



Análisis de las técnicas utilizadas en cierre de faenas e instalaciones mineras

DE 25/2016

Resumen ejecutivo

Desde el año 2011, Chile cuenta con una ley que regula el cierre de faena e instalaciones mineras una vez terminada la operación. Dicha ley exige que luego del cese de la explotación minera se asegure la estabilidad física y química del lugar, de manera de resguardar la salud y seguridad de las personas y del medio ambiente.

El informe incluye una revisión de la ley de cierre de faena e instalaciones mineras, de su aplicación y del escenario en que se encuentran las mineras chilenas al respecto. Debido a que esta ley es relativamente nueva, Chile no cuenta con una vasta experiencia al respecto. Es por esto que este informe busca analizar técnicas de estabilización química y física, en este caso de control de drenaje ácido y fito-remediación, junto con recopilar experiencias nacionales e internacionales que den cuenta de las técnicas utilizadas en los planes de cierre.

Se analizan los cuatro tipos de fito-remediación y se entregan ejemplos de especies vegetales junto con su presencia en el territorio nacional. También se expone el caso de planta Matta de Enami como caso chileno que aplica esta técnica. En el análisis del control de drenaje ácido, se distinguen las dos grandes ramas que son prevención y remediación, junto con sus diversas aplicaciones. Los casos estudio de cierre de faena se dividen en dos categorías, nacionales e internacionales. En los casos nacionales se exponen los cierres de las minas El Indio y Lo Aguirre, mientras que en los casos internacionales se exponen casos de Canadá, Francia, Alemania, Inglaterra y Moldova.

Como comentarios finales a este informe destacan la importancia de que, si bien cada plan de cierre y sitio minero es distinto, existen factores comunes que pueden ser divididos en etapas, de manera de poder organizar mejor el plan. También se destaca que cada sitio tiene sus características y clima propio, por lo que se debe escoger con cuidado las especies vegetales a utilizar para estabilización física y química del suelo de manera sustentable. Los sitios remediados generalmente tendrán modificaciones de su geoforma con respecto al sitio original. Dichas diferencias pueden ser aprovechadas para distintos fines. Como se ve en los casos estudio, los rajes pueden ser transformados en lagunas o las faenas mineras en parques para mejora del paisaje, por ejemplo.

Finalmente, se destaca la importancia de la innovación e integración con el medio ambiente para un plan de cierre exitoso.



Abstract

Since 2011, Chile has a law that regulates mine closure once the operation stage is finished. The law requires that, after the cessation of the mine exploitation, the physical and chemical stability of the site is assured, so the health and safety of both people and environment is safeguard.

This report includes a review of the mining closure law, its application, and the scenario in which Chilean mining companies are on this matter. Because this law is relatively new, Chile does not count with a vast experience in this regard. This is why this report aims to analyze chemical and physical stabilization techniques, specifically, acid mine drainage control and phytoremediation, along with gathering national and international experiences that show the techniques used in mine closure plans.

The four types of phytoremediation are analyzed, and examples of plant species are given along with their presence in the national territory. The case of the Enami's Matta plant is also described as a Chilean case that applies this technique. In the analysis of acid mine drainage control, two major branches are distinguished along with their applications, these are prevention and remediation. The case studies of mine closure are divided in two categories, national and international. In the national cases section the plans of El Indio and Lo Aguirre are exposed, while in the international cases section the cases of Canada, France, Germany, England and Moldova are exposed.

As final comments to this report, it is highlighted the importance that, although every closure plan and mine site are different, there are common factors that can be divided into stages, so that the plan can be better organized. It is also noted that every site has its own characteristics and climate, therefore the vegetal species to be used in physical and chemical stabilization of the soil must be carefully chosen to develop the remediation in a sustainable manner. The remediated sites will generally have modifications of their geoform with respect to the original site. These differences can be exploited for different purposes. As explained in the case studies, for example, the pits can be transformed into lakes or the sites into parks for landscape improvement.

Finally, it is highlighted the importance of innovation and environmental integration for a successful mine closure plan.



Contenido

Resumen ejecutivo	ii
Abstract.....	iii
1 Introducción.....	1
2 Objetivos y metodología.....	1
3 Agenda regulatoria	2
4 Análisis de técnicas de estabilización	5
4.1 Fito-remediación.....	5
4.2 Control de drenaje ácido.....	10
4.2.1 Prevención	10
4.2.2 Remediación	12
5 Casos estudio de cierre de faena minera	14
5.1 Casos nacionales	14
5.2 Casos internacionales	18
6 Comentarios finales y recomendaciones.....	24
7 Referencias	26



1 Introducción

La actividad minera, como parte de su proceso de extracción de minerales de la tierra, trae consigo una serie de impactos al medio ambiente, los cuales son, principalmente, modificación de las geoformas debido a las perforaciones; generación de residuos mineros como relaves, estériles y potencial generación de drenaje ácido; otros impactos propios de actividades industriales son pérdida de vegetación; variación del recurso hídrico; contaminación del aire; y afectación de la calidad del suelo para otros fines, entre otros. Debido a que la actividad minera en un determinado lugar tiene una vida útil finita (mientras existan reservas), es que surge la necesidad de habilitar los sitios donde estuvieron las faenas mineras para poder darles usos alternativos y/o para evitar daños al medio ambiente, una vez que estas concluyan su operación.

En este contexto, el año 2011, el Ministerio de Minería promulga la Ley 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras. En dicha ley se establece que, una vez finalizada la actividad extractiva minera, se debe asegurar la estabilidad física y química del lugar, de manera de otorgar el debido resguardo a la vida, salud, y seguridad de las personas y medio ambiente.

2 Objetivos y metodología

El cierre de faenas e instalaciones mineras es algo relativamente nuevo en nuestro país, y que por lo tanto, no existe una gran experiencia en el tema. Existen guías que explican qué se debe hacer, pero no cómo se debe hacer (Sernageomin 2014). En este contexto, el presente informe busca recopilar distintas experiencias de cierres de faenas mineras, tanto en Chile como en el extranjero, para dar a conocer las técnicas utilizadas en la estabilización física y química del lugar.

La metodología para realizar este informe consiste primero en la descripción de toda la legislación aplicable al tema de cierre de faena e instalaciones mineras. Luego, viene una sección donde se describen diversas técnicas de estabilización física y química que se utilizan en cierre de faena minera, específicamente las técnicas de control de drenaje ácido y de fito-remediación, y la experiencia de Chile en estas materias. Luego se describen dos experiencias de cierre de faena de Chile, para luego analizar casos estudio de cierre de faenas a nivel internacional. De cada caso analizado se extraerán los puntos más relevantes. Finalmente se analiza la información y datos obtenidos para poder concluir con comentarios finales a este reporte.



3 Agenda regulatoria

Desde el año 2011, Chile cuenta con una ley que obliga y regula el cierre de faenas e instalaciones mineras luego del cese de las operaciones, bajo el principio de “quien contamina paga”. Previo a esta ley, los cierres de faena minera estaban regulados a través del Reglamento de Seguridad Minera (D.S. N°132 de 2004), del Ministerio de Minería, donde se establece que se debe presentar a Sernageomin un proyecto de plan de cierre de las faenas mineras, conforme a lo establecido en el reglamento, en caso de querer cerrar. Sin embargo, el reglamento de seguridad minera no era suficiente ya que no existía una normativa específica que regulara las externalidades negativas de la minería. Al momento de la creación de la ley de cierre de faena minera, se buscaba impedir la generación de nuevos pasivos mineros y tener una garantía financiera para que las empresas mineras cumplieran con lo comprometido en sus planes de cierre.

Los objetivos principales de la ley son seis; mitigar los efectos negativos de la minería, dar estabilidad física y química al sitio minero, resguardar la vida, salud y seguridad de las personas y el medio ambiente, crear un fondo post-cierre, establecer garantías de cierre y evitar el abandono del sitio luego del cese de las operaciones. (Morales 2016)

Las principales diferencias entre el reglamento de seguridad minera y la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras son: La ley regula la estabilidad química además de la física exigida en el reglamento; el reglamento contemplaba actualizaciones cada cinco años y la ley actualizaciones periódicas cada cinco años más otras voluntarias y extraordinarias; el reglamento no contempla auditorías ni garantía mientras la ley sí; la ley contempla un fondo post cierre que el reglamento no contemplaba; y las sanciones son más rigurosas en la ley que en el reglamento (Sernageomin 2012).

La ley de cierre de faena e instalaciones mineras, junto con los reglamentos en donde se aplica, se explican a continuación.

Ley de cierre de faenas

La Ley N° 20.551 del Ministerio de Minería se crea el año 2011, y luego es modificada por la Ley N° 20.819 del 2015. Posteriormente, el año 2012 se aprueba el Reglamento de la Ley de cierre de faena e instalaciones mineras bajo el Decreto 41.

Los planes de cierre deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental y ser aprobados antes de su implementación, es más, dichos planes deben ser aprobados previo inicio de las actividades de exploración y explotación en el caso de proyectos



nuevos. Los planes de cierre tienen un carácter progresivo, deben planificarse y actualizarse durante toda la vida útil del proyecto. Esto se debe a que la operación de una mina es dinámica y puede finalizar de forma prematura por diversos motivos, tales como: económicos, como que bajen los precios de los commodities a un nivel que el negocio deja de ser rentable; geológicos, como el decaimiento inesperado de la ley de un mineral, nuevas regulaciones; otros como temas ambientales, presiones sociales, cambio en la estructura de los mercados, entre otros. Esto es conforme al D.S. 40 del 2013, reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

En la ley se aclara que toda empresa minera debe presentar un plan de cierre de sus faenas mineras, sin embargo, existen dos tipos de procedimientos, el general y el simplificado. Aquellas faenas que exploten más de 10.000 ton brutas mensuales deben someterse a un procedimiento general, mientras que las que exploten menos de 10.000 ton brutas mensuales se pueden someter a un procedimiento simplificado. A su vez, las que extraigan cantidades menores a 5.000 toneladas al mes no se deben someter al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, pero si deben presentar un plan de cierre simplificado, donde se declaren las medidas y acciones que se tomarán para evitar la afectación del medio ambiente.

La ley de cierre de faena, en su Título XIII, exige que cada minera que se someta a un procedimiento general pague una *“garantía que asegure al Estado el cumplimiento íntegro y oportuno de la obligación de cierre”* (art. 49). La garantía será *“determinada a partir de la estimación periódica del valor presente de los costos de implementación de todas las medidas de cierre, contempladas para el período de operación de la faena, hasta el término de su vida útil, así como las medidas de seguimiento y control requeridas para la etapa post cierre”* (art. 50). Esta garantía se debe pagar mientras la minera esté en operación, por lo que le permite provisionar los costos de cierre mientras la faena sea productiva.

Los contenidos generales de los planes de cierre son: antecedentes generales de la faena, descripción del entorno, vida útil, análisis de las instalaciones, valorización de las medidas de cierre, programa de post cierre, información de post cierre, resumen de la valorización del plan, garantías financieras, información estratégica, programa de difusión.

Por último, cabe destacar que la presente ley también aplica a las mineras que se encontraban en operación previa promulgación y entrada en vigencia de la ley de cierre de faena, con la excepción de contratistas de contratos especiales de operación vigente que se hayan suscrito con el estado de Chile. Queda establecido en el texto de la ley que *“Las empresas mineras y de hidrocarburos que a la época de entrada en vigencia de esta*



ley se encontraren en operación, y quedaren afectas al procedimiento de aplicación general, deberán determinar, otorgar y poner a disposición del Servicio la garantía de su plan de cierre” (art. Primero de artículos transitorios).

Otras normativas

Además de la ley de cierre de faena e instalaciones mineras, existen otros instrumentos normativos que hacen referencia al cierre de faena minera. Estos son:

- Reglamento SEIA: DS 40/2013, Artículo 137.- *Permiso para la aprobación del plan de cierre de una faena minera. El permiso para la ejecución del plan de cierre de una faena minera, será el establecido en el artículo 6º de la Ley 20.551, de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. Los requisitos para su otorgamiento consisten en velar por la estabilidad física y química de las faenas de la industria extractiva minera, de manera de otorgar el debido resguardo a la vida y salud de las personas y medio ambiente. Este permiso lo tiene que otorgar SERNAGEOMIN luego de haberse mostrado conforme con el plan de cierre presentado.*
- Reglamento seguridad minera: En este reglamento (Decreto 132/2002, Artículo 495) se establecen los lineamientos de lo que debe contener un plan de cierre de depósito de relaves. Además este reglamento establecía los lineamientos de los cierres de faena minera previa promulgación de la ley de cierre e instalaciones mineras.

Faenas que deben presentar plan de cierre en Chile

En Chile, 157 faenas mineras deben presentar su plan de cierre de faena e instalaciones mineras. De estos, 150 lo han presentado quedando 7 aún por presentar. De estos 150 existen 144 (correspondiente al 96%) que ya han sido resueltos y 6 que aún están en evaluación. De los 144 resueltos, sólo 75 han sido aprobados, los demás han sido rechazados (Morales 2016).

Cabe destacar también que de los planes presentados (correspondientes a procedimientos generales), un 75% tiene carácter transitorio, y solo el 25% restante es de carácter general.



4 Análisis de técnicas de estabilización

A continuación se describen técnicas de estabilización física y química utilizadas en sitios donde hubo actividad minera.

4.1 Fito-remediación

La fito-remediación se refiere al conjunto de procesos bioquímicos realizados por plantas y microorganismos asociados a ellas, para degradar, asimilar, metabolizar, remover, o detoxificar metales pesados, compuestos orgánicos y otro tipo de contaminantes de ambientes contaminados en suelo, sedimentos, y agua.

Las principales ventajas de la técnica de fito-remediación son que se requiere una inversión mucho menor en comparación con otras técnicas, y que además contribuye a la estabilización del suelo, evita las emisiones de polvo y la erosión, a la vez que mejora el paisaje (Li 2006), reduce la generación de lixiviados y el transporte de contaminantes, aumenta la masa vegetal, es una posible generación de hábitat y refugio para fauna, entre otros. La principal desventaja es que el tiempo que toma en realizarse el proceso de remediación es considerablemente más largo que los procesos convencionales (Patiño y Epalza 2015).

Existen cuatro formas de fito-remediación principalmente, estas son fito-estabilización, fito-filtración, fito-volatilización y fito-extracción.

En primer lugar, la fito-estabilización utiliza ciertas especies vegetales con la capacidad de inmovilizar los contaminantes en el suelo o adsorberlos a sus raíces. Esta técnica previene que los contaminantes migren a las aguas subterráneas o al aire. Esta técnica no remueve los metales, solo los estabiliza, y es más efectiva en suelos con alto contenido orgánico. Sus principales ventajas son que es más barato que otras técnicas de estabilización, es fácil de implementar y es preferible estéticamente. Un ejemplo de estos son algunas especies de *Agrostis* y *Festuca* para la estabilización de suelos contaminados con plomo, zinc y cobre, ver Figura 4-1 (Padmavathiamma y Li 2007). La especie *Agrostis* resiste temperaturas muy bajas (-15°C), necesita mucha agua (1.000 mm/año), se da bien en la montaña y en Chile se puede encontrar de la región de la Araucanía hacia el sur. La *Festuca*, por su parte, también resiste bajas temperaturas (-8°C), necesita mucho sol, pero poca agua (100-300 mm/año), crece en altura y se puede encontrar en las regiones de Arica y Parinacota e Iquique. Hay otras especies de *Festuca* que se dan en la región del Maule que tienen un requerimiento de agua un poco mayor (400-800 mm/año) (Chileflora 2016).



Figura 4-1: Especies fito-estabilizadoras



Fuente: Plant-Identification.co.uk

En segundo lugar, la fito-filtración, utiliza las raíces de las plantas para captar los contaminantes presentes en el suelo. Una vez que las raíces están saturadas de contaminantes se extraen las plantas, se separa la raíz y se le realiza un tratamiento, tal como la incineración. Esta técnica se utiliza para extraer contaminantes de medios acuáticos con plantas hidropónicas, el problema de esto es que la extracción de agua de dichas raíces es costoso por su alta cantidad de humedad absorbida. Ejemplos de estas son la Maravilla (Caléndula), para remover plomo y ciertos elementos radioactivos, y la Mostaza India (Brassica Juncea), para remover cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y zinc. Ver Figura 4-2 (Padmavathiamma y Li 2007). La Maravilla necesita mucho sol, soporta altas temperaturas (30°C), pero no muy bajas (solo hasta 15°C), requiere de mucha agua, sobre todo en períodos de germinación y crecimiento. La Mostaza India en Chile se conoce con el nombre de Yuyo, se puede encontrar en todo el territorio nacional, ya que posee varias especies. Estas se pueden encontrar desde los 0 a los 2.000 metros de altura, hay algunas que prefieren climas secos y mucho sol, mientras otras necesitan mucha agua y no demasiado sol (Chileflora 2016).

Figura 4-2: Especies de fito-filtración



Fuente: biomassproducer.com.au



En tercer lugar, se encuentra la fito-volatilización. En este caso, las especies captan ciertos metales del suelo, los transforman en especies gaseosas mediante procesos biológicos, y los liberan a la atmósfera. La ventaja de esta técnica es que los metales se extraen del suelo sin necesidad de cortar la planta, pero la desventaja es que el contaminante no se elimina sino que se traspasa a otro medio donde eventualmente decantará. Existen solo algunos pocos metales que pueden pasar por este proceso, un ejemplo es el selenio el cual puede ser volatilizado por la alfalfa (*Medicago sativa*). Ver Figura 4-3 (Padmavathiamma y Li 2007). La alfalfa se da en Chile desde la región de Coquimbo hacia el sur, vive hasta los 2.000 metros de altura, necesita entre 400 y 800 mm de agua al año, y mucha luz (Chileflora 2016).

Figura 4-3: Especie de fito-volatilización



Fuente: Buenasalud.net

En cuarto lugar, la fito-extracción se refiere a la asimilación y translocación de los contaminantes del suelo por las raíces y demás componentes de la planta, como tallos, hojas y flor (a diferencia de la fito-filtración que solo acumula en raíces). Hay ciertas especies que se llaman hiper acumuladoras que son capaces de absorber cantidades inusuales de metales en comparación con otras plantas acumuladoras. Se han identificado más de 400 especies de hiper acumuladoras, (Padmavathiamma y Li 2007) y el año 2003 Canadá lanzó un libro llamado "Phytorem" con una base de datos de más de 750 plantas terrestres y acuáticas con capacidades de fito-remediación (McIntyre, McAfee y Haber 2003). Para llevar a cabo esta técnica se requiere plantar las especies seleccionadas, esperar varias semanas o meses hasta que estén saturadas de metal y luego cosecharlas para un tratamiento posterior. Esta rutina se debe repetir varias veces hasta que el nivel de contaminación del suelo se vuelva aceptable. Se deben extraer las plantas, principalmente, para evitar que sean consumidas por animales y que incorporen metales a sus organismos y a la cadena trófica. El tiempo total que dura este tipo de remediación



varía dependiendo del nivel de contaminación del suelo, los metales presentes, y las especies que se utilicen, entre otros, pero normalmente oscila entre 1 y 20 años. Ejemplos de especies híper acumuladoras son *Ipomea Alpina* para cobre, *Pteris Vittata* para arsénico, y *Thlaspi Caerulescens* para zinc y cadmio. La *Ipomea* se encuentra en la zona central de Chile, no soporta heladas, crece solo hasta en 2.000 metros de altura, necesita entre 400 y 800 mm de agua anuales, pero puede sobrevivir hasta 5 meses de sequía, requiere mucho sol y es tóxica cuando se ingiere (Chileflora 2016). La *Pteris Vittata* es una especie de helecho resistente, capaz de soportar heladas, y con un requerimiento medio de agua y sol (zona central de Chile). La *Thlaspi Caerulescens* se da en la zona central de Chile, es resistente a heladas, requiere mucho sol, crece bien en altura y requiere de 400 a 800 mm de agua anuales soportando hasta 5 meses de sequía (Chileflora 2016).

Figura 4-4: Especies híper acumuladoras de metales



Fuente: chileflora.com, mississippiferns.com, luontoportti.com

Para que la práctica de fito-remediación resulte y sea sustentable, las especies que se planten deben ser adecuadas y capaces de soportar condiciones adversas de altas concentraciones de metales (Singh, Raghubanshi y Singh 2002). Deben tener alta tolerancia a los metales, ser capaces de acumular varios tipos de metales y en grandes cantidades, tener una alta producción de biomasa, un crecimiento rápido, ser resistentes a pestes y plagas y no ser atractivas para los animales, de manera de no contaminar a la cadena trófica (Padmavathiamma y Li 2007). Es relevante realizar un análisis de suelos, de manera de determinar si es factible reforestar el área para su remediación y, de ser posible, que especies serían las más adecuadas para dicha tarea. Generalmente el análisis de suelos que se hace del sitio tiene un foco minero y no forestal, es por esto que se debe hacer un nuevo análisis del tipo de suelo, la química de éste, las características de los sustratos, y la materia orgánica que se debe agregar, entre otros, de manera de que la vegetación del lugar sea exitosa (Krümmelbein, y otros 2012).



Uno de los casos más antiguos de fito-remediación en Chile es el tranque de relaves de la planta Matta de Enami. En 1988 llevaron a cabo un plan de forestación en el relave acumulado por más de 20 años y de aproximadamente 1.000 m² de área y 3 m de profundidad, para estabilizar la superficie y reducir la erosión por viento. La primera etapa del plan solo fue en un cuarto de esta área y se plantaron cuatro especies de árboles. Ortiz y otros llevaron a cabo un estudio para determinar: (1) la supervivencia de las especies plantadas, (2) la caracterización química del suelo vegetado y no vegetado, y (3) la concentración de cobre en la raíz y cuerpo de las especies vegetales plantadas en el suelo del relave. De los resultados de esta investigación se desprende que el pH y contenido orgánico de las muestras de suelo vegetado y no vegetado, no varían significativamente (pH cercano a 7,4 y contenido orgánico cercano al 5%). Con respecto al contenido de cobre entre suelo sin y con vegetación la diferencia fue muy significativa: el suelo sin vegetación tenía 2.550 ppm, los primeros 10 cm de suelo vegetado 60 ppm, y en una profundidad de 10 a 20 cm del suelo, 290 ppm (Ortiz, Alcaide y Kao 2008).

Figura 4-5: Forestación de relave planta Matta



Fuente: Cochilco, Visita a terreno

Para el estudio de Ortiz, se seleccionaron nueve especies de plantas, de las cuales cinco eran nativas. A dichas especies se les hizo un análisis de contenido de cobre tanto en la raíz como en las hojas y se determinó una razón de contenido de cobre entre hojas y raíz. En algunas especies esta razón era menor a 1 y en otras mayor, indicando en estas últimas una migración del metal de la raíz a las hojas. En las 9 especies analizadas el contenido total (en peso seco) de cobre en la raíz y hojas varió entre los 330 y 3.500 ppm aproximadamente. Según el análisis realizado por Ortiz, uno de los mayores contenidos de cobre se encontró en la especie *Schinus Polygamus*, una especie arbórea conocida comúnmente como Huingán, que crece entre la región de Atacama y la de Los Lagos. Esta especie se da entre los 0 y 2.000 metros de altura y es capaz de desarrollarse en climas



secos con lluvias raras, necesita mucho sol y resiste hasta -5°C . Por otro lado, hubo tres especies que no habían sido plantadas en un principio pero que no sobrevivieron las altas concentraciones de metales ya que no se encontraban en el sitio del relave al momento del estudio. Estas son *Acacia cyanophyllia*, *Cupressus macrocarpa* y *Prosopis chilensis* (más conocido como Algarrobo) (Ortiz, Alcaide y Kao 2008).

Además del estudio mencionado anteriormente, existe un convenio de colaboración entre la SONAMI y, facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Universidad Católica de Chile, para estudiar acerca de la gestión integrada de residuos mineros y orgánicos: se estudia la potencialidad que tienen los residuos orgánicos para remediar los mineros a través de fito-remediación. Esta técnica consiste en mezclar los relaves mineros con los residuos orgánicos para mejorar la calidad del suelo y permita un mejor establecimiento y desarrollo de la capa vegetal sobre el relave. Los residuos orgánicos que se pueden usar van desde lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas, purines tratados, guano, lodos de industria de celulosa, hasta restos de industria maderera, residuos de hortalizas y frutas, compost y residuos orgánicos municipales (Fundación Tecnológica 2014).

4.2 Control de drenaje ácido

Uno de los principales problemas de contaminación producto de la actividad minera es la generación de drenaje ácido de los relaves y de las pilas de material estéril. El drenaje ácido se puede generar incluso mucho tiempo después de terminada la operación de la mina, por lo que es un tema que se debe tener en cuenta para el plan de cierre de faena.

Existen, a grandes rasgos, dos formas de control de drenaje ácido, que son evitar su generación (prevención) o tratamiento de los flujos generados (remediación), las cuales se explican a continuación.

4.2.1 Prevención

La formación de drenaje ácido se produce cuando ciertos minerales entran en contacto con oxígeno y agua, dando lugar a una reacción de oxidación que genera protones y minerales oxidados. Algunas medidas de prevención de generación de drenaje ácido son: inundación o sellado de minas subterráneas, almacenamiento de relaves bajo el agua, almacenamiento de relaves en tierra en montones sellados, mezcla de material de descarte, solidificación total de los relaves, aplicación de surfactantes aniónicos, y micro



encapsulación (revestimiento). Estas técnicas tienen dos principios de acción, hay unas que tienen como objetivo impedir el contacto de los minerales con el agua y el oxígeno, mientras otras es mezclar materiales productores de ácido con otros consumidores de ácido.

- a. Con respecto al primer principio de acción, las técnicas de prevención asociadas a este buscan impedir, dentro de lo posible, el contacto del oxígeno, el agua o ambos con los estériles y relaves, de manera de impedir la reacción que genera el drenaje ácido. Una manera de hacer esto es inundando o sellando las minas subterráneas abandonadas. Cuando se inunda, el oxígeno contenido en el agua es consumido por los microorganismos que oxidan minerales, y se impide el paso de más oxígeno al sistema sellando la mina. Ahora bien, esta técnica será efectiva solo cuando no ocurra otro tipo de intercambio de aguas con oxígeno (por aguas subterráneas por ejemplo). Bajo esta misma lógica se postula la técnica de disposición de relaves y estériles bajo el agua de manera de prevenir el contacto con oxígeno. Existen también las cubiertas secas de pilas de estériles o de relaves, en donde se instala una base impermeable por debajo de la pila, y por sobre esta viene una capa de sellado (normalmente se usa arcilla aunque no es recomendado para climas secos porque se quiebra), una capa protectora y una capa de suelo. En la capa de suelo normalmente se incorporan especies vegetales que le agregan estabilidad (Johnson y Hallberg 2005).
- b. El segundo principio de acción consiste en mezclar materiales que generan acidez con otros que consuman acidez para producir compuestos neutros para el medio ambiente, como por ejemplo la mezcla de fosfatos con pirita para precipitar el hierro y así disminuir su disponibilidad como agente oxidante. Otras técnicas utilizan biocidas para impedir la acción de bacterias que favorecen las reacciones de oxidación (bacterias tales como las hierro- o sulfuro-oxidantes). El problema con esto es que los biocidas pueden ser tóxicos para el medio ambiente (Johnson y Hallberg 2005).

Pese a lo anterior, la reacción de oxidación que da lugar al drenaje ácido ocurre espontáneamente en el medio ambiente, por lo que las medidas de prevención suelen no ser siempre estables (Johnson y Hallberg 2005).



4.2.2 Remediación

El tratamiento de los flujos, o remediación, puede llevarse a cabo a través de procesos abióticos o biológicos, y estos pueden ser a través de sistemas activos o pasivos. (Johnson y Hallberg 2005).

4.2.2.1 Abióticas activas

Las estrategias de remediación abióticas activas se basan principalmente en la adición de agentes químicos neutralizantes (como cal, carbonato de calcio, carbonato de sodio, hidróxido de sodio, y óxidos de magnesio entre otros), lo cual aumenta el pH (más alcalino) y hace decantar los metales disueltos como hidróxidos o carbonatos, los cuales pueden ser removidos posteriormente. Esta reacción se hace posible mediante la aireación, ya que utiliza el oxígeno como agente oxidante. El resultado de este tratamiento es un barro rico en metales, los cuales van a variar dependiendo la composición del drenaje y las condiciones de la reacción. La adición de ciertos agentes junto con un control del pH puede remover incluso compuestos como el arsénico y molibdeno. Si bien este sistema es eficiente en el tratamiento de drenaje ácido, tiene las desventajas de ser caro y de generar barros como residuo (Johnson y Hallberg 2005).

4.2.2.2 Abióticas pasivas

Las estrategias de remediación abióticas pasivas, también consisten en la adición de alcalinidad al drenaje ácido pero en condiciones anóxicas. La idea es mantener los metales (como el fierro) en su forma reducida y así evitar que precipiten en la cal o agente alcalino para no reducir su efectividad como agente neutralizante de pH. Si bien este tipo de tratamiento de drenaje ácido es de costo relativamente bajo, tiene varias complicaciones asociadas y no sirve para cualquier tipo de drenaje ácido. Puede fallar si entra en contacto con oxígeno o si tiene concentraciones muy altas de fierro o aluminio. Esta estrategia de remediación suele usarse en conjunto con otros tipos de tratamiento (biológicos activos y abióticos activos), de manera complementaria (Johnson y Hallberg 2005).

4.2.2.3 Biológicas activas

Las estrategias de remediación biológicas activas, como su nombre lo indica, utiliza organismos vivos en el tratamiento del drenaje ácido. En este caso, se utilizan microorganismos capaces de alcalinizar el pH y de inmovilizar metales para que no se produzcan las reacciones que dan origen al drenaje ácido.

4.2.2.4 Biológicas pasivas

Las estrategias de remediación biológicas pasivas son diversas y las más comunes son el uso de humedales aeróbicos, humedales anaeróbicos y biorreactores de compostaje,



barreras reactivas permeables y biorreactores hierro-oxidantes. Los humedales aeróbicos y anaeróbicos tienen como objetivo transformar los metales disueltos en minerales para poder extraerlos. La técnica a utilizar dependerá del pH del drenaje.

(1) Los humedales aeróbicos suelen ser más bien superficiales y necesitan de un pH neutro o alcalino para actuar (como aguas de relaves, que bajo la acción de los floculantes son típicamente alcalinos), ya que las reacciones que se producen en éstos suelen acidificar el pH del sistema. En dichos humedales se plantan especies macrófitos para que regulen el flujo de agua y estabilicen los metales a través de fito-estabilización.

(2) Los humedales anaeróbicos y biorreactores de compostaje, a diferencia de los humedales aeróbicos, las reacciones clave para mitigar el drenaje ácido ocurren en ausencia de oxígeno, las reacciones de reducción están impulsadas por donores de electrones que provienen de la materia orgánica del compost o del humedal. Tampoco utilizan macrófitos y se encuentran bajo el suelo. Las bacterias que actúan en estos sistemas generan alcalinidad y sulfuros biológicos, por lo que son ideales para tratar drenajes mineros ácidos y ricos en metales como los de minas abandonadas. Materias orgánicas típicamente utilizadas para esta técnica son estiércol o compost de hongos.

(3) Las barreras reactivas permeables, utilizan el mismo principio de acción que los humedales anaeróbicos o biorreactores de compostaje y son muy usados para tratar aguas contaminadas como los drenajes ácidos mineros. El método consiste en intersectar el flujo del agua contaminada con una barrera de reactivos, tales como mezcla de orgánicos y cal, que sean lo suficientemente permeables para que el agua fluya a través de ella.

(4) Los reactores hierro-oxidantes son como las barreras reactivas permeables pero específicos para hierro. Actúa con bajos pH ($\text{pH} < 4$) y bajo la acción de bacterias hierro-oxidantes.

Las ventajas de estos sistemas son que tienen un bajo costo de mantención, que los barros ricos en metales son mantenidos en el sistema, y que pueden ofrecer otros servicios ecosistémicos como mejora del paisaje, control de polvo, de erosión y de temperatura. Por otro lado, las desventajas son que son caros de instalar, necesitan grandes superficies, y existe incertidumbre con respecto a cómo y en qué cantidad se acumulan los metales en el sistema.



5 Casos estudio de cierre de faena minera

A continuación se describen casos estudio de cierre de faena minera, tanto a nivel nacional como internacional. La idea del análisis de los casos estudio es poder recoger experiencias exitosas de planes de cierre de faena que puedan ser replicables en otros sitios mineros.

5.1 Casos nacionales

A nivel nacional, destacan dos casos de cierre de faena minera, estos son El Indio y Mina Lo Aguirre, los cuales se describen a continuación.

Caso 1: Cierre de faena el Indio.

La mina de oro El Indio, ubicada en el Valle del Elqui, región de Coquimbo, fue adquirida por la empresa Barrick el año 1994, aunque el inicio de su explotación se remonta a 1979.

La mina dejó de operar el año 2002 tras lo cual inició su proceso voluntario de cierre de faena, transformándose en uno de los primeros casos de cierre de faena minera en Chile junto con el cierre de la mina Lo Aguirre. Las principales obras que forman parte del plan de cierre incluyen desmantelamiento de construcciones, retiro de edificaciones, obras y equipos, descontaminación de áreas, estabilización de taludes y restauración de las principales geoformas que se encontraban en el área previo a la actividad minera, donde fueron construidas plantas de procesos, tranques de relaves, rajos de explotación, minas subterráneas con sus túneles de acceso, depósitos de estériles, y pilas de lixiviación, entre otros (Barrick 2013).

Una componente clave del plan de cierre de la mina El Indio fue el manejo del curso de las aguas superficiales para poder establecer un drenaje física y químicamente estables para minimizar los requerimientos de monitoreo. Uno de los principales impactos a las geoformas de la zona fue que, debido a las actividades mineras, el curso del río Malo se modificó, por lo que parte del plan de cierre fue restaurar su curso original (ver Figura 5-1).



Figura 5-1: Restauración del lecho del río Malo, plan de cierre El Indio



Fuente: (Barrick 2012)

Se construyó también un tranque de relaves, llamado Pastos Largos, el cual fue diseñado especialmente para retener los relaves y evitar el drenaje de metales pesados aguas abajo de la mina (Cacciuttolo y Tabra 2015).

Figura 5-2: Tranque de relaves Pastos Largos



Fuente: GoogleEarth, dic 2014

Las actividades de cierre de faena han implicado una inversión de cerca de US\$ 80 millones. Actualmente se encuentra en proceso de post-cierre donde se llevan a cabo obras menores y monitoreo de parámetros tales como la calidad del agua.

Caso 2: Cierre de faena Mina lo Aguirre.

La mina de cobre lo Aguirre, propiedad de Sociedad Minera Pudahuel (SMP), comenzó a operar el año 1980, se ubica en la región Metropolitana, muy cerca de la ciudad de



Santiago, siendo visible desde la ruta 68. Lo Aguirre fue la primera minera en el mundo en aplicar a escala comercial el proceso de lixiviación en pilas para los óxidos de cobre, de biolixiviación en pilas para los sulfuros de cobre, y primeros en Chile en producir cátodos de cobre por electroobtención (Rodríguez F. 2013), logrando patentar el proceso de LIX-SX-EW, que es altamente eficiente y de bajo costo de operación. Luego de finalizado su período de operación, el año 2000, la mina lo Aguirre había generado una serie de externalidades que son la mina misma (cuatro rajos y una subterránea), botaderos de pétreos, botaderos de lixiviación, botaderos de estériles, tranques de soluciones y la planta (Minera Pudahuel 2016). La Figura 5-3 a continuación muestra el estado de la mina previo al cierre de faena minera.

Figura 5-3: Mina Lo Aguirre pre-cierre



Fuente: minera Pudahuel, 2000

En este contexto, la mina presentó el año 2000 ante el Sernageomin de forma voluntaria un plan de cierre que fue aprobado el mismo año y concluido en su parte fundamental el año 2008 (Minera Pudahuel 2016). Los principales compromisos adquiridos en el plan fueron: Asegurar las condiciones de estabilidad física de bancos en los rajos, estabilidad física-química de los depósitos de estériles y pilas de lixiviación, bloqueo de accesos y señalética mina-planta, construcción de un sistema de canalización de las aguas superficiales en los botaderos, disposición final de materiales peligrosos y no peligrosos, cubrimiento superficial de las pilas de lixiviación con capa de material arcilloso con un mínimo de 10 cm, más una capa vegetal entre 5 y 7 cm, plan de reforestación y re vegetación y plan de monitoreo.

Figura 5-4: Mina Lo Aguirre post-cierre



Fuente: minera Pudahuel, 2016

El plan de cierre de la mina lo Aguirre estuvo dividido en tres etapas. La primera correspondió al proceso de movilización del personal y desarme de máquinas y planta. La segunda etapa consistió en la estabilización de los botaderos y pilas: traslado de pilas, disminución del ángulo del talud, impermeabilización de botaderos, instalación de dos sistemas hidráulicos, uno para el drenaje ácido y otro de evacuación de aguas lluvias. Luego, se cubrieron las pilas con arcilla y con tierra vegetal que fue adquirida de la misma zona, por lo que tenía naturalmente semillas y restos de vegetación nativa. Se hizo además un plan de revegetación y forestación, en donde se ha podido ver que se ha poblado de fauna nativa, un buen indicador de la salud ambiental del área (Minera Pudahuel 2016).

El plan de cierre fue autofinanciado, principalmente mediante el reciclaje de residuos. En primer lugar se captó las aguas de drenaje de las pilas estabilizadas para extraer el cobre contenido en ellas (un proceso sin ácido sulfúrico agregado). Para esto se utilizó chatarra de fierro y se llevó a cabo un proceso de cementación para la obtención de cobre. Entre los años 2003 y 2010 se extrajeron más de 2.600 TMF de cobre de las pilas estabilizadas, y con la venta de éste se financió parte del plan. También se vendió cementos, áridos, terreno y activos de la minera para financiar el plan (Minera Pudahuel 2016).

Debido a la cercanía de la mina lo Aguirre con la ciudad de Santiago, es que este proyecto tiene un gran potencial para uso educacional y turístico. Su principal atractivo se debe a que es una mina pionera en el proceso LIX-SX-EW de extracción de metales, y a que es un caso exitoso de cierre de faena minera en Chile (Rodríguez F. 2013).

5.2 Casos internacionales

A continuación se presentan casos internacionales de planes de cierre de faena minera, en donde se muestra en qué consistieron, las actividades involucradas y los resultados obtenidos.

Caso 1: Island Copper mine, Puerto Hardy, British Columbia, Canadá.

La mina Copper Island, ubicada 14 Km al sur del puerto Hardy en la isla de Vancouver, empezó a operar el año 1971, extrayendo principalmente cobre, y, en menor cantidad, molibdeno, oro, plata y renio. Durante la operación, se generaron estériles que fueron acumulados cerca de la costa, y relaves, los cuales fueron depositados en el mar (una de las primeras en utilizar esta técnica a nivel mundial). Finalmente, la mina cerró sus faenas en 1995, dejando un rajo de una profundidad de 400 metros bajo el nivel del mar.

El plan de cierre de faena minera se comenzó a diseñar en 1969, previo al inicio de operaciones de la planta, y el plan final (luego de todas las modificaciones sufridas) fue presentado a las autoridades y desarrollado en 1994. En aquel período, el plan fue modificado varias veces, adaptándose a las necesidades de la zona, los cambios en el proceso de extracción y a los avances tecnológicos. Éste tenía ocho zonas de influencia principales, que son el sitio de la planta procesadora, el rajo, las paredes del rajo, el botadero de estériles de la playa, el botadero de estériles del interior, manejo de aguas, monitoreo marino, y la estación de bombeo “Marvel River”. El plan de cierre consideró también la sustentabilidad económica de la comunidad del puerto Hardy.

El plan de cierre de faena minera consistió, primero en la remediación de las 90 hectáreas, correspondientes al sitio de procesamiento del mineral, de acuerdo a los estándares del gobierno. Se vendieron los equipos que se podían vender y se desmantelaron los que no, para luego comenzar con un proceso de regulación del sitio contaminado. Luego, las 480 hectáreas que habían sido afectadas, fueron convertidas de vuelta en bosques y hábitat de fauna nativa, a través de un proceso de reforestación con árboles, pastizales y otras especies nativas del área. El plan de reforestación ha sido exitoso, el ecosistema ha logrado desarrollarse y atraer fauna nativa como venados, osos y gansos. La zona de la playa (donde estaban los botaderos de estériles), también fue remodelada y mejorada, recuperando la geografía de la orilla y replantando especies nativas.

Con respecto al rajo de 215 hectáreas de superficie, este fue llenado con agua de mar, de manera de estabilizar sus paredes y propiciar un ambiente estable para el drenaje ácido generado por los estériles. Los drenajes ácidos son colectados por tuberías y dirigidos



hacia el lago a una profundidad de 200 metros. El lago se encuentra estratificado, con una capa inferior salada y anóxica (sin oxígeno), y una capa superior de agua dulce producto de las lluvias y desagües. En la capa inferior, bacterias reductoras de azufre producen sulfuros de hidrógeno, los cuales reaccionan con el metal, haciéndolo precipitar en el fondo del lago. Dicho sistema ha demostrado ser un buen tratamiento a largo plazo para el control del drenaje ácido. Ver Figura 5-5 (Mining Facts Organization 2006, Wen, y otros 2007).

Figura 5-5: Island Copper en el último año de operación (1995) y post-cierre (2002)



Fuente: (Wen, y otros 2007)

Caso 2: Restauración de sitio Auvergne, Francia

Durante el siglo XIX se extrajo grandes cantidades de plomo y plata de un yacimiento minero en Auvergne, en el centro de Francia, hasta el año 1905 cuando la actividad minera terminó. Los residuos mineros que resultaron de dicha actividad consisten en rocas, relaves y escorias, los cuales estaban distribuidos en cuatro sitios, ocupando un volumen total de 200.000 m³, ubicados a lo largo del río Sioule. Como no crecía vegetación en los sitios donde estaban los residuos, éstos estaban expuestos a sufrir procesos de erosión por las lluvias y el viento, lo que en consecuencia causaba contaminación de los sedimentos del río y de las áreas aledañas.

Los relaves tenían altas concentraciones de plomo (6.000-70.000 ppm), arsénico (900-8.000 ppm), cadmio (4-107 ppm), zinc (0,8-2,3 ppm) y cromo (0,1-1 ppm). El año 2009, el estado francés ideó un programa de rehabilitación de sitio basados en estudios ambientales para disminuir la erosión y evitar el contacto de los contaminantes con las personas. Los trabajos de rehabilitación del sitio consistieron en diversas actividades: En primer lugar se escogió un sitio estratégico para acumular allí todos los residuos mineros de los 4 sitios, de manera de reducir la huella y los impactos de dichos residuos. En

segundo lugar, se cubrieron los residuos con una capa de suelo de 80 cm, para luego implementar un plan de revegetación con el fin de proteger el sitio contra la erosión. Por último se implementó un sistema de drenaje de las aguas superficiales (sobre todo aguas lluvia), siendo éstas dirigidas a una laguna, la cual fue restaurada y transformada en un humedal. Los humedales tienen la propiedad de ayudar a reducir la carga de contaminantes aguas debajo de ellos. Esto se debe a que las especies vegetales y microorganismos presentes en ellos actúan como captadores naturales de los metales presentes en las aguas de drenaje.

El proceso de rehabilitación del sitio incluye también un plan de monitoreo de la evolución y crecimiento de las especies vegetales plantadas y de la llegada de fauna nativa al sitio. Además, se realiza un muestreo para determinar la evolución de la biodisponibilidad de los metales presentes en el relave. Otra particularidad de este programa de cierre es que se recuperaron ciertos metales contenidos en los drenajes mineros cuya venta ayudó a financiar en parte la ejecución de la rehabilitación del sitio (Bellenfant, y otros 2013).

Caso 3: “Lausitz, minas de carbón, Alemania”: El distrito de Lausitz en Alemania, es el área minera de carbón más grande del país. El distrito tuvo su apogeo en los 80, aunque luego de la reunificación alemana, en 1990, la mayoría de las minas habían cerrado, quedando en la actualidad solo cuatro minas operativas. El problema surgió luego del cese de operación de la mayoría de las minas, ya que habían quedado pilas de material estéril acumuladas y, como ya no se extraía agua para la minería, el nivel de la napa subterránea empezó a subir a sus niveles originales, alcanzando las pilas de estériles y generando drenaje ácido (Graupner, Koch y Prommer 2014). Para el cierre de faena y remediación de este sitio, se propuso acondicionar y revegetar la zona, de manera de estabilizar los suelos y absorber metales a las especies plantadas. Para el proceso de acondicionamiento se utilizó materiales como la cal para reducir la acidez del suelo, y se agregó también suelo orgánico y fertilizantes. Para el proceso de revegetación se tuvo que tener especial atención a la compactación del suelo, ya que producto del peso de las pilas de material y de la mayor cantidad de agua que circulaba ahora, el suelo se compactó más de lo que estaba. Esto produce menor conductividad hidráulica y menor permeabilidad del aire. Por esto, se debía hacer un arado profundo en el suelo para ablandarlo y se debían plantar especies de rápido crecimiento para que no se endureciera el suelo antes de que las raíces empezaran a desarrollarse. Se consideró también un segundo arado luego de unos tres años para facilitar aún más el crecimiento (Krümmelbein, y otros 2012). Debido a la gran cantidad de agua subterránea de la zona y a los grandes rajos que se crearon por la



extracción de mineral, se decidió inundar los rajos, se aprovecharon los rajos para hacer lagunas y canalizar y recibir las aguas. Esto se hizo con dos propósitos, que son reducir el déficit de aguas superficiales y subterráneas en la zona, y para poder controlar de mejor manera la calidad del agua. Los lagos creados de forma artificial sirvieron también como tratamiento de drenajes ácidos producidos en el área de la mina. Estos drenajes eran previamente tratados bajo la superficie con bacterias para la reducción del hierro, y luego conducidos a los lagos y tratados con cal para elevar el pH (principio similar a las barreras reactivas permeables) (Benthaus y von Bismark 2015).

Figura 5-6: Lausitz, pre y post cierre



Fuente: (Benthaus y von Bismark 2015)

Otra particularidad de este plan de cierre fue el aprovechamiento de las estructuras de la mina como atracción turística, de manera de acercar más a la gente a la minería y a la tradición minera de la zona. La más famosa es la “Torre Eiffel acostada”, la cual es una estructura metálica que supera a la torre Eiffel en longitud, la cual era utilizada para extraer el mineral y ahora está disponible para que las personas puedan conocerla de cerca.

Figura 5-7: "La torre Eiffel acostada de Lausitz"



Fuente: The Link (The Link 2016)

Caso 4: "Proyecto Eden, Inglaterra": El proyecto Eden se desarrolla en un antiguo rajo de donde se extraía arcilla caolinita, ubicado en St Austell, Cornwall, Reino Unido. La mina cerró sus puertas el año 1995. A partir de ese mismo año, se empezó a pensar en un cierre de faena minera y rehabilitación del sitio distintos a lo que se hubiera hecho antes. La idea era transformar el sitio en un lugar para el desarrollo de la biodiversidad. El año 2000 se empieza la construcción del proyecto Eden. Se construyeron los invernaderos más grandes del mundo, los cuales tenían forma circular o de burbujas para poder adecuarse a la geografía del rajo, se fabricaron 83.000 toneladas de suelo fértil para ayudar a la regeneración del ambiente, la mayor parte de éste provino de restos orgánicos, algunos de los cuales fueron recolectados de la basura orgánica doméstica. Dado que muchas de las especies fueron plantadas en los invernaderos, se plantó más de mil especies propias de la selva tropical para así tener un centro educativo donde se pudiera recrear los distintos climas y ecosistemas del mundo. En marzo 2001 abrieron sus puertas al público, y en junio habían tenido más de un millón de visitas. Parte del proyecto Eden fue construir un anfiteatro donde se han realizado conciertos y otro tipo de presentaciones artísticas. El sitio tiene también un centro de eventos donde se celebran matrimonios, festivales y otros eventos. Uno de los principales programas del proyecto Eden es un programa internacional para niños donde se les enseña a crear jardines y temas de educación ambiental y ciudadana (Eden Project 2015).

Figura 5-8: Mina pre y post proyecto Eden



Fuente: Eden Project, 2015

Caso 5: “Cricova mina de Caliza, Moldova”: La antigua mina Cricova, de la república Moldova que se ubica entre Ucrania y Rumania, es una mina subterránea de caliza. La piedra caliza extraída de esta mina se utilizó por siglos para construir las casas de la ciudad de Chisinau, capital de Moldova y ubicada a 15 Km al sur de la mina. El año 1953 la mina ya abandonada, fue redescubierta y catalogada por expertos en producción de vino como un lugar ideal para el almacenamiento de vino, por su temperatura y humedad. Si bien este no es un caso de cierre de faena propiamente tal, es un buen ejemplo de aprovechamiento de un ex-sitio minero y de transformación de un pasivo a un activo (Daniel y Careddu 2011)

Figura 5-9: Cavas de vino en la antigua mina subterránea de Moldova



Fuente: www.pilcrowmagazine.com



6 Comentarios finales y recomendaciones

El cierre de faena minero ha estado tomando cada vez más presencia en el mundo. Chile ya cuenta con faenas mineras que realizaron plan de cierre y otras cuantas que empezarán a cerrar en los próximos años. Si bien no existe una fórmula única para llevar a cabo los planes de cierre de faena minera, si hay factores comunes que tienen las faenas mineras los cuales van a tener que ser abarcados para poder cumplir con la normativa. Dentro de estos factores unos de los más relevantes son el control del drenaje ácido y el control de la movilidad de los metales en el suelo, ya sea el polvo movido por el viento, o por migración a las aguas subterráneas.

De los casos estudio es relevante destacar sobre todo el caso de minera Pudahuel y la descripción de las etapas del plan de cierre, siendo la primera la movilización de la gente y desarme de estructuras, la segunda estabilización de botaderos y pilas, y la tercera el plan de revegetación y monitoreo del cierre. Estas etapas pueden ser replicadas a grandes rasgos en otros planes de cierre. En este contexto, se hace relevante mencionar el concepto de cierre de mina integrado, que considera aspectos ambientales, sociales y económicos desde una etapa temprana desde el proceso de desarrollo de la mina y mantenido a través del periodo operacional de la mina, sobre todo considerando que cierre de mina y rehabilitación de sitio son procesos dinámicos.

Otro tema a rescatar de los casos estudios, es un factor que tiende a repetirse que es la estabilización física y química a través de vegetación. En ese sentido es necesario tener en cuenta que no cualquier tipo de vegetación se adecúa a un ex sitio minero, por lo que es clave tener conocimiento de fito remediación para que este proceso sea exitoso.

Uno de los impactos que produce la minería es la modificación de las geoformas, como se vio en los casos estudio, estos sitios modificados pueden ser aprovechados para otros fines tales como recreación, educación, o turismo, entre otros. También se debe tener en cuenta que la actividad minera puede hacer sinergia con otras actividades industriales y utilizar residuos orgánicos para llevar a cabo planes de vegetación y forestación. Los residuos orgánicos pueden ser usados en remediación de sitio minero, como en el caso del Proyecto Eden, ya que ayudan a aumentar el contenido orgánico de la tierra el cual permite mejores posibilidades a las especies vegetales para crecer en ese suelo. En este sentido es de gran importancia tener una visión global, incorporando otras industrias al cierre de faena, ya que lo que para algunos es visto como residuos para otros puede ser insumo.



Chile tiene mucho que aprender aún acerca de cierre de faena minera. En este contexto, analizar los casos internacionales es clave para evitar problemas y lograr el éxito. Por otro lado, tal como se dijo en la visita a terreno al cierre de faena de la mina Lo Aguirre, innovar y atreverse a hacer cosas distintas es necesario para mejorar la situación actual y para optimizar los resultados. El superintendente de administración de minera Pudahuel explicó que “El cierre de faena es un proceso continuo, y como tal no puede ser tratado siempre igual. Se deben romper los paradigmas y generar conocimiento de manera de innovar y sacar el mayor valor posible a los pasivos mineros” (Minera Pudahuel 2016).

Este trabajo es una primera aproximación a las técnicas de cierre de faena minera, en un futuro trabajo se incluirá aspectos económicos más detallados de los planes de cierre propiamente tales.



7 Referencias

- AREAMINERA. *Mina lo Aguirre: Ejemplo de autofinanciamiento de un plan de cierre de faenas*. Enero de 2011. <http://www.aminera.com/historico/historico/54-contenido/29928-mina-lo-aguirre-ejemplo-de-autofinanciamiento-de-un-plan-de-cierre-de-faenas.html> (último acceso: Agosto de 2015).
- Australian Government. *Mine closure and completion: Leading practice sustainable development program for the mining industry*. Handbook, Social Economic Environmental, 2006.
- Barrick. *Barrick - Cierre el Indio*. 2013. <http://barricklatam.com/cierre-el-indio/> (último acceso: agosto de 2015).
- . *El Indio: Un ejemplo de compromiso ambiental*. Diciembre de 2012. <http://www.somosbarrick.com/zaldivar/2012/12/el-indio-un-ejemplo-de-compromiso-ambiental/>.
- Bellenfant, Gael, Anne-Gwenaelle Guezennec, Françoise Bodenan, Patrick D'Hugues, y Daniel Cassard. «Re-processing of mining waste: Combining environmental management and metal recovery?» *Mine Closure 2013, Cornwall, United Kingdom*, 2013: 571-582.
- Benthaus, F. Carl, y Friedrich von Bismark. «Lessons learned from restoring large scale mining induced water regime in Germany - Best practice in coal mining-.» *Intergovernmental Forum on mining, minerals, metals and sustainable development*. Geneve: LMBV, Octubre de 2015.
- Cacciuttolo, Carlos, y Kathia Tabra. «Water Management in the Closure of Tailings Storage Facilities.» Santiago: 10a ICARD IMWA 2015, Abril de 2015.
- Chileflora. *Buscador de plantas*. 2016. <http://www.chileflora.com> (último acceso: 2016).
- Daniel, Paul, y Nicola Careddu. *Litos online: Underground mining in perspective: Moldova*. 2011. <http://litosonline.com/ar/node/456> (último acceso: 2016).
- Eden Project. *Eden Project Timeline*. 2015. <http://www.edenproject.com/eden-story/eden-timeline> (último acceso: 2016).
- Fundación Tecnológica. *Gestión Integrada de Residuos Orgánicos y Mineros*. <http://www.fundaciontecnologica.cl/sonami/wp-content/uploads/2016/03/Residuos-Org.-y-Mineros.pdf>, Santiago: Boletín minero, 2014.

- Graupner, Bastian J, Christian Koch, y Henning Prommer. «Prediction of diffuse sulfate emissions from a former mining district and associated groundwater discharges to surface waters.» *Journal of Hydrology*, 2014: 169-178.
- Johnson, D. Barrie, y Kevin B. Hallberg. «Acide mine drainage remediation options: a review.» *Science of the Total Environment*, 2005: 3-14.
- Krümmelbein, Julia, Oliver Bens, Thomas Raab, y M.Anne Naeth. «A history of lignite coal mining and reclamation practices in Lutasia, eastern Germany.» *Canadian Journal of Soil Science*, 2012: 53-66.
- Li, M.S. «Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice.» *Science of the Total Environment*, 2006: 38-53.
- McIntyre, Terry, Brenda J McAfee, y Erich Haber. *Phytoremediation reference database*. Canadá: Environment Canada, 2003.
- Minera Pudahuel. «Visita a terreno y presentación plan de cierre mina Lo Aguirre.» *SMP: Nueva Pudahuel S.A. Plan de Cierre Mina Lo Aguirre*. Santiago: Visita a terreno y presentación, 2016.
- Minería Chilena. *Grupo Editorial EDITEC*. Mayo de 2012. <http://www.mch.cl/2012/05/25/union-comunal-de-juntas-de-vecinos-de-copiapo-visita-cierre-de-faena-el-indio/> (último acceso: Agosto de 2015).
- Mining Facts Organization. <http://www.miningfacts.org/>. 2006. <http://www.miningfacts.org/environment/what-happens-to-mine-sites-after-a-mine-is-closed/> (último acceso: 2015).
- MMSD. *Minería, Minerales y Medio Ambiente*. Libro/Reporte, Londres: MMSD, Proyecto Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable, 2002.
- Morales, Ana Luisa. «Ley N° 20.551 cierre de faenas e instalaciones mineras.» *Presentación*. Santiago: Sernageomin, 10 de Noviembre de 2016.
- Nueva Pudahuel S.A. «Plan de cierre mina Lo Aguirre.» *SMP*. 2011. www.smp.cl (último acceso: Agosto de 2015).
- Ortiz, Claudia, Oscar Alcaide, y Julia Li Kao. «Copper distribution in leaves and roots of plants growing on a copper mine-tailing storage facility in northern Chile.» *Revista chilena de historia natural*, 2008: 489-499.



- Padmavathiamma, Prabha K., y Loretta Y. Li. «Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants.» *Water, Air, & Soil Pollution Journal*, 2007: 105-126.
- Patiño, Carlos A, y Gustavo E Epalza. *Diseño y evaluación de un sistema piloto de descontaminación de aguas residuales a partir de plantas hiperacumuladoras Costus spicatus y Heliconia psittacorum*. Tesis, Ocaña: CIEBB, 2015.
- Rodríguez F., Carlos. *Patrimonio Geológico en Ciudad de Santiago*. Agosto de 2013. <https://geositiosantiago.wordpress.com/2013/08/31/yacimiento-de-cobre-lo-aguirre/> (último acceso: Agosto de 2015).
- Ruiz C., Joaquín. *Mina Lo Aguirre: Plan de cierre con consideraciones medioambientales*. junio de 2012. <http://biblioteca.cchc.cl/DataFiles/26866-2.pdf> (último acceso: Septiembre de 2015).
- SEA. *Servicio de Evaluación Ambiental*. Diciembre de 2003. <http://www.sea.gob.cl/noticias/visitan-plan-de-cierre-proyectos-%E2%80%9Cplan-de-cierre-minas-tambo%E2%80%9D-y-%E2%80%9Cestudio-integral-tranque-d> (último acceso: Agosto de 2015).
- Sernageomin. *Guía metodológica para la presentación de planes de cierre sometidos al procedimiento de aplicación general*. Guía Metodológica, Santiago: Sernageomin, 2014.
- Sernageomin. *Ley 20.551 Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras: Aspectos generales*. Presentación, Santiago: Gobierno de Chile, 2012.
- Singh, A N, A S Raghubanshi, y J S Singh. «Plantations as a tool for mine spoil restoration.» *Current Science*, 2002: 1436-1441.
- SMP. *Plan de cierre Mina lo Aguirre*. 2012. <http://smp.cl/plandecierre.php> (último acceso: Agosto de 2015).
- The Link. *Der Titan von Lichterfeld*. Agosto de 2016. <http://thelink.berlin/2016/08/besucherbergwerk-f60-lausitz-brandenburg/> (último acceso: Octubre de 2016).
- Wen, Marc E., y otros. *Fisheries habitat compensation planning for mine drainage impacts at the Island Copper mine*. British Columbia Mine Reclamation Symposium 2007, Vancouver: Faculty of Applied Science, 2007.



White, Christopher, Simon C Wilkinson, y Geoffrey M Gadd. «The Role of Microorganisms in Biosorption of Toxic Metals and Radionuclides.» *International Biodeterioration and Biodegradation*, 1995: 17-40.

Wilton, Mike J., y Gregory A. Lawrence. *The evolution of the Island Copper mine pit lake*. Symposium, Vancouver: The technical and Research Committe on Reclamation, 1998.



Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por

Constanza Kutscher Monckeberg
Analista de Estrategias y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya
Director de Estudios y Políticas Públicas

Noviembre/ 2016

