

UCH-FC
Q. Ambiental
T693
C.2



**FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE**

**“ANALISIS DE PRACTICAS DE PREDICCION, PREVENCION Y CONTROL DE
DRENAJE ACIDO EN LA MINERIA CHILENA”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial
de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

Jorge Armando Torres Pérez

Director de Seminario de Título: Sra. Carmen Gloria Dueñas Castro
Profesor Patrocinante: Mag. Julio Hidalgo Carvajal

Septiembre de 2011
Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

JORGE ARMANDO TORRES PEREZ

“ANÁLISIS DE PRÁCTICAS DE PREDICCIÓN, PREVENCIÓN Y CONTROL DE DRENAJE ÁCIDO EN LA MINERÍA CHILENA”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Sra. Carmen Gloria Dueñas Castro
Director Seminario de Título

Carmen Gloria Dueñas

Mag. Julio Hidalgo Carvajal
Profesor Patrocinante

Hidalgo

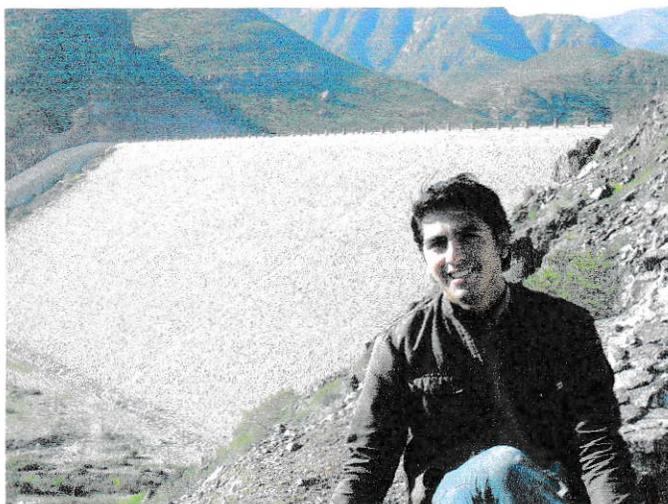
Dr. Nicolás Yutronic Sáez
Corrector

N. Yutronic Sáez

Dr. Fernando Mendizábal Emeraldia
Corrector



BIOGRAFÍA



Mi nombre es Jorge Armando Torres Pérez, nací el 24 de enero de 1986 en Lima – Perú. Estudié mi enseñanza básica y parte de la enseñanza media en ese país. El año 2000 me trasladé hasta Antofagasta, donde continué mi enseñanza media. Siempre estuvo dentro de mis intereses seguir estudiando y llegar a ser un profesional, idealmente ser médico o abogado, hasta que por iniciativa del colegio, visitamos una universidad donde nos mostraron muchas carreras profesionales, y definitivamente me gustó la química más que otros ámbitos.

Posteriormente me informé sobre las mejores universidades de Chile, y me di cuenta que la Universidad de Chile era la institución donde quería estudiar. Con el paso del tiempo fui analizando cuál era la carrera, relacionada con la química, que me gustaría estudiar. Averiguando encontré la carrera de Química Ambiental, leí el perfil profesional y encajaba perfectamente con lo que tenía pensado. Sin más que pensar postulé y afortunadamente quedé en lo que tenía establecido.

Fue un largo y duro camino el recorrido para estar en esta instancia. Trabajar y estudiar al mismo tiempo me dio momentos buenos y momentos malos, momentos tristes y otros alegres, buenas y malas notas, pero finalmente estoy dando el último paso de vida estudiantil, el más importante de mi vida hasta el momento. Sin embargo, empiezo un nuevo camino, al cual no le tengo miedo, ya que me siento muy capaz de afrontar con éxito todas las adversidades gracias a las herramientas que me han proporcionado en la universidad, mi familia, los profesores y amigos que me apoyaron.

A mi familia por estar en cada momento acompañándome y apoyándome siempre a la distancia. Con un ustedes me di cuenta que no es necesario tener junto a una persona para sentirla cerca. Muchas gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero darle las gracias a mis profesores por enseñarme todo lo que sé profesionalmente y en algunos casos, personalmente. Son personas sorprendentes, muchas veces los quise y otras veces no tanto, pero es claro que son las personas adecuadas realizar este trabajo.

También quiero agradecer a Fundación Chile, por darme la oportunidad de realizar mi tesis en sus dependencias. Especialmente quiero darle las gracias a Carmen Gloria Dueñas por asistirme, apoyarme y orientarme. Aprendí mucho y le estoy enormemente agradecido por eso.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición de Drenaje Ácido	6
1.2 Fuentes de DAM	7
1.3 Etapas del Desarrollo del DAM.....	8
1.4 Impactos del Drenaje Ácido Sobre el Medioambiente.....	12
1.5 Normativa Ambiental Vigente	13
1.6 Predicción del Drenaje Ácido.....	14
1.7 Prevención y Control del Drenaje Ácido	16
1.7.1 Prevención del DAR	16
1.7.2 Control del DAR.....	17
1.8 Programa Nacional para la Gestión Integral del Drenaje Ácido en Zonas Áridas y Semiáridas (Programa DAZA)	18
1.9 GARD Guide, Global Acid Rock Drainage	19
1.10 Objetivos	19
1.10.1 Objetivo General.....	19
1.10.2 Objetivos Especificos	20
II. METODOLOGÍA.....	21
2.1 Análisis de las prácticas de predicción, prevención y control de drenaje ácido en Estudios de Impacto Ambiental analizados.	21
2.2 Análisis de la percepción de las autoridades en relación a las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido, y de la capacidad técnica nacional para evaluar la generación del drenaje ácido	22
2.3 Comparación entre las prácticas de gestión del drenaje ácido a nivel	

nacional e internacional.....	25
III. RESULTADOS.....	26
3.1 Análisis de las prácticas de predicción, prevención y control de drenaje ácido en Estudios de Impacto Ambiental analizados.....	26
3.2 Análisis de la percepción de las autoridades en relación a las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido, y de la capacidad técnica nacional para evaluar la generación del drenaje ácido.....	30
3.3 Comparación entre las prácticas de gestión del drenaje ácido a nivel nacional e internacional.....	37
IV. DISCUSIÓN.....	58
V. CONCLUSIONES.....	67
VI. RECOMENDACIONES.....	69
VII. ANEXOS	73
ANEXO 1: Fichas Estudios de Impacto Ambiental	
ANEXO 2: Encuesta Sector Público	
ANEXO 3: Encuesta Compañías Mineras	
ANEXO 4: Análisis de Laboratorio – Metodología	
ANEXO 5: Ensayos de Laboratorio – Test Estáticos y Cinéticos más utilizados	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Normativa Chilena Asociada al DAM	13
Tabla 2:	Ejemplos de Tipos de Prevención de Drenaje Ácido.....	17
Tabla 3:	Ejemplos de Tipos de Tratamiento de DAM.....	18
Tabla 4:	Clasificación de las muestras y principales resultados del Test ABA	34
Tabla 5:	Instrumentación para el monitoreo de parámetros a controlar para la efectividad de la cobertura	43
Tabla 6:	Algunas Consideraciones para la Selección de Especies de Plantas ...	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Diagrama simplificado de las alternativas de procesamiento de Cobre. Principales fuentes de Drenaje Ácido.....	5
Figura 2:	Porcentaje de técnicas de predicción, prevención y control del DAR	27
Figura 3:	Porcentaje de técnicas de predicción de DAR más utilizadas	28
Figura 4:	Porcentaje de medidas de prevención de DAR más utilizadas.....	29
Figura 5:	Porcentaje de medidas de control de DAR más utilizadas	30
Figura 6:	Técnicas de Predicción más Necesarias según Servicio Públicos	31
Figura 7:	Medidas de Prevención más Necesarias según Servicio Públicos.....	31
Figura 8:	Medidas de Control más Necesarias según Servicio Públicos	32
Figura 9:	Técnicas de Predicción más utilizadas según Sector Privados	33
Figura 10:	Medidas de Prevención más utilizadas según Sector Privados.....	33
Figura 11:	Medidas de Control más utilizadas según Sector Privados	34
Figura 12:	Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - muestra PA-1	35
Figura 13:	Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - duplicado PA-1	36
Figura 14:	Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - muestra SBL	36
Figura 15:	Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - duplicado SBL.....	37
Figura 16:	Esquema de una Cobertura de Almacenamiento y Descarga	41

LISTA DE ABREVIATURAS.

DAM	Drenaje Ácido de Minas.
DAR	Drenaje Ácido de Rocas.
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería.
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente.
MINSEGPRES	Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios.
EIA	Estudio de Impacto Ambiental.

RESUMEN

El Drenaje Acido de Rocas (DAR) es el fenómeno de generación de aguas ácidas, producido por procesos de meteorización de rocas (principalmente oxidación de sulfuros). Generalmente presentan un contenido significativo de metales disueltos.

Actualmente, existen diferentes técnicas para combatir la generación de drenaje ácido. Estas son las técnicas de predicción, de prevención y de control de drenaje ácido. Las técnicas de predicción buscan determinar el potencial de generación de drenaje ácido. Las técnicas de prevención se encargan de evitar que los agentes que participan en la generación de drenaje ácido (roca sulfurada, agua y aire) entren en contacto. Por otro lado, las técnicas de control, se practican cuando ya se generó el drenaje ácido.

El objetivo del presente informe consiste en analizar la situación actual en Chile en términos de las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido que se desarrollan actualmente en el país, y entregar recomendaciones.

Se observó que en el 30 % de los EIA no se realizaron técnicas de predicción. El 62 % de las medidas de predicción implementadas fueron producto de la revisión de los resultados de predicción realizados.

El ensayo BC Research, es una alternativa más completa que muchos otros test predictivos y es recomendable su utilización. Sin embargo, podría perfeccionarse al considerar factores como el rango de temperatura (entre 28 y 35 °C) al cual la *thiobacillus ferrooxidans* presenta su mayor actividad metabólica.

Con respecto a las medidas de prevención implementadas se puede inferir que las empresas realizan actividades adicionales a lo declarado a las autoridades ambientales como parte de los EIA y además el sistema actual de fiscalización no da

cuenta de los cambios implementados en las faenas, pese a que las modificaciones son sometidas a análisis de pertinencia a la autoridad ambiental.

Del análisis realizado a las cubiertas vegetales, se puede destacar que existen opciones potenciales a implementar en Chile, correspondiente a dos tipos de coberturas muy similares, la coberturas de Almacenamiento y Descarga y las coberturas de Almacenamiento, Derivación y Descarga. Estas son una importante alternativa a evaluar principalmente para los planes de cierre de las faenas mineras. Además, se propone una alternativa de evaluación de la calidad del diseño de la cobertura mediante un procedimiento y con la utilización de ciertos instrumentos que permiten monitorear las características hidrogeotécnicas y climáticas, entre otras. A pesar de los resultados mostrados, se propone implementar pruebas piloto para asegurar el adecuado funcionamiento de las coberturas.

Respecto al estudio de los resultados del análisis de brechas realizado al sector público se priorizaron los siguientes aspectos a investigar: Capacitación, Investigación en características locales, Pruebas de predicción In-situ, Test dinámicos y Normativa específica.

Los residuos mineros masivos fueron exonerados del D.S. N°148, sobre residuos peligrosos. Lo que implica que el drenaje ácido y los residuos mineros masivos no están acogidos a ninguna regulación. Una alternativa podría ser incorporar dentro de esta normativa los residuos mineros masivos, tal que quede regulado indirectamente la generación del drenaje ácido, ya que se realizaría una caracterización de la roca a depositar en los botaderos, y existirían límites máximos permitidos para la concentración de sulfuros de metales en la roca.

Otra alternativa, ya propuesta, es la incorporación de la prevención de la generación del drenaje ácido en la futura normativa de planes de cierres mineros.

ABSTRACT

Acid Rock Drainage (ARD) is the phenomenon of generation of acid waters produced by processes of weathering of rocks (mainly oxidation of sulfides). Generally have a significant content of dissolved metals. Currently, there are different techniques to control the generation of acid drainage. These are the techniques of prediction, prevention and control acid drainage. Forecasting techniques attempt to measure the potential to generate acid drainage. Prevention techniques are responsible for preventing those involved in the generation of acid mine (rock sulfur, water and air) into contact. On the other hand, control techniques are practiced when the acid drainage generated.

The purpose of this report is to analyze the current situation in Chile in terms of forecasting practices, prevention and control of acid drainage that are currently in the country, and provide recommendations.

It was noted that 30% of EIA predictive techniques were performed. 62% of the measures implemented were the result of prediction of the review of the prediction results achieved.

The trial BC Research, an alternative is more complete than many other predictive tests and is recommended for use. However, it could be refined by considering factors such as temperature range (between 28 and 35 °C) at which the *Thiobacillus ferrooxidans* is its greater metabolic activity.

With regard to preventive measures can be implemented to infer that the companies undertake activities additional to the environmental authorities declared as part of the EIA and also the current control system does not account for the changes

implemented in the tasks, although modifications are subject to analysis of relevance to the environmental authority.

From the analysis of the ground cover, we may note that there are potential options to be implemented in Chile, for two types of coverage are very similar, Storage and Offloading hedges and hedges Storage, Referral and Discharge. These are an important alternative to assess primarily to the closure plans for mining operations. It is also proposed an alternative assessment of the design quality of coverage through a procedure and the use of certain instruments to monitor hidrogeotécnicas and climatic features, among others. Although the results shown, it is proposed to implement pilot testing to ensure the proper functioning of the coverage.

Regarding the study results conducted gap analysis, priority was given to the public sector to investigate the following aspects: Training, Research local characteristics, testing prediction In-situ, dynamic and specific legislation Test. The massive tailings were exempt from DS. N°148 on hazardous waste. This implies that acid drainage and tailings mass are not benefiting from any regulation. An alternative would be to incorporate into this massive mining waste regulations, such that it is indirectly regulated the generation of acid drainage, because it would make a characterization of rock deposited in landfills, and maximum allowable limits exist for the concentration of sulfides metals in the rock. Alternatively, a proposal is the incorporation of preventing the generation of acid drainage in the future legislation of mine closure plans.

I. INTRODUCCIÓN

La industria minera en Chile ha sido desde hace décadas el motor de la economía nacional. Antiguamente, la base económica chilena era el salitre, hasta que tuvo su gran caída debido a la creación del salitre sintético por parte de los alemanes durante la época de la primera guerra mundial. Actualmente, la mayor parte del dinero que mueve al país es generado por la industria minera metalúrgica de cobre, la industria maderera y la industria del salmón. Sin embargo, indiscutiblemente, la primera genera más ingresos que las otras.

El proceso minero metalúrgico del cobre depende de la capacidad de operación. Esta determina la mejor secuencia para extraer el mineral, compatibilizando las características de la operación con los resultados económicos esperados, para un largo período (en general, sobre los 10 años). En Chile el proceso minero metalúrgico del cobre generalmente se realiza a través de las siguientes etapas:

Extracción: se puede realizar de subterránea o a rajo abierto (superficial), incluye sub-etapas, como la perforación, tronadura, carguío y transporte. En esta etapa se obtienen rocas mineralizadas del tamaño adecuado para ser cargadas y transportadas a la Planta en camiones o ferrocarril. De acuerdo al contenido de cobre y el valor de procesamiento (ley de corte), se define lo que es el "mineral". El material que se encuentra bajo la ley de corte es considerado "estéril" si no contiene cobre, o "mineral de baja ley" si tiene algo de cobre que podría ser recuperado a través de otro procedimiento. El mineral obtenido con contenido de cobre es transportado, luego de su extracción, a la Planta de procesamiento.

Chancado: el objetivo del chancado es reducir el tamaño de los fragmentos mayores hasta obtener un tamaño uniforme máximo de ½ pulgada (1,27 cm.) aproximadamente.

Posterior al chancado, se pueden seguir dos líneas de procesamiento:

- a) Flotación Convencional: Molienda-Flotación-Fundición-Electrorrefinación.
- b) Lixiviación en Pilas: Lixiviación-Extracción por Solventes-Electroobtención.

A continuación se describen cada una de estas líneas de proceso:

Flotación Convencional

Molienda: se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm), la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de cobre en forma de partículas individuales.

Flotación: es un proceso físico-químico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre y otros elementos como el molibdeno, del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original.

Fundición: el concentrado de cobre seco (proveniente del proceso de flotación) con una concentración del 31 % de cobre, se somete a procesos de pirometalurgia en hornos a grandes temperaturas, mediante los cuales el cobre del concentrado es transformado en cobre metálico y se separa de otros minerales como hierro (Fe), azufre (S), sílice (Si) y otros.

Electrorrefinación: mediante la electrorrefinación se transforman los ánodos producidos en el proceso de fundición a cátodos de cobre electrolítico de alta pureza. Se basa en las características y beneficios que ofrece la electrólisis, que permite refinar el cobre anódico (ánodo) mediante la aplicación de la corriente eléctrica, obteniéndose cátodos de cobre de alta pureza (99,99%).

Lixiviación en Pilas

Lixiviación: es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen, aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Se obtienen soluciones de sulfato de cobre (CuSO_4) con concentraciones de hasta 9 g/L denominadas PLS que son llevadas a diversos estanques donde se limpian eliminándose las partículas sólidas que pudieran haber sido arrastradas. Estas soluciones de sulfato de cobre limpias son llevadas a la planta de extracción por solvente.

Extracción por Solvente (SX): en esta etapa la solución que viene de las pilas de lixiviación, se libera de impurezas y se concentra su contenido de cobre, pasando de 9g/L a 45 g/L, mediante una extracción iónica.

Electroobtención (EW): esta etapa corresponde al desarrollo de un proceso electrometalúrgico mediante el cual se recupera el cobre disuelto en una solución concentrada de cobre. Esta etapa corresponde al desarrollo de un proceso electrometalúrgico mediante el cual se recupera el cobre disuelto en una solución concentrada de cobre.

De acuerdo al tipo de mineral, oxidado o sulfurado, se utiliza una determinada tecnología para su procesamiento, generando diferentes residuos en cada caso (Figura 1). El tipo de residuo de interés para este trabajo, es aquel que puede generar drenaje ácido.

Diariamente la minería genera grandes volúmenes de residuos que pueden ser potencialmente generadores de drenaje ácido. Para la obtención de una tonelada de cobre metálico, es necesario remover en promedio aproximadamente 350 toneladas (ton) de material estéril o lastre, 150 ton de mineral de baja ley, 66 ton relaves, 57 ton de residuos de lixiviación y 1 ton de escoria. Debido a que la producción de cobre en Chile el año 2005 bordeó los 5,5 millones de toneladas, queda claramente expuesto que el impacto ambiental de esta actividad es enorme.

El drenaje ácido tiene una composición típica en muestras seleccionadas de 21,8 mg/L Fe; 240 mg/L SO_4^{-2} ; 0,15 – 0,5 mg/L Cu; 0,04 As y un pH entre 1 – 2. Los metales pueden alcanzar concentraciones del orden de los g/L.

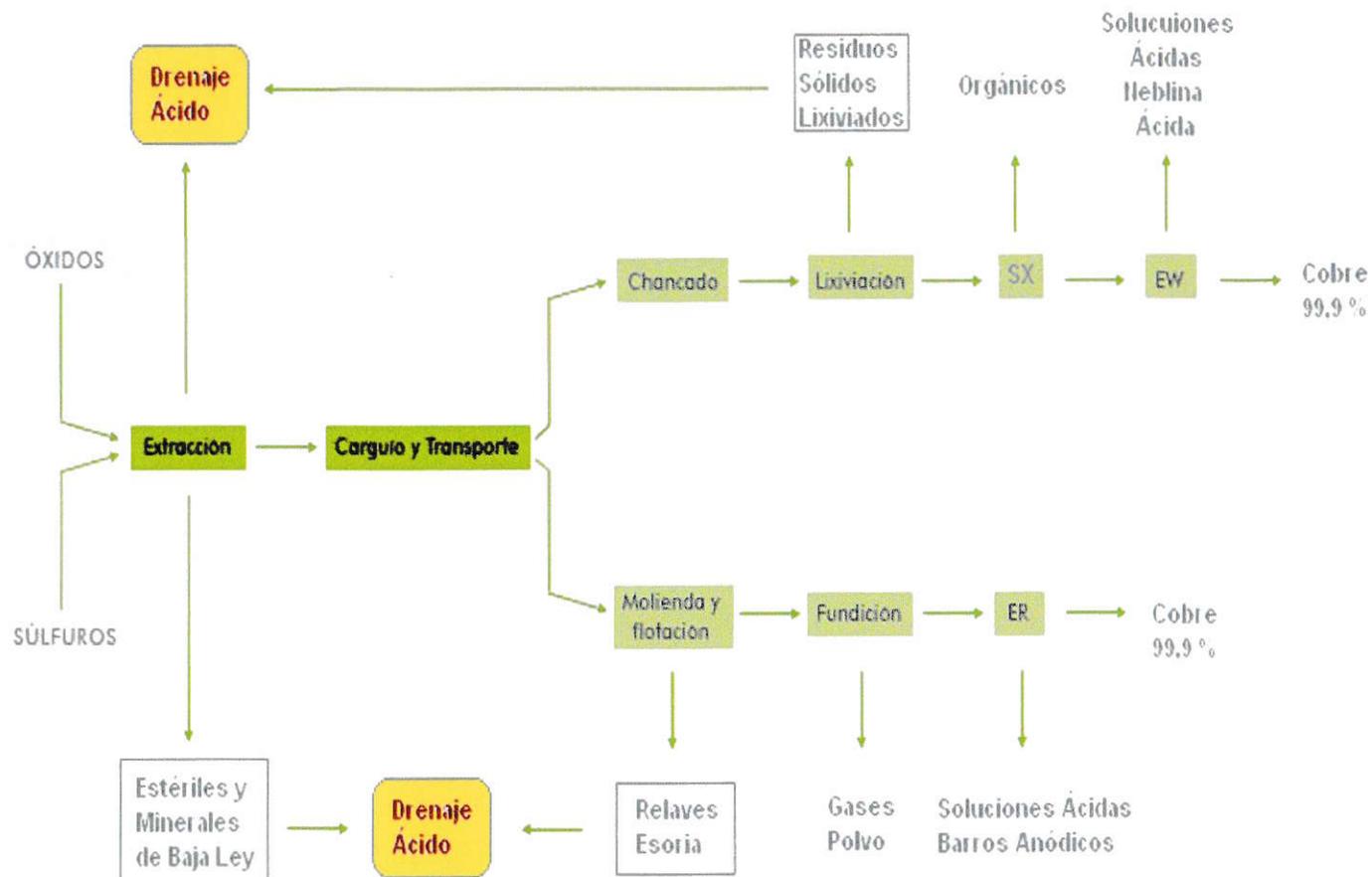


Figura 1: Diagrama simplificado de las alternativas de procesamiento de Cobre. Principales fuentes de Drenaje Ácido.

Fuente: Información Codelco. Diseño propio.

1.1 Definición de Drenaje Ácido

El drenaje ácido son infiltraciones de soluciones ácidas sulfatadas, generalmente con un contenido significativo de metales disueltos, resultado de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados y de la lixiviación de metales pesados asociados, provenientes de rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua.

El Drenaje Ácido de Rocas (DAR) es producido por procesos de meteorización de rocas (principalmente oxidación de sulfuros), y puede existir en el medioambiente sin actividad minera. En cambio, el Drenaje Ácido de Mina (DAM), es el fenómeno de generación de aguas ácidas, asociado a la explotación de yacimientos minerales, es decir a la actividad antropogénica.

Generalmente, el drenaje ácido se caracteriza por tener bajos valores de pH (entre 5 y 1,5), una alcalinidad decreciente y una acidez creciente en el tiempo, concentraciones elevadas de sulfato, concentraciones elevadas de metales (disueltos y totales) y concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales (SDT). En general, el drenaje ácido puede tener las siguientes características:

- Neutro con concentraciones elevadas de sulfatos.
- Neutro con concentraciones elevadas de metales.
- Ácido con concentraciones elevadas de metales.
- pH bajo y alto nivel de sulfatos.

1.2 Fuentes de DAM

El procesamiento minero del cobre se puede realizar de dos maneras: la Flotación Convencional y la Lixiviación en Pilas. Inicialmente, se sigue una línea en común, la extracción y chancado del material extraído. La extracción genera rajos, muchas veces del orden de kilómetros de largo y decenas de metros de profundidad. Estos rajos son una fuente de DAM, debido a que las rocas sulfuradas que se encuentran a gran profundidad, quedan expuestas al oxígeno del aire, luego el agua que se encontraba retenida en los intersticios de las rocas entra en contacto con el material oxidado, generando el drenaje ácido.

Por otro lado, producto de la extracción, el material estéril es llevado a depósitos, produciéndose la oxidación de las rocas sulfuradas por el aire. Este material queda expuesto a las condiciones meteorológicas del sector, esto es, a las lluvias, nevadas y afloramientos de agua, los cuales pueden generar drenaje ácido en mayor o menor medida si se previene su generación.

La Flotación Convencional, genera un residuo denominado relave, que se genera durante el proceso de la separación del cobre del resto del material que lo contiene. Los relaves son trasladados generalmente por tuberías, a depósitos de relaves. Los depósitos de relaves, al igual que los depósitos de estéril, quedan expuestos a las condiciones meteorológicas del sector de su emplazamiento. La diferencia radica en que los relaves contienen además, reactivos utilizados para mejorar y acelerar la separación del cobre del resto de la roca, lo que agrava más la contaminación.

La Lixiviación en Pilas, genera un residuo denominado rípios de lixiviación.

Estos rípios, son la resultante de la lixiviación del mineral con ácido sulfúrico.

La Lixiviación en Pilas puede ser dinámica o estática. El primer caso implica que, luego de la lixiviación del mineral con el ácido, los rípios resultantes son trasladados hacia un depósito de rípios donde, al igual que los relaves y el material estéril, quedan expuestos a las condiciones meteorológicas del sector, pudiendo generarse drenaje ácido. En el segundo caso, los rípios no son retirados, sino, al finalizar el proceso de lixiviación, se deposita más material, el que luego será lixiviado generándose diferentes capas de rípios en la posteridad.

En cualquiera de los casos, el mayor problema que genera la industria minera en relación a la generación del drenaje ácido, son los efectos que se producen posteriormente al cierre de las faenas. Lo anterior, debido a que si es rentable para alguna empresa en particular, procesar el drenaje generado durante su etapa de operación, la problemática se mantiene parcialmente controlada. Sin embargo, la contaminación se hace más evidente cuando las faenas cesan sus operaciones, ya que tanto los relaves, como los rípios y el material estéril, quedan expuestos permanentemente a la lluvias, nevadas y/o afloramientos de aguas, produciéndose drenaje ácido no controlado.

En la Figura 1 anterior, se ilustran las principales fuentes de generación de DAM.

1.3 Etapas del Desarrollo del DAM

El desarrollo de la generación del DAM o DAR en general, es un proceso que generalmente ocurre en tres etapas. El proceso es dependiente del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos

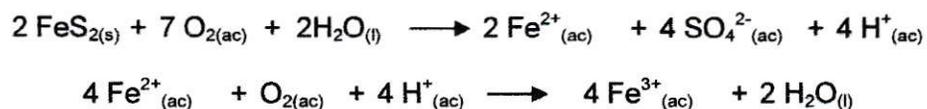
relacionados. A continuación se hace una descripción general de cada una de estas etapas:

a) Etapa I

- Los minerales sulfurados, como la pirita (bisulfuro de hierro (FeS_2)), son oxidados químicamente por el oxígeno del aire (oxidante principal), produciéndose sulfato, ión de hierro (II) y protones, los cuales son los responsables de la acidez.
- Los metales liberados precipitan y están relativamente inmóviles, debido a que los minerales alcalinos como la calcita (CaCO_3) y la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez y producen la precipitación de hierro como óxido o hidróxido.
- A medida que se agotan los minerales carbonatados, el pH de la matriz de intercambio iónico disminuirá, pasando a la siguiente etapa del desarrollo del DAR.

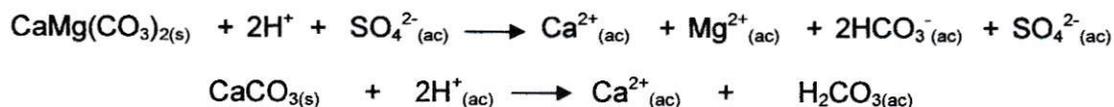
Reacciones Etapa I

La generación de ácido es producido a través de las siguientes reacciones:

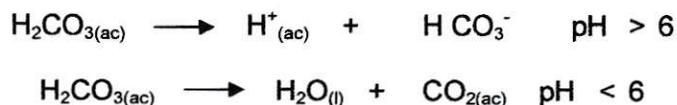




El consumo de ácido se produce mediante la siguiente reacción:



El ácido carbónico es inestable y se descompone fácilmente, dando:



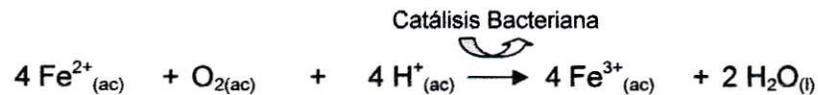
Las concentraciones de estas especies dependen del pH y las respectivas constantes de acidez del ácido carbónico.

b) Etapa II

- Cuando el pH disminuye hasta 4,5, ocurren reacciones de oxidación, tanto químicas como biológicas. Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3,5.
- Se presentan concentraciones elevadas de ión de hierro (II) y sulfato, y se observa una acidez relativamente alta, a pesar de que las concentraciones de metales en la solución puedan ser bajas.

Reacciones Etapa II

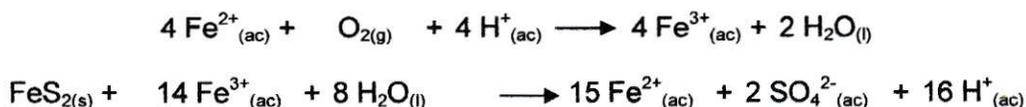
En esta etapa se producen las mismas reacciones que en la Etapa I. La diferencia radica en que las bacterias empiezan a participar en la catálisis de la reacción de ión de hierro (II) a ión de hierro (III).



c) Etapa III

- Las reacciones dominantes se transforman de oxidación química a principalmente oxidación biológicamente catalizada.
- Se produce hierro, que se oxida biológicamente a ión de hierro (III), el que pasa a ser el oxidante principal, reemplazando al oxígeno y el drenaje se vuelve aún más ácido producto de la oxidación de sulfuros metálicos (ZnS, PbS, etc.), con mayores concentraciones de metales disueltos.
- La velocidad de oxidación es mucho más rápida que en la etapa I. En la literatura existen informes sobre la observación del aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquéllas generadas por oxidación química.

Reacciones Etapa III



1.4 Impactos del Drenaje Ácido Sobre el Medioambiente

Los problemas ambientales asociados al drenaje ácido son variados, el hecho más preocupante es que los efectos son evidenciados generalmente en el largo plazo. Entre algunos de los efectos sobre el medio ambiente, se pueden nombrar los siguientes:

- Interrupción del crecimiento y reproducción de fauna y flora acuática.
- Inhibición del crecimiento de comunidades vegetales aledañas a los canales de drenaje, producto de que la acumulación de hierro y sulfuros en la superficie de los suelos dificulta la penetración de las raíces. También, el ácido sulfúrico afecta la tasa de crecimiento de las plantas.
- Daño a los ecosistemas (cadenas tróficas, comunidades, otros).
- Afectación a la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (acuíferos poco profundos), lo cual podría afectar a la comunidad por limitar, e incluso impedir utilizar las aguas para algunos usos como riego.

Además de la disminución de pH y el aumento de metales en el agua, pueden precipitar iones de hierro (III) (Fe^{+3}), produciendo como precipitado hidróxido de hierro

(III) $(\text{Fe}(\text{OH})_3)$, el cual es un sólido fangoso, de color amarillo o naranja, que puede cubrir el lecho de un riachuelo y decolorar el agua aumentando la turbidez.

1.5 Normativa Ambiental Vigente

En la actualidad la legislación y normativa nacional asociada al DAM, en su mayoría corresponden a pautas ambientales dentro de las cuales se encuentran especificaciones de emisión, calidad y acuerdos de producción limpia APL.

A continuación (Tabla 1), se entrega un listado de la normativa de carácter asociada al DMA y la materia que regula cada una.

Tabla 1: Normativa Chilena Asociada al DAM

Ente Regulatorio	Materia que Regula
D.S. N°609/98 del MINSEGPRES	Regula la emisión de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado.
D.S. N°90/00 del MINSEGPRES	Regula la emisión de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
D.S. N°46/02 del MINSEGPRES	Regula la emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas.
NCh 1333/Of.78 del SISS	Fija los requisitos de calidad de agua para diferentes usos.
Acuerdo Marco de	Es un compromiso de voluntades del sector público competente

Ente Regulatorio	Materia que Regula
Producción Limpia del sector de la Gran Minería	y del Consejo Minero y sus asociados, con el objetivo de promover el mejoramiento de la productividad y competitividad del sector, así como las prácticas de prevención de la contaminación y producción limpia en áreas de interés mutuo, promoviendo una mayor articulación de los distintos organismos públicos regulatorios y fiscalizadores en materias de regulación sanitaria y ambiental, tanto nacional como internacional, con las empresas mineras con las cuales se relacionan.
D.S. N°148/03 del MINSAL	Regula el manejo de residuos peligrosos.

1.6 Predicción del Drenaje Ácido

La base del concepto de predicción es tratar de utilizar la información recopilada en la actualidad para predecir no sólo lo que ocurrirá dentro de 1 año, ni de 10, sino dentro de los próximos 100 años.

El reconocimiento temprano de la probabilidad de que un tipo de roca, generará drenaje ácido, es esencial para prevenir el desarrollo de un problema de DAM.

La predicción de la generación de DAM debe involucrar labores de muestreo y ensayos de laboratorio y de campo, tanto para las minas existentes como para proyectos mineros.

La predicción del potencial de generación ácida y lixiviación de metales es muy importante desde una perspectiva ambiental. Se ha identificado que puede haber considerables implicancias económicas en los requerimientos para dar solución al DAR en un asentamiento minero.

La identificación anticipada de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos pueden reducir considerablemente los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas correctivas. Además, la identificación temprana y la incorporación de medidas de control, pueden reducir las obligaciones financieras de mantener instalaciones de recolección y tratamiento a largo plazo; por ejemplo, mantener a perpetuidad una planta de tratamiento químico. Es importante que tanto la compañía minera como las autoridades competentes efectúen las pruebas suficientes y apropiadas para garantizar que todos los problemas potenciales hayan sido identificados y tratados.

No existe un único conjunto de pruebas que garantice una predicción absoluta del DAR. Sin embargo, si se tiene conocimiento de los factores físicos y químicos que controlan el DAR, y con la aplicación de las técnicas que se mostrarán más adelante, se podría identificar el potencial de generación de ácido y estimar la calidad del agua del drenaje, a corto y a largo plazo.

La predicción se puede realizar a una gran variedad de materiales y a través de distintos métodos, tales como estudios mineralógicos detallados, comparaciones con otros sitios, monitoreo del drenaje, pruebas de laboratorio estáticas, pruebas de laboratorio cinéticas y pruebas de campo en el sitio minero.

En el Anexo 5 se sintetizan los métodos de laboratorio (métodos de muestreo, ensayos estáticos, cinéticos y ensayos de extracción), métodos de campo y modelación matemática del potencial de generación de acidez (modelos empíricos y modelos determinísticos), y se indican sus principales ventajas y desventajas.

1.7 Prevención y Control del Drenaje Ácido

La prevención consiste en la implementación de medidas, con el fin de evitar la generación drenaje ácido. En este caso, el control de la calidad del agua es fundamentalmente el control de todo producto soluble y la prevención de oxidación y generación de ácido en el futuro. En contraste, el control se implementa después de la generación o liberación de contaminantes. En este caso, las medidas de control deberán referirse a la oxidación, pasada y futura, y a los productos solubles almacenados.

1.7.1 Prevención del DAR

Existen dos tipos de prevención para generación del drenaje ácido. El primero consiste en evitar la interacción roca-aire, con el fin de limitar o reducir las reacciones de oxidación de minerales sulfurados y por ende limitar o reducir la generación de drenaje ácido en la fuente. Con esto se inhibe la oxidación de sulfuros y la generación de drenaje ácido no se manifestará. El segundo tipo controla principalmente la interacción roca-agua, para eliminar la migración o movilización de contaminantes a través de la infiltración y escurrimiento. El control de la migración se obtiene con la intervención del flujo aguas arriba del agua superficial o subterránea y/o con el control de la infiltración en la superficie de la instalación. En la Tabla 2 se presentan algunos ejemplos de medidas de prevención de la generación de drenaje ácido.

Tabla 2: Ejemplos de Tipos de Prevención de Drenaje Ácido

Prevención roca-aire	Prevención roca-agua
Cubiertas y sellos.	Co-disposición de residuos de roca y relaves.
Desulfuración/manejo y asilamiento selectivo de residuos sulfurosos.	Reducción de la infiltración: Cubiertas simples de suelo. Cubiertas sintéticas. Cubiertas complejas.
Micro-encapsulación o envoltura de la pirita.	Desviación del agua superficial.
Mezcla con aditivos básicos.	Intercepción del agua subterránea.
Inhibición de las bacterias.	---
Cubiertas de agua y descarga subacuática.	---
Saturación.	---

1.7.2 Control del DAR

La recolección y tratamiento del DAR es el control in-situ de la química de los lixiviados, el cual es implementado después de la generación o liberación de contaminantes. Este tipo de control se puede realizar a través de métodos de tratamiento químico activo, que involucran el tratamiento en una planta química; y métodos de tratamiento pasivo que se basan en el tratamiento "natural". El primero requiere atención y control continuo, mientras que el segundo funciona sin mantenimiento ni control riguroso.

A continuación, en la Tabla 3 se indican algunas técnicas de tratamiento de DAM:

Tabla 3: Ejemplos de Tipos de Tratamiento de DAM

Tratamiento activo	Tratamiento pasivo
Neutralización química.	Canal de caliza anóxico (CCA).
Disposición y tratamiento de lodos.	Canales de caliza óxicos.
Recuperación de metales.	Sistemas de flujo vertical.
---	Pantanos e inundaciones.

1.8 Programa Nacional para la Gestión Integral del Drenaje Ácido en Zonas Áridas y Semiáridas (Programa DAZA)

El Programa DAZA, perteneciente a Fundación Chile, una organización que se identifica con el desarrollo y transferencia de nuevas tecnologías y con el desarrollo de programas nacionales e internaciones de cooperación, es un programa nacional de cooperación público privada, el cual ha estado abocado durante su puesta en marcha (2009 - 2010) a analizar las prácticas actuales y requerimientos de la industria minera nacional y de los servicios públicos para la predicción, prevención, control y/o tratamiento del drenaje ácido. Durante su desarrollo (2009 -2019), el Programa DAZA identificará y ejecutará las prioridades de investigación basadas en el análisis de las brechas detectadas, incluyendo temas tales como: Validación de tecnologías; Lixiviación de metales; Tratamiento pasivo; Predicción temprana; Pruebas geoquímicas in situ; Codisposición residuos mineros masivos; Factores microbiológicos; Capacitación, entre otros. Como parte de los desafíos del programa, se están creando comités público privados estratégicos y técnicos - científicos, bajo la gestión de

Fundación Chile, para construir capacidades (predicción, prevención, control y tratamiento), generar herramientas y aportar significativamente al conocimiento de drenaje ácido y a aumentar la transferencia de información y tecnología. El programa DAZA es el representante en Chile de la red SANAP - South American Network for Acid Prevention, y está trabajando activamente en la formalización e incorporación de otros países de sudamérica a esta red. La red SANAP forma parte de INAP - International Network for Acid Prevention.

El desarrollo de este documento forma parte del Programa DAZA con el fin de hacer un aporte a nivel nacional, del estado actual en que se encuentran las técnicas de predicción, prevención y control del DAR, y al desarrollo de nuevas técnicas o a la adaptación o mejoramiento de técnicas ya utilizadas a nivel mundial al caso de Chile.

1.9 GARD Guide, Global Acid Rock Drainage

El GARD Guide, es un trabajo completo y extenso, que fue elaborado por expertos de varios países y tiene como objetivo ser una referencia mundial para la prevención del drenaje ácido y para identificar las mejores prácticas en el campo del drenaje ácido. Para conocer el GARD Guide en su versión completa, visitar la siguiente dirección electrónica: www.gardguide.com.

1.10 Objetivos

1.10.1 Objetivo General

Analizar la situación actual en Chile en términos de las prácticas de predicción, prevención y control del Drenaje Ácido de Rocas y entregar recomendaciones.

1.10.2 Objetivos Específicos

1. Analizar las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido en Chile que realizan las empresas, a través de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA).
2. Analizar la percepción de las autoridades en relación a las prácticas de predicción, prevención y control del Drenaje Ácido de Rocas en Chile, presentadas por las empresas mineras en los EIA, y la capacidad técnica nacional para evaluar la generación del drenaje ácido.
3. Hacer una comparación entre las prácticas de gestión de las aguas ácidas a nivel nacional e internacional.

II. METODOLOGÍA

2.1 Análisis de las prácticas de predicción, prevención y control de drenaje ácido en Estudios de Impacto Ambiental analizados.

Para el estudio de las prácticas de gestión de aguas ácidas por las empresas mineras se realizó el análisis de 37 EIA recopilados, todos presentados a la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) o Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA), correspondiente, entre el año 2000 y noviembre del año 2009. Los EIA analizados fueron recopilados de las Regiones I, II, III, IV, V y RM. Cabe destacar que la primera I Región de Tarapacá incluye la que actualmente es la XV Región de Arica y Parinacota.

Algunos estudios fueron descargados desde la página web del sistema de evaluación de impacto ambiental www.e-seia.cl, otros fueron solicitados personalmente en la biblioteca de la CONAMA y otros enviados desde regiones. Estos EIA recopilados se analizaron en cuanto a:

- Especificaciones de modelos de predicción,
- Medidas de predicción por tipo de fuente (rajo, depósito de estériles, rípios, relaves) y por fase de operación (operación y cierre), y
- Medidas de control por fase de operación y por tipo de fuentes.

Para el análisis de los EIA se confeccionó las fichas indicadas en el Anexo 1,

donde se muestran, además, algunos de los resultados más representativos de los EIA estudiados. El Anexo 1 se divide en dos fichas, la primera ficha permite identificar la información relacionada con el drenaje ácido que entregan las empresas mineras a la CONAMA, mientras que la segunda ficha permite identificar los ensayos realizados según el tipo de residuo muestreado.

2.2 Análisis de la percepción de las autoridades en relación a las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido, y de la capacidad técnica nacional para evaluar la generación del drenaje ácido

Para el análisis de la percepción de las autoridades se envió una encuesta electrónica (Anexo 2) con invitaciones a participar a las siguientes organizaciones del Estado con competencia ambiental:

- Corporación Chilena del Cobre (COCHILCO).
- Dirección General de Aguas (DGA).
- Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).
- Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).
- Ministerio de Salud (MINSAL).
- Ministerio Minería.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

La encuesta consta de tres fichas: I. Prácticas actualmente en uso, II.

Requerimientos y III. Recomendaciones.

La primera ficha se enfoca en determinar la frecuencia con la que el Organismo del Estado encuentra información en los EIA sobre técnicas de predicción y medidas de prevención y control de DAR y seguimiento. La frecuencia se clasifica como Muy frecuente, Medianamente frecuente, Poco frecuente, Nunca y No sabe.

La segunda ficha se enfoca en identificar cuáles son las técnicas de predicción, y medidas de prevención y control de drenaje ácido que deberían presentarse como estándar en los EIA.

Por último, la tercera ficha se enfoca en las áreas que deberían ser reforzadas para afrontar el problema de la generación de drenaje ácido. Las áreas corresponden a Capacitación y Difusión, Investigación, Regulación y Desarrollo Tecnológico. Dentro de cada una de las áreas se proponen diferentes medidas, las cuales son clasificadas, para este caso, en diferentes órdenes de prioridad en Primera prioridad, Segunda prioridad, No prioritario, Innecesario y No sabe.

Además de la encuesta enviada se realizó un Workshop o taller entre Fundación Chile y los servicios públicos el 22 de Diciembre de 2009, con el objetivo de proveer un espacio para una discusión abierta sobre brechas relacionadas con la gestión de drenaje ácido a nivel nacional.

Se determinó realizar el análisis desde el punto de vista de la importancia de realizar la técnica o medida de predicción, prevención y control. Para esto se realizó una suma ponderada con la cual se determina cuál es la técnica o medida más necesaria de realizar o implementar.

Adicionalmente, y con el objetivo de complementar el análisis de las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido, se realizó el mismo procedimiento con las compañías mineras, es decir, se envió una encuesta para

conocer las opiniones del sector privado con respecto a la capacidad tanto técnica como normativa para abordar la problemática ambiental generada por el drenaje ácido. La encuesta (Anexo 3) consta de dos secciones: I. Prácticas actualmente en uso y II. Requerimientos.

La primera sección se enfoca en determinar, desde el punto de vista de las compañías mineras, la frecuencia con la que estas presentan información en los EIA relacionada con las técnicas de predicción y medidas de prevención y control de DAR.

La frecuencia se clasifica como Muy frecuente, Medianamente frecuente, Poco frecuente, Nunca y No sabe.

La segunda sección se enfoca en las áreas que deberían ser reforzadas para afrontar el problema de la generación de drenaje ácido. Las áreas corresponden a Capacitación y Difusión, Investigación, Regulación y Desarrollo Tecnológico. Dentro de cada una de las áreas se proponen diferentes medidas, las cuales son clasificadas, para este caso, en diferentes órdenes de prioridad en Primera prioridad, Segunda prioridad, No prioritario, Innecesario y No sabe.

Las encuestas fueron enviadas a 21 compañías mineras:

- Minera Candelaria
- Freeport Macmoran (FMI)
- Goldcorp
- Minera Las Cenizas
- Antofagasta Minerals
- Collahuasi
- Bhp Billiton
- Cerro dominador
- CMDA
- Minerasep
- Pucobre
- Compañía Minera Dayton
- Mantos de Oro - Kinross
- Coeursa

- Barrick
- Xstrata Copper
- Codelco
- Compañía Minera Teck Carmen de Andacollo
- Yamana Gold
- Minera Nueva Pudahuel
- SQM

Además de la encuesta enviada se realizó un Workshop el 22 de Abril de 2010 entre Fundación Chile, los servicios públicos y las compañías mineras (sector privados), con el objetivo de proveer un espacio para una discusión abierta sobre las deficiencias que existen en la gestión de drenaje ácido a nivel nacional, tanto técnica como tecnológica.

Para reforzar el estudio y aportar a los resultados, se realizaron análisis de laboratorio con muestras de relaves y sulfuros de baja Ley provenientes de instalaciones mineras. Todas estas muestras fueron previamente sometidas a un programa completo de caracterización de potencial de drenaje ácido y de movilidad de metales. La metodología de los análisis se adjunta en el Anexo 4.

2.3 Comparación entre las prácticas de gestión del drenaje ácido a nivel nacional e internacional.

La comparación entre lo realizado a nivel nacional e internacional se realizó con la información obtenida anteriormente y lo realizado en el extranjero relacionado con la generación de drenaje ácido de rocas.

III. RESULTADOS

3.1 Análisis de las prácticas de predicción, prevención y control de drenaje ácido en Estudios de Impacto Ambiental analizados.

De las 37 fichas estudiadas se extrajo información del porcentaje de las técnicas de predicción, prevención y control que las empresas mineras realizan en sus instalaciones, las cuales se muestran en la Figura 2.

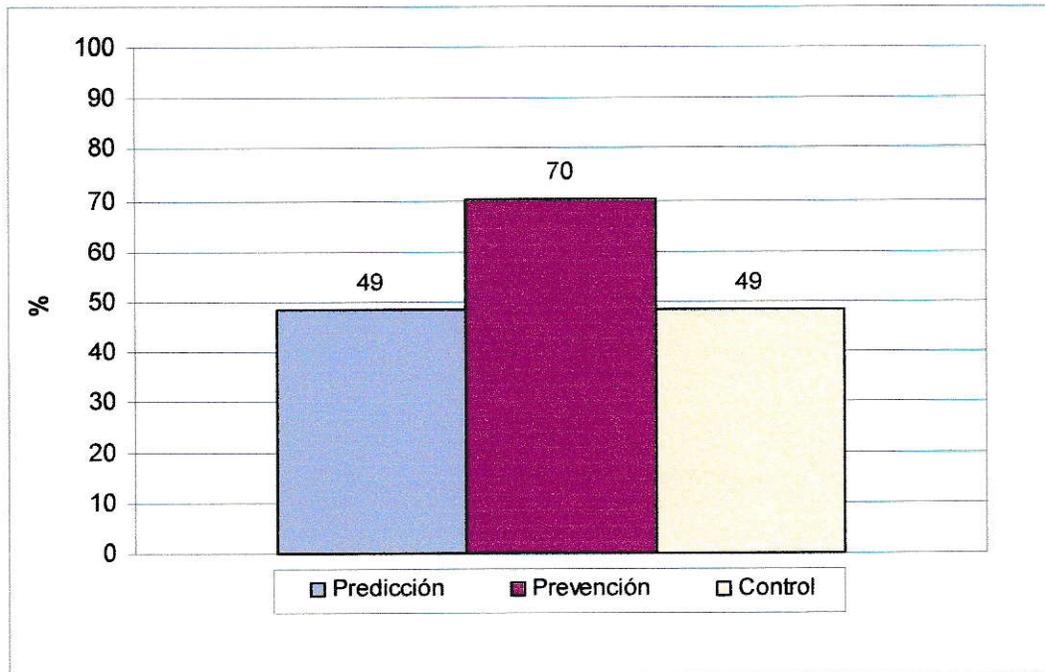


Figura 2: Porcentaje de técnicas de predicción, prevención y control del DAR

Fuente: Fundación Chile.

Con respecto a las técnicas de predicción, en la Figura 3 se indica el porcentaje de las técnicas de predicción realizadas por las empresas mineras, que informan a la CONAMA.

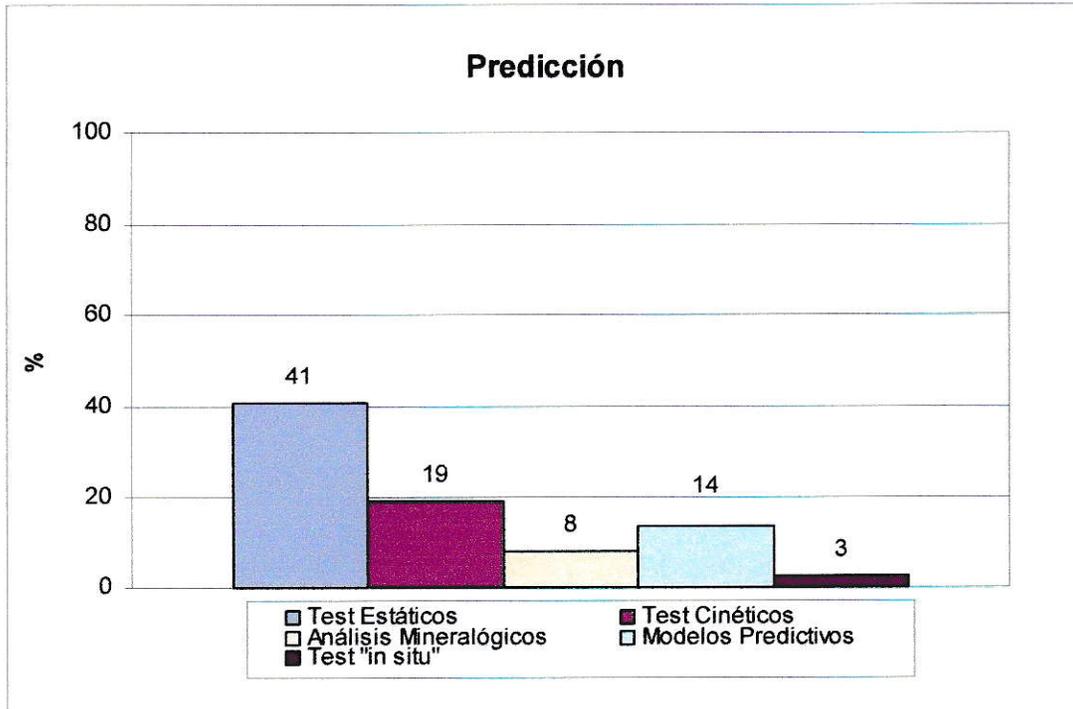


Figura 3: Porcentaje de técnicas de predicción de DAR más utilizadas

Fuente: Fundación Chile.

Se analizó también las técnicas de prevención. En la Figura 4 se representan los porcentajes de las medidas de prevención más ejecutadas por las empresas mineras.

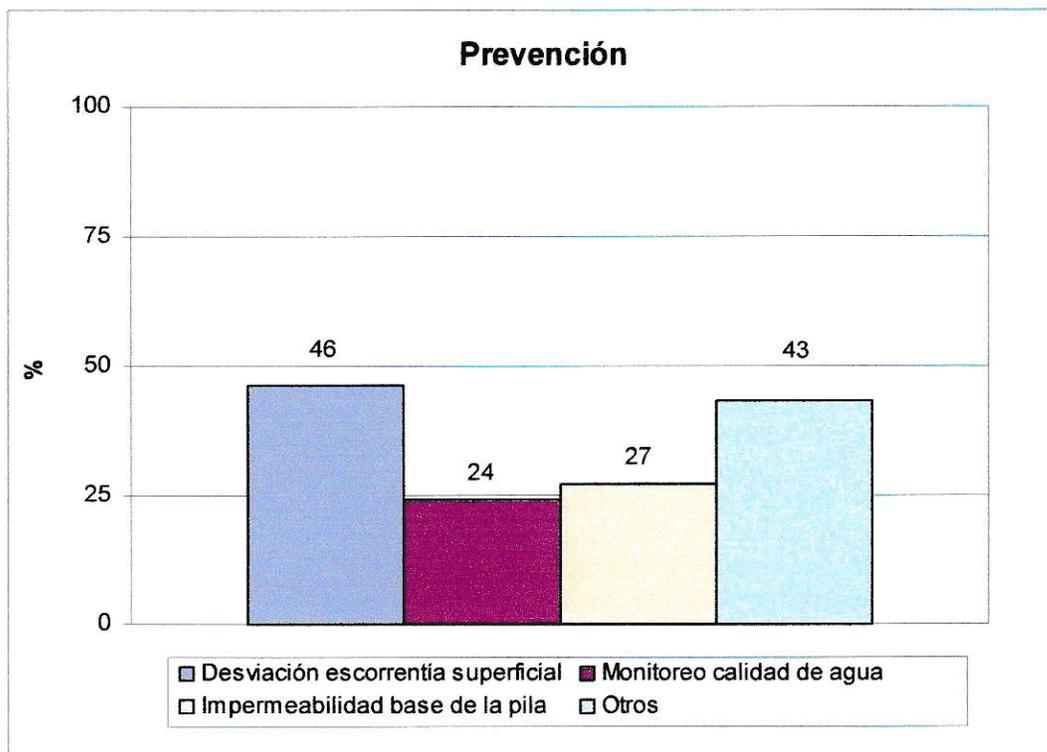


Figura 4: Porcentaje de medidas de prevención de DAR más utilizadas

Fuente: Fundación Chile.

Con respecto a las medidas de control, en la Figura 5 se representan los porcentajes de las medidas de control más ejecutadas por las empresas mineras.

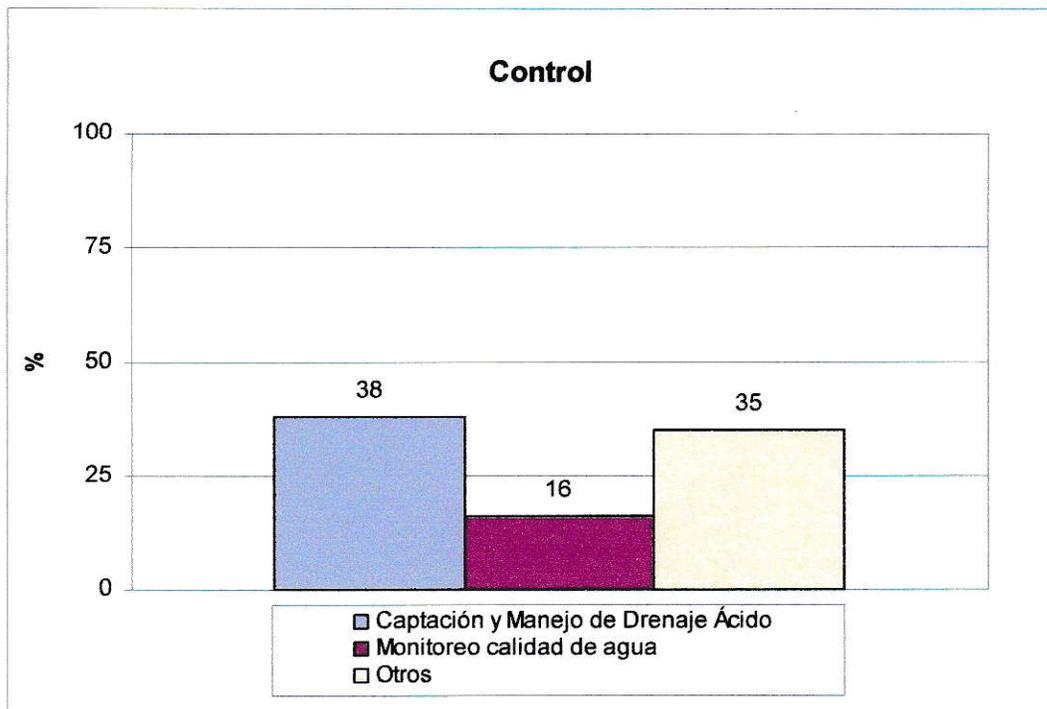


Figura 5: Porcentaje de medidas de control de DAR más utilizadas

Fuente: Fundación Chile.

3.2 Análisis de la percepción de las autoridades en relación a las prácticas de predicción, prevención y control del drenaje ácido, y de la capacidad técnica nacional para evaluar la generación del drenaje ácido

De las 8 encuestas enviadas al Sector Público el 100 % fueron contestadas. La Figura 6 presenta los resultados de las técnicas de predicción, mientras que las Figuras 7 y 8, presentan los resultados de las medidas de prevención y control, respectivamente.

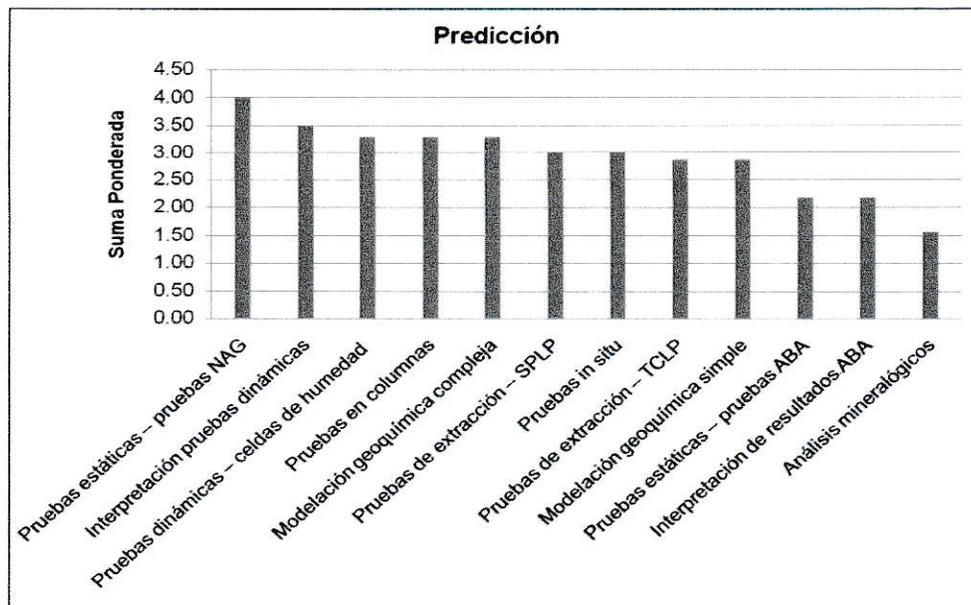


Figura 6: Técnicas de Predicción más Necesarias según Servicio Públicos

Fuente: Fundación Chile.

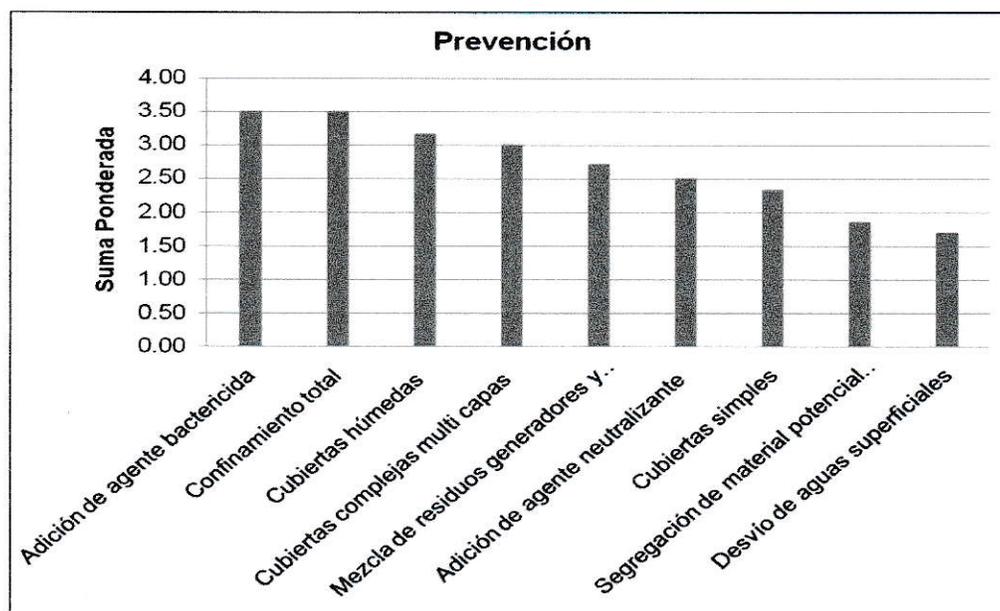


Figura 7: Medidas de Prevención más Necesarias según Servicio Públicos

Fuente: Fundación Chile.

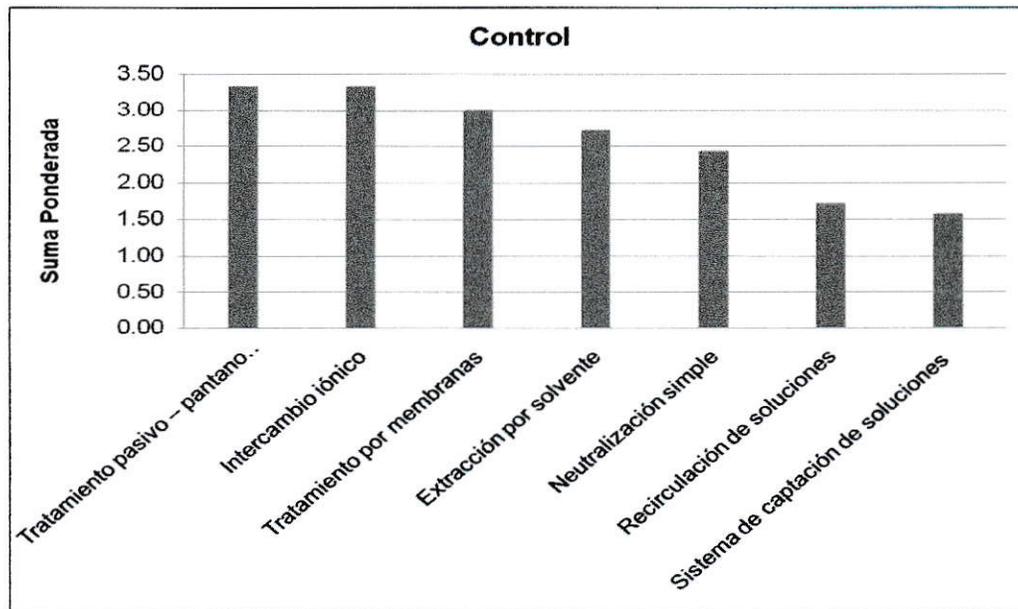


Figura 8: Medidas de Control más Necesarias según Servicio Públicos

Fuente: Fundación Chile.

Por otro lado, de las 21 encuestas enviadas a las empresas mineras ocho fueron contestadas. La Figura 9 presenta lo relacionado con las técnicas de predicción, mientras que las Figuras 10 y 11, presentan los resultados de las medidas de prevención y control, respectivamente.

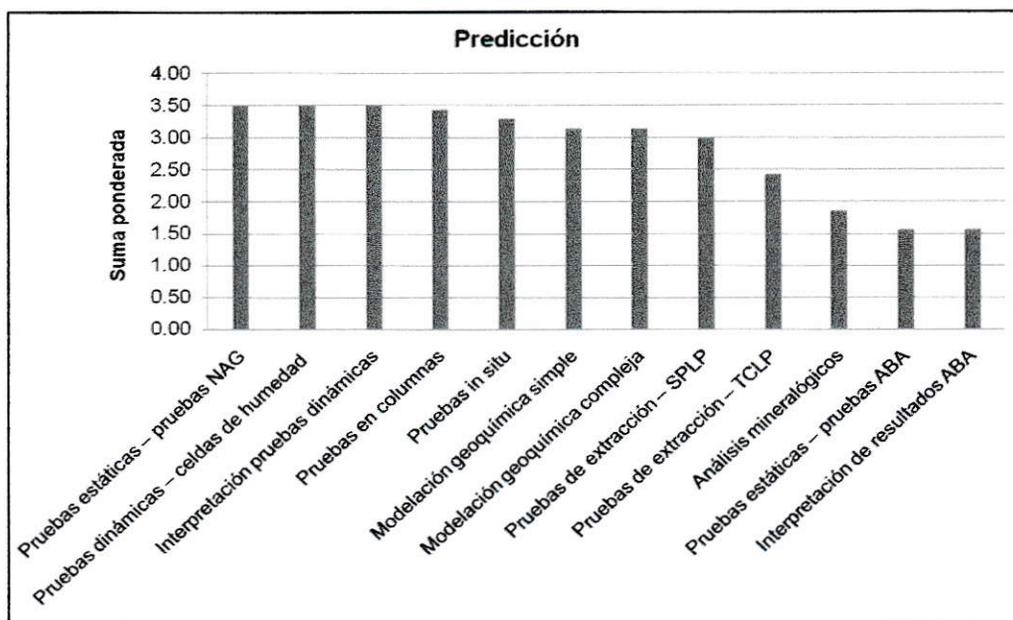


Figura 9: Técnicas de Predicción más utilizadas según Sector Privados

Fuente: Fundación Chile.

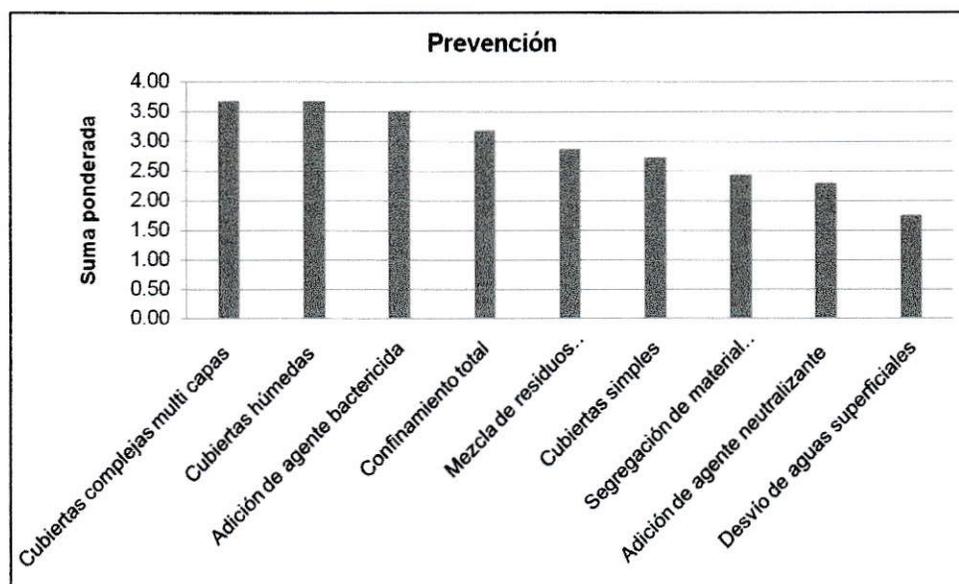


Figura 10: Medidas de Prevención más utilizadas según Sector Privados

Fuente: Fundación Chile.

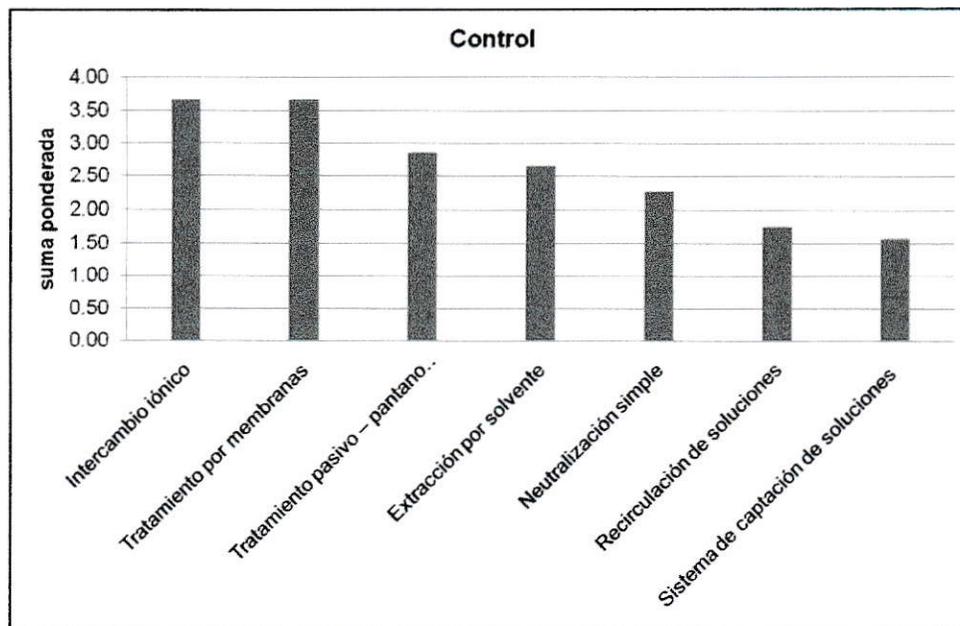


Figura 11: Medidas de Control más utilizadas según Sector Privados

Fuente: Fundación Chile.

Con respecto a los análisis de laboratorio de muestras de relaves y sulfuros de baja Ley, en la Tabla 4 se presenta la clasificación por material y sector muestreado de cada una de las muestras y los resultados obtenidos del Test Estático ABA.

Tabla 4: Clasificación de las muestras y principales resultados del Test ABA

Muestra	Material	Resultados ABA			
		pH	PN	PA	PNN
		Kg CaCO ₃ / t			
PA-1	Relave	5,86	2,0	27,5	-25,5
SBL	Sulfuro de baja Ley	8,32	13,0	171,3	-158,3

A las muestras se realizó el ensayo BC Research, el cual consiste en la titulación directa con ácido sulfúrico de la muestra, desde un pH natural, hasta un punto

de viraje de pH 3,5. El objetivo es determinar el equilibrio entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina.

En las Figuras de la 12 a 15, se muestran las curvas de titulación de las muestra de la Tabla 4.

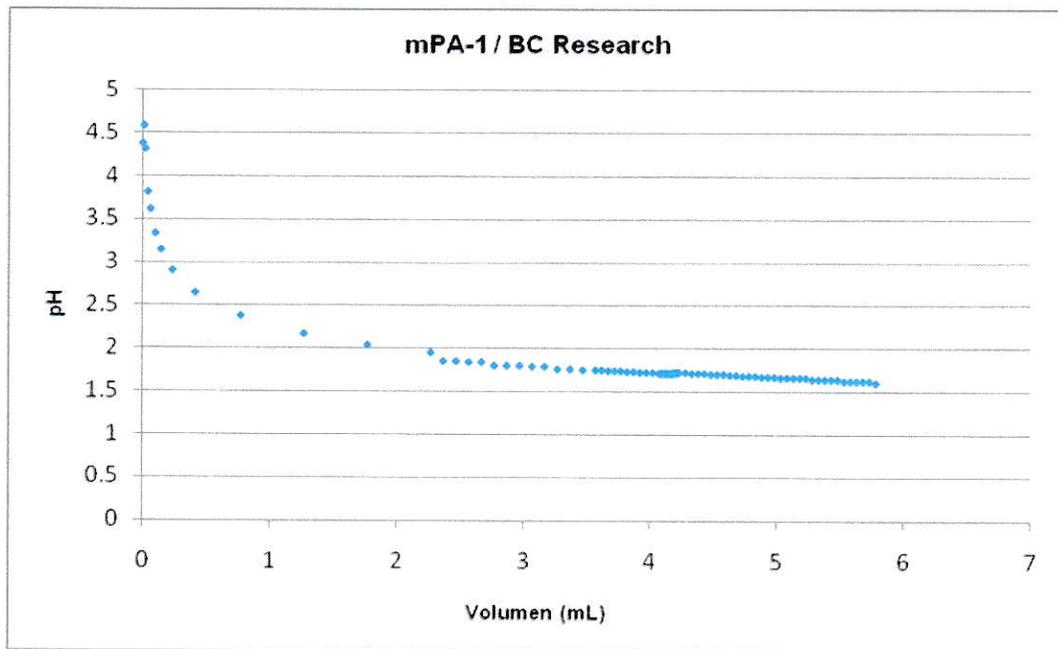


Figura 12: Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - muestra PA-1

Fuente: Fundación Chile.

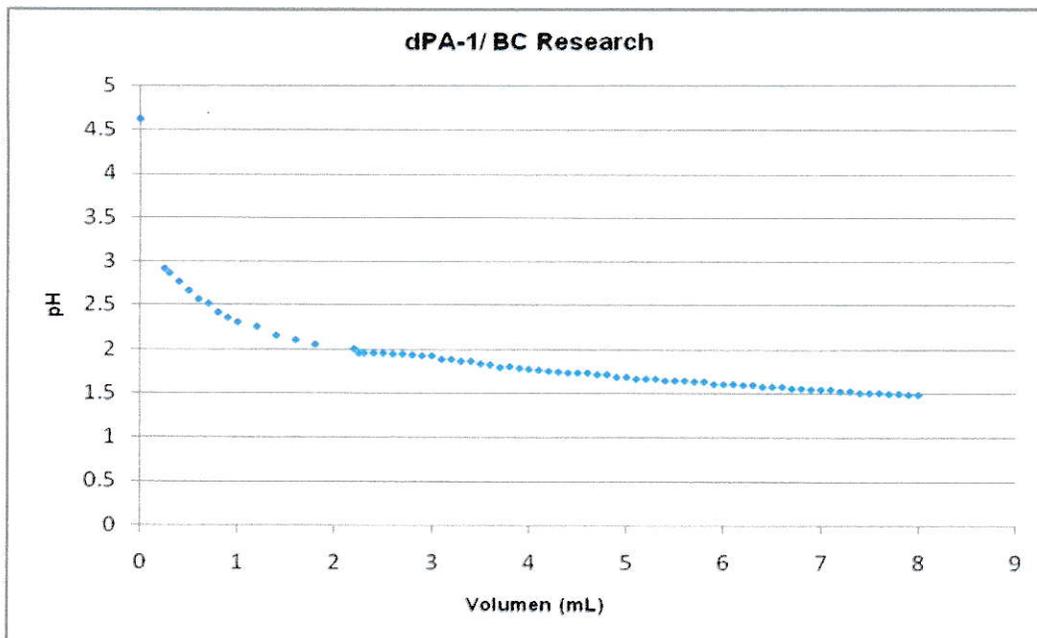


Figura 13: Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - duplicado PA-1

Fuente: Fundación Chile.

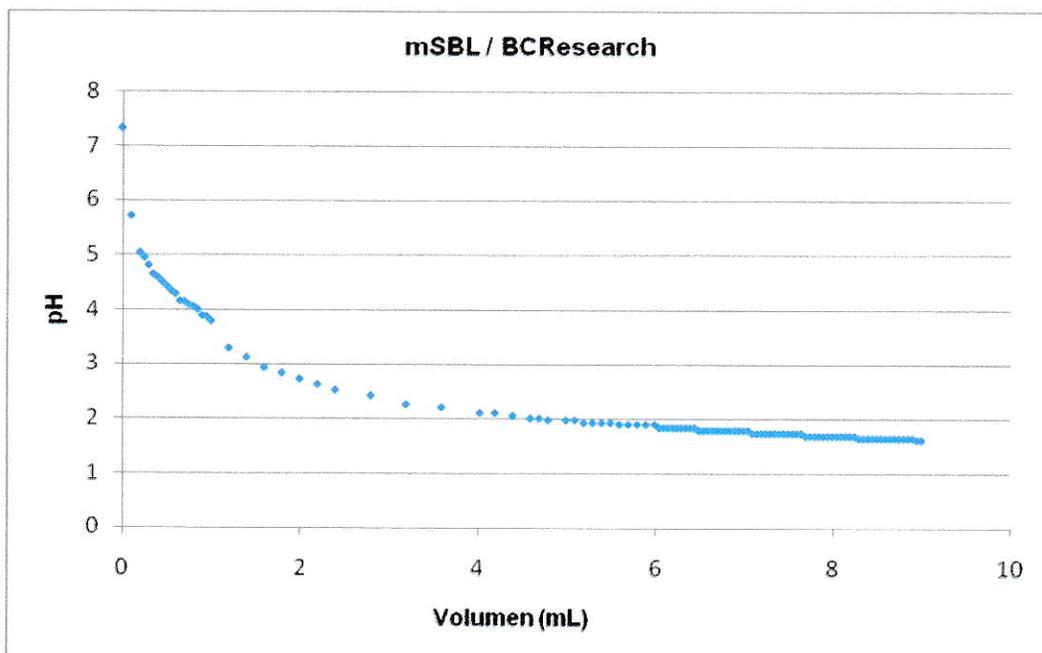


Figura 14: Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - muestra SBL

Fuente: Fundación Chile.

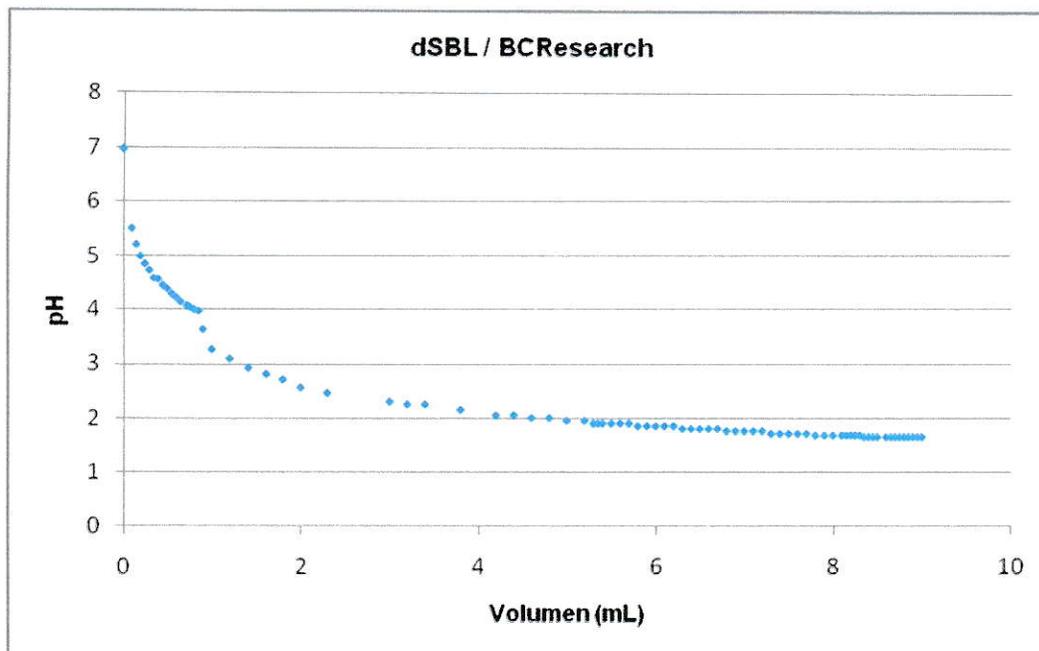


Figura 15: Variación de pH vs. Volumen de ácido agregado - duplicado SBL

Fuente: Fundación Chile.

3.3 Comparación entre las prácticas de gestión del drenaje ácido a nivel nacional e internacional.

Chile presenta complejidades climáticas para afrontar la prevención del drenaje ácido. La mayoría de las faenas mineras en Chile se encuentran en el sector norte del país, caracterizado por un clima desértico. Internacionalmente, la gestión de la prevención del drenaje ácido está enfocada a evitar el contacto de la roca oxidada con aguas naturales, para esto generalmente se utilizan tipos de cubiertas, muchas veces cubiertas vegetales, que protegen la roca oxidada del contacto con el agua. La complicación es que las cubiertas han sido diseñadas para climas húmedos. En Chile no se conocen casos de revegetación de residuos mineros, esto porque la cubierta vegetal no resistiría mucho tiempo y sucumbiría por los efectos de las altas

temperaturas y la baja humedad, ya que en estas zonas las tasas de evaporación superan a las tasas de precipitación.

Resultado de la investigación de sistemas de prevención de drenaje ácido aplicables a Chile, se encontró que existe una solución interesante (aún en proceso de desarrollo) que consiste en utilizar los efectos de la barrera capilar para controlar la infiltración del agua en la superficie de los sitios de disposición de residuos. Dichos sistemas diseñados atraen actualmente un considerable interés por representar una alternativa ventajosa frente a las coberturas más tradicionales basadas en materiales con una baja conductividad hidráulica saturada (Morris y Stormont 1997; Ward y Gee 1997; Dwyer 2001; Zhan y cal. 2001; Scanlon y cal. 2005). Las ventajas principales de una cobertura con barrera capilar radican en su relativa simplicidad, estabilidad a largo plazo y sus costos de construcción potencialmente más bajos en comparación con las coberturas más tradicionales basadas en materiales (suelos naturales y/o geosintéticos) con una baja conductividad hidráulica saturada. Las coberturas de Almacenamiento y Descarga (Store-Release - SR) o las coberturas de Almacenamiento, Derivación y Descarga (Store-Divert-Release SDR; que corresponde a una cobertura SR colocada en una superficie inclinada) pueden resultar muy convenientes para minimizar la infiltración de las precipitaciones en los residuos y para controlar la lixiviación potencial de los contaminantes provenientes de los residuos en condiciones áridas y semiáridas (e.g., Williams y cal. 1997; Zornberg y Caldwell 1998; Benson y cal. 2001; Fourrie y Moonsammy 2002).

Una cobertura SDR clásica comprende una capa de suelo de grano fino colocada sobre un material más grueso. El material grueso de la base puede estar conformado por los residuos de la mina, si es que el contraste hidráulico entre este material y el suelo de grano fino es lo suficientemente acentuado (Zhan y cal. 2001);

también se pueden agregar más capas para que la cobertura sea más efectiva.

En el caso de una cobertura construida en un área plana, el efecto de la barrera capilar en la interfaz entre los materiales finos y gruesos permite que la capa de suelo más fino almacene el agua de ingreso, la cual puede ser descargada posteriormente por evaporación. En las áreas con declive, la cobertura con barrera capilar funciona también como un sistema de desviación de agua lateral. El objetivo de la cobertura es tener suficiente escorrentía, evapotranspiración, almacenamiento y filtración lateral (en el caso de las coberturas inclinadas) para evitar la infiltración de agua en los residuos de la mina.

Con respecto a la cobertura SR, cuando se aplica precipitación sobre una cobertura SR que utiliza los efectos de la barrera capilar (inicialmente seca), el agua se acumula en el material de grano fino hasta que la presión en la interfaz alcance el valor de la entrada del agua del material de grano grueso. Posteriormente el agua almacenada en la capa de grano fino es descargada de regreso a la atmósfera mediante evapotranspiración. Las características esenciales de una cobertura de acumulación y descarga son:

- Evita las zonas bajas en la superficie de los desechos reactivos en donde la infiltración a través de la cobertura podría estancarse y producir un derrame contaminante.
- Una capa hermética en la base de la cobertura, de arcilla compactada y humedecida, de 0,5 metros de espesor, para limitar la filtración en caso de rotura en la cobertura de acumulación y descarga que la recubre.
- Una capa de terreno rocoso, con un mínimo de 1,5 metros de grosor

(dependiendo de los patrones de lluvia y de la naturaleza física de los materiales) para acumular y descargar el exceso de lluvia mediante la evapotranspiración.

- Se remueven y se presionan ligeramente con una excavadora los montículos de tierra descargados para desbaratar los conductos potenciales para el agua, mientras se mantienen las zonas de estancamiento para que quede distribuida el agua superficial.
- Inicialmente se recubre con mantillo, se fertiliza y se siembra con arbustos y árboles autóctonos; posteriormente a los 12 meses se re-fertiliza y se siembran hierbas para establecer una cubierta vegetal diversa y sostenible que ayude a descargar agua y a mejorar la estética.

En la Figura 16 se presenta un esquema simple del sistema de cobertura de almacenamiento y descarga.

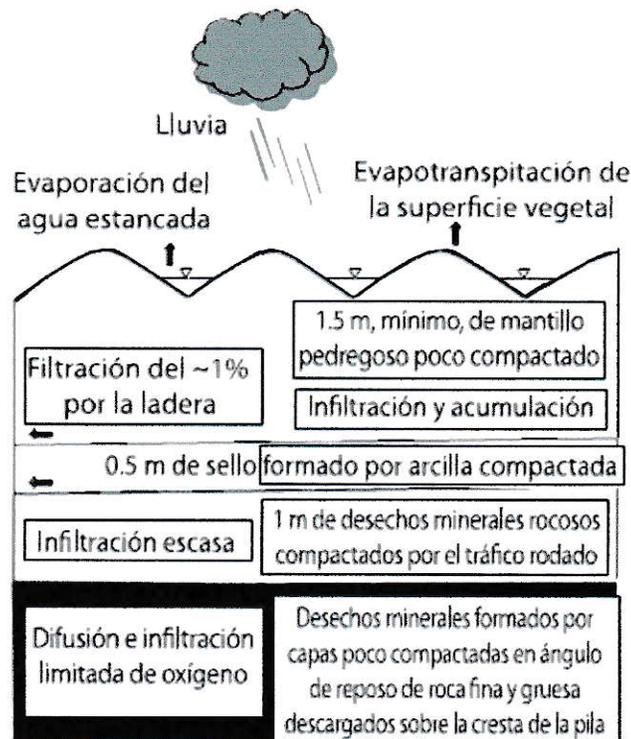


Figura 16: Esquema de una Cobertura de Almacenamiento y Descarga

Fuente: Fundación Chile.

Los principales parámetros que controlan el desempeño de las coberturas SR son las propiedades no saturadas de los materiales (la curva de retención de agua y la función de permeabilidad), el espesor de las capas, las condiciones climáticas (especialmente los eventos de precipitación extrema) y la inclinación de la cobertura.

Una barrera capilar con pendiente (cobertura SDR) aprovecha las propiedades no saturadas de los suelos para favorecer el drenaje lateral durante los periodos lluviosos, un proceso que complementa la función de evaporación asociada con el flujo de agua ascendente durante los periodos secos. Las coberturas SDR han demostrado que funcionan bien como un medio para desviar el agua en climas relativamente secos (Ross 1990; Stormont, 1996; Zhan et al. 2001). A continuación se presenta una

metodología para el diseño de un sistema de cobertura eficiente:

1. Caracterización de los materiales de la cobertura.
2. Recolección de información climática y acerca de la vegetación.
3. Evaluación preliminar de las capas de la cobertura.
4. Modelamiento numérico del flujo no saturado.
5. Modelamiento físico.
6. Diseño final.
7. Construcción y monitoreo a largo plazo.

Se debe ampliar la información sobre las diferentes estrategias de monitoreo a fin de evaluar la capacidad de las coberturas para inhibir la producción de drenaje ácido antes de su construcción. En esta etapa es importante elegir los parámetros apropiados que serán monitoreados y, por consiguiente, el tipo de instrumentos que se instalará en las coberturas. Los principales parámetros que se monitorearán son: succión matricial, contenido volumétrico de agua, flujo de oxígeno, parámetros meteorológicos y flujo y calidad de agua.

Existen diferentes instrumentos para cada uno de los parámetros indicados anteriormente. En la Tabla 5 se presenta un resumen de los instrumentos para el monitoreo de los parámetros, sus ventajas y desventajas.

Tabla 5: Instrumentación para el monitoreo de parámetros a controlar para la efectividad de la cobertura

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
Medición de la succión	Tensiómetro	Mediciones directas, el radio de la medición se puede extender hasta 10 cm, lectura continua posible, no se requiere ninguna fuente de energía, la salinidad del suelo no lo afecta, costo relativamente bajo.	Rango limitado de medición (menos de 100 kPa), respuesta relativa lenta debido al equilibrio de tiempo entre la cubeta y el suelo, se necesita un buen grado de contacto entre el dispositivo y el suelo, requiere mantenimiento frecuente en climas cálidos y secos, debe estar protegido contra los ciclos de congelación-descongelación (lleno de alcohol antes del invierno).
	Bloques de Yeso	El radio de medición se extiende hasta 10 cm, no se requiere	Tiene un uso limitado en la investigación de campo debido a

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
		mantenimiento, es sencillo y no es costoso.	su débil resolución, no se recomienda en suelos saturados (de 0 a 30 kPa), el tiempo afecta las propiedades del bloque de yeso, poco equilibrio con el suelo, no se recomienda para suelos arenosos debido a que el agua drena muy rápido y no se puede equilibrar el instrumento, no es apropiado para suelos hinchados, el efecto de histéresis y las variaciones de temperatura afectan al bloque de yeso.
	Sensor de Matriz Granular o Bloques Watermark	Se solucionan los problemas del bloque de yeso, el radio de	Tiempo de reacción largo, no se adapta para mediciones

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
		<p>medición se extiende hasta 10 cm, no se requiere mantenimiento, es sencillo y no es costoso.</p>	<p>precisas en suelos arenosos debido que estos tienen un drenaje rápido, no se adapta a suelos arcillosos, se necesita reinstalar la sonda cuando el suelo se vuelve muy seco, la salinidad del suelo lo afecta.</p>
	Sensor de Disipación de Calor	<p>El rango de medición se encuentra entre 10 y 1,000 kPa, no requiere mantenimiento, radio de medición hasta de 10 cm, posibilidad de registro de las mediciones, la salinidad del suelo no lo afecta.</p>	<p>Se necesita un controlador sofisticado para controlar las operaciones de calentamiento y para las mediciones, tiempo de reacción largo (algunas horas para una succión entre 10 y 50 kPa y hasta alrededor de 1 semana para una succión de 500 kPa, no se recomienda para</p>

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
			suelos arenosos, consumo significativo de energía en caso de mediciones frecuentes.
	Sicrómetro de Suelo	Alta precisión (excepto en rangos próximos a la saturación del suelo), se adapta a condiciones de baja humedad.	No se recomienda para profundidades de suelo bajas, radio pequeño de medición, el tiempo para alcanzar el equilibrio es de alrededor de una hora, no es apropiado para succiones cercanas a la saturación, se necesita equipo especializado para la energización y lectura de la sonda.
	Potenciómetro WP4	Mediciones rápidas y fáciles, amplio rango de medición hasta	Medición destructiva (se necesita una nueva muestra

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
		40 MPa, requiere bajo volumen de muestreo (15 a 7 ml)	para cada medición), es necesario adquirir una cubeta para muestras, la precisión es de aproximadamente 100 kPa.
	Equitensiómetro EQ2	Rango de medición entre 0 y 1,500 kPa, mantenimiento gratis, posibilidad de registro de datos, se puede dejar instalado en suelos congelados, calibración estable por un periodo de dos años.	Una precisión de aproximadamente 10 kPa para mediciones entre 0 y 100 kPa, se requiere la calibración por parte del fabricante, no se adapta bien en suelos salinos, no es muy adecuado para suelos salinos.
	Interruptores Electro-ópticos	Bajo precio, estabilidad física, confiabilidad, mediciones rápidas, registro automático.	Dispositivo no fabricado, no existe información sobre mediciones de precisión, tecnología nueva no probada

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
			exhaustivamente.
Medición del Contenido Volumétrico de Agua	Métodos Gravimétricos	Mediciones con buena precisión, la salinidad y la naturaleza del suelo no lo afectan, fácil de realizar.	Prueba destructiva, toma mucho tiempo, no es posible registrar las mediciones, se requiere la medición de la densidad del suelo.
	Métodos Radioactivos - Sonda de Neutrones	Precisión de alrededor de 0,005 (cm^3/cm^3), método bastante conocido.	Riesgos relacionados con la seguridad (ya que implica el uso de radioactividad), se requiere personal calificado, se necesita calibración para suelos específicos, es un instrumento pesado y voluminoso, tiempo de medición largo, baja precisión en mediciones próximas a la superficie del suelo (debido a las

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
			interacciones con la atmósfera), lecturas manuales, adquisición costosa, requiere calibración debido a la desintegración de la fuente radioactiva con el paso del tiempo, se necesita capacitación especializada y autorización del gobierno para el transporte, posesión y uso de la fuente radioactiva.
	Métodos Radioactivos -Rayos Gama	Buena resolución espacial, precisión de aproximadamente 0,01, permite mediciones a diversas profundidades, posibilidad de registro de datos.	Riesgos de radiación, se requiere personal calificado, instalación compleja (dos tubos) se necesita un haz fino, el cual se obtiene por colimación, se requiere calibración, la

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
			adquisición es costosa, las variaciones de la densidad del suelo lo afectan, errores de medición cuando se utiliza en suelos estratificados.
	Métodos Dieléctricos - Reflectómetro de Dominio Temporal (RDT)	Precisión entre 0,01 y 0,025, no se requiere calibración específica para cada suelo, las mediciones en diversos lugares se facilitan por medio de un múltiple, amplia variedad de configuraciones de sonda, alteración mínima del suelo, no muy sensible con niveles normales de salinidad, puede proporcionar mediciones	Uso limitado en suelos con alta salinidad, en suelos arcillosos altamente conductivos y en material sulfuroso, se requiere calibración para algunos suelos, el área de medición está limitada a un radio de 3 cm alrededor de la longitud de las guías de onda metálicas de las sondas.

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
		simultáneas de conductividad eléctrica del suelo, ha sido utilizado en el monitoreo de coberturas.	
	Métodos Dieléctricos - Dominio de Frecuencia: (DF): Capacitancia y Reflectometría en el Dominio de Frecuencia	Precisión de aproximadamente 0,01 después de la calibración, posibilidad de mediciones en suelos con alta salinidad, mejor resolución que las sondas RDT, posibilidad de conexión con registradores convencionales, flexibilidad en el diseño de las sondas (mayor que el RDT), no es muy caro en comparación con el RDT.	Ámbito pequeño de influencia (aproximadamente 4 cm), sensibilidad a la temperatura, densidad, composición arcillosa y a la retención de aire, requiere calibración.
	Métodos Dieléctricos -	Precisión de aproximadamente	Se recomienda calibrarlo para

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
	Reflectometría en el Dominio de Amplitud (RDA): Impedancia	0,05 (cm^3/cm^3), puede alcanzar 0,01 (cm^3/cm^3) con calibración, posibilidad de mediciones en suelo con mucha salinidad, mínima alteración del suelo, posibilidad de registro de datos, bajo costo, la temperatura no lo afecta, evaluación in situ de la densidad del suelo.	obtener mediciones fiables y ámbito pequeño de influencia.
	Métodos Dieléctricos - Transmisión de Fase (Sonda Virrib)	Precisión en las mediciones de aproximadamente 0,01 (cm^3/cm^3), volumen significativo de mediciones de suelo 15-20 litros, posibilidad de registro de datos, bajo costo.	Alteración significativa del suelo, se requiere calibración para obtener mediciones confiables, sensible a la salinidad.
	Métodos Dieléctricos -	Precisión que oscila entre 0,01 y	Poca precisión, alteración

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
	Transmisión en el Dominio Temporal	0,02 (cm ³ /cm ³), medición del volumen del suelo comprendida entre 0,8 y 6,1, posibilidad de registro de datos, costo relativamente bajo.	significativa del suelo durante la instalación en el campo debido a la configuración de la sonda.
	Métodos Geofísicos de Campo a Gran Escala - Radar de Penetración de Suelo: radar de penetración de suelo, inducción electromagnética, radiometría y radiaciones de microondas	No son destructivas y pueden medir el contenido volumétrico de agua en superficies relativamente grandes (no son métodos con precisión milimétrica).	Estas técnicas requieren medios importantes (avión, radar, etc.), lo que resulta en interpretaciones que suelen ser complejas; estas técnicas no han sido validadas en coberturas de capas múltiples y requieren recursos humanos calificados. En consecuencia, el uso de estos métodos (sin los enfoques tradicionales, tales

Parámetro	Instrumento de Monitoreo	Ventajas	Desventajas
			como la sonda de neutrones y los métodos RDT) no es recomendable.
Parámetros Meteorológicos	Estaciones Meteorológicas	No se indica	No se indica
Tasa de Filtración y Calidad de Agua	Lisímetros de Succión	No se indica	No se indica
	Lisímetros de Filtración	No se indica	No se indica
Flujo de oxígeno	Pruebas Modificadas de Consumo de Oxígeno	No se indica	No se indica
	Método de la Gradiente de Oxígeno	No se indica	No se indica

Uno de los aspectos más importantes, antes de la instalación de la cubierta vegetal sobre los residuos mineros, es la investigación y elección de un adecuado tipo de planta. La efectividad de la cubierta depende del clima y del comportamiento de la evapotranspiración como forma de control de la lixiviación.

La distribución natural de las plantas se controla principalmente por el clima y, secundariamente, por los factores del suelo. Los factores limitantes que controlan la distribución de las plantas se acentúan en climas secos o fríos donde la variabilidad estacional de temperatura y humedad es más crítica, como ocurre en las zonas altoandinas del norte de Chile. Las condiciones climáticas no son controlables, pero sí la condición del suelo a utilizar, es por esto que antes de la instalación de las faenas mineras, debe retirarse las capas superficiales de suelo que tengan propiedades aptas para el desarrollo de vegetación a modo de utilizar este suelo para la revegetación de la superficie de los residuos mineros. Si bien no en todos los casos se cuenta con suelos fértiles, se puede mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo para ser utilizado en la revegetación.

Para realizar un proceso de revegetación de coberturas de residuos mineros es necesario mejorar en primer lugar las condiciones físicas del suelo: estabilidad, aireación, infiltración y retención de humedad, para lo cual es común el uso de materiales orgánicos de la zona como estiércol y compost. La adición de materia orgánica a los suelos incrementará la infiltración, el drenaje y la aireación y reducirá el efecto de encostramiento de la superficie de los suelos que es beneficiosa para establecer el contacto semilla-suelo para una apropiada germinación.

Se debe corregir la reacción del suelo, en el caso de que el suelo sea fuertemente ácido (pH menor de 5,5) mediante la aplicación de enmiendas calcáreas (caliza, dolomita) con la finalidad de favorecer el crecimiento de las plantas y de los

microorganismos los cuales necesitan de calcio; además también es importante para neutralizar algunos elementos potencialmente tóxicos que podrían ser absorbidos por las plantas en suelos ácidos y se podrían bioacumular en el follaje de los pastos con los riesgos potenciales que esto representa para la alimentación animal. Para determinar los requerimientos de encalado del suelo superficial a ser utilizado en programas de revegetación se debe tener en cuenta la textura, la cantidad de materia orgánica del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y el pH inicial del suelo.

En los materiales de la capa superficial deben analizarse los siguientes parámetros: pH, porcentaje de materia orgánica, conductividad eléctrica, tasa de adsorción de sodio (si se sospecha que existe el problema), análisis de tamaño de partículas, nitrógeno-nitrato, fósforo y potasio disponibles para la planta, además de los metales.

La mejor manera para restablecer una comunidad microbiana en el suelo es aplicar una capa superficial de suelo al sitio disturbado que contenga una población viable y diversa de microbios. Tierra fresca sacada justo antes de la siembra. Otras fuentes microbianas incluyen el estiércol o el compost que podrían ser aplicado para proporcionar un inóculo del cual se puede originar una población microbiana. También se podría utilizar el follaje de especies forestales como fuente de abono directo.

Por otro lado, es indispensable elegir un tipo de planta adecuada para el clima árido, para esto es vital conocer los factores que limitan el crecimiento de la planta. En la Tabla 6 se indican las consideraciones generales que limitan de manera frecuente el crecimiento de las plantas en los programas de revegetación de coberturas de relaves.

Tabla 6: Algunas Consideraciones para la Selección de Especies de Plantas

CONDICIONES	TIPO DE PLANTA
<p>Tipo de residuo</p> <p>Metales tóxicos en alta concentración.</p> <p>Acidez y alcalinidad extrema.</p> <p>Deficiencias de nutrientes.</p>	<p>Plantas tolerantes a los metales</p> <p>Por ejemplo Senecio en las zonas altoandinas.</p> <p>Colonizadores naturales de áreas mineralizadas.</p> <p>Leguminosas u otras plantas fijadoras de nitrógeno e.g., <i>Aliso tarhui</i></p>
<p>Clima</p> <p>Fríos extremos con un periodo de corto crecimiento.</p> <p>Condiciones áridas o semiáridas.</p> <p>Condiciones templadas.</p>	<p>Especies nativas o introducidas de rápido crecimiento (treboles, festucas).</p> <p>Especies nativas o introducidas de lento crecimiento.</p> <p>Especies agrícolas o forestales dependiendo del tipo de rehabilitación.</p>
<p>Uso del Suelo</p> <p>Para rápida estabilización y alta productividad.</p> <p>Para vida silvestre.</p> <p>Para espacios de recreación.</p>	<p>Especies agrícolas (avena forrajera).</p> <p>Variedades de especies nativas, que provean semilla, fruta, y espacios de protección y anidación.</p> <p>Especies resistentes a la intervención antropica.</p>

IV. DISCUSIÓN

Con respecto a los EIA analizados, en la Figura 2 se puede apreciar que en el 51 % de los casos analizados no se realizaron técnicas de predicción y control de drenaje ácido, y que en el 30 % no se implementaron medidas de prevención, esto es un alto porcentaje, lo que indica que existe una gran probabilidad de ocurrencia de eventos de contaminación por generación de drenaje ácido al momento del cierre de las faenas mineras.

Siguiendo la misma línea, se obtuvo que sólo el 62 % de las medidas de prevención implementadas fueron producto de los resultados de las técnicas de predicción. Esto indica que los resultados de las técnicas de predicción no son usados sistemáticamente para implementar medidas de prevención, tanto para la etapa de operación como de cierre. El 38 % restante de medidas implementadas no fueron precisamente para prevenir el drenaje ácido, sino que para prevenir el desgaste de la base de los taludes de los botaderos y así no se produzca un colapso de este, lo que también es una medida preventiva, pero enfocada desde el punto de vista estructural, no ambiental. Esto indica que hay poca conciencia o una bajo conocimiento sobre el tema.

Además, se observa que mientras más antiguos son los EIA, menos análisis se realizan, siendo que el origen de las técnicas de predicción tales como el ABA estándar datan del año 1978. Lo anterior indica, que en dicha época habían menores medidas de gestión del drenaje ácido en Chile y había un mayor desconocimiento por parte de las de las autoridades frente a la generación del drenaje ácido.

Del análisis de las técnicas de predicción utilizadas (Figura 3), se observa que, de acuerdo a la clasificación establecida, en las faenas mineras se realizan más test estáticos que otros tipos de técnicas de predicción. En orden descendente los test estáticos se presentan en un 41 % de los casos, test cinéticos en un 19 %, modelos predictivos en un 14 %, análisis mineralógicos en un 8 % y por último test in situ en un 3 %.

Dentro de los test estáticos el más utilizado es el test ABA. El test ABA es una técnica que presenta muchas desventajas o limitaciones.

El potencial de acidez (PA) puede sobreestimarse, debido a que para el cálculo del PA, se usa el azufre total y no se diferencia entre especies de azufre generadoras o no generadoras de ácido. Para Chile, este método está sujeto a un error muy grande, debido a que el norte chileno es rico en sulfato, lo que viene a ser acidez almacenada.

Según los servicios públicos con respecto a las técnicas de predicción (Figura 6) la técnica más necesaria de usar o para la cual existe un mayor déficit de utilización, es la prueba estática NAG (Generación Neta de Acidez). El ensayo NAG se encuentra aún en desarrollo y presenta muchas limitaciones, no proporciona una medida del Potencial de Neutralización (PN), no se determinan las proporciones de generación de ácido y además la oxidación de pirita a través de H_2O_2 puede interferirse con componentes alcalinos.

De acuerdo al sector privado, las pruebas estáticas (con excepción del NAG), análisis mineralógico y el TCLP son de uso corriente para la predicción. Las pruebas dinámicas, columnas e in-situ son de uso mucho menos frecuente. Al igual que para el caso anterior de los servicios públicos, el ensayo NAG es el que presenta un mayor déficit. Si bien este ensayo nos proporciona el potencial neto de acidez, no entrega un comportamiento del material en relación con el tiempo. Además, no incluye el factor de

las bacterias, ya que empieza en un pH en el cual las bacterias presentan baja actividad y se va adicionando NaOH lo que aumenta el pH de la solución y disminuye la actividad bacteriana.

Observando los resultados de los EIA y de lo establecido por los servicios públicos y el sector privados, se observa que se ha dejado de lado una técnica muy eficiente que los que se usan mayoritariamente en los EIA, el ensayo BC Research. La gran ventaja de esta técnica radica en que el método de titulación del PN permite la neutralización de minerales presentes para la reacción a su propia velocidad, permitiendo así una reacción a la neutralización más natural. Simula más correctamente el efecto de consumo de ácido por los materiales neutralizadores presentes en la muestra, en forma dinámica y cómo varía el valor del pH a medida que se agrega ácido a la solución.

Para apoyar este análisis se realizó el ensayo BC Research a dos muestras. Este ensayo radica en agregar alícuotas de ácido sulfúrico en pequeñas cantidades y registrar las variaciones de pH hasta 3,5, pero en esta ocasión se decidió seguir agregando ácido hasta pH 2,0 para registrar la actividad bacteriana de la *thiobacillus ferrooxidans*. Las dos muestras presentan un comportamiento similar con un rápido descenso del pH de la solución lo que indica que existe baja presencia de material neutralizante en la muestra. Por otro lado, se observa una disminución del pH de la solución lo que indica que existe actividad bacteriana, pero no de forma tan marcada.

El análisis realizado no permite determinar si se presentará drenaje ácido en la muestra, pero no es muy acertado para valores inferiores a 3,5, esto relacionado con la actividad bacteriana.

Si bien el ensayo BC Research es un método más completo que el test ABA u otros, no permite describir completamente el comportamiento del residuo en relación a

la generación del drenaje ácido a valores bajos de pH.

Probablemente puede existir una contribución inhibitoria debido a la formación de precipitados férricos.

Se podría lograr un efectivo aumento de la actividad oxidativa bacteriana mediante un adecuado control de la concentración de hierro (y formación de precipitados) y la acidez en solución.

Además, la *thiobacillus ferrooxidans* es un organismo *mesófilo* (vive a temperatura ambiente) con una temperatura óptima entre 28 y 35 °C. Este puede ser un factor incidente en los valores de cambio de pH en el ensayo BC Research. Un importante aporte sería considerar en el procedimiento del ensayo BC Research, el factor de regulación de temperatura de la solución para mantenerlo en el rango de 28 – 35 °C. Si bien, esto asumiría que en todas las instalaciones se tendría valores de pH sobreestimados, una de las consideraciones ambientales para efectos de contaminación es tomar los resultados en el caso del peor escenario. Además, por el clima de las zonas donde se emplazan estas mineras, las temperaturas son elevadas, lo que indica que asumir que las bacterias se encontrarán a valores de temperatura cercanos de la óptima no sería un factor tan errado.

Con respecto a las medidas de prevención, del análisis de los EIA se obtuvo que la mayor medida implementada es la desviación de la escorrentía superficial con un 46 %, impermeabilización de la base de la pila del botadero con un 27 % y el monitoreo de la calidad del agua con un 24 %. Comparando estos resultados con las respuestas de los servicios públicos (Figura 7) y del sector privados (Figura 10), se encuentra que existe concordancia con que el desvío de escorrentía superficial es la medida mayormente implementada en las faenas mineras. Sin embargo, a partir de la segunda medida existen diferencias con lo indicado por los servicios públicos y lo

indicado por el sector privados. Lo indicado por los servicios públicos es en función de lo que ellos observan en los EIA y concuerda con los resultados de las fichas del Anexo 1, pero no concuerda con lo indicado en la Figura 10, esto quiere decir que las empresas mineras no están entregando toda la información en los EIA y/o que están implementando medidas no indicadas en los EIA, lo que es un factor muy relevante para el análisis, ya que no se estaría cumpliendo algo establecido bajo una Resolución Exenta, como son las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) que aprueban los EIA, y que además existe un vacío en cuanto a fiscalización por parte del sector público a las empresas mineras.

Con respecto a las medidas de control del análisis de los EIA (Figura 5), se puede apreciar que la medida más implementada es la de captación y manejo del drenaje ácido con un 38 %, seguido por el monitoreo de la calidad del agua con un 16 %. Según las respuestas de los servicios públicos y el sector privado (Figura 8 y Figura 11, respectivamente), existe concordancia en que se realiza mayormente la captación del drenaje ácido, posteriormente la técnica de control más realizada es la de recirculación al proceso y la de intercambio iónico la menos utilizada. Esto se realiza para aprovechar el agua y en algunos casos para recuperar el contenido de metales. Hay veces en que por la composición del drenaje ácido, se hace poco recomendable la recirculación al proceso, por lo que hay que realizar un tratamiento. Además, en las fases de cierre inevitablemente se debe realiza algún tratamiento. Las posibles técnicas de control serían tratamiento pasivo-pantano, intercambio iónico, tratamiento por membranas y neutralización simple. Sin embargo, el enfoque de este análisis, al igual que el actual enfoque a nivel mundial con respecto a la generación de cualquier contaminante es evitar la generación del drenaje ácido, y no corregir o controlar el problema.

Con respecto al análisis de las medidas de prevención tales como las coberturas SR y SDR, son una buena alternativa para evaluar su utilización en las faenas mineras que se encuentran en el norte de Chile y que están sometidas a climas áridos, donde se hace difícil la prevención de la generación del drenaje ácido. Estas cubiertas están diseñadas para soportar altas temperaturas y son capaces de mantener con vida la superficie vegetal que las cubre mediante la evaporación del agua acumulada en las capas inferiores, esto permite que se desarrolle normalmente la vegetación de la superficie y se evite la erosión eólica y por ende el desgaste de la cubierta SR o SDR.

Para evaluar la calidad de una propuesta de diseño de SR o SDR, se deberían incluir los siguientes puntos:

- La justificación del objetivo del diseño para el sistema de cobertura;
- Las principales características hidrogeotécnicas de los materiales utilizados en el sistema de cobertura, para condiciones representativas, como tamaño de partícula, límites Atterberg, pruebas de compactación, pruebas de succión, densidad relativa a la partícula, entre otros;
- La información climática (condiciones promedio y extremas) y acerca de la vegetación, como precipitación, velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura, humedad relativa, especies de plantas y eventos extremos;
- Descripción del modelamiento físico (en el laboratorio y en el campo) utilizado para verificar el diseño y calibrar los modelos numéricos;
- Los resultados principales del modelamiento físico;
- El efecto de la pendiente en el desempeño, si una porción de la cobertura está

construida en una superficie inclinada;

- El diseño final basado en los resultados del modelamiento numérico (modelo previamente validado con los resultados del modelamiento físico) en condiciones extremas y en el peor escenario en cuanto a las propiedades del material;
- Un análisis de otros aspectos que pueden afectar el desempeño a largo plazo del sistema de cobertura, tales como los ciclos de congelación-descongelación, desecación, vegetación, erosión pluvial, erosión eólica y otros;
- Una estrategia de monitoreo para verificar si se cumplen con los objetivos en cuanto a la filtración a través del sistema de cobertura.

Con respecto a los sistemas de monitoreo de las cubiertas, la evaluación de la succión (en particular para valores de succión bajos) en un medio grueso resulta difícil, debido especialmente al rápido drenaje del suelo. Sin embargo, los tensiómetros, sensores de disipación de calor y el sensor de matriz granular han sido utilizados con éxito para monitorear la succión en sistemas de cobertura utilizados para controlar el drenaje ácido de los residuos de minas.

El mantenimiento de campo constituye también un criterio importante para seleccionar el equipo apropiado encargado de monitorear la succión en los sistemas de cobertura. Debido a que los tensiómetros, potenciómetros y el equitensiómetro requieren un considerable mantenimiento de campo, y que los bloques de yeso se disuelven con el tiempo, no se recomiendan para monitoreos a largo plazo, por lo que no es recomendable la utilización de estos últimos para instalarlos en fases de cierre de faenas mineras.

También se debe tener en cuenta la precisión a la hora de elegir un buen equipo. La mayoría de los métodos tienen la suficiente precisión para utilizarlos en el monitoreo de los sistemas de cobertura; sin embargo, no se recomienda el uso de un sicrómetro para realizar mediciones precisas debido a su baja precisión.

Finalmente, un parámetro que debe tomarse en cuenta en la selección del dispositivo más apropiado para monitorear la succión es el rango de medición. En el caso de los sistemas de cobertura SR o SDR, es necesario medir la succión mayor próxima a la superficie debido a la evaporación. En este caso en particular, los sensores de disipación de calor y los sicrómetros pueden ser más apropiados; asimismo, una combinación de sensores de matriz granular (ubicados cerca de los efectos de la barrera capilar) y sicrómetros (ubicados cerca a la superficie) puede constituir una opción adicional.

Para la medición del contenido volumétrico de agua, debido a que los métodos dieléctricos y nucleares constituyen los enfoques más utilizados en los sistemas de cobertura, sólo se analizarán estas dos técnicas a continuación.

Todos estos métodos de medición de contenido de agua no requieren mantenimiento de campo, lo que se considera una ventaja para su utilización en fases de cierre de faenas.

La salinidad puede afectar las lecturas equipos dieléctricos; en la mayoría de las situaciones se puede aplicar una corrección de la salinidad. Todos los métodos proporcionan una suficiente precisión para el monitoreo de los sistemas de cobertura instalados en los residuos de minas.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA 2003) concluyó que la sonda de neutrones constituye el dispositivo más práctico para las mediciones de campo del contenido de agua del suelo (especialmente para las investigaciones

V. CONCLUSIONES

Los resultados indican que no se realizan los análisis necesarios para determinar si existe potencial de generación de drenaje ácido, y que a pesar de esto, los EIA son aprobados por las autoridades ambientales chilenas.

Por otro lado, se obtuvo que las técnicas de predicción mayormente realizadas corresponden a los test estáticos, los cuales con el pasar del tiempo han demostrado que no son los más recomendables de realizar, ya que entre otras cosas presentan muchos supuestos en los análisis.

El ensayo BC Research, es una alternativa más completa que muchos otros test predictivos y es recomendable su utilización, sin embargo, cabe destacar que podría perfeccionarse al considerar factores como el rango de temperatura (entre 28 y 35 °C) al cual la *thiobacillus ferrooxidans* presenta su mayor actividad metabólica.

Con respecto a las medidas de prevención implementadas se puede inferir que las empresas realizan actividades adicionales a lo declarado a las autoridades ambientales como parte de los EIA y además el sistema actual de fiscalización no da cuenta de los cambios implementados en las faenas, pese a que las modificaciones sí son sometidas a análisis de pertinencia a la autoridad ambiental.

Del análisis realizado a las cubiertas vegetales, se puede destacar que a pesar de las complicaciones climáticas que el sector norte de Chile presenta para la implementación de cubiertas vegetales, existen opciones potenciales a implementar, dos tipos de coberturas muy similares, la coberturas de Almacenamiento y Descarga (Store-Release - SR) y las coberturas de Almacenamiento, Derivación y Descarga (Store-Divert-Release SDR; que corresponde a una cobertura SR colocada en una

superficie inclinada). Estas por su particularidad de ser capaces de mantener el agua de las escasas precipitaciones y luego permitir la evaporación del agua acumulada, (lo que permite que la superficie vegetal se mantenga viva) son una importante alternativa a evaluar principalmente para los planes de cierre de las faenas mineras. Además, se propone una alternativa de evaluación de la calidad del diseño de la cobertura mediante un procedimiento y con la utilización de ciertos instrumentos que permiten monitorear las características hidrogeotécnicas, climáticas, entre otros.

VI. RECOMENDACIONES

A pesar de los resultados mostrados, se propone implementar pruebas piloto para asegurar el adecuado funcionamiento de las coberturas.

Con respecto a la normativa cabe destacar que recientemente se realizaron modificaciones al D.S. N° 90 y se estableció dejar fuera de este ente regulatorio el las aguas de contacto provenientes de los residuos mineros masivos.

Por otro lado, los residuos mineros masivos fueron exonerados del D.S: N148, sobre residuos peligrosos. Lo que implica que las aguas de contacto y los residuos mineros masivos no están acogidos a ninguna regulación. Una alternativa podría ser incorporar dentro de esta normativa los residuos mineros masivos, tal que quede regulado indirectamente la generación del drenaje ácido, ya que se realizaría una caracterización de la roca a depositar en los botaderos, y existirían límites máximos permitidos para la concentración de sulfuros de metales en la roca.

Otra alternativa, ya propuesta, es la incorporación de la prevención de la generación del drenaje ácido en la futura normativa de planes de cierres mineros.

REFERENCIAS

- Armando Valenzuela, M.Sc. ORIGEN AMBIENTAL Y CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR METALES PESADOS. Significado ambiental de la contaminación por metales pesados en suelos. Unidad de Asuntos Internacionales y del Medio Ambiente. Comisión Chilena del Cobre, 2001.
- Canada Centre for Mineral and Energy Technology. MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE (MEND). Volumen 1,2,3,4,5 y 6. Editores: Charlene M. Hogan, Gilles A. Tremblay, Marzo, 2001.
- Carlos Ruiz Fuller; L. Aguirre ... [y otros]. GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS METALÍFEROS DE CHILE, Instituto de Investigaciones Geológicas, 305 p., 1965.
- Carmen Dueñas C. DRENAJE ÁCIDO DE ROCAS EN LA MINERÍA CHILENA. Tesis de Título, Químico Ambiental. Universidad de Chile, 2002.
- Claudio Herrera A. MANEJO AMBIENTAL DE LASTRE CON POTENCIAL GENERADOR DE AGUAS ÁCIDAS. Tesis de Título, Ingeniería Civil de Minas. Universidad de Chile, Noviembre de 1999.
- Environment Australia. MANAGING SULPHIDIC MINE WASTES AND ACID DRAINAGE, Best Practice Environmental Management in Mining, Mayo 1997.

- Mendoza Juan, Mogrovejo José, Yataco Amado, República del Perú. GUÍA AMBIENTAL PARA EL MANEJO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, Ministerio de Energía y Minas, 1997.
- Ministerio de Energía y Minas. GUÍA PARA EL MANEJO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, 2000
- Revista Ecoamérica. TECNOLOGÍAS LIMPIAS PARA LA INDUSTRIA. Abril 2002, Año 2, N° 16.
- SIGA Consultores y Ministerio de Minería. GUÍA METODOLÓGICA DE PREDICCIÓN, PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINAS EN CHILE Y SEMINARIO DREBAJE ÁCIDO DE FAENAS MINERAS, 2001.
- S.H. Castro, M.A. Sánchez y F. Vergara, Eds. EFLUENT TREATMENT IN THE MINING INDUSTRY, University of Concepción-Chile, Department of Metallurgical Engineering, 1998.
- S.H. Castro, M.A. Sanchez and F. Vergara. ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND EFFLUENT TREATMENT IN THE CHILEAN COPPER INDUSTRY. Clean Technology Group, Department of Metallurgical Engineering. University of Concepcion.

- Water Management Consultants. CURSO TÉCNICO: DRENAJE ÁCIDO DE MINAS, Acuerdo Marco de Producción Limpia, Ministerio de Minería, Consejo Minero, Marzo 2002.

SITIOS WEB

- Department of Chemistry and Geochemistry. Colorado School of Mines Golden, Colorado. "Acid Mine Drainage Experiments".

VII.ANEXOS

ANEXO 1.
FICHAS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL

Compañía Minera		Compañía Minera Zaldívar	
Consultora asociada		MWH Chile	
EIA		MODIFICACIONES FAENA MINERA ZALDÍVAR	
Fecha presentación		22-07-2009	
Región		II Región de Antofagasta	
Comuna (Obras)		Antofagasta	
Tipo de mineralización		No especifica	
Tipo de procesamiento		Pilas de Lixiviación (la modificación se realiza sólo en esta línea) – Flotación Convencional	
Unidades Litológicas		No se presenta capítulo	
Cantidad de material manejado por día (ton/día)	Mineral	No especifica	Menciona la cantidad total de material manejado por día, equivalente a 140.000
	Estéril	No especifica	
	Relaves	2.200	
Cantidad total de material manejado durante la vida útil (ton)	Mineral	No especifica	
	Estéril	No especifica	
	Relaves	No especifica	
Criterio de muestreo (tipo de residuos, unidad litológica u otro)		----	
Modelo predictivo	Nombre	No presenta	
	Característica	----	
Medidas de Prevención	Fase operación	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	No especifica
		Depósito de relaves	Desviación de escorrentía superficial
		Depósito/Ripios de lixiviación	Impermeabilización de la base de la pila. Contención de aguas lluvias
		Otros	Desviación de aguas lluvias en cubetas de Residuos Sólidos Domésticos (RSD) y cubetas de

			Residuos Sólidos no Peligrosos (RISES NP)
	Fase cierre	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	No especifica
		Depósito de relaves	Intercepción de aguas lluvias
		Depósito/Ri pios de lixiviación	Sistema de cobertura (no especifica cuál)
		Otros	----
Medidas de Control	Fase operación	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	No especifica
		Depósito de relaves	No especifica
		Depósito/Ri pios de lixiviación	Captación de filtraciones y recirculación al proceso
		Otros	----
	Fase cierre	Rajo	Caracterización de drenaje ácido y su gestión según resultados de caracterización química
		Depósito de estéril	No especifica
		Depósito de relaves	No especifica
		Depósito/Ri pios de lixiviación	No especifica
		Otros	----

Tipo de residuo	Tipo de prueba	Nº de muestras	Análisis de los resultados	Comentarios	Laboratorio
----	----	----	----	----	----

Compañía Minera		Sociedad Contractual Minera El Morro	
Consultora asociada		Knight Piésold S. A. Consulting y Water Management Consultants S.A.	
EIA		Proyecto El Morro	
Fecha presentación		25-11-2008	
Región		III Región de Atacama	
Comuna (Obras)		Alto del Carmen, Vallenar y Copiapó	
Tipo de mineralización		Pórfido Cuprífero rico en oro	
Tipo de procesamiento		Flotación convencional	
Unidades Litológicas		Grabas, Tobas, Pórfido de Feldespato, Brecha Hidrotermal, Pórfido de Biotita, Brecha Ígnea, Pórfido de Anfíboles y Brecha tectónica	
Cantidad de material manejado por día (ton/día)	Mineral	90.000	
	Estéril	385.000	
	Relaves	88.000	
Cantidad total de material manejado durante la vida útil (ton)	Mineral	450.000.000	
	Estéril	1.600.000.000	
	Relaves	----	
Criterio de muestreo (tipo de residuos, unidad litológica u otro)		Se muestreó según tipo de residuo y unidad litológica. Se realizó en dos fases. Fase I (2006-2007) y Fase II (2007-2008).	
Modelo predictivo	Nombre	Visual HELP	Código de modelación numérica mediante saturación-especiación PHREEQC
	Característica	Se basa en un balance de aguas para el estudio de la infiltración de aguas a través de un relleno sanitario. Simula procesos asociados al movimiento de agua dentro de una estratigrafía determinada y el riesgo ambiental que representa un determinado nivel de filtración sobre las aguas subterráneas. Se usó para la determinación de la tasa de infiltración a través del depósito de	Simula las reacciones químicas y el transporte en el agua. Se basa en la química de equilibrio de soluciones acuosas que interactúa con los minerales, gases, soluciones de sólidos, intercambiadores y superficies de sorción.

			estériles y del depósito de relaves.
Medidas de Prevención	Fase operación	Rajo	----
		Depósito de estéril	Desvío de escorrentía superficial
		Depósito de relaves	Desvío de escorrentía superficial
		Depósito/Ripios de lixiviación	----
		Otros	----
	Fase cierre	Rajo	
		Depósito de estéril	Cobertura con material inerte y sistema de intercepción y desviación de escorrentía superficial
		Depósito de relaves	Desvío de escorrentía superficial
		Depósito/Ripios de lixiviación	----
		Otros	Área Planta Concentradora: Colección de drenaje ácido a través de sistema contrafosos y evaporación o recirculación al proceso. Depósitos de material excavado (de caminos, zanjas, entre otros): Contarán con fosos y contrafosos para canalización de aguas lluvias y con cubierta vegetal, al final de su utilización.
Medidas de Control	Fase operación	Rajo	Riego de caminos y reutilización en proceso
		Depósito de estéril	Sistema de colección y manejo de drenaje ácido (evaporación y/o recirculación al proceso).
		Depósito de relaves	Sistema de colección y manejo de drenaje ácido (evaporación y/o recirculación al proceso).
		Depósito/Ripios de	----

	Fase cierre	lixiviación	
		Otros	----
		Rajo	Monitoreo de aguas del rajo, para definir medidas de manejo.
		Depósito de estéril	Captación y evaporación de drenaje ácido.
		Depósito de relaves	Captación y evaporación de drenaje ácido.
		Depósito/Ri pios de lixiviación	----
		Otros	----

Tipo de residuo	Tipo de prueba	Nº de muestras	Análisis de los resultados	Comentarios	Laboratorio
Estéril y relaves	ABA/ S-Sulfato/pH de la pasta, Química de la Roca, Mineralogía Óptica, Pruebas estáticas NAG, Pruebas cinéticas NAG y HCT	120	Análisis bien detallado	Adecuada cantidad de muestras, según plan de muestreo de programa MEND.	Análisis desarrollado por el laboratorio Cantest en Vancouver, Canadá.

Compañía Minera		Compañía Minera Latinoamerica (CMLA)	
Consultora asociada		SIGA Ingeniería Aplicada	
EIA		Proyecto Minero Tres Valles	
Fecha presentación		04-11-2008	
Región		Cuarta Región de Coquimbo	
Comuna (Obras)		Comunas de Salamanca e Illapel	
Tipo de mineralización		Minerales de cobre	
Tipo de procesamiento		Lixiviación en pilas (LX)	
Unidades Litológicas		Rocas Intrusivas y Rocas Estratificadas	
Cantidad de material manejado por día (ton/día)		Mineral	5.400
		Estéril	----
		Relaves	----
Cantidad total de material manejado durante la vida útil (ton)		Mineral	17.108.000
		Estéril	29.100.000
		Relaves	----
Criterio de muestreo (tipo de residuos, unidad litológica u otro)		No especifica	
Modelo predictivo	Nombre		No presenta
	Característica		----
Medidas de Prevención	Fase de operación	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	Desvío de las aguas lluvias Monitoreo de aguas subterráneas
		Depósito de relaves	----
		Depósito/Ripios de lixiviación	Membrana impermeabilizadora en la base del depósito Piscinas captadoras de soluciones infiltradas Pozo de monitoreo de aguas subterráneas
		Otros	----

	Fase cierre	Rajo	Monitoreo de calidad de agua del rajo	
		Depósito de estéril	Cubierta vegetal	
		Depósito de relaves	----	
		Depósito/Ri pios de lixiviación	No especifica	
		Otros	----	
	Medidas de Control	Fase operación	Rajo	No especifica
			Depósito de estéril	No especifica
			Depósito de relaves	----
			Depósito/Ri pios de lixiviación	No especifica
			Otros	----
Medidas de Control	Fase cierre	Rajo	No especifica	
		Depósito de estéril	No especifica	
		Depósito de relaves	----	
		Depósito/Ri pios de lixiviación	No especifica	
		Otros	----	

Tipo de residuo	Tipo de prueba	Nº de muestras	Análisis de los resultados	Comentarios	Laboratorio
Estéril	Test ABA	5	Concretos	Presenta solamente análisis ABA y no otro tipo de prueba geoquímica. Poca cantidad de muestras. No se realizan duplicados No se realiza comparación con otros laboratorios	CIMM T&S

Compañía Minera			Minera Lumina Copper Chile S.A. (MLCC)
Consultora asociada			Gestión Ambiental Consultores
EIA			Proyecto Caserones
Fecha presentación			21/10/2008
Región			III Región de Atacama
Comuna (Obras)			Tierra Amarilla
Tipo de mineralización			Mineral porfídico de cobre - molibdeno
Tipo de procesamiento			Flotación Convencional y Lixiviación en Pilas
Unidades Litológicas			No especifica
Cantidad de material manejado por día (ton/día)		Mineral	150.000
		Estéril	750.000
		Relaves	85.000 aprox.
Cantidad total de material manejado durante la vida útil (ton)		Mineral	1.350.000.000
		Estéril	671.000.000
		Relaves	800.000.000 aprox.
Criterio de muestreo (tipo de residuos, unidad litológica u otro)			Se muestreó según tipo de residuo, ya sea relave o estéril
Modelo predictivo	Nombre		No especifica
	Característica		----
Medidas de Prevención	Fase operación	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	Monitoreo de calidad de aguas de infiltraciones.
		Depósito de relaves	Intercepción y desviación de escorrentía superficial (aguas lluvia y derretimiento de nieve)
		Depósito/Ripios de lixiviación	Impermeabilización con membrana en la base del depósito. Intercepción y desviación de escorrentía superficial (aguas lluvia y derretimiento de nieve). Captación y drenaje de aguas subterráneas para evitar contacto con depósito. Monitoreo de calidad de aguas subterráneas.

		Otros	Zona de planta y oficinas: Intercepción y desviación de escorrentía superficial (aguas lluvia y derretimiento de nieve)
	Fase cierre	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	No especifica
		Depósito de relaves	No especifica
		Depósito/Ri pios de lixiviación	No especifica
		Otros	----
Medidas de Control	Fase operación	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	Captación y recirculación al proceso
		Depósito de relaves	Captación y recirculación al proceso
		Depósito/Ri pios de lixiviación	Captación y recirculación al proceso
		Otros	----
		Fase cierre	Rajo
	Depósito de estéril		No especifica
	Depósito de relaves		No especifica
	Depósito/Ri pios de lixiviación		No especifica
	Otros		----

Tipo de residuo	Tipo de prueba	N° de muestras	Análisis de los resultados	Comentarios	Laboratorio
Estéril	ABA, SPLP y NAG	42	Completo		No especifica
Relaves	ABA, SPLP y NAG	23			

Compañía Minera		TOMMY S.A.	
Consultora asociada		GESCAM S.A.	
EIA		Proyecto Minero Puquíos	
Fecha presentación		02-06-2008	
Región		Cuarta Región de Coquimbo	
Comuna (Obras)		Comuna de La Higuera	
Tipo de mineralización		Sulfuros secundarios, óxidos verdes y óxidos negros de cobre	
Tipo de procesamiento		Lixiviación en pilas	
Unidades Litológicas		Granodiorita Chingoles (rocas porfídicas), Granodiorita Puquíos (composición granodiorítica a monzogranítica), Pórfido "Ojos" de Cuarzo (composición monzogranítica), Pórfido del proyecto Minero Puquíos (composición monzogranodiorítica), Pórfido Máfico Tardío (contacto intrusivo con el pórfido e intruyendo a las granodioritas Puquios y Chingoles y al Pórfido Cuarcífero), Filones Aplíticos (filones subverticales de rumbo promedio N35°W y subverticales que intruyen a las granodioritas Chingoles y Puquios) y Filones Dacíticos (filones subverticales relacionados con el Pórfido Máfico Tardío).	
Cantidad de material manejado por día (ton/día)	Mineral	8.490	
	Estéril	No especifica	
	Relaves	----	
Cantidad total de material manejado durante la vida útil (ton)	Mineral	21.500.000	
	Estéril	37.000.000	
	Relaves	----	
Criterio de muestreo (tipo de residuos, unidad litológica u otro)			
Modelo predictivo	Nombre	No presenta	
	Característica	----	
Medidas de Prevención	Fase operación	Rajo	Intercepción y canalización de aguas lluvias
		Depósito de estéril	Intercepción y canalización de aguas lluvias
		Depósito de	----

		relaves		
		Depósito/Ripios de lixiviación	Intercepción y canalización de aguas lluvias	
		Otros	----	
		Fase cierre	Rajo	Construcción de canales perimetrales en torno al rajo Aplicación de mineral neutralizante (i.e: CaCO3). Monitoreo de las aguas subterráneas. En caso de requerirse, tratamiento y neutralización a las aguas.
			Depósito de estéril	Cubrimiento del botadero con estériles y suelo natural Cubrimiento del material estéril con material neutralizante Sistema de monitoreo Canalización perimetral
			Depósito de relaves	----
			Depósito/Ripios de lixiviación	Lavado de los ripios Mezclado de ripios con material neutralizante – Mezcla de residuos generadores y no generadores Sistema de monitoreo Canalización perimetral
			Otros	----
Medidas de Control	Fase operación	Rajo	Tratamiento y neutralización (no especifica el tipo de neutralización)	
		Depósito de estéril	Tratamiento y neutralización (no especifica el tipo de neutralización)	
		Depósito de relaves	----	
		Depósito/Ripios de lixiviación	Tratamiento y neutralización (no especifica el tipo de neutralización)	
		Otros	----	

	Fase cierre	Rajo	Tratamiento y neutralización (no especifica el tipo de neutralización)
		Depósito de estéril	Tratamiento y neutralización (no especifica el tipo de neutralización)
		Depósito de relaves	----
		Depósito/Ri pios de lixiviación	Tratamiento y neutralización (no especifica el tipo de neutralización)
		Otros	----

Tipo de residuo	Tipo de prueba	Nº de muestras	Análisis de los resultados	Comentarios	Laboratorio
No especifica	----	----	----	----	----

Compañía Minera		Sociedad Contractual Minera El Abra (SCMEA)	
Consultora asociada		Jaime Illanes Asociados Consultores S.A.	
EIA		LIXIVIACIÓN DE SULFUROS SULFOLIX	
Fecha presentación		16-03-2007	
Región		II Región de Antofagasta	
Comuna (Obras)		Comuna de Calama	
Tipo de mineralización		Mineral de óxidos, mixtos y sulfuros de cobre (calcosina, bornita y calcopirita)	
Tipo de procesamiento		Lixiviación de material chancado y lixiviación en botadero	
Unidades Litológicas		No especifica	
Cantidad de material manejado por día (ton/día)		Mineral	224.000
		Estéril	No especifica
		Relaves	---
Cantidad total de material manejado durante la vida útil (ton)		Mineral	1.890.000.000
		Estéril	No especifica
		Relaves	----
Criterio de muestreo (tipo de residuos, unidad litológica u otro)		El estudio considera la ejecución de pruebas estáticas y dinámicas para muestras por categoría de litología y mineralización correspondiente a óxidos y sulfuros.	
Modelo predictivo	Nombre	Estudio del potencial generación de drenaje ácido a través del potencial de infiltración de agua en el botadero	
	Característica	Se realiza la estimación del volumen de retención máximo de agua en el botadero (capacidad de retención) y el volumen total precipitado sobre el mismo, considerando eventos de precipitación extrema. La razón entre el volumen de agua precipitada y la capacidad de retención es un indicador del riesgo potencial de agua que puede presentarse en la base del botadero producto de infiltración por precipitación.	
Medidas de Prevención	Fase de operación	Rajo	No especifica
		Depósito de estéril	Conducción y evaporación de aguas lluvias
		Depósito de relaves	----

		Depósito/Ri pios de lixiviación	Desvío de aguas lluvias	
		Otros	----	
		Fase cierre	Rajo	No presenta
			Depósito de estéril	No especifica
			Depósito de relaves	----
			Depósito/Ri pios de lixiviación	Canales colectores de aguas lluvias
Otros	----			
Medidas de Control	Fase operación	Rajo	Monitoreo de calidad de aguas del rajo Captación y riego de caminos con drenaje ácido de mina	
		Depósito de estéril	No especifica	
		Depósito de relaves	----	
		Depósito/Ri pios de lixiviación	No especifica	
		Otros	----	
	Fase cierre	Rajo	Medidas de manejo adecuadas (no explican cuáles).	
		Depósito de estéril	No especifica	
		Depósito de relaves	----	
		Depósito/Ri pios de	No especifica	

		lixiviación	
		Otros	----

Tipo de residuo	Tipo de prueba	N° de muestras	Análisis de los resultados	Comentarios	Laboratorio
Estéril	ABA y HCT	No especifica	Falta Anexo DP-3 que explica el estudio de pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas	Falta Anexo DP-3 que explica el estudio de pruebas geoquímicas estáticas y dinámicas	MWH Americas Inc. Chile Ltda.

ANEXO 2
ENCUESTA SECTOR PÚBLICO

Predicción, Prevención y Control de la Generación de Aguas Ácidas Análisis Prácticas Actuales y Requerimientos

El **Programa DAZA**, Programa Nacional para la Gestión Integral del Drenaje Ácido, tiene como objetivo lograr cooperación entre el sector público y privado, para construir capacidades en la predicción, prevención, control y tratamiento de esta problemática a nivel nacional, generar herramientas, aportar significativamente al conocimiento del drenaje ácido y aumentar la transferencia de información y tecnología.

El presente análisis tiene como fin analizar las prácticas actuales de la industria minera nacional, basado en las evaluaciones de impacto ambiental revisadas y los requerimientos de los servicios públicos para la gestión del drenaje ácido. En el período (2009 -2019), el Programa DAZA identificará y ejecutará las prioridades de investigación basadas en el análisis de las brechas detectadas.

Para el cumplimiento de este objetivo, el Programa DAZA invita a los servicios públicos a contribuir en:

- Responder una encuesta digital o física
- Asistir a reuniones de comités técnicos científicos.

ANALISIS DE BRECHAS

¿Que sabemos?

Investigación de
Brechas

¿Qué necesitamos
saber?

Enviar respuesta a la siguiente dirección de correo electrónico:

cgduenas@fundacionchile.cl, o al siguiente FAX: 56-2-2400601

Indicar **ANALISIS DE BRECHAS** en el asunto de su correo enviado.

Indicar su nombre, cargo desempeñado y sector público al cual pertenezca.

Confirme su interés en participar en reuniones de comités.

¿QUE ES EL PROGRAMA DAZA?

Hoy en día el drenaje ácido está reconocido como uno de los problemas más serios y ambientalmente perdurables en el sector minero.

En vista de lo anterior y dada la relevancia que ha adquirido para el sector minero y servicios públicos, una efectiva gestión ambiental del drenaje ácido en virtud del marco regulatorio actual y futuro, Fundación Chile crea el Programa Nacional para la Gestión Integral del Drenaje Ácido, Programa DAZA, basado en el exitoso modelo MEND de Canadá.

El programa DAZA es el representante en Chile de la red SANAP - South American Network for Acid Prevention, y está trabajando activamente en la formalización e incorporación de otros países de

Nombre:

Cargo Desempeñado:

Sector público:

Email:

Fono:

Fecha:

La encuesta consta de tres partes: I. Prácticas actualmente en uso, II. Requerimientos y III. Recomendaciones.

I. PRÁCTICAS ACTUALMENTE EN USO

En los estudios de impacto ambiental que a Usted le corresponde evaluar y calificar, ¿con que frecuencia encuentra las siguientes metodologías de predicción y técnicas de prevención y control de drenaje ácido?

1. Muy frecuente
2. Medianamente frecuente
3. Poco frecuente
4. Nunca
0. No sabe

Áreas generales	Metodologías en uso	1	2	3	4	0
<u>Predicción</u>	Análisis mineralógicos					
	Pruebas estáticas – pruebas ABA					
	Interpretación de resultados ABA					
	Pruebas estáticas – pruebas NAG					
	Pruebas de extracción – SPLP					
	Pruebas de extracción – TCLP					
	Pruebas dinámicas – celdas de humedad					
	Interpretación pruebas dinámicas					
	Pruebas en columnas					
	Pruebas in situ					
	Modelación geoquímica simple					
Modelación geoquímica compleja						
<u>Prevención</u>	Segregación de material potencial generador de ácido					
	Mezcla de residuos generadores y no generadores					
	Adición de agente neutralizante					
	Adición de agente bactericida					
	Desvío de aguas superficiales					
	Cubiertas simples					
	Cubiertas complejas multi capas					
	Cubiertas húmedas					
Confinamiento total						
<u>Control</u>	Sistema de captación de soluciones					
	Recirculación de soluciones					
	Neutralización simple					
	Extracción por solvente					
	Tratamiento pasivo – pantano construido					
	Intercambio iónico					
	Tratamiento por membranas					
<u>Seguimiento</u>	Monitoreo y seguimiento					

II. RECOMENDACIONES

Entre las siguientes metodologías predicción y técnicas de prevención y control de drenaje ácido, ¿cuáles recomendaría Usted como estándar en los estudios de impacto ambiental y en los futuros Planes de Cierre que a Usted le corresponde evaluar y calificar?

1. **Muy recomendado**
2. **Recomendado**
3. **Eventualmente recomendado**
4. **No recomendado**
0. **No sabe**

Áreas generales	Metodologías en uso	1	2	3	4	0
<u>Predicción</u>	Análisis mineralógicos					
	Pruebas estáticas – pruebas ABA					
	Pruebas estáticas – pruebas NAG					
	Pruebas de extracción - SPLP					
	Pruebas de extracción - TCLP					
	Pruebas dinámicas – celdas de humedad					
	Pruebas en columnas					
	Pruebas in situ					
	Modelación geoquímica simple					
	Modelación geoquímica compleja					
<u>Prevención</u>	Segregación de material potencial generador de ácido					
	Mezcla de residuos generadores y no generadores					
	Adición de agente neutralizante					
	Adición de agente bactericida					
	Desvío de aguas superficiales					
	Cubiertas simples					
	Cubiertas complejas multi capas					
	Cubiertas húmedas					
<u>Control</u>	Confinamiento total					
	Sistema de captación de soluciones					
	Recirculación de soluciones					
	Neutralización simple					
	Extracción por solvente					
	Tratamiento pasivo – <i>wetland</i>					
	Intercambio iónico					
	Tratamiento por membranas					
<u>Monitoreo</u>	Barreras reactivas					
	Monitoreo de cumplimiento de norma DS90 y DS46					
	Monitoreo de validación de predicción de características de efluente					
	Caracterización permanente de residuos mineros generados durante la operación					

ANEXO 3
ENCUESTA COMPAÑÍAS MINERAS

Predicción, Prevención y Control de la Generación de Aguas Ácidas Análisis Prácticas Actuales y Requerimientos

El **Programa DAZA**, Programa Nacional para la Gestión Integral del Drenaje Ácido, tiene como objetivo lograr cooperación entre el sector público y privado, para construir capacidades en la predicción, prevención, control y tratamiento de esta problemática a nivel nacional, generar herramientas, aportar significativamente al conocimiento del drenaje ácido y aumentar la transferencia de información y tecnología.

El presente análisis tiene como fin analizar las prácticas actuales de la industria minera nacional y los requerimientos del sector minero para la gestión ambiental del drenaje ácido. En el período (2009 -2019), el Programa DAZA identificará y ejecutará las prioridades de investigación basadas en el análisis de las brechas detectadas.

ANALISIS DE BRECHAS

¿Que sabemos?

~~Investigación de Brechas~~

¿Qué necesitamos saber?

Para el cumplimiento de este objetivo, DAZA invita a compañías mineras a contribuir en:

- Responder una encuesta física o digital.
- Asistir a Workshop o reuniones de comités.

Enviar respuesta a la siguiente dirección de correo electrónico:
cgduenas@fundacionchile.cl, o al siguiente FAX: 56-2-2400601

Indicar **ANALISIS DE BRECHAS** en el asunto de su correo enviado.

Indicar su nombre, cargo desempeñado y sector público al cual pertenezca.

Confirme su interés en participar en reuniones de comités.

¿QUE ES EL PROGRAMA DAZA?

El Programa DAZA, basado en el exitoso modelo MEND de Canadá, es un programa nacional de cooperación público privada, el cual ha estado abocado durante su puesta en marcha (2009 - 2010) a analizar las prácticas actuales y requerimientos de la industria minera nacional y de los servicios públicos para la predicción, prevención, control y/o tratamiento del drenaje ácido.

El programa DAZA es el representante en Chile de la red SANAP - South American Network for Acid Prevention, y está trabajando activamente en la formalización e incorporación de otros países de sudamérica a esta red.

Nombre:

--

Cargo Desempeñado:

--

Compañía:

--

Email:

--

Fono:

--

Fecha:

--

La encuesta consta de dos partes: I. Prácticas actualmente en uso y II. Requerimientos.

I. PRÁCTICAS ACTUALMENTE EN USO

En los estudios de impacto ambiental que Usted ha sometido a evaluación ambiental, ¿con que frecuencia presenta las siguientes metodologías de predicción y técnicas de prevención y control de drenaje ácido? Incluir plan de cierre.

- 1. Muy frecuente**
- 2. Medianamente frecuente**
- 3. Poco frecuente**
- 4. Nunca**
- 0. No sabe**

Áreas generales	Metodologías en uso	1	2	3	4	0
Predicción	Análisis mineralógicos					
	Pruebas estáticas – pruebas ABA					
	Interpretación de resultados ABA					
	Pruebas estáticas – pruebas NAG					
	Pruebas de extracción – SPLP					
	Pruebas de extracción – TCLP					
	Pruebas dinámicas – celdas de humedad					
	Interpretación pruebas dinámicas					
	Pruebas en columnas					
	Pruebas in situ					
	Modelación geoquímica simple					
Modelación geoquímica compleja						
Prevención	Segregación de material potencial generador de ácido					
	Mezcla de residuos generadores y no generadores					
	Adición de agente neutralizante					
	Adición de agente bactericida					
	Desvío de aguas superficiales					
	Cubiertas simples					
	Cubiertas complejas multi capas					
	Cubiertas húmedas					
Confinamiento total						
Control	Sistema de captación de soluciones					
	Recirculación de soluciones					
	Neutralización simple					
	Extracción por solvente					
	Tratamiento pasivo – pantano construido					
	Intercambio iónico					
	Tratamiento por membranas					

ANEXO 4
ANÁLISIS DE LABORATORIO - METODOLOGIA

I. MÉTODO BC RESEARCH MODIFICADO: CONSUMO DE ÁCIDO

El método consiste en la titulación directa con ácido sulfúrico de la muestra, desde un pH natural, hasta un punto de viraje de pH 3,5.

1.1 Preparación de la Muestra

La muestra debe ser tomada de tal manera que sea representativa del tipo de mineralización. El número de muestras que será examinada depende de la variabilidad de la mineralización y debe ser dejada al criterio de l geólogo.

El total de la muestra es procesado en un chancador de cono a menos de 10 mallas. Una porción representativa es separada, secada y pulverizada en torno al 60 % menos 400 mallas para el análisis, el test de titulación y, si es necesario, pruebas de confirmación.

1.2 Procedimiento (Test de Titulación)

- a) Suspender n 100 mL de agua destilada en porciones duplicadas de 10 g de la muestra pulverizada.
- b) Agitar aproximadamente 1 min. y registrar el pH natural de la muestra.
- c) Titular la muestra a pH 2,0 con H₂SO₄ 1,0 N, 0,5 N y 0,1 N usando un titulador automático.
- d) Continuar la prueba hasta que menos de 0,1 mL de ácido sean adicionados en un período de 4 horas.
- e) Registrar el volumen total de ácido adicionado y convertir a kg por tonelada de muestra.

Para una muestra de 10 g, el ácido consumido está dado por:

$$\text{mL H}_2\text{SO}_4 \text{ 1,0 N} * 4,0 \text{ kg / tonelada}$$

1.3 Interpretación:

Si el valor de consumo de ácido (en kg de ácido por tonelada de muestra) excede el potencial de ácido producido (kg por tonelada), la muestra no será una fuente de drenaje de mina. Si el consumo de ácido es menos que el potencia de producción de ácido o la diferencia es marginal, existe la posibilidad de producción de agua ácida de mina y se lleva a cabo una prueba de confirmación. Se elije un pH de 2,0 para la titulación, considerando que para valores más altos, las bacterias generadoras de ácido Thiobacillus ferroxidans no son activas.

1.4 Modificación Adicional

En la aplicación de este método, se recomienda registrar la relación entre la cantidad de ácido agregado y el pH de equilibrio correspondiente. Dicho registro se obtiene conectando al titulador un sistema de registro automático.

Se opera agregando un volumen fijo de solución ácida, lo más pequeño posible, y registrando el valor del pH en el cual se estabiliza la solución. Luego, se vuelve a agregar ácido hasta alcanzar el punto final de la titulación. (pH 2,0).

ANEXO 5.
ENSAYOS DE LABORATORIO
TEST ESTÁTICOS Y CINÉTICOS MÁS UTILIZADOS

Ensayo Balance Ácido Base (BAB) estándar y modificado

Ensayo	Origen y Fuente	Método y objetivo	Ventajas	Limitaciones	Duración
EPA Standard Acid Basic Accounting (BAB Estándar)	Environment al Protection Agency. EPA (Sobek et al, 1978).	<p>El método consiste en que la muestra se trata con un exceso de ácido clorhídrico estandarizado, luego se calienta para asegurar la reacción completa.</p> <p>El objetivo es determinar el equilibrio entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Método ampliamente aceptado y normalmente usado. Rápido y fácil de realizar. • Tipo de ensayo con el que se cuenta con más resultados, respecto a los demás ensayos estáticos. • Bajo costo, puede usarse como parte de un proceso de extensa evaluación. La interpretación de los datos de BAB es utilizada para tomar decisiones sobre a cuáles residuos se les aplicarán pruebas cinéticas. • Determina la cantidad máxima del potencial de neutralización y el potencial de acidez disponible en una muestra, así los resultados del BAB proveen a los reguladores y operadores de mina de una estimación global de la acidez neta que puede generar residuos de mineralización. • Si la digestión se maneja y mantiene al nivel más elevado del rango de pH dictado por el ensayo, los resultados del PN son comparables a los del método EPA BAB modificado. • Los resultados de BAB pueden mostrar rápidamente residuos 	<ul style="list-style-type: none"> • El potencial de acidez (PA) puede sobreestimarse, debido a que para el cálculo de PA, se usa el azufre total, no diferencia entre especies de azufre generadoras o no generadoras de ácido. • La proporción y magnitud de las reacciones generadoras y consumidoras de ácido no son determinadas. • La determinación del PN es llevada a cabo en un pH ácido <6, donde todo el carbonato es expelido como gas. Bajo condiciones de campo la mineralización de la calcita puede tener lugar en niveles de pH neutros o alcalinos y ocurre una incompleta neutralización a bicarbonato. • El método no indica a qué pH la muestra puede neutralizarse durante un largo contacto con agua ácida. • Debido a la digestión agresiva de la muestra con exceso de ácido clorhídrico, puede sobreestimar el potencial de neutralización. 	5 días

Ensayo	Origen y Fuente	Método y objetivo	Ventajas	Limitaciones	Duración
			problema, los cuáles afectan el plan de la mina y las opciones de disposición.		
Modified Acid Basic Accounting (ABA Modificado)	Environment al Protection Agency. Lawrence, 1989	Determinar el equilibrio entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina.	<ul style="list-style-type: none"> Permite una valoración más realista de PA usando concentraciones de sulfuro, de manera que las formas de azufre que no producen ácidos no sean incluidas en los cálculos de generación de ácido como sulfuro. El método previene la sobreestimación de PN comparada con el procedimiento estándar. 	<ul style="list-style-type: none"> El cálculo de PA únicamente en base de S-sulfurado no se considera apropiado en el contexto de muchos yacimientos epitermales, porque más del 50% del S total frecuentemente existe en formas no sulfuradas. 	5 días

Prueba inicial de Investigación de B.C.

Ensayo	Origen y fuente	Método y objetivo	Ventajas	Limitaciones	Duración
Prueba Inicial de Investigación de B.C.	British Columbia. Bruynesteyn, A. Y Hackl, RP., 1984.	El método consiste en la titulación directa de ácido sulfúrico de la muestra, desde un pH natural,	<ul style="list-style-type: none"> Ha sido ampliamente utilizado para la determinación del PN Neto. Rápido y fácil de realizar. Puede usarse como parte de un proceso de extensa evaluación. El método de titulación del PN permite la neutralización de minerales presentes para la 	<ul style="list-style-type: none"> El PA en este ensayo se calcula utilizando la concentración total de azufre, por lo que puede causar sobreestimación del PA de la muestra. Este método puede llegar a tomar varios días, lo cual lo hace más caro que los otros ensayos presentados. 	5 días

Ensayo	Origen y fuente	Método y objetivo	Ventajas	Limitaciones	Duración
		<p>hasta un punto de viraje de pH 3,5.</p> <p>El objetivo es determinar el equilibrio entre el ácido que se genera y el ácido que se consume en los componentes de una mina.</p>	<p>reacción a su propia velocidad, permitiendo así una reacción a la neutralización más natural.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La proporción y magnitud de las reacciones generadoras y consumidoras de ácido no son determinadas. • El método no indica a qué pH la muestra puede neutralizarse durante un largo contacto con agua ácida. 	

Prueba de Producción neta de acidez.

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Duración
Net Acid Production Test (NAP).	Lawrence, 1988.	Determinar el equilibrio entre el ácido que se genera y el	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido y fácil de realizar. • Puede usarse como parte de un proceso de extensa evaluación. • Prueba de terreno conveniente, debido a que no se requieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Método todavía en la fase de desarrollo. • No proporciona una medida del PN disponible. • Las proporciones de generación 	5 días

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Duración
Net Acid Generating (NAG).	Miller, 1990.	ácido que se consume en los componentes de una mina, sin la necesidad de analizar el azufre.	<p>análisis de azufre.</p> <ul style="list-style-type: none"> Elimina la incertidumbre relativa a la disponibilidad de las especies de azufre oxidables, y proporciona una indicación final de la capacidad de la Producción Neta de Ácido. 	<p>de ácido no se determinan.</p> <ul style="list-style-type: none"> La oxidación de pirita a través de H₂O₂ puede interferirse con componentes alcalinos. 	

Prueba estándar Celda de Humedad

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Duración
Prueba estándar Celda de Humedad	ASTM Método #D5744-96	Pruebas de laboratorio a pequeña escala, diseñadas para simular los procesos de intemperismo geoquímico para una muestra específica de roca, bajo condiciones de oxidación óptimas. Los datos resultantes pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de	<ul style="list-style-type: none"> Ensayo cinético a escala de banco más usado para determinar el potencial de generación de lixiviado ácido. Correlaciona las pruebas de predicción estática con la liberación de acidez observada. Por ejemplo, dado un resultado de BAB, predice si la liberación de ácido (pH < 5) realmente ocurrirá. Los ensayos de celdas de humedad pueden modificarse para responder mejor a cuestiones específicas (como inocular de una bacteria oxidante, para introducir efectos del azufre oxidados). 	<ul style="list-style-type: none"> La interpretación de los resultados a veces es compleja. Los largos periodos de prueba, y aplicación de los datos de las pruebas, pueden inducir costos altos. Las tasas de reacción en celdas es lenta bajo condiciones de pH neutro, ya que la oxidación de sulfuro es abiótica. El consumo de mineral buffering es también lento, resultando la liberación real de acidez en periodos largos de retraso, 	Mínimo 20 semanas

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Duración
		oxidación, el grado de potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.	<ul style="list-style-type: none"> • Simula los ciclos húmedo / seco del ambiente. • Puede determinar las tasas de generación de ácido y consumo de ácido (absoluta y relativa). La tasa de remoción de mineral puede indicar cuando la roca realmente generará ácido. • Proporciona una indicación de calidad de agua de lixiviación que puede esperarse del material residual. • Los datos de estos ensayos pueden ser usados como entrada a un modelo matemático. • Monitorear la liberación de sulfato, indicando las tasas de oxidación. • Evaluación de los minerales involucrados en la generación y consumo de ácido. Análisis detallado del lixiviado puede indicar los tipos de reacciones existentes. • Evaluación de efectos galvánicos. Efectos galvánicos pueden ocurrir cuando los sulfuros de diferentes tipos están en contacto directo eléctrico. El potencial electroquímico de cada sulfuro determina la secuencia de oxidación. 	<p>posiblemente lleve a la conclusión que el ácido nunca sería liberado.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Generalmente, los proyectos requieren la información en menos que un año, sin embargo, como el PN aumenta y el PN/PA aumenta, es probable que la química del lixiviado no ácido estable continúe por varios años o décadas. • Las condiciones de los ensayos no siempre son representativas de las condiciones de campo, por esto los resultados de este ensayo no pueden ser aplicados directamente a gran escala. • El establecimiento de la celda estándar de humedad de colas, no permite precipitaciones de minerales secundarios, por lo que los lixiviados generados por estas celdas no deben ser considerados como representativos de la calidad de lixiviado de DAR. 	

¹ El tiempo de duración y costo unitario de la prueba varía específicamente de la muestra a analizar, por lo tanto dadas las características de la muestra esta puede variar desde 3 meses a más de 3 años, por ende varía su costo.

Prueba de Lixiviación en Columna

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Duración
Prueba de Lixiviación en Columna	British Columbia AMD Task Force Report. 1989.	Pruebas de laboratorio a pequeña escala, diseñadas para simular los procesos de intemperismo geoquímico para una muestra específica de roca, bajo condiciones de oxidación óptimas. Los datos resultantes pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado de potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayo cinético a escala de banco más usado para determinar el potencial de generación de lixiviado ácido. • Correlaciona las pruebas de predicción estática con la liberación de acidez observada. Por ejemplo, dado un resultado de BAB, predice si la liberación de ácido (pH < 5) realmente ocurrirá. • Los ensayos de celdas de humedad pueden modificarse para responder mejor a cuestiones específicas (como inocular de una bacteria oxidante, para introducir efectos del azufre oxidados). • Simula los ciclos húmedo / seco del ambiente. • Puede determinar las tasas de generación de ácido y consumo de ácido (absoluta y relativa). La tasa de remoción de mineral puede indicar cuando la roca realmente generará ácido. • Proporciona una indicación de calidad de agua de lixiviación que puede esperarse del material residual. • Los datos de estos ensayos pueden ser usados como entrada a un modelo matemático. • Monitorear la liberación de sulfato, indicando las tasas de oxidación. 	<ul style="list-style-type: none"> • La interpretación de los resultados a veces es compleja. • Los largos periodos de prueba, y aplicación de los datos de las pruebas, pueden inducir costos altos. Las tasas de reacción en celdas es lenta bajo condiciones de pH neutro, ya que la oxidación de sulfuro es abiótica. El consumo de mineral buffering es también lento, resultando la liberación real de acidez en periodos largos de retraso, posiblemente lleve a la conclusión que el ácido nunca sería liberado. • Generalmente, los proyectos requieren la información en menos que un año, sin embargo, como el PN aumenta y el PN/PA aumenta, es probable que la química del lixiviado no ácido estable continúe por varios años o décadas. • Las condiciones de los ensayos no siempre son 	Mínimo 20 semanas

Ensayo	Origen y fuente	Método	Ventajas	Limitaciones	Duración
			<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación de los minerales involucrados en la generación y consumo de ácido. Análisis detallado del lixiviado puede indicar los tipos de reacciones existentes. • Evaluación de efectos galvánicos. Efectos galvánicos pueden ocurrir cuando los sulfuros de diferentes tipos están en contacto directo eléctrico. El potencial electroquímico de cada sulfuro determina la secuencia de oxidación. 	<p>representativas de las condiciones de campo, por esto los resultados de este ensayo no pueden ser aplicados directamente a gran escala.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El establecimiento de la celda estándar de humedad de colas, no permite precipitaciones de minerales secundarios, por lo que los lixiviados generados por estas celdas no deben ser considerados como representativos de la calidad de lixiviado de DAR. 	