su dureza y resistencia a los esfuerzos, a diferencia de otras formas de alteración que tienden a debilitarlas.

SINGENÉTICA (en inglés: *Syngenetic*): Se dice de una mineralización cuya depósito es contemporáneo con la formación de la roca que la alberga. El término se opone a epigenética (la mineralización es claramente tardía respecto a la formación de la roca). Una situación intermedia es la de una mineralización diagenética en rocas sedimentarias, que es posterior a la sedimentación misma, pero acompaña al proceso de litificación de la roca encajadora.

SIGMOIDE: Plano de falla o veta en forma similar a una letra S. Cuando la estructura se cierra, se denomina lazo sigmoide. También se suele escribir cimoide (lo que es menos correcto). Las estructuras sigmoides son características de la cizalla simple, vale decir, del efecto de corte de una pareja de fuerzas. Las condiciones internas dentro del lazo sigmoide pueden ser extensionales o compresionales dependiendo del sentido de movimiento en la falla principal.

SÍNTER: Depósito hidrotermal superficial constituido por sílice y/o carbonatos. La precipitación de estos minerales forma costras superficiales en sistemas tipo campo geotérmico al evaporarse y enfriarse el agua que contiene la sílice y el carbonato. La roca denominada andacollita (definida en

Andacollo, Chile) es propiamente un sínter carbonatado.

SISTEMA: En geología designa un conjunto de procesos relacionados entre sí que tienen por consecuencia un determinado tipo de resultado. Por ejemplo, un sistema epitermal incluye: a) una fuente térmica poco profunda; b) la interacción de soluciones hipógenas (= hipogénicas) con aguas subterráneas profundas; c) el flujo de soluciones hidrotermales a través de redes de fracturas movidas por el desarrollo de celdas convectivas; y d) el transporte y depósito de metales preciosos (Au, Ag). Su resultado es la formación del yacimiento epitermal.

SKARN: Yacimientos metalíferos (Fe, Cu, Au, Zn, W, etc.) formados en la aureola de contacto de secuencias pelítico-carbonatadas y volcánicas, intruidas por granitoides. Más propiamente, designa su ganga constituida por granate, piroxeno y anfíbola. Ver además: Granate, metamorfismo y metasomatismo.

SOLUCIÓN HIDROTHERMAL (en inglés: *Hydrothermal solution*): Solución acuosa caliente natural de cualquier origen. Una solución hidrotermal tiene una capacidad especial para transportar metales en forma de iones complejos, los que deposita cuando sufre un desequilibrio físico (cambios en T o P) o químico. Ver además: Hidrotermal.

SONDAJES (SONDEOS) (en inglés: *Drill holes*): Los sondeos (= sondeos) se realizan para descubrir y reconocer la magnitud y leyes de un cuerpo mineralizado. Los sondeos pueden ser realizados en conjunto con otras labores de exploración o desarrollo (túneles, piques = pozos). Existen diversos tipos de sondeos:

- Con recuperación de testigo (*core*): DDH = *Diamond Drill Hole*. Son caros, pero al disponer de un testigo de roca, se puede obtener gran información geológica, mineralógica, geotécnica (RQD, FF), y por supuesto de leyes de mineral.
- Sin recuperación de testigo: 1) DTH = *Down the Hole* = percusión-rotación, donde se recupera una arenilla (*cutting*). 2) Aire reverso, similar al DTH pero con menor contaminación de materiales. La información geológica que se obtiene es muy limitada, aunque se pueden determinar las leyes de mineral y realizarse un estudio mineralógico preliminar.

Los testigos (*cores*) deben ser objeto de cuidadoso estudio, indicando con la mayor precisión posible su ubicación, orientación y metraje correspondiente al segmento estudiado. La descripción del sondeo (mapeo = testificación) incluye su litología, mineralología, alteración hidrotermal o supérgena (= supergénica), y fracturas y vetillas presentes. Normalmente, los sondeos en roca mineralizada se cortan en dos a lo largo de su eje. Una mitad se guarda en cajas especiales y la otra es enviada al laboratorio para análisis químicos.

STOCK: Ver macizo.

STOCKWORK: Se denomina así a un enrejado de fracturas que se expresan a distintas escalas, desde el nivel métrico al microscópico, y que pueden albergar la mineralización principal de un yacimiento metalífero. Uno de los dos tipos estructurales de pórfidos cupríferos se denomina stockwork por su relación con estas estructuras (el otro es el denominado chimenea a brecha = *breccia pipe*). El

stockwork se puede desarrollar tanto en el intrusivo como en la roca cortada por éste. En su origen pueden participar factores tectónicos, como la intersección de sistemas de fallas, así como el efecto explosivo generado por la descompresión de fluidos supercríticos. Los stockworks se pueden encontrar además en yacimientos epitermales de Pb-Zn-(Ag) (p.ej., distrito de Mazarrón, España) o en sulfuros macizos (= masivos) (por ej., Río Tinto, España). Ver además: Pórfidos cupríferos, sulfuros macizos.

SUBDUCCIÓN: Proceso de introducción de una placa litosférica oceánica bajo el manto litosférico continental (por ej., Cadena Andina) o bajo el manto litosférico oceánico (arcos de islas). El ángulo del plano de subducción se puede conocer porque constituye una zona sísmica (ver zona de Wadati-Benioff). Su inclinación está relacionada en parte con la velocidad de convergencia de las placas (inversamente proporcional). También influyen en la inclinación otros factores, como perturbaciones debidas a la topografía de la placa subductada y la edad de la placa. Una placa joven y caliente presenta mayor flotabilidad (*buoyancy*) y subduce a menor ángulo. Los procesos de subducción desempeñan un papel principal en la generación de los magmas que dan origen a importantes tipos de yacimientos metalíferos, como los pórfidos cupríferos, los depósitos epitermales y los de hierro tipo Kiruna (p.ej., Faja Ferrífera del Norte de Chile). Esto ocurre tanto en los márgenes continentales de tipo Andino como en los arcos de islas oceánicos.

SUBSIDENCIA: Proceso de hundimiento superficial o bien de un bloque geológico. Tiene su origen en la pérdida de apoyo vertical (por ejemplo, un proceso kárstico) o en la pérdida de presión lateral (que afecta el comportamiento de las fallas presentes). Labores mineras subterráneas poco profundas (como en Portovelo-Zaruma, Ecuador) pueden ser causa de subsidencia. También es normal el desarrollo de cráteres de subsidencia en las explotaciones subterráneas por hundimiento de bloques (*block caving*), como los formados en El Salvador, Río Blanco y El Teniente (Chile).

SUBVOLCÁNICO: Emplazamiento de un cuerpo magmático entre el nivel volcánico y el hipabisal. Por ejemplo, los intrusivos asociados a los yacimientos de Sn-Ag de la parte central-sur de la faja estannífera de Bolivia se emplazaron en un nivel subvolcánico. Este nivel se sitúa en torno a 1.0 – 1.5 km de profundidad. El término también puede aplicarse a domos de emplazamiento muy somero, como los que dieron origen a yacimientos epitermales de Pb-Zn-(Ag) en los distritos de La Unión y Mazarrón (España).

SULFÓFILO: El término designa a los elementos que poseen afinidad por el azufre y, por lo tanto, están presentes en las paragénesis hidrotermales sulfuradas o se asocian al azufre en otros ambientes naturales (por ej., piritas fromboidales de medios acuosos reductores). También se usa el término calcófilo, pero éste significa, etimológicamente: afinidad por el cobre, de ahí que sea menos apropiado. Entre los elementos que presentan mayor afinidad por el azufre están Mo, Cu, Ni, Co, Fe, Zn, Pb, Sb y Ag. La metalogénesis asociada al magmatismo calcoalcalino es esencialmente sulfófila.

SULFUROS MACIZOS (MASIVOS) (en inglés: *Massive sulfides*): Es un término muy amplio, que incluye distintos tipos de depósitos asociados a diferentes ambientes tectónicos (dorsales oceánicas, plataforma marina continental, cuenca tras arco, actividad volcánica tipo caldera en el fondo oceánico, etc.). Incluye tipos de yacimientos como los Sedex, Besshi, Kuroko, Chipre, etc. Estos tipos de yacimientos tienen en común su depósito cercano al nivel del fondo marino, el carácter masivo de la mineralización, la presencia en grados variables de sedimentos marinos, y la actividad hidrotermal

exhalativa. Ver además: Besshi, Chipre, Kuroko, Sedex.

SUPERCRÍTICO: El equilibrio agua líquida-vapor está determinado por la relación temperatura-presión. Esto implica que puede existir agua en estado líquido a temperaturas muy por encima de la temperatura de ebullición del agua a nivel del mar (100°C) si la presión es mayor a 1 atmósfera. Sin embargo, lo señalado tiene un límite. Así, ese equilibrio se extiende hasta los 374°C, donde a 218 atmósferas aun puede existir agua líquida. Sobre esa temperatura se extiende un campo denominado supercrítico, donde a presiones elevadas el agua se presenta en forma de un fluido cuya densidad puede alcanzar una cifra en torno a 0.8, pero que ya no es agua líquida propiamente tal. Si la presión que permite la existencia de este fluido supercrítico disminuye bruscamente, el fluido pasa a gas de manera explosiva. Esto se debe a que el vapor de agua ocupa un volumen que es unas 1.000 veces superior al ocupado por el agua líquida. Fenómenos explosivos de esta naturaleza pueden dar lugar a la formación de stockworks y cuerpos de brecha, tanto en estructuras cilíndricas como en cuerpos filonianos.

SUPÉRGENO (SUPERGÉNICO): Proveniente de la superficie. Por ejemplo, cuando la oxidación en superficie y hasta el nivel freático causa la lixiviación del cobre de un yacimiento y forma un horizonte profundo en el que está más concentrado (bajo el nivel freático), el fenómeno se califica como de enriquecimiento supérgeno (= supergénico = enriquecimiento secundario). El término se contrapone a hipógeno (= hipogénico). Ver además: Hipógeno.

T

TAQUILITA: Vidrio volcánico generalmente de composición muy rica en sílice. Se denomina pseudotaquilita al material vítreo que puede formarse en una zona de falla debido al efecto de la fricción producida por el movimiento de los bloques, la cual puede generar temperaturas capaces de fundir el material fino presente.

TECTÓNICA: Es el estudio de los procesos de deformación de la corteza terrestre que actúan a gran escala, como el desarrollo de cinturones orogénicos, fallas mayores, movimientos de placas litosféricas y sus consecuencias, emplazamiento de cuerpos batolíticos, etc.

TECTÓNICA DE PLACAS: Teoría geológica que explica el funcionamiento tectónico global de la Tierra, así como su historia geológica, sobre la base de la formación, desplazamiento y destrucción de placas rígidas. Estas placas, constituidas por litosfera (manto rígido) y corteza continental (placas continentales) u oceánica (placas oceánicas), se desplazan sobre un manto de menor rigidez (manto astenosférico). El movimiento de las placas se atribuye a las corrientes de convección que operan en el manto astenosférico, que movilizan materia y energía térmica entre el núcleo externo y el manto litosférico. Las placas oceánicas nacen en las dorsales oceánicas y se destruyen en las zonas de subducción. Esta teoría permite explicar la deriva continental y está sustentada en evidencias físicas, como las bandas de inversiones paleomagnéticas del fondo oceánico y la actividad sísmica en los bordes de placa. También se ha comprobado experimentalmente el desplazamiento de islas oceánicas y continentes mediante geodesia satelital (GPS). Por otra parte, la misma teoría permite explicar la generación de magmatismo en diversos ambientes tectónicos, así como la distribución mundial de los

yacimientos minerales, y entrega una explicación consistente de la historia geológica de la Tierra. La tectónica de placas surgió en la década de 1960 y en su desarrollo fue esencial el estudio geofísico de los fondos oceánicos y su interpretación sobre la base del registro estratigráfico de las inversiones de polaridad del campo magnético terrestre, elaborado en años anteriores (el que permitió traducir la información paleomagnética binaria en términos de tiempo transcurrido).

TERMODINÁMICA: Es la ciencia que estudia los sistemas en términos de los intercambios de energía y materia. Desempeña un papel muy importante en el estudio de los sistemas geológicos y sus procesos ya que define sus condiciones de equilibrio. En lo referente a procesos que incluyen reacciones químicas (como la formación de minerales, las interacciones agua-roca-gas, etc.) la termodinámica permite evaluar el grado de desequilibrio de un sistema, pero no el tiempo que demorará en alcanzar el equilibrio respectivo. En ese aspecto debe complementarse con la cinética química. Un parámetro termodinámico de especial utilidad es la energía libre asociada a una reacción química determinada, e indica en qué medida la reacción ocurrirá espontáneamente y entregará energía (reacciones exotérmicas) o requerirá energía para ocurrir (reacciones endotérmicas). Los diagramas Eh-pH son un instrumento termodinámico de gran aplicación en geoquímica y en el estudio de procesos hidrotermales y supérgenos (= supergénicos), así como en hidrometalurgia. Ver además: Energía libre.

TEORÍA: Es una explicación científica de rango mayor al de la hipótesis, aplicada a una parte muy importante del campo de una ciencia. Puede incluir una serie de leyes (que son explicadas por la teoría) así como varias hipótesis sobre las que se apoya. Ejemplos: teoría de la evolución biológica; teoría de la tectónica de placas. En materia de depósitos minerales, las principales teorías conciernen a su origen, como la teoría hidrotermal. Un campo de larga discusión ha sido la importancia relativa de los procesos magmáticos y de la sedimentación marina en la formación de yacimientos, discusión que reprodujo en parte la del plutonismo-neptunismo relativa al origen de las rocas. Esta discusión ha sido superada en buena parte, debido a las perspectivas aportadas por la tectónica de placas, a la mejor comprensión del efecto de los procesos diagenéticos y al conocimiento obtenido respecto al papel de las salmueras metalíferas y de los sistemas hidrotermales en campos geotérmicos.

TERRAZA: Es el remanente de un plano de erosión y depósito (por ej., el plano de inundación de un río, una plataforma de abrasión marina, etc.), una vez que se ha producido un ascenso del bloque respectivo y su parcial erosión. Las terrazas pueden contener concentraciones metálicas tipo placer, formadas en el antiguo plano de erosión-depositación.

TERRENO (del inglés: *Terrane*): En términos tectónicos, se llama así a un bloque de corteza, limitado por fallas, cuya historia geológica es distinta de la de otros bloques adyacentes. Un uso coloquial del término terreno (en Chile) es el de campo. Por ejemplo, una *salida al terreno*, es una excursión geológica.

TESTIGO (en inglés: *Drill core*): Se denomina así al cilindro más o menos continuo de roca que se obtiene de una perforación realizada con una corona de acero con diamantes industriales incrustados. La herramienta tiene una apertura central, en la que va quedando encajada la roca cortada por la corona. La corona a su vez se encuentra ligada a un sistema de tubos. La maquinaria de perforación induce dos tipos de movimiento: hacia abajo y rotacional, para producir el corte de la roca e introducirlo

en la tubería. Para recuperar el testigo, hay que extraer toda la tubería, operación que se realiza sistemáticamente cada tantos metros. Ver además: Sondajes (= sondeos).

TEXTURA (en inglés: *Texture*): La textura de una roca o minerales está configurada por rasgos estructurales finos, incluidos los relativos al crecimiento cristalino. Por ejemplo: textura sacaroidal de una roca microcristalina, textura coliforme de los minerales de una mena. También un enrejado fino de vetillas constituye un rasgo textural. De especial importancia en términos del tratamiento metalúrgico de minerales sulfurados son aquellas relaciones texturales como el entrecrecimiento de minerales, que pueden dificultar mucho su separación en el proceso de molienda.

TIERRAS RARAS (en inglés: *Rare earth elements = REE*): Es un grupo de elementos químicos cuyo número atómico está comprendido entre 58 (Lantano) y 71 (Lutecio): La, Ac, Ce, Pr, Na, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb y Lu. Su característica distintiva es que al aumentar el número atómico en 1, el electrón adicional correspondiente es agregado a un nivel electrónico interno (y no al último orbital). En consecuencia, entre dos elementos contiguos no existen mayores diferencias químicas (las cuales dependen de los orbitales electrónicos externos que determinan la valencia). Como tampoco hay diferencias físicas significativas (puesto que la diferencia de masa es sólo 1), estos elementos son muy difíciles de separar entre sí. Actualmente estos elementos (REE) tienen importantes aplicaciones tecnológicas. Su fuente principal son los fosfatos como la monacita (Ce,La,Nd,Th)PO₄ (abundante en Brasil). También alcanzan contenidos importantes en la mena de yacimientos IOCG como Olympic Dam (Australia). En Chile se ha considerado la posibilidad de obtenerlos de apatita (= apatito), mineral que acompaña la mineralización en yacimientos de la Faja Cretácica Ferrífera. Sin embargo, su contenido de REE es relativamente bajo. Esto se explica por la asociación de los REE con el magmatismo alcalino mientras que en Chile predomina el de tipo calcoalcalino.

TOBA (en inglés: *Tuff*): Roca piroclástica formada por la litificación de ceniza volcánica.

TRANSPRESIÓN Y TRANSTENSIÓN: Ambos términos se refieren a situaciones generadas a lo largo de grandes fallas, donde su curvatura induce condiciones locales de presión o tensión. En el territorio chileno se generaron condiciones tectónicas de estos tipos durante el período Cretácico, las cuales controlaron el emplazamiento de cuerpos magmáticos asociados a yacimientos de Fe tipo Kiruna (faja ferrífera cretácica), de vetas (= filones) de Cu-Fe-Au, y de yacimientos tipo skarn de los mismos metales.

TRAS ARCO (en inglés: *Back arc*): El término designa una cuenca situada entre el arco magmático, producto de subducción de placa oceánica, y una zona continental estable (antepaís). La cuenca tras arco se forma por efecto de condiciones extensionales, que generan un régimen subsidente y pueden dar lugar al ingreso del mar el que puede alcanzar profundidades someras o mayores. Este fue el caso de la Cuenca de Huarmey, en Perú, que se desarrolló y profundizó en el Cretácico Inferior, mientras más al sur existía sólo una cuenca somera. Distintos tipos de yacimiento pueden formarse en este tipo de cuencas.

TRAZAS (en inglés: *Trace elements*): Se denomina elementos en trazas a aquellos presentes en las rocas en concentraciones inferiores a 0.1%. Tienen aplicaciones importantes en estudios petrológicos y metalogénicos, así como en prospección geoquímica.

TUBO DE CORRIENTE: Modelo metalogénico general propuesto por H. Pelissonnier, que analiza la formación de yacimientos minerales en término de un gran volumen de rocas o sedimentos desde el cual los metales son extraídos y transportados por el efecto de fluidos, a través de mecanismos químicos físicos-químicos o físicos. Posteriormente son depositados al estrecharse el *tubo de corriente* por el cual circulan. Dicho estrechamiento puede ser igualmente de carácter químico, físicoquímico o físico. Más allá, el fluido transportador sigue su curso, ahora a través de otro volumen amplio, desarrollando anomalías geoquímicas *de fuga* o pequeños depósitos con el resto de minerales no depositados.

TURMALINA: Ciclosilicato rico en boro que cristaliza en el sistema hexagonal. Este mineral es típico de las mineralizaciones ricas en fluidos neumatolíticos o hidrotermales de alta temperatura. Es además común en yacimientos cupríferos del tipo chimenea de brecha, donde acompaña a sericita y sílice secundaria. Su fórmula general es: $AD_3G_6(BO_3)_3[T_6O_{18}]Y_3Z$ donde A = Ca, Na, K, D = Al, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Li, Mg, Mn^{2+} , G = Al, Cr^{3+} , Fe^{3+} , V^{3+} , T = Si, Y = O y/o OH, y Z = F, O y/o OH.

U

ULTRAMÁFICAS: Rocas como las peridotitas, constituidas por olivino y piroxeno, cuya composición es similar a la del manto de la Tierra y tienen su origen en materiales procedentes de ese nivel. A estas rocas se asocian yacimientos podiformes de cromita. Ver además: Podiforme.

V

VÁLVULA ACTIVADA: Cuando hay cuerpos de agua subterránea separados por niveles impermeables, el cuerpo inferior puede estar sometido a una presión suprahidrostática, muy superior a la presión hidrostática existente en el cuerpo superior libre. Si el nivel impermeable se rompe (por efecto de la reactivación de una falla: Sismo), el agua asciende violentamente debido a la diferencia de presiones existente. Este proceso puede dar lugar al depósito de minerales hidrotermales si las soluciones afectadas contienen iones metálicos complejos, dado el desequilibrio que implica el ascenso violento descrito.

VETA (FILÓN): Ver filón.

VOLCÁN: Estructura en forma de cono o domo, producto de la extrusión de lava o de material piroclástico. Se clasifican en volcanes escudo (de gran diámetro respecto a su altura, constituidos por lavas fluidas de composición basáltica), estratovolcanes (integrados por estratos de lava y estratos piroclásticos alternados), hornitos (formados sólo por piroclastos), y domos (formados por lavas viscosas, ricas en sílice). En términos de formación de yacimientos metalíferos, presenta especial interés la actividad volcánica correspondiente a los estratovolcanes y domos pliocenos o más antiguos. Desde el punto de vista de los riesgos naturales, ambas formas son notablemente peligrosas en el caso

de volcanes activos, por el riesgo de ocurrencia de flujos piroclásticos (riesgo presente en el caso del volcán Chaitén, Chile).

VOLCANOGÉNICO (en inglés: *Volcanogenic*): Se denomina así a yacimientos de origen fumarólico o hidrotermal, formados a poca profundidad y en asociación a la actividad volcánica subaérea o submarina. Ver además: Sulfuros macizos (= masivos).

W

WAD: Material constituido principalmente por MnO_2 . El dióxido de Mn se forma por oxidación de Mn^{2+} a Mn^{4+} , seguida de la hidrólisis y precipitación de este último en forma de dióxido. El wad tiene un carácter coloidal y una notable capacidad para captar metales como Cu, Ni, etc. (de ahí el interés que presentan los nódulos de MnO_2 del fondo oceánico). En yacimientos exóticos de cobre el wad capta altos contenidos del metal, formando el denominado *copper wad*, así como un material de aspecto algo diferente (*copper pitch*). El wad tiene amplia distribución, dado que el Mn es un elemento menor de las rocas y el Mn se oxida rápidamente a la forma MnO_2 , una vez que es extraído de las rocas por efecto de la meteorización. En la provincia de Ciudad Real (España) existen yacimientos epitermales de Mn con importantes contenidos en Co y Ni. Ver además: Nódulos

X

XENOLITO (GABARRO): Fragmento de roca de distinta composición presente en la masa de un cuerpo de roca intrusiva. Corresponden a restos no asimilados de rocas incorporadas durante el ascenso del magma. Si su composición (aunque no necesariamente su textura) es similar a la del intrusivo, se denominan autolitos.

XENOTERMALES: Término utilizado para yacimientos hidrotermales para los cuales se supone una fuente ígnea aunque no existan evidencias de magmatismo en la geología local. Es un concepto antiguo, en la práctica sobrepasado por los conocimientos actuales que implican múltiples orígenes para las soluciones hidrotermales, incluidas las salmueras metalíferas.

Y

YACIMIENTO MINERAL (DEPÓSITO MINERAL): Se denomina así a una concentración natural de minerales que presenta razonables posibilidades de ser explotada con provecho económico, ya sea en el presente o en un futuro relativamente cercano. Ver además: Recursos, reservas.

Z

ZEOLITAS (en inglés: *Zeolites*): Son tectosilicatos caracterizados por redes estructurales muy abiertas, con grandes espacios de interconexión, en los que se alojan moléculas de agua y cationes. Puesto que ello permite a los cationes una elevada movilidad, pueden ser fácilmente intercambiados con los del medio externo. Entre sus principales aplicaciones industriales está la de actuar como

tamices moleculares en el tratamiento de líquidos y gases, así como en el campo de la catálisis. En Chile no se cuenta con yacimientos de estos minerales, pero las zeolitas se presentan en muchos distritos metalíferos (como Talcuna, en la Región de Coquimbo), así como en secuencias de rocas volcánicas alteradas.

ZONA DE CEMENTACIÓN (ENRIQUECIMIENTO SECUNDARIO): Es la zona de formación de sulfuros secundarios enriquecidos en yacimientos de cobre, donde calcosina (Cu_2S) se forma por reemplazo del Fe de otros sulfuros por Cu, procedente de la zona de oxidación. El límite entre ambas zonas está dado por el nivel freático (de aguas subterráneas) local. Ver además: Oxidación.

ZONA OXIDADA: Es la zona superior de un yacimiento de cobre aflorante o sub-aflorante, situada sobre el nivel freático, en la cual el agua meteórica rica en oxígeno produce la oxidación de los sulfuros primarios. Si hay suficiente piritita (FeS_2), el ambiente ácido generado favorece el transporte vertical descendente del Cu hacia la zona de cementación o su transporte lateral para formar yacimientos oxidados exóticos de Cu. Todo esto ocurre de manera importante si y solo si la cantidad de agua disponible es la adecuada (ni poca ni mucha: clima semiárido) y la tectónica, la topografía, y las temperaturas son igualmente adecuadas. Ver además: Zona de cementación.

ZONACIÓN (en inglés: *Zoning*): El término es muy amplio, y en mineralogía y yacimientos minerales se refiere a fenómenos de segregación zonal que van desde la escala cristalina (por ej., cristales de plagioclasa zonados) hasta la de un orógeno (por ej., zonación metalífera de la cadena andina). Aquí consideraremos en particular la zonación de los minerales de interés económico, a la escala de un yacimiento metalífero o de un distrito. Al respecto, un ejemplo clásico de zonación es la del Distrito de Cornwall (Cornualles: suroeste de Gran Bretaña) donde se definió un esquema clásico con Sn-W en los granitos del centro mineralizador, siguiendo con minerales de Cu hacia la roca encajadora, y finalmente sulfuros de Pb y Zn. La idea básica es que al producirse los pulsos mineralizadores desde un centro (generalmente asociado a un magma intrusivo), los fluidos neumatolítico-hidrotermales van atravesando envolventes de temperatura y presión decrecientes. Esto implica disequilibrios en las condiciones de transporte de metales en fase gaseosa (fluidos neumatolíticos) que son los primeros en depositarse y, posteriormente, en las condiciones que hacen posible su movilización en forma de iones metales complejos en soluciones hidrotermales. Naturalmente, los metales que forman iones complejos más estables deberían continuar en solución hasta distancias mayores del centro mineralizador. Esto ocurre en la práctica, puesto que los metales más pesados como Au, Pb, etc., que forman complejos más estables, efectivamente se depositan a mayor distancia. Sin embargo, existen tres factores que hacen que este tema no sea tan simple. El primero es la existencia de diversos iones complejos de un mismo metal. Por ejemplo, el oro forma un ión clorurado a alta temperatura y uno sulfurado a temperaturas menores. En consecuencia, el primero se desestabiliza y deposita el Au en un nivel más profundo. El factor señalado puede traducirse igualmente en el depósito del metal bajo distintas formas mineralógicas (y la zonación concierne a los minerales, más que a los metales mismos). Un segundo factor es que frecuentemente existen dos o más pulsos de mineralización, los cuales pueden implicar cambios en la composición de los fluidos y en su temperatura inicial. El tercer factor, también importante, concierne a las interacciones químicas entre los fluidos mineralizadores y las rocas que atraviesan. Finalmente, es importante señalar que la zonación representa a nivel espacial lo que la paragénesis muestra en términos de tiempo, vale decir, son dos expresiones del desequilibrio de los fluidos mineralizadores debidos a los cambios termodinámicos que los afectan. La principal aplicación práctica de la zonación concierne a su uso en exploración minera. Esto es así porque permite

prever: a) Los cambios que puede experimentar la mineralización en la profundidad de un yacimiento y b) La posible existencia de yacimientos aún desconocidos en el entorno distrital.

ZONA DE FALLA: Las grandes fallas geológicas no constan de un solo plano de falla bien definido, sino que corresponden a un volumen tabular denominado zona de falla, constituido por rocas muy fracturadas y numerosos planos de fallas a través de los cuales se realizan los desplazamientos. Es común que las rocas de la zona de falla presenten alteración hidrotermal así como metamorfismo dinámico, con formación de cataclasitas en la zona superior y milonitas en la inferior. En la mega zona de falla de Atacama algunos cuerpos con mineralización ferrífera tipo Kiruna han experimentado el efecto metamórfico antes descrito. Localmente, esto ha generado un bandeamiento de magnetita y mica, adquiriendo así aspecto muy similar al de una formación ferrífera bandeada (BIF).

ZONA DE SATURACIÓN: Término que en hidrogeología designa a la zona situada bajo el nivel freático del acuífero. Bajo ella se desarrolla la zona de cementación (sulfuros enriquecidos) en yacimientos cupríferos.

ZONA DE SUBDUCCIÓN (en inglés: *Subduction zone*): Ver tectónica de placas y zona de Wadati-Benioff.

ZONA DE WADATI -BENI OFF: Zona sísmica desarrollada en la parte superior de una placa litosférica en proceso de subducción y por la parte inferior del manto litosférico en contacto con ella. Permite inferir la posición e inclinación de la zona de subducción.

ZONA VADOSA: Término hidrogeológico que designa la zona comprendida entre la superficie del terreno y el nivel freático. Es una zona no saturada en agua y que contiene aire en los espacios libres, junto con agua que desciende hacia el nivel freático (o asciende por capilaridad). La zona de oxidación de los yacimientos metalíferos sulfurados se desarrolla en la zona vadosa. La zona vadosa presenta especial riesgo de generación de drenaje ácido, ya sea que se sitúe en yacimientos ricos en pirita o en desechos mineros ricos en el mismo mineral. De ahí que se recurra a su saturación con agua para evitar o retardar dicho proceso en las operaciones de cierre de explotaciones mineras.