UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

Prefactibilidad Técnica de la Fitoestabilización del Tranque de Relave N° 3 Minera Altos de Punitaqui

Trabajo de Titulación para optar al Título de Técnico Universitario en MINERÍA Y METALURGIA

Alumnos:
Stefanía Margarita Henríquez Bergamín
Jorge Antonio Hernández González

Profesor guía:
Ing. Marcelo Rojas Vidal

2017

DEDICATORIA

El camino recorrido, si bien no ha sido fácil, todos los eventos acontecidos durante el proceso nos han servido para madurar y comprender de lo que se trata la vida, es por esto que agradecemos en primer lugar a Dios por darnos la fortaleza e inteligencia para cargar con el peso del termino de un ciclo.

En segundo lugar agradecer el apoyo incondicional de nuestros padres, que sin su apoyo en todo sentido, no habríamos llegado hasta estas circunstancias, entre ellos se encuentran Giovanna Paola Bergamín Rojas, Pedro Alejandro Henríquez Caamaño, Eugenia del Carmen González Osorio, Jorge Acrisio Hernández Vargas (Q.E.P.D).

En tercer lugar agradecer a nuestro profesor guía Marcelo Rojas Vidal, el cual fue clave para la toma de decisiones en este trabajo, además de su apoyo para permitir desarrollar un tema el cual lo identifica bastante.

A nuestros amigos sus buenas vibras y apoyo en momentos difíciles, Michelle Espinoza, Kevin Valenzuela, Yonatan Lira, Javier Aravena, Priscilla Maureira, Oscar Olivero, Luis Lerdón.

A nuestras hermanas y abuelos, por sus palabras y compañía, Thiare Henríquez, Andrea Saldaño, Marilyn Hernández; Margarita Rojas y Juan Bergamín (Q.E.P.D).

Por último destacar a la familia Henriquez-Bergamin, por dejarme conocerlos más íntimamente y hacerme sentir parte de ellos, lo cual es impagable, me faltara tiempo para agradecer todo lo que han hecho por mí. Espero de todo corazón que nuestra amistad verdadera perdure por siempre.

RESUMEN

KEYWORDS: PREFACTIBILIDAD, FITOESTABILIZACIÓN. TRANQUE, RELAVE

La mina comprende un conjunto de labores que permiten explotar un yacimiento con beneficio económico y tratar el mineral extraído; se puede clasificar como minería a cielo abierto o minería subterránea. Posteriormente, se emplean mecanismos como es la conminución que consiste en reducir el material extraído de la mina. Luego continúan los procesos culminantes en los que se libera las partículas minerales en la planta de tratamiento, entre los que se encuentran lixiviación, flotación o electro-obtención.

Los relaves se forman a partir de los procesos antes mencionados. Tempo atrás solían ser abandonados por la falta de normativa que regulará el cierre de faenas. Actualmente, se ha tratado de cambiar ese escenario, imponiendo leyes, para proteger los ecosistemas que están aledaños a estos depósitos.

La fitoestabilización busca remediar la contaminación que se genera en algunos terrenos donde se alojan grandes masas de material mineral, a través de una tecnología usada mediante la aplicación de especies nativas.

El primer capítulo dará a conocer los impactos que puede provocar la construcción del Tranque de relave III, su ubicación y características propias, las cuales tendrían como consecuencia la polución del mismo, que afecta no tan sólo a sus trabajadores, sino a toda la zona que lo rodea; su estabilidad, lo cual provocaría la contaminación del lugar y la deforestación propia del sector, lo que ha causado daño a la flora y fauna del espacio.

En el segundo capítulo se repasará la técnica de Fitoestabilización, viéndola desde un punto de vista, en la que se reconoce como una metodología óptima para conseguir el equilibrio adecuado para el sector.

El tercer capítulo expondrá la selección de las especies más adecuadas para ser utilizadas en el proceso de Fitoestabilización. Además, se entregará resultados sobre la base de estimaciones basada en experiencias referente a esta área.

ÍNDICE

Introducción 1

Problemática.....3

Objetivo general. 6

Objetivos específicos. 6

Capítulo 1: Identificar los potenciales impactos ambientales del tranque de relave de Minera Altos de Punitaqui, en Planta los Mantos. 8

Antecedentes Generales de compañía Minera Altos de Punitaqui.....10

1.0.- Potenciales impactos en Tranque de relave III 11

1.1.- Impacto ambiental N° 1: Construcción de Tranque de relave 11

Canal de contorno.....13

1.2.- Impacto ambiental N°2: Polución.....17

1.3.- Impacto ambiental N°3: Inestabilidad del tranque de relave 19

1.4.- Impacto ambiental N°4: Catastro de daños al ecosistema 20

Capítulo 2: Reconocer la fitoestabilización como método para mitigar los riesgos ambientales del tranque de relave N°3 de la planta Los Mantos, perteneciente a empresas Glencore. 26

2.0.- Análisis preliminar de pasivos ambientales mineros.....28

2.1.- Implementación de un proceso de plan de cierre de faenas.....29

2.2.- Pauta para elaboración de planes de cierres de faenas.....30

2.3.- Que es la Bioreremediación.....31

2.4.-Análisis de la elección del método fitoestabilización.....32

2.5.- Fitoestabilización de relaves mineros 33

2.6.- Que es la fitoestabilización.....35

2.7.- Desarrollo secuencial para el proceso de Fitoestabilización 36

2.8.- Técnicas para mitigar los impactos ambientales generados por los tranques de relave 38

Capítulo 3: Seleccionar las especies más idóneas para la Fitoestabilización del tranque de relave de la Planta Los Mantos.....44

3.0.- Importancia del tipo de vegetación para este proceso en específico 46

3.1.- Criterios básicos para escoger las especies vegetales, al momento de llevar a cabo el proceso: 47

3.2.-Fitoestabilización del Tranque de Relave 3 47

3.3.-Procedimiento para la toma de muestras 48

3.4.-Concentraciones anómalas de metales pesados en el Tranque III 49

3.5.- Elección de especies más idóneas para la fitoestabilización: 51

3.6.- Metodología de remediación de la Planta Manuel Antonio Matta Goyenechea. 56

3.7.- Estimaciones de Resultados 57

Conclusiones Recomendaciones 61

Bibliografía.....63

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1-1. Fotografía Aérea del tranque de relave III 12
Figura 1-2. Área superficial utilizado la construcción del tranque III 14
Figura 1- 3. Construcción ineficiente del canal de contorno Tranque III 16
Figura 1- 4. Construcción eficiente del canal de contorno.....16
Figura 1- 5. Dispersión de polvo de relave por acción del viento.....18
Figura 1- 6. Diferencias de material particulado.....18
Figura 1- 7. Probable trayectoria del flujo de relaves y zonas potencialmente afectadas 21
Figura 2- 1. Contaminación por relaves mineros 28
Figura 2- 2 “Cubrimiento de taludes con material estéril” 30
Figura 2- 3 “Fitorremediacion de espescies vegetales” 33
Figura 2- 4. Proceso de fitoestabilización en plantas. 36
Figura 2- 5. Área utilizada por el tranque de Planta Matta. 36
Figura 2- 6. Forestación del Tranque Los Quillayes. 37
Figura 2- 7. Evolucion de la forestacion en la Planta Matta, 2009. 38
Figura 2- 8. Efecto eólico erosivo 39
Figura 2- 9. Deslizamientos rotacionales típicos. 40
Figura 2- 10. Deslizamiento traslacional 40
Figura 2- 11. Corte o cizalladura.....41
Figura 2- 12. Cubierta forestada del Tranque III, Punitaqui. 42
Figura 3- 1. Cultivo hidropónico de especies tolerantes a Cobre. 51
Figura 3- 2. Flores de Monte de Burro (Phrodus mycrophyllus).....53
Figura 3- 3. Detalle de flores y hojas de espino, Acacia caven 54
Figura 3- 4. Imagen de cola de zorro. 55
Figura 3- 5. Fotografía de romerillo.....55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- 1. Superficie del Proyecto.....15
Tabla 1- 2. Árboles en peligro de extinción.....23
Tabla 1- 3. Arbustos en peligro de extinción 23
Tabla 1- 4. Cactáceas en peligro de extinción.....24
Tabla 1- 5. Hierbas Perennes en peligro de extinción.....24
Tabla 1- 6. Hierbas anuales o bianuales en peligro de extinción 24

Tabla 1- 7. Flora y fauna predominante del sector Punitaqui 25
Tabla 3- 1. Análisis Granuloquímico de los principales constituyentes del tranque: 49
Tabla 3- 2. Contenidos máximos de metales pesados totales permitidos en lodos aplicados a distintos suelos en Chile. 50
Tabla 3- 3. Retención de cobre en raíces y hojas de las especies utilizadas en tranque de relave Matta (En Biomasa seca).....56
Tabla 3- 4. Cálculo total de plantas para el tranque III, es el siguiente 58

SIGLAS Y SIMBOLOGIAS

HDPE: Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)

DGA: Dirección General de Aguas

CONAMA: Comisión nacional de medio ambiente

DIA: Declaración de impacto ambiental

OMS: Organización mundial de la salud

EPA: Agencia de protección ambiental

SERNAGEOMIN: Servicio nacional de geología y minería

CONAF: Corporación Nacional Forestal

MLP: Minera los Pelambres

ENAMI: Empresa Nacional de Minería

SEGPRES: Secretaría General de la Presidencia

Msnm: Metros sobre el nivel del mar

INN: Instituto Nacional de Normalización

SIMBOLOGIA

% : Porcentaje

tpd: Toneladas por día

ha: Hectareas

mm: Milímetros

pH:

Cu: Cobre

Fe: Hierro

Hg: Mercurio

Au: Oro

µg: Microgramos

m^3: Metro cubico

Anexo glosario

-Flotación: Proceso físico-químico que permite la separación de minerales sulfurados de cobre

-Nivel freático: Se le conoce como manto freático, son las aguas subterráneas del planeta.

-Metales pesados: Son metales tóxicos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas.

-Mitigar: Atenuar o minimizar alguna acción negativa.

-Fitorremediación: Corresponde a una ecotecnología, principalmente utilizan plantas que tienen la capacidad de absorber, acumular y degradar compuestos contaminantes.

-Relave: Corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados.

-Sublevel stoping: Es un tipo de método de explotación, donde el mineral se extrae por tajadas verticales de grandes dimensiones, finalmente dejando el caserón vacío.

-Geomembrana: Son carpetas de polietileno impermeables, usadas actualmente en tranques de relave para impedir el escurrimiento de soluciones toxicas a las napas subterráneas

-Escorrentias superficiales: describe el flujo del agua, lluvia, nieve, u otras fuentes, sobre la tierra, y es un componente principal del ciclo del agua.

-Erosión: Corresponde al desgaste superficial de un terreno.

-Efluente: Es el fluido procedente de una instalación industrial.

-Contaminación atmosférica: Dícese de la presencia de sustancias extrañas a la composición habitual del aire, en un lugar y durante un cierto período de tiempo.

-Ecosistema: Sistema biológico constituido por seres vivos que interactúan en un ambiente.

-Espesamiento: Consiste en un método de separar mediante sedimentación, parte del agua de una suspensión, a modo de obtener por una parte, una pulpa de mayor concentración de sólidos en la descarga y por la otra un flujo de agua clara.

-Aglomeración: Técnica de agrupación de partículas, que consiste en la adhesión de la partículas finas hacia partículas de mayor tamaños, formando partículas de tamaño homogéneo.

-Arenas cicloneadas: arena con granulometría gruesa, que fue separada del material fino.

-Pretil: Muro protector de poca altura, construido para preservar de caídas. Que en los tranques se ubican normalmente en la parte baja.

-Perennes: tratan sobre plantas que tienen la capacidad de vivir durante varias estaciones.

-Estadística Biológica: Es una rama de la estadística que se ocupa de los problemas planteados dentro de las ciencias de la vida, como la biología, la medicina, entre otros.

-Estabilidad física: Situación de seguridad estructural, que mejora la resistencia y disminuye las fuerzas desestabilizadoras que pueden afectar depósitos de una faena

-Estabilidad química: Situación de control en agua, en aire y en suelo de las características químicas que presentan depósitos de relaves, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar la reacción química que causa acidez, previniendo que entre en contacto con el agua.

-Metalófitas excluyentes: Se les atribuye a los tipos de planta que tienen tolerancia a desarrollarse en medios ricos en minerales del tipo pesados y aparten tienen la característica de acumular dichos metales en sus raíces.

-Cizalladura: Es la diferencia en la velocidad del viento o su dirección entre dos puntos en la atmósfera terrestre. La cizalladura puede ser vertical u horizontal.

-Capa vegetal: Es la cobertura de plantas (flora) salvajes o cultivadas que crecen espontáneamente sobre una superficie de suelo o en un medio acuático.

-Caudal: Cantidad de agua que lleva una corriente o que fluye de un manantial o fuente.

-Cuprífera: zona que lleva o que contiene cobre.

-Idónea: consiste en la determinación de algo, cuando esta reúne todas las condiciones necesarias para un servicio o función.

-Biomasa seca: es un tipo de materia orgánica provocada por un proceso biológico espontaneo o provocado utilizable como fuente de energía, excluyendo el agua.

-Prefactibilidad: Análisis preliminar de una idea para determinar su viabilidad para convertirlo en un proyecto.

-Endémica: que se repite frecuentemente o que está muy localizado en un lugar.

-Esteparico: Tipo de clima que posee zonas de pasto con muy pocos árboles.

-Heliofania: Cantidad de brillo del sol y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa.

Introducción

La minería forma parte de nuestra identidad como nación, siendo clave para el desarrollo de los chilenos, ya que con las grandes reservas que se encuentra a lo largo de la geografía abrupta en la que habitamos, es posible mantener una economía pujante.

Mundialmente Chile es reconocido como un país minero por su gran producción y exportación de cobre, pero no sólo se dedica a la explotación de este mineral, también existen otros recursos minerales como; molibdeno, oro, plata, hierro, manganeso, plomo y zinc, influyendo de manera positiva en los sectores, económicos, sociales y culturales. (Gajardo)

Chile cuenta con una amplia carta de mineras a lo largo de su extensa franja, existiendo así, de manera simultánea una gran cantidad de tranques de relaves.

A pesar de todos los beneficios que proporciona la minería, nos trae muchos factores que afectan el medio ambiente; deforestaciones acompañado de la eliminación de la flora y fauna, desapropiación de pueblos, entre otros. Además, uno de los problemas más cuestionables en Chile producido por las industrias de esta área, es la contaminación de los suelos por medio de relaves, los cuales tienen como propósito principal, contener materiales sólidos, líquidos y contaminantes tóxicos para el medio ambiente. Por esta misma razón se establecieron leyes que resguardan la seguridad ambiental y humana, controlando la construcción de relaves y posibles cierres de estos mismos, las que se explicarán con más profundidad en los capítulos 1 y 2.

El relave donde se centra esta investigación, se ubica en la Región de Coquimbo, específicamente en el pueblo que lleva por nombre “Punitaqui”. Dicho relave se construyó en Planta los Mantos, que pertenece a la Minera Altos de Punitaqui. Esta empresa comprende una planta de tratamiento de mineral sulfurado, por medio de flotación donde se producen concentrados de cobre y oro.

La finalidad de esta investigación es proponer una solución que genere un cambio favorable para la zona en cuestión, aplicando la técnica de fitoestabilización al tranque de relave N° 3, evitando así la propagación de sustancias tóxicas; en primer lugar por el subsuelo del relave, que puedan llegar hasta las áreas carentes de impermeabilización y como consecuencia que alcance el nivel freático; en segundo lugar que puedan escurrirse compuestos hacia el estero ubicado en la zona noreste del tranque,

el cual abastece a parte de la fauna durante ciertas temporadas. En tercer lugar se encuentra la inestabilidad de los taludes del depósito a raíz de los movimientos sísmicos acontecidos años atrás, lo que causa un inminente riesgo para la comunidad aledaña. Finalmente, la polución presente en la superficie del tranque, debido a la mala compactación de material por el uso de granulometrías heterogéneas, el que pueda llevar el viento.

La Fitoestabilización, básicamente consiste en el uso de especies nativas que permiten la estabilización química, física y biológicamente, evitando así los efectos tóxicos sobre los seres vivos y escurrimiento a napas subterráneas.

Problemática

Uno de los grandes daños ocasionados al medio ambiente surge a raíz de las actividades mineras, que para llevar a cabo sus etapas, deben adoptar distintas técnicas para conseguir el beneficio económico, es por esto que el método de remediación ha tomado un grado de mayor importancia, para mejorar dichas consecuencias, cuyas repercusiones llegan a ser desastrosas.

Los tranques de relaves no son una excepción y constituyen uno de los mejores ejemplos que deja más en evidencia de la contaminación ambiental de suelos, los que al cabo de los años se han ido incrementando. Años atrás se dejaban en estado de abandono sin importar lo nocivo que pueden llegar a ser para un ecosistema. Sin embargo, actualmente se han establecido nuevas leyes que resguardan las inmediaciones dispuestas para depósito de residuos sólidos peligrosos, de material residual.

En este trabajo de titulación se usará como referente el tranque III, para el que se busca proponer la metodología de fitoestabilización como medida de mitigación, ya que por estudios aplicados se detectó concentraciones altas de metales pesados, específicamente en Cu y Fe, cuyos valores de contaminación de los suelos, ascienden a 2600 y 10400 mg/kg respectivamente, los cuales sobrepasan 20 veces la normativa utilizada (Ley Federal Alemana y la Norma de Lodos NCh 2952) de manera exponencial, siendo 100 mg/Kg el límite permisible para el cobre.

Los riesgos inminentes ante la presencia de este tranque, han generado bastante controversia, partiendo por la inestabilidad del mismo, producto de la diversificación presente en el material escogido para su composición, lo que tiende a aumentar la probabilidad del derrumbe; en segundo lugar se encuentra la polución en la superficie del tranque, a causa de la gran presencia de finos acumulados en esa parte, que sumado al tipo de clima del sector permite trasladar este tipo de partículas finas a otras zonas, en las que pueden ir metales pesados, teniendo como consecuencia la contaminación de las áreas donde puedan llegar éstas partículas, aumentando la posibilidad de escurrir hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneas.

Ante estas eventualidades se plantea la técnica ya especificada, que permitirá mejorar de forma significativa en su mayoría los problemas presentes en el Tranque III, consistiendo en la reforestación total del tranque, que evitará la erosión superficial del terreno dando mayor firmeza a lo largo del mismo, minimizando la posibilidad de derrumbe y conjuntamente disminuirá los excesos de material particulado suspendido en el ambiente. Por ultimo evitará el escurrimiento de los metales tóxicos hacia las napas subterráneas cercanas al tranque, acumulando metales en diferentes partes de las

especies vegetales como en sus raíces por medio de la técnica de fitoestabilización, o bien, absorbiéndose en la planta baja y aérea a través de la fitorremediación.

Objetivo general.

Evaluar la perfectibilidad técnica de la Fitoestabilización del Tranque III, a partir de los contaminantes presentes en el relave.

Objetivos específicos.

A. Identificar los potenciales impactos ambientales del tranque de relave de Minera Altos de Punitaqui, en la Planta los Mantos.

B. Reconocer la fitoestabilización como método para mitigar los riesgos ambientales del tranque de relave III de la Planta Los Mantos, mediante análisis por absorción atómica.

C. Seleccionar las especies idóneas para la fitoestabilización del tranque de relave de la planta Los Mantos, a través de las propiedades de las plantas.

Capítulo 1: Identificar los potenciales impactos ambientales del tranque de relave de Minera Altos de Punitaqui, en Planta los Mantos.

Antecedentes Generales de compañía Minera Altos de Punitaqui

En sus comienzos, la actual Minera Altos de Punitaqui, pertenecía a inversionistas australianos, la cual era denominada como “Minera Tamaya”, que luego de sus pérdidas, que la llevaron a la bancarrota, fue rematada, lo que derivó que durante el año 2010 fuese adquirida por la multinacional Glencore International Plc.

La compañía Minera Altos de Punitaqui, trabaja a la par con varias empresas que cumplen roles de prestar servicios complementarios, donde conjuntamente producen concentrados de cobre y oro principalmente. La etapa de producción, (perforación, tronadura, carguío y transporte) se desarrolla en las faenas de empresa Cinabrio y Minera Punitaqui; posteriormente el material ya extraído se deriva a Planta los Mantos, que emplea técnicas de conminución y flotación para la liberación del material de interés, consiguiendo recuperaciones por sobre el 90%. (Contacto directo con Guinel, 2016).

Las necesidades de agilidad en los procesos de la compañía, desencadenaron en una serie de modificaciones, en el año 2013 la empresa comenzó a comprar material con mineral de interés a otras pequeñas mineras, además de minera Cinabrio, los que a fin de cuentas permitirían aumentar la producción de Planta los Mantos, al enfocarse en realizar una parte del proceso de obtención de concentrados

La capacidad de la planta presentó alcanzar tonelajes óptimos, bordeando las 3400 tpd. A pesar del buen rendimiento, la Minera Punitaqui fehacientemente, solo puede entregar un total de 3200 tpd, como la minera no abastece en su totalidad la capacidad de la planta quedan 200 tpd las que se consideran como una cantidad disponible que puede usarse para venta, lo que se considera bajo pero que se espera un incremento para el futuro. (MWH, 2007).

La minera subterránea Cinabrio está ubicada en el sector de Potrerillo Alto, a 15 kilómetro de Ovalle, en el Cerro La Campana, la cual posee un nivel de profundidad de 370 metros, con tres kilómetros de túneles.

El método de explotación que se efectúa en el yacimiento es *sublevel open stoping*, donde la ley de su mineral es de 1,3% de cobre, con porcentajes de contenido de plata.

Al presente se tratan 1,1 millones de toneladas de mineral al año, cantidad que no mostrara grandes variaciones durante el 2013. Esto quiere decir que actualmente entrega

a exportación 45.000 toneladas de concentrado de cobre, lo que corresponde a 12.000 toneladas de cobre fino.

1.0.- Potenciales impactos en Tranque de relave III

1.1.- Impacto ambiental N° 1: Construcción de Tranque de relave

Los efectos más cuestionados de los procesos mineros tienen relación con el medio ambiente y la salud de las personas, tanto a mediano como a largo plazo. Es por esto, que se han tomado medidas de mitigación las que permitirán desarrollar de mejor forma las etapas de elaboración de depósitos de material residual y de este modo disminuir los posibles impactos a presentarse en un futuro en Minera Altos de Punitaqui Ltda.

El proceso de construcción de un depósitos de relaves, forma una de las partes más importante dentro de las faenas mineras, para ser más certeros en el área de metalurgia, ya que es ahí donde se desarrolla el proceso de flotación, etapa en la que se obtiene por un lado la liberación del metal de interés desde los sólidos que lo contienen y por otro, el material residual que conforman la ganga que va directamente a los ya mencionados pasivos ambientales. Cabe destacar que si bien este proceso es bastante efectivo para minerales sulfurados, los residuos que genera aún contienen ciertos metales pesados que al acumularse en bajas cantidades pueden sobrepasar los límites permisibles convirtiéndose en materiales tóxicos, por este hecho se debe dar énfasis a los aspectos técnicos constructivos, que ha tenido la minera desde sus inicio de actividades en el Tranque de relaves N° III, ver Figura 1-1.

Figura 1-1. Fotografía Aérea del tranque de relave III

Fuente: Google Earth, 2017

1.1.2-Declaración de Impacto Ambiental enfocada en la infraestructura del tranque.

El trabajo de elaboración del Tranque III se describe a continuación desde su puesta en marcha hasta el la evolución de su factibilidad que ha tenido a través del tiempo, ver Figura 1-2.

1.1.2.1.-Aspectos Técnicos-Constructivos del Tranque

La empresa de la Minera Altos de Punitaqui Ltda., realizó durante julio de 2007 una declaración de impacto ambiental, donde postularon una serie de puntos para que se aceptara el comienzo de sus actividades. El material considerado para el tranque tiene origen de la Planta Los Mantos, que a su vez trabaja con el mineral que viene de Mina Cinabrio. La capacidad volumétrica del relave estimada por la minera es de 3.800.000 toneladas de roca seca basándose en el hecho de que alcance una producción diaria de 3000 tpd, durante un periodo de 3,5 años. La forma final que tendría el tranque sería de un polígono y se ubicaría a una altura de 296 m.s.n.m. (RAMIREZ,2007).

1.1.2.2.-Obras físicas a realizarse para el proyecto:

Para conseguir un desarrollo óptimo del proyecto en su totalidad, se debe llevar a cabo cada una de las exigencias que solicita la entidad fiscalizadora, las contempladas por este relave son las siguientes:

Muro de partida:

En este aspecto se consideró en primer lugar contar con un suelo previamente preparado, el cual está compuesto por grava arenosa, que en su mayoría reflejo ser de alta competencia. La profundidad de la composición del material del suelo alcanza no más de 10 metros, para asegurar que no se presenten escurrimientos por el relave, de modo que pueda afectar las napas, para evitar dicho hecho se usó una lámina permeable de 1.5 mm. La altura máxima determinada fue de 27 m quedando a 286 m por sobre el mar y el método utilizado fue de aguas arriba. Cabe destacar que dicha técnica si bien se menciona, no está estudiada por la legislación vigente. Ramírez, (2007) a nivel de verificar su efectividad en comparación con otros.

Sistema de drenaje:

Esta obra tiene la finalidad de captar el agua que se forma producto de la acumulación de arenas, para evitar sobrecargos al mismo muro conformado, evitando un posible colapso. Utilizando alfombras de drenaje de 0,5 m, que a su vez está protegida con una geomembrana antifiltraciación, posteriormente dichas alfombras conectan con tubos HDPE, los que descargan las aguas a unas cámaras cuya capacidad máxima es de 216 m3, también revestida por HDPE. Las aguas captadas luego se ocupan para desarrollar las diferentes operaciones de la planta.

Canal de contorno:

Durante los meses entre mayo y julio se aprecian mayores probabilidades de precipitaciones, para esto se construyó un canal de contorno cuya longitud determinada por la minera fue de 486 m, el que terminaría conectando con la quebrada los mantos por

el extremo noroeste. La finalidad de la construcción de esta obra surge por la necesidad de evitar escorrentías superficiales, que de cierto modo ayudará a proteger los taludes del relaves evitando su destrucción, la empresa estableció, que el conducto debía tener una pendiente del 1% y que para mayor seguridad se le aplicaría revestimiento en la parte baja (CERDA, 2013).

Protección fluvial:

Para prevenir la erosión superficial en las inmediaciones del tranque de relave N° 3, se han tomado medidas de resguardo en el canal que circula el agua hacia la quebrada durante eventos de lluvia, la que consiste en la construcción de un muro soporte, ubicado en la parte inferior del muro de arenas, para que de este modo se eviten colapsos en el efluente.

Figura 1-2. Área superficial utilizado la construcción del tranque III

Fuente: Copyright ©, 2017

1.1.3- Superficie utilizada para el Tranque de relave III

Para el proyecto se contempló en su etapa de evaluación, que su superficie abarcaría una longitud de 18,2 ha, ver Tabla 1-1.

Tabla 1- 1. Superficie del Proyecto

Ítem	Superficie (m2)
Área embalse cota final	87,490
Área muro cota final	81,141

Fuente: Declaración de impacto ambiental Tranque III

1.1.4.-Infracciones detectadas por la Súper Intendencia de Medio Ambiente

En junio de 2013 se registró una falla en el sistema eléctrico de la Planta Los Mantos, lo que trajo repercusiones para el desarrollo de sus procesos, debido al derrame de aguas provenientes de la etapa de flotación y de las bombas de relave, las que terminaron alcanzando el estero Los Mantos y que consecuentemente pudieron haber afectado las napas subterráneas con la presencia de metales pesados, como; Cu, Fe, Mn. Para esto se realizaron estudios los cuales fueron evaluados por la DGA en base a lo que establece la N.Ch 1.333, (CONAMA, 2001).

Dentro de las no conformidades detectadas por la Superintendencia de Medio Ambiente son:

- Ausencia de impermeabilización de los suelos por donde se ubican dos de las tuberías de conexión de la planta con el relave.
- El canal de contorno del tranque carece de revestimiento a diferencia de lo que se detalló en la DIA hecha en 2007 por la minera, el cauce no presenta el mismo ancho a lo largo de su longitud y se ubica en zonas donde se ven taludes mal edificados, ver Figura 1-3, ver Figura 1-4.

- Ineficiente plan de contingencia de la empresa, enfocado a situaciones de derrame de riles, que termine perjudicando las zonas aledañas al tranque.

Figura 1- 3. Construcción ineficiente del canal de contorno Tranque III

Fuente: Informe de Fiscalización Ambiental, 2013

Figura 1- 4. Construcción eficiente del canal de contorno

Fuente: Informe de Fiscalización Ambiental, 2013

1.1.5.- Modificaciones a la infraestructura del tranque realizadas hasta la fecha:

Como se especificó anteriormente, las actividades correspondientes a las obras físicas calculadas por la administración de Minera Punitaqui, delimitaron que hasta 2013 se mantendría operativo el tranque. Sin embargo, se pudo apreciar durante la temporada de verano del presente año 2017, que aún se continúa con los trabajos en el depósito de material residual. Dentro de los cambios realizados se encuentran los siguientes:

- Reparación de las infracciones detectadas por la Superintendencia del medio ambiente
- Aumento en 10 m la altura del tranque quedando finalmente en 37m.
- En sus inicios el tranque usaba el método de aguas arriba, en cambio, actualmente desarrolla la técnica de eje central.

1.2.- Impacto ambiental N°2: Polución

La contaminación atmosférica es un tema que se ha evidenciado desde el siglo XX y que a través del tiempo producto de la aparición del área industrial, se han incrementado los niveles de material particulado suspendidos en el ambiente. Se ha demostrado por medio de diferentes organismos, uno de ellos es la O.M.S, que la polución produce efectos severos en las personas, principalmente enfermedades cardiorrespiratorias, los efectos pueden demostrarse a corto, como a largo plazo y en algunos casos estas enfermedades son irreversibles. Por otra parte, el medio ambiente también se ve perjudicado a escala de flora y fauna silvestre, por lo que se han desarrollado leyes (Ley 19300, 1994) para el resguardo de los ecosistemas donde se desarrollen actividades que puedan afectar de una u otra forma al entorno de donde se ubica la labor y que provoque impactos negativos, ver Figura 1-5.

El material particulado en Chile se genera mayoritariamente por el sector minero, por ello se han tomado diferentes medidas para mitigar su producción con la finalidad de ir disminuyendo. Su presencia es posible diferenciarla en $MP_{2,5}$ que abarca a las partículas que son muy finas, cuya capacidad de entrar en el sistema respiratorio es tan alto que consecuentemente puede terminar en los alvéolos pulmonares causando diferentes enfermedades e influye significativamente disminuyendo la mortalidad de los individuos afectados (Conama,2010). Asimismo el MP_{10} se le denomina a partículas de fracción gruesa, que en su mayor grado no se le reconoce como un riesgo latente para las personas según la literatura técnica disponible de (EPA, 2009), ver Figura 1-6.

Figura 1- 5. Dispersión de polvo de relave por acción del viento

Fuente: http://www2.inia.cl

Guías

$MP_{2,5}$:	**10 $\mu g/m^3$, media anual** **25 $\mu g/m^3$, media de 24 horas**
MP_{10}:	**20 $\mu g/m^3$, media anual** **50 $\mu g/m^3$, media de 24 horas**

Figura 1- 6. Diferencias de material particulado

Fuente: Guías de calidad del aire de la OMS, 2005

1.2.1 Granulometría del Relave III

La disposición de material residual acumulado en el tranque demostró ciertas irregularidades, debido a que no se utilizaron rocas de granulometría similar, lo que trajo como consecuencia una acumulación de finos en su superficie, esto repercute de tal magnitud que por ser un clima semidesértico, nos indica que se generan masas de aire

que se distribuyen a velocidades por sobre lo normal, trayendo como consecuencia que este material particulado termine ubicándose en sectores aledaños al tranque, los que pueden constituir elementos de alta densidad y que en concentraciones bajas suele ser tóxicos.

Para evitar la propagación de finos la Minera Punitaqui, se ha planteado desarrollar su pronto cierre de faenas, donde se aplicará una técnica de aglomeración para la superficie del tranque, seguido de una capa de espesamiento, lo que debería contener el material y así que por acción del viento no sea transportado. Finalmente para su cierre definitivo y como una medida de remediación de ese entorno, se propone realizar la Fitoestabilización del tranque.

1.3.- Impacto ambiental N°3: Inestabilidad del tranque de relave

El clima en la comuna se caracteriza por ser estepárico de interior y tiende a ser secano a semidesértico. El sector tiene la particularidad de ser muy luminoso y seco, su principal característica es su gran heliofanía, con poca nubosidad y fuerte insolación, provocando que sus temperaturas sean más elevadas que el sector costero y con pronunciadas oscilaciones térmicas; las lluvias son pocas y variables por lo que la humedad atmosférica es baja, con muy poca pluviométrica entre 150 a 280 mm en los meses de junio a septiembre; en verano las temperaturas varían con mínimas de 10° y máximas de 40°; en invierno, mínimas de –3° y máximas de 23° (Dpto. de turismo IMMP, 2016)

Antes de construir un tranque de relave se deben considerar algunos factores, para que tenga buena resistencia al momento de enfrentar cualquier anomalía que pueda suceder, tales como temblores o terremotos, erosión superficial, entre otros. En el caso del tranque de relave III, sólo resiste un sismo grado 8.4 en la escala Richter, lo cual nos demuestra que no tiene una estabilidad muy alta en el caso de un sismo mayor, basándose en el hecho de los movimientos telúricos de gran intensidad acontecidos durante los últimos años(Contacto directo con Guinel, 2016).

Existe un método que ofrece más seguridad en contención, se llama “aguas abajo”. El proceso se basa en colocar las arenas de forma que el coronamiento del muro se deslice hacia el exterior a medida que se agranda el tranque. Por el contrario, la fracción fina se deposita aguas arriba. La mayor seguridad del método “aguas abajo”, se refleja en que la obra es más estable frente a movimientos externos como temblores o terremotos. Debido al drenaje natural y a la compactación, la construcción con las arenas

cicloneadas se va apoyando sobre arenas depositadas previamente que tienen menor contenido de agua, por lo que el muro es más resistente. (SERNAGEOMIN, 2003)

Si llegase a producirse un sismo mayor a 8.4 y se derrumbase el tranque, este contaminaría todo el suelo a su alrededor, incluyendo el estero que conecta la planta con el pueblo de Punitaqui.

Es por esto que se propone la fitoestabilización en el relave, para mitigar el relave, teniendo mayor resistencia e inmovilizando la mayor cantidad de metales pesados.

1.4.- Impacto ambiental N°4: Catastro de daños al ecosistema

El hecho de construir un tranque de relave es nocivo para el ecosistema, ya que lo primero que se realiza es la deforestación del lugar, dando paso a la contaminación del suelo, la flora y fauna del lugar, cabe destacar que dentro de la región de Coquimbo existen diversas especies que están en peligro de extinción.

En la comunidad de Punitaqui se encuentran muchas especies en estado vulnerable, donde podemos encontrar especies nativas como introducidas. Un problema latente en el lugar es la desertificación y pérdida de la cobertura vegetal, debido principalmente, a las actividades mineras, el desarrollo de la ganadería caprina y la preparación de nuevas tierras para cultivar (Universidad de la Serena, 2014)

Además de la vulnerabilidad de la flora, la fauna propia del lugar ha sufrido grandes daños, su hábitat ha sido destruido y acotado en pequeños lugares, además de la disminución de la fuente hídrica para poder subsistir, recordando que es un clima con pocas precipitaciones.

El tranque de relave III, se construyó a un costado del estero Los Mantos, generando una fuente de contaminación para el pueblo y la fauna que existe en el lugar, pero la minera tomó medidas de prevención, por si ocurriera un colapso del tranque ante cualquier situación. Construyó un pretil de seguridad, al borde norte de la zona llamada Pueblo Nuevo, con el objeto de dirigir y guiar un fortuito flujo de relaves líquidos, hacia la zona agrícola (parronales), garantizando de este modo ante alguna contingencia, que el flujo no llegue de ninguna forma al poblado. Además de esta medida de seguridad se propone utilizar la fitoestabilización, para que trabaje en conjunto con esta medida (POCH Ambiental, 2013), ver Figura 1-7, ver Figura 1-8.

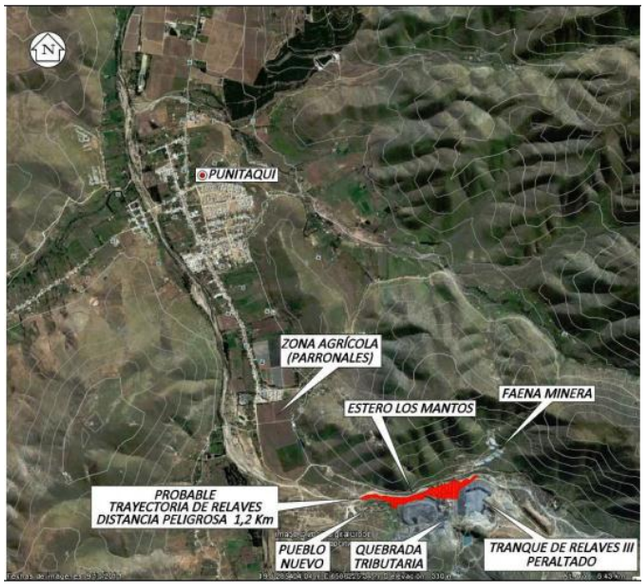


Figura 1- 7. Probable trayectoria del flujo de relaves y zonas potencialmente afectadas

Fuente: Análisis de Estabilidad Estática y Pseudo- estática del Tranque III peraltado, SNC LAVALIN

Figura 1-8. Pretil de seguridad ante eventual distancia peligrosa

Fuente: Análisis de Estabilidad Estática y Pseudo- estática del Tranque III peraltado, SNC LAVALIN

1.4.1.- Flora y fauna de la IV región de Coquimbo

La fauna presente en la región, está formada por especies tales como; el Zorro Culpeo, el Chungungo y el Lobo de Pelo; hay asnos que viven en estado salvaje en la precordillera andina, Guanacos, Chinchillas, Gatos de Monte, Vizcachas y pequeños roedores destacando el marsupial "yaca", Garumas, Liles, Petreles Chercanes, Tordos, Cernícalos, Chunchos y muchas otras especies de aves, mariposas, coleópteros, entre otros.

En la Reserva Nacional Pingüino de Humboldt, resalta la presencia de la especie faunística Pingüino de Humboldt, y de otras como Pato Yunco, Guanay, Chungungo y lobos marinos que forman sus numerosas loberas. También se encuentra la presencia de una colonia residente de la especie Delfín Nariz de Botella, que se desplaza habitualmente entre las islas. (Gobierno regional, CONAF, SERNATUR)

La vegetación natural de los alrededores de La Serena y Coquimbo, los espinales, fueron explotados con mucha intensidad, desde la llegada de los españoles, lo que generó la parcial extinción de esta especie.

Como ya se mencionó anteriormente, dentro de la región existen especies que están en peligro de extinción, en las siguientes tablas se nombraran estas especies y el lugar donde predominan.

Abreviación de las comunas en que la especie está presente

Provincia Elqui:	Provincia Limarí:	Provincia Choapa:
LH= La Higuera	RH= Río Hurtado	CA= Canela
VI= Vicuña	OV= Ovalle	IL= Illapel
LS= La Serena	MP= Monte Patria	SA= Salamanca
CQ= Coquimbo	PU= Punitaqui	LV= Los Vilos
PA= Paihuano	CM= Combarbalá	
AN= Andacollo		

Tabla 1- 2. Árboles en peligro de extinción

EN PELIGRO																
ÁRBOL	ELQUI							LIMARÍ					CHOAPA			
Caesalpinia spinosa		VI	LS	CQ			AN	OV	MP							
Citronella mucronata								OV					CA			LV
Drimys winteri				CQ				OV	MP				CA	IL	SA	LV
Escallonia revoluta								OV					CA	IL		LV
Jubaea chilensis																LV
Kageneckia angustifolia									MP			CM		IL	SA	
Lomatia dentata																LV
Monttea chilensis	LH	VI	LS	CQ				OV			PU		CA	IL		
Pouteria splendens													CA			LV
Prosopis flexuosa		VI				PA								IL		
Sophora macrocarpa																LV

Fuente: Francisco A. Squeo, Gina Arancio, Clodomiro Marticorena & Mélica Muñoz.

Tabla 1- 3. Arbustos en peligro de extinción

EN PELIGRO																
ARBUSTO	ELQUI							LIMARÍ					CHOAPA			
+ *Adesmia littoralis*	LH			CQ												
+ *Atriplex coquimbana*			LS	CQ				OV								
Balsamocarpon brevifolium	LH	VI	LS													
+ *Calceolaria robusta*								OV								
+ *Chorizanthe frankenioides*	LH		LS	CQ												
Dennstaedtia glauca						PA										
Gaultheria mucronata								OV								
Haplopappus integerrimus									MP	PU	CM			IL		
+ *Haplopappus meyenii*								OV		PU			CA			
Lapageria rosea								OV								
+ *Myrcianthes coquimbensis*	LH		LS	CQ												
Passiflora pinnatistipula																LV
Proustia pyrifolia													CA			LV
+ *Senecio coquimbensis*	LH			CQ				OV		PU						
+ *Senecio munnozii*																LV
Skytanthus acutus	LH															
+ *Verbesina saubinetia*			LS	CQ												

Fuente: Francisco A. Squeo, Gina Arancio, Clodomiro Marticorena & Mélica Muñoz.

Tabla 1- 4. Cactáceas en peligro de extinción

EN PELIGRO			
CACTÁCEA	ELQUI	LIMARÍ	CHOAPA
Eriosyce kunzei	LH VI PA	RH MP	IL
Eulychnia breviflora	LH LS CQ		

Fuente: Francisco A. Squeo, Gina Arancio, Clodomiro Marticorena & Mélica Muñoz.

Tabla 1- 5. Hierbas Perennes en peligro de extinción

EN PELIGRO			
HIERBA PERENNE	ELQUI	LIMARÍ	CHOAPA
+ *Calceolaria picta*	LH LS CQ	RH	
+ *Galium leptum*	VI	MP	
+ *Leucocoryne conferta*			IL LV
+ *Peperomia coquimbensis*		OV	
Peperomia doellii	LH LS		

Fuente: Francisco A. Squeo, Gina Arancio, Clodomiro Marticorena & Mélica Muñoz.

Tabla 1- 6. Hierbas anuales o bianuales en peligro de extinción

EN PELIGRO			
HIERBA ANUAL O BIANUAL	ELQUI	LIMARÍ	CHOAPA
+ *Viola aurata*	VI LS PA		

Fuente: Francisco A. Squeo, Gina Arancio, Clodomiro Marticorena & Mélica Muñoz.

Extracto de especies predominantes del sector de Punitaqui, ver Tabla 1-7.

Tabla 1- 7. Flora y fauna predominante del sector Punitaqui

Flora	**Fauna**
Algarrobo	Viscacha
Palqui	Cóndor
Maitén	Zorro Chilla
Chañar	Aguilucho
Espino	Diucas
Pimiento	Colibrí
Colliguay	Garza cuca
Quisco	Torcaza
Pulpica	Degú
Tara	Tricahue
Retamo	

Fuente:http://www.munimontepatria.cl/turismo/?action=documento&id_documento=94

Capítulo 2: Reconocer la fitoestabilización como método para mitigar los riesgos ambientales del tranque de relave N°3 de la planta Los Mantos, mediante análisis por absorción atómica.

2.0.- Análisis preliminar de pasivos ambientales mineros

Antiguamente en Chile, no se contaba con una buena base legislativa referente al área. Por lo que se realizaban prácticas que iban en contra de la naturaleza, en donde era común que empresas eliminaran sus productos residuales provenientes de las operaciones de segregación y liberación mineralógica, vertiendo desechos a zonas hídricas. Tales como: lagos, valles, ríos y mares, entre otros. En cambio, cuando dichas organizaciones no disponían de sectores formados por la naturaleza como los ya mencionados, destinaban el material a zonas específicas en donde lo acumulaban, de tal forma que se contenían mediante el uso de terraplenes, cuya fabricación era con el mismo material rocoso desechado, para finalmente cuando se agotaban las reservas de mineral de interés al interior del yacimiento, los tranques de relave se abandonan sin importar las condiciones de estabilidad física y química del sector en específico y los impactos que generaría en su entorno (SERNAGEOMIN, 2010), ver Figura 2-1.

Figura 2- 1. Contaminación por relaves mineros

Fuente: Diario Correo La Libertad, 2010

Remontándose al siglo XX, donde el área minera tuvo un crecimiento sostenible en lo que respecta a su explotación cada vez mayor, impulsado por la incorporación de tecnologías avanzadas, las cuales permitieron este balance positivo, viéndolo desde el ámbito económico. pero que acarreaba con un determinante clave en estos procesos, cada vez más a la baja, cuya denominación es la Ley Mineral; este parámetro produjo la

extracción masiva a escala cuantitativa, de material rocoso desde yacimientos mineros, acumulando hasta el año 1990, 22.060.646 m^3 en 341 depósitos de la Región de Coquimbo (SERNAGEOMIN, 1990)

Hoy, felizmente en minería, se cuenta con la ley cierre de faena, que comenzó a regir desde el año 2011, a su vez dicha legislación se sustenta por la regulación 20.551, la cual fue desarrollada por las siguientes razones:

- Las consecuencias desfavorables de la Industria Minera Extractiva, no eran reguladas con una normativa específica.
- Hacer valer el concepto "el que contamina paga", es decir, las empresas mineras, deben hacerse cargo de los daños que producen los materiales contaminantes lanzados sin ningún cuidado al medio ambiente.
- Terminar con la formación de Nuevas Faenas Mineras Abandonadas.
- La empresa se debe comprometer con el estado a través de una cifra monetaria la cual permita solventar los gastos de los terrenos usados, en el caso de que la faena no lleve un plan de cierre de faena.

Los principales objetivos de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras son:

- Velar por la vida, salud y seguridad de las personas y del Medio Ambiente.
- Disminuir las consecuencias negativas de la producción en la industria minera.
- Impedir el Abandono de faenas mineras al término de las operaciones realizadas después de los procesos de extracción.
- Controlar la estabilidad física y química de las zonas donde se efectué la actividad minera (SERNAGEOMIN, 2011).

2.1.- Implementación de un proceso de plan de cierre de faenas

Minera Altos de Punitaqui, a pesar de seguir con sus labores de recuperación de concentrados de cobre y oro, en Planta los Mantos, pretende implementar a corto plazo un plan de cierre para el Tranque de relave III, donde se aplicó en los taludes del relave una capa compuesta de material estéril de granulometría diversa (Guinel 2017), para evitar la excesiva polución que genera el tranque, posteriormente la compañía pretende

agregar una capa de material espesado, proveniente de los desechos de los procesos de flotación de sulfuros. Al término de esta medida que tomara la empresa, se implementar la medida de remediación llamada fitoestabilización, ver Figura 2-2.

Figura 2- 2 “Cubrimiento de taludes con material estéril”

Fuente: Fotografía de Stefania Henríquez

2.2.- Pauta para elaboración de planes de cierres de faenas

En este punto se detallan los parámetros que deben considerar las faenas mineras cuando se disponen a realizar la finalización de las operaciones, partiendo por la especificación de la capacidad que tenga la planta mensualmente. (Chile Ministerio de minería, 2014).

1. Resumen Ejecutivo.
2. Índice.
3. Tipo de Plan de Cierre.
4. Antecedentes Generales de la Faena.
    - 4.1 Identificación de la Faena Minera
    - 4.2 Ubicación de la Faena Minera
    - 4.3 Descripción de la Faena Minera.
    - 4.4 Duración del Proyecto.
5. Resumen de las Resoluciones de Calificación Ambiental del Proyecto.
6. Descripción del Entorno.

7. Metodología de Evaluación de Riesgos.

8. Instalaciones de la Faena Minera.

    8.1 Características de la Instalación.

    8.2 Ubicación de la Instalación.

    8.3 Evaluación de Riesgos de la Instalación.

    8.4 Compromisos de la(s) Evaluación (es) Ambiental (es).

    8.5 Medidas y Actividades de Cierre Propuestas para la Instalación.

    8.6 Programación de Medidas y Actividades de Cierre de la Instalación.

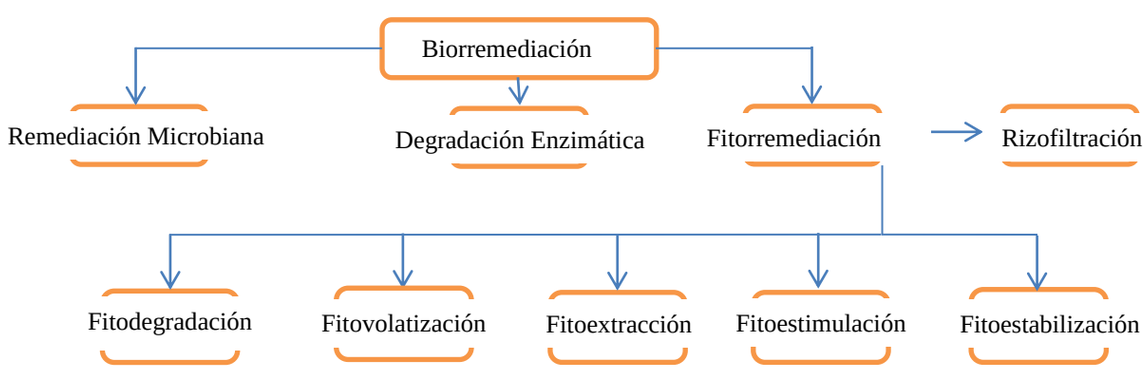
9. Actividades de Post Cierre y Monitoreos por instalación.

10. Anexos.

2.3.- Que es la Biorremediación

Para poder remediar sectores contaminados, existe un método llamado Biorremediación, el cual usa seres vivos (microorganismos, plantas y hongos), se utiliza cuando la contaminación ha dañado los ecosistemas. Esta técnica no elimina los contaminantes, ya que el encargado de hacer esta labor se denomina depuración, dicha eliminación emplea métodos físico/químico o biológicos, pudiendo alcanzar el objetivo de exterminar componentes pesados. (Pérez, 2016)

Mapa conceptual sobre las ramas de la Biorremediación



2.4.-Análisis de la elección del método fitoestabilización

El motivo por el cual se escogió una de las técnicas de fitorremediación, es básicamente por el doble gasto, que se generaría al usar en primer lugar algunos de los otros dos métodos de la biorremediación, ya que al finalizar, por ejemplo, la degradación enzimática o remediación microbiana, la superficie del terreno del relave se mantendría con las mismas características físicas, produciendo que los impactos mencionados en el primer capítulo persistan, a excepción de la estabilización química del suelo. A su vez, una de las ramas elegidas de dicho método para implementar, es la fitoestabilización, por ser la más acertada alterando el curso de evolución de la contaminación y por otro lado, establecer un futuro ecosistemas para la fauna propia del sector, a diferencia de técnicas como: Fitoextracción, que para cumplir con su funcionamiento óptimo, al terminar la absorción de los metales a su biomasa, deben sacarse los arboles de la zona remediada, destinándolos a otros sectores, en otras palabras se estaría llevando el problema a otro lugar, ya que si un animal se llegase a alimentar de esta planta, particularmente de hojas y tallo, puede provocar la muerte del mismo, destacar que las especies usadas de esta metodología no presentan algún riesgo para los animales, porque dichas especies nativas no son parte de su dieta alimenticia; La Rizofiltración, en cambio, absorbe, precipita y concentra en sus raíces contaminantes, provenientes de aguas subterráneas cargadas, degradando compuestos orgánicos, restringiendo su capacidad de trabajo, bajando los niveles de efectividad en relaves como el que se está analizando, donde no se cuenta con una vasta presencia acuífera; La Fitoestimulación, el enfoque de trabajo que tiene esta técnica, radica en la liberación de exudados radiculares, principalmente para el tratamiento de hidrocarburos derivados del petróleo, reflejando que no es aplicable en su totalidad para el tranque en cuestión, esto se debe a la gran presencia de silicatos y su casi nula existencia de hidrocarburos; La Fitovolatilización, consiste en la captación de los metales en sus hojas, para luego liberarlos a través de un proceso de transpiración hacia la atmosfera, siendo probable que los contaminantes repercutan nuevamente en el ambiente. La Fitodegradación, como su nombre lo indica, degrada contaminantes que comprenden algunos tipos de municiones, atrozina, solventes clorados, pesticidas, entre otros. Dejando en claro, que esta tecnología no es acorde a los contaminantes presentes en el tranque, interfiriendo su posibilidad de uso.

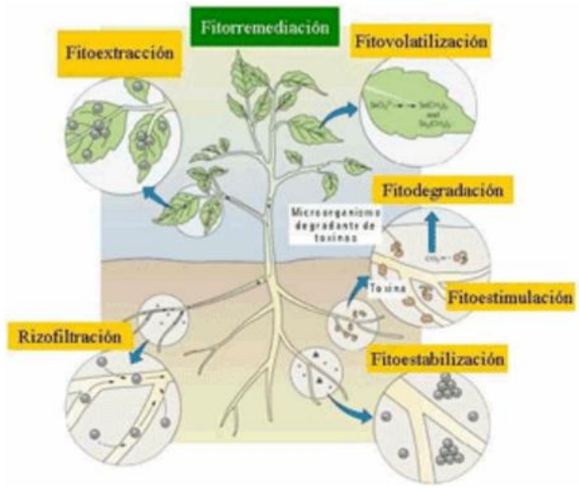


Figura 2- 3 “Fitorremediacion de espescies vegetales”

Fuente: ® Copyright ArgenBio, 2007

2.4.1-Análisis químico

Según el análisis realizado al tranque de relave III, se ha podido reconocer que existen las condiciones necesarias, que facultan el desarrollo de la técnica de fitoestabilización, por su presencia de metales pesados, dando a conocer que el cobre y el hierro (Ver capítulo 3.4) están sobre los límites permisibles, según las legislaciones Norma lodos NCh2952c-2004 y Ley Federal Alemana BBoSchG/1999, ver Figura 2-4.

Determinación de concentración de Cu, Fe, S y Zn en base de un kg de mineral:

Especies	% EN PESO	Cu	Fe	S	Zn
Calcopirita	0,48	0,17	0,15	0,17	
Calcosina	tz				
Bornita	0,15	0,09	0,02	0,04	
Blenda	0,35			0,12	0,237
Rutilo	0,36				
Pirita	0,74		0,34	0,39	
Hematita	0,45		0,31		
Magnetita	0,30		0,22		
Ganga	97,17				
TOTAL	100,00	0,26	1,04	0,72	0,237

GUARACHI INGENIEROS LTDA 1

MUESTRA: COMPOSITO RELAVE

1. Especies mineralógicas.

Calcopirita	$CuFeS_2$
Calcosina	Cu_2S
Bornita	Cu_5FeS_4
Blenda	ZnS
Rutilo	TiO_2
Pirita	FeS_2
Magnetita	Fe_3O_4
Hematita	Fe_2O_3
Ganga no metálica	

El 97,17% de la muestra corresponde a ganga no metálica o silicea.

Calcopirita (0,48%) y bornita (0,15%), sólo trazas de calcosina.

Abundante presencia de blenda (6,05%)

La blenda se presenta en calidad de indicios en un 0,35%.

La ganga de hierro está conformada por pirita, hematita y magnetita.

Av.L.Thayer Ojeda 0191 - Of.1006 Fono: 3341041 / 42 Fax: 3341041
Providencia - Santiago www.guarachi.cl E-mail: cperez@guarachi.cl

Figura 2- 4 “Especies mineralógicas presentes en el Tranque de relave III”

Fuente: Carmen Pérez Delard, 2017.

2.5.- Fitoestabilización de relaves mineros

Para contrarrestar el incremento de metales pesados en los suelos, se han implementado diferentes metodologías de remediación. Estos suelos ricos en metales son muy complejos de volver a su estado de un principio, ya que estos elementos que no consiguen ser degradados químicamente. Por lo tanto, los tratamientos utilizados comúnmente son inviables en países que están en desarrollo. Por esta razón en las últimas décadas se ha investigado sobre tratamientos más baratos, ambientalmente más apropiados y que exista una mayor probabilidad en su utilización en usos posteriores. Entre las técnicas nacientes con mejor eficacia y relación costo-operación baja, existe la fitoestabilización, que a su vez es una rama de la fitorremediación (Ginocchio y León, 2007).

2.6.- Que es la fitoestabilización

La fitoestabilización es un método que inmoviliza los contaminantes alojados en el suelo, a través, del uso de plantas metalófitas excluyentes, las cuales absorben y acumulan de forma inocua en sus raíces los metales pesados, esto impide el traspaso de elementos tóxicos al nivel freático (aguas subterráneas), ver Figura 2-2.

Esta capa vegetal metalófita, ayuda a la estabilidad física, química y biológica del lugar, evitando el levantamiento de partículas finas por efecto del viento y el agua contaminada hacia zonas cercanas al relave.

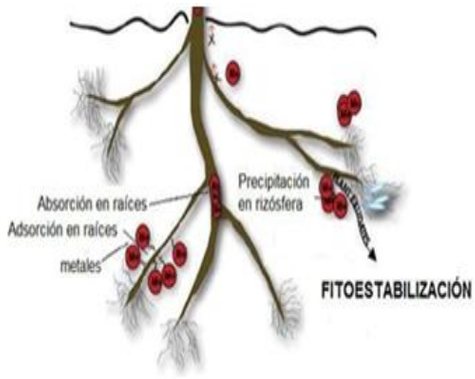


Figura 2- 5. Proceso de fitoestabilización en plantas.

Fuente: MasScience. El potencial de la fitorremediación como tecnología medioambiental, 2015

2.7.- Desarrollo secuencial para el proceso de Fitoestabilización

El primer paso consiste en la identificación de los terrenos donde se hará el proceso de fitoestabilización. Principalmente son grandes extensiones de suelo donde existe contaminación superficial y tiene como ventaja respecto a otros métodos de remediación de suelos, facilidad de aplicar, bajo costo y además es agradable estéticamente, ver Figura 2-3.

Figura 2- 6. Área utilizada por el tranque de Planta Matta.

Fuente: Planta Matta, enami (tranque de relaves), 2009

El segundo paso trata sobre identificación de ciertas condiciones en el suelo, que afecten a la resistencia de las plantas escogidas, tales como:

- pH
- Compactación de suelo
- Salinidad
- Déficit hídrico

- Fertilidad

El tercer paso para llevar a cabo un proceso de fitoestabilización es seleccionar las plantas adecuadas, normalmente especies que acumulan pocos contaminantes. Conforme las plantas van creciendo, cambian y estabilizan el suelo, de manera que se reduce la movilidad de los contaminantes, evitando así su migración a otros medios como el agua o el aire, ver Figura 2-4.

Figura 2- 7. Forestación del Tranque Los Quillayes.

Fuente: Biobío Chile, 2014

El cuarto paso es mantener las áreas verdes dispuestas en la superficie de los respectivos relaves, para que se consiga la estabilización completa, lo que según la literatura técnica dura entre 15 y 25 años, ver figura 2-5.

Figura 2- 8. Evolucion de la forestacion en la Planta Matta, 2009.

Fuente: Enamin, 2009

2.8.- Técnicas para mitigar los impactos ambientales generados por los tranques de relave

2.8.1.- Polución:

Uno de los impactos ambientales tiene relación con el efecto eólico erosivo, explicado en el (Capítulo 1), que a grandes rasgos trata sobre el desgaste superficial y que tiene consecuencias nocivas para los individuos que entren en contacto con este aire que arrastra partículas con metales pesados.

Para solucionar este evento desfavorable, se incorporara una cortina corta viento, la que estará dispuesta en la zona entre el límite de la superficie del tranque y los taludes formados, conformando esta cortina un perímetro equivalente a 1200 m App. Esta técnica se aplicó en relave de Planta Matta (Carmona, 2009), donde se obtuvo resultados favorables que de cierto modo, disminuyó considerablemente el transporte de masas de aire, ya que por su clima semidesértico las velocidades del viento son aún más altas que las condiciones normales, por lo que tendrá gran cabida en el Tranque III, en base a sus similitudes climáticas, ver Figura 2-6.

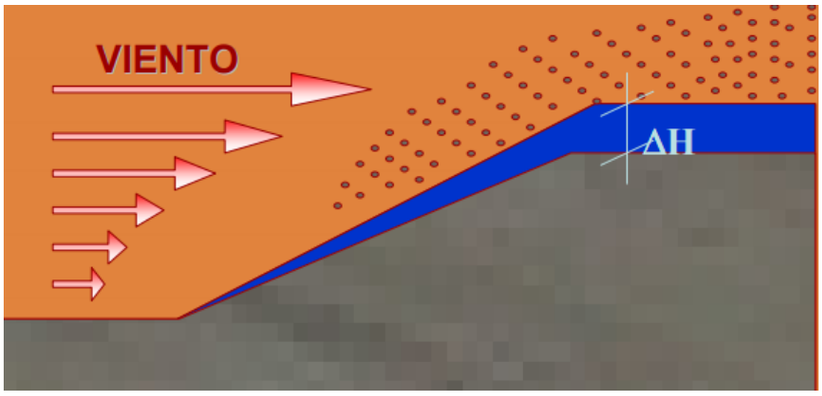


Figura 2- 9. Efecto eólico erosivo

Fuente: Enami, 2009

2.8.2.- Estabilidad

Según estudios hechos por la minera y por las modificaciones que se la han aplicado durante el transcurso del tiempo desde que se puso en operación este tranque, se ha podido llegar a la conclusión que presenta características de inestabilidad dejándolo en el marco de alto riesgo, para las zonas aledañas.

A saber, que alguna de las eventualidades sísmicas acontecidas dan crédito a esta postura, dejando en evidencia su latente deslizamiento. Recalcar que hasta el año 2013 se estimaba que a partir de la escala de Richter, el tranque soportaría un movimiento telúrico como máximo de 8,4. Algunos de los deslizamientos que puede adoptar el tranque frente a estas condiciones son las siguientes:

2.8.2.1.- Deslizamientos rotacionales:

Este tipo de deslizamiento se presenta en terrenos formados por materiales homogéneos de carácter granular o cohesiva, al provocarse este evento toma una forma más o menos circular y cóncava. La masa que se mueve hacia el suelo suele ser similar a un bloque rígido al desplazarse, (Alvarado- Tinttin, 2015), ver Figura 2-7.

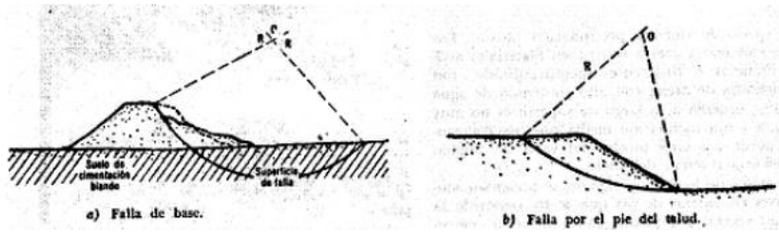


Figura 2- 10. Deslizamientos rotacionales típicos.

Fuente: Manual de estabilidad de taludes, 2005

2.8.2.2.- Deslizamientos traslacionales:

Cuando los terrenos presentan diferencias en sus propiedades, se hace presente este deslizamiento, pero no de forma circular como el anterior, ya que la masa que se desprende del suelo se desliza de afuera hacia abajo, siguiendo la dirección que forman las discontinuidades presentes en el superficie. (Alvarado- Tinttin, 2015), ver Figura 2-8.

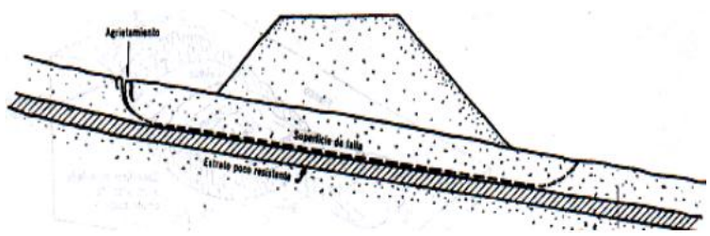


Figura 2- 11. Deslizamiento traslacional

Fuente: Manual de estabilidad de taludes, 2005

A partir de lo explicado previamente se deduce que el tranque usado en esta oportunidad frente a las restricciones de sismos ya especificados, conlleva a una deslizamiento rotacional

Frente a este problema la Planta los Mantos distribuyó una capa de granulometría gruesa que ayudo a la estabilidad del tranque, donde pretenden al término de este proceso, agregar una capa de espesado, que se obtiene a partir de la planta de espesado,

y por último proponer la incorporación de la fitoestabilización, ya que las plantas utilizadas en este método ayudaran a la estabilidad física del relave (Contacto directo Guinel, 2016).

Algunos aspectos que ayudan a la estabilidad de los suelos mediante el uso de plantas son:

- Obstaculización: Las plantas por medio de su follaje, absorben la energía producida por la lluvia al caer, evitando la presión que ejerce sobre el suelo. Además, atrapan los residuos que se transportan por el aire

- Inmovilizar: Las raíces sujetan las partículas del suelo. Aumentando de esta forma la resistencia y firmeza en los terrenos, disminuyendo la erosión superficial.

- Obstaculizar: Provocan el aumento de la desigualdad del suelo, causando la disminución de la velocidad de la escorrentía, entre otros.

Las raíces ayudan mecánicamente el suelo, ya que estas fortalecen el aguante de la cizalladura, esto quiere decir que la raíz produce tensiones en el suelo (ALVARADO y TINTTIN, 1997), ver Figura 2-9.

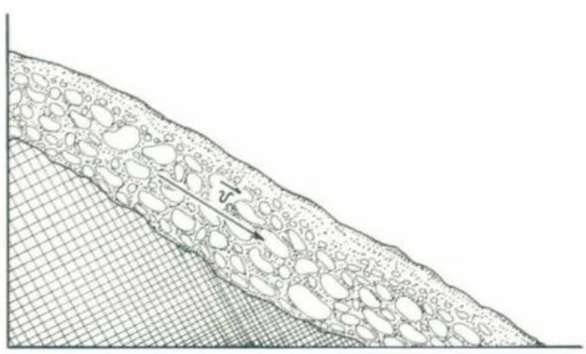


Figura 2- 12. Corte o cizalladura

Fuente: León (1997)

2.8.3.- Ecosistema

Este impacto trae consigo grandes modificaciones que en algunos casos resultan irreversibles (Lagos, 1989), para los elementos que interactúan entre sí en los terrenos en donde se instala un relave, ya que como se detalló anteriormente el proceso parte por la deforestación que conjuntamente se encuentra ligada a la expropiación de la fauna del lugar, finalmente disponiendo el material residual para la conformación del tranque.

Una de las soluciones que Minera Punitaqui pretende realizar, es reforestar en su totalidad el tranque con especies nativas abarcando una superficie total de 18,2 ha (Ver capítulo 3), que tengan alta adaptabilidad en el sector, lo que de cierta manera se cree que mejorará la calidad de vida de tal forma que se consiga el equilibrio inicial entre la fauna y flora, ver Figura 2-10.

A su vez evitará gran cantidad de riesgos que de una u otra forma, reaccionan directa e indirectamente, pasando desde enfermedades por la generación de partículas finas hasta posibles derrumbes, que constituyen un peligro para los habitantes de ese pueblo.

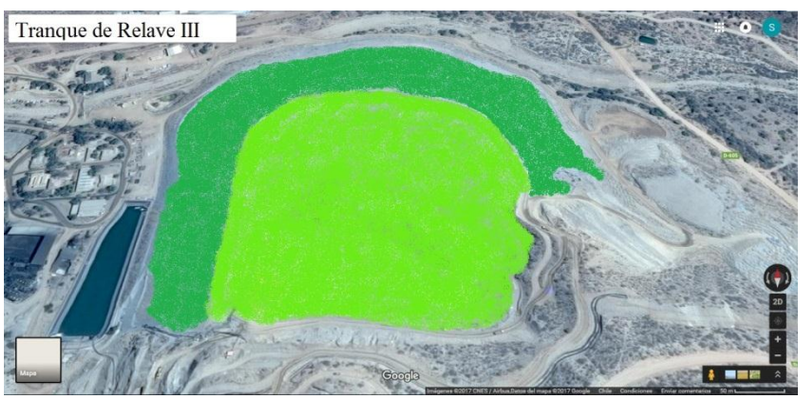


Figura 2- 13. Cubierta forestada del Tranque III, Punitaqui.

Fuente: www.GoogleEarth.cl, 2017

Capítulo 3: Seleccionar las especies más idóneas para la Fitoestabilización del tranque de relave de la Planta Los Mantos, a través de las propiedades de las plantas.

3.0.- Importancia del tipo de vegetación para este proceso en específico

Se debe diferenciar el significado de flora y vegetación, por una parte la vegetación son los aspectos cuantitativos que se basan en el sentido del crecimiento que va adoptando la especie vegetal; a diferencia de la flora que se basa en las cualidades del crecimiento de la especie. (Hernández-Serra-Faúndez, 2000)

Es decir, la vegetación comprende un rol fundamental dentro de un ecosistema, de modo que al no estar presente en la superficie, influye de forma significativa en el efecto de erosión, ya que esta genera una barrera para que no ocurra un arrastre de la capa vegetal y disminución natural por el caudal del viento, el cual provoca levantamiento de polvo. Además, la presencia de esta denominada "barrera vegetal" conduce a que se produzca la absorción de agua por las raíces, impidiendo que el agua traiga consecuencias de arrastre como las mencionadas previamente y permite la filtración de agua evitando escorrentías o saturaciones de aguas en la superficie del terreno.(Hernández-Serra-Faúndez, 2000)

A lo largo de este capítulo se evaluaran diferentes especies de vegetación, nativas como introducidas, presentes en la cuarta región de Coquimbo. Para cumplir con todos los requerimientos de selección a cabalidad, hay algunas variables a considerar al momento de elegir qué especies se encuentran más cualificadas para su uso en este proceso de fitoestabilización, el que estará complementado por la fitoextracción en el Tranque de Relave III.

La propuesta planteada se llevaría a cabo en una planicie que circunda un clima de tipo mediterráneo semidesértico, esto es a nivel comunal, enfocada a la localidad de Punitaqui, perteneciente a la provincia del Limarí (Desertificación en la comuna de Punitaqui, 2006):

- Condiciones semiáridas, sequías estacionales, variabilidad en las precipitaciones, suelos pobre con tendencia a erosión.
- Perdida de cubierta forestal producto de incendios.
- Explotación insostenible de recursos hídricos (contaminación química, salinización y agotamiento acuíferos).
- Crisis en agricultura tradicional generando abandono de tierras, deterioro de suelos y estructuras de conservación de aguas.

3.1.- Criterios básicos para escoger las especies vegetales, al momento de llevar a cabo el proceso:

- Técnica de remediación post cierre faenas: Al momento del cierre del depósito de relave, se debe tener en cuenta como se utilizará la superficie del terreno para la posterioridad, que conforma la vegetación que se manipulará para el proceso de fitoestabilización, a los que se le puede aplicar metodologías como; reforestación con especie natural presente en el área o lugares de recreación para las personas, entre otros. La opción más adecuada para realizar la fitoestabilización depende donde esté construido el tranque de relave, donde influyen las disposiciones geográficas y climáticas.

- Limitantes con respecto al clima en lugares determinados: El desarrollo favorable de las etapas en una faena, está predeterminado por las condiciones del clima en cuestión. Para permitir de esta forma el buen crecimiento de los especímenes vegetales, a través de estudios hechos en Europa, Estados Unidos Y Canadá (Ginocchio y León, 2007) ha identificado que las de tipo endémica se adaptan mejor a los fenómenos climáticos en lugares destinados a fitoestabilizar, ya que por el contrario, si no se logra el proceso de adaptación al usarse plantas introducidas, induce a una elevación de los costos a lo largo de los procesos. (Guía Nº3: flora y vegetación asociados a relaves mineros abandonados).

- Limitaciones fisicoquímicas de acuerdo a toxicidades: El crecimiento de la vegetación se ve afectado por la conformación del tranque, ya que se suelen construir con material fino y homogéneo, que a fin de cuentas reduce el potencial crecimiento de las raíces, donde están presentes niveles de toxicidad que afectan a los seres vivos. Además, la falta de nutrientes perjudica la supervivencia de los constituyentes de la capa de vegetación. Por ello se debe preparar la superficie del tranque, para que el proceso tenga éxito. (Ginocchio y Leon 2007).

3.2.-Fitoestabilización del Tranque de Relave 3

Para desarrollar cada uno de los parámetros que el proceso de estabilización de suelos contempla, y que a su vez se seleccione adecuadamente las especies vegetales del

tipo metalófitas, se debió realizar una exhaustiva investigación, que se sustentaba por artículos científicos, experiencias realizadas, y algunos trabajos de titulación, entre otros. Lo que a fin de cuentas permitiría obtener resultados exitosos.

Esta investigación en cambio proporcionará estimaciones a largo plazo, debido a que dicha metodología comprendida entre la fitoestabilización y cierre del tranque tiene una duración que bordea los 25 años, (MLP, 2008)

Cabe mencionar, que algunos de los Tranques que fueron evaluados y que desarrollan activamente la técnica de fitoestabilización como Los Quillayes (MLP, 2008), Planta Matta. Para lo que se usó como base La guía N° 3: Flora y Vegetación Asociadas a relaves mineros abandonados (Lobos, Ginocchio & Baker, 2011), la cual se limita a entregar un catastro general de las plantas presentes en la región de Coquimbo.

A pesar de que estos relaves se encuentran en la región donde se ubica el tranque, el cual se somete a estudio en este trabajo, no cumplen con los estándares para utilizarlos como apoyo en lo que sucedería al llevar a cabo la fitoestabilización en el tranque de relave 3, ya que los resultados provistos por los mismos son inconsistentes, es decir, que el producto de este proceso no son lo suficientemente completos sobre la base de la absorción y acumulación por su poco tiempo en funcionamiento.

A partir de lo ya dicho, se decidió fundamentarse con la exitosa fitoestabilización realizada en la planta Manuel Antonio Matta de Copiapó, ubicado en la tercera región de Atacama, perteneciente a ENAMI, cuya operatividad viene desde el año 1998, que muestra un resultado más clarificado para así poder demostrar estimaciones más certeras en cuanto a los resultados que se puedan obtener en esta experiencia. Si bien, no se localiza en la región de Coquimbo, sus condiciones climáticas presentan ciertas similitudes, que a fin de cuentas no afectaría exponencialmente el desarrollo de esta propuesta. (Carmona, 2009).

3.3.-Procedimiento para la toma de muestras

Para caracterizar los constituyentes principales del tranque, el personal del laboratorio químico de la Minera Punitaqui, desarrollo los siguientes pasos:

Durante el reconocimiento de suelos se tomó un total de 20 muestras de 500g cada una, en diferentes puntos estratégicos del tranque, siguiendo el protocolo de toma de muestras de suelo, definido por el artículo 28 del D.S. Nº 4/09 (SEGPRES, 2009).

Para ver la distribución de tamaño de los gránulos de estos materiales provenientes del relave, se ocupó el método de análisis granulométrico, el cual requiere trabajar con una cantidad de mineral definida, previamente homogenizada, en donde dicha cantidad de mineral se introduce a tamices para así evaluar en qué malla se encuentra el 80% de la carga, en este caso resultó ser en la maya #200. Al finalizar este proceso, la muestra resultante se envió al laboratorio de análisis químico, identificando los metales presentes en el tranque. (Ver resultados en capítulo 3.4).

3.4.-Concentraciones anómalas de metales pesados en el Tranque III

Los resultados establecieron índices con mayores presencias en Cu-Fe. Ver tabla 3-1. A saber, que están en el marco de metales pesados y pueden ser altamente tóxicos para el medio en donde se encuentran. Como son del tipo "pesados", es importante mencionar los límites de acumulación en sectores en específico, ya que si estos alcanzan cursos de agua, superficiales como subterráneos genera daños severos para el ecosistema, ver Tabla 3-2.

Tabla 3- 1. Concentración de cobre y hierro en relave III

Zonas estudiadas	PH suelo: agua 1:01	Contenido total de metales mg/Kg	
		Cu	Fe
Tranque -	6,7	2.600	10.400

Fuente: Planta los Mantos, 2017

Tabla 3- 2. Contenidos máximos de metales pesados totales permitidos en lodos aplicados a distintos suelos en Chile.

Metal	Chile[1]	
	Suelos aptitud frutal y/o forestal	Suelos degradados
	Mg kg^{-1} MS	
As	20	40
Cd	8	40
Cu	1000	1200
Hg	10	20
Ni	80	420
Pb	300	400
Se	50	100
Zn	2000	2800
Cr	n.n.	n.n.
Mo	n.n.	n.n.

Fuente: Norma lodos Nch2952c -2004 (INN 2004)

Tabla 3- 3 “Límites máximos de metales pesados en el suelo, según Ley Federal Alemana”

Tipo de ley	As	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn
	----------mg kg^{-1}----------							
Ley protección de suelo[1] Suelo Arcilloso (I)	20	100	1,5	100	60	70	1	200
Suelo limoso (II)	15	70	1	60	30	50	0,5	150
Suelo Arenoso (I)	10	40	0,4	30	100	15	0,1	60
Ordenanza Lodos[2] Suelos pH 5,5-7	-	100	1,5 (1)*	100	60	50	1	100 (150)*
LABO[3] Suelo arenoso	3	15	0,3	20	3	3	0,03	15
Suelo limoso	10	50	0,3	50	30	50	0,06	90
Suelo arcilloso	10	75	1	100	60	75	0,14	120

Fuente: European Commission, 2001

3.5.- Elección de especies más idóneas para la fitoestabilización:

Mediante experimentos en laboratorios y visitas a tranques de relave dentro de la IV región de Coquimbo, se seleccionaron distintos tipos de plantas que crecían en los alrededores de tranques con concentraciones de Cu y Au. Además, de otras especies que fueron seleccionadas por su tolerancia a la presencia de metales pesados como los ya mencionados, a las que se le realizó ensayos, dosis-respuesta para definir el grado de tolerancia a cobre (Cu) y la forma de acumulación de Cu.

Los experimentos en laboratorios para categorizar la vegetación como ejemplares tolerantes a metales pesados, consiste en el uso de semillas de distintas especies, donde son introducidas en medios de sustratos y que al cabo de un periodo de tiempo definido se ve la aptitud a las condiciones sometidas (Ginocchio, 2008), ver Figura 3-3.

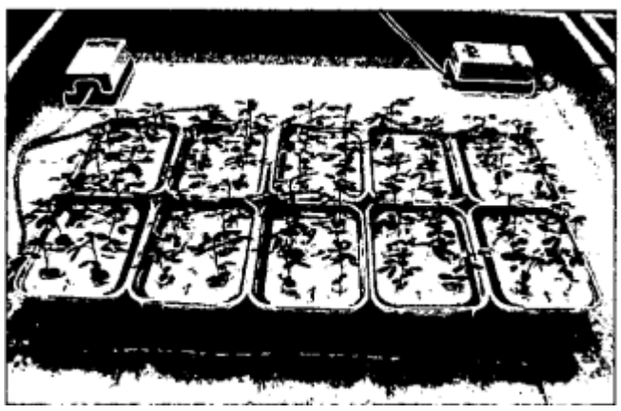


Figura 3- 1. Cultivo hidropónico de especies tolerantes a Cobre.

Fuente: PROYECTO 04CR9IXD-01, 2008.

Según el empleo de estudios de la flora y vegetación en la región ya mencionada, se pudo identificar que se cuenta con un total de 41 tipos de plantas con tolerancia a metales no deseados, donde se pudo analizar especies del tipo colonizadoras espontáneas que comprende a plantas cuyo crecimiento se da en sectores aledaños a relaves o en zonas donde hay presencia cuprífera en el subsuelo y en algunos casos tienen alta

tolerancia a este elemento. Entre las plantas que demostraron más aptitudes a estas condiciones se encuentran: Acacia caven (espino), Gymnophyton robustum (monte de burro), y Polypogon australis y Baccharis linearis (romerillo), esta última es de tipo pseudometalófitas, caracterizándose por alta capacidad de tolerar cobre biodisponible. Destacar que estos cuatro tipos de plantas, acumulan principalmente cobre en sus raíces. (Ginocchio, 2011),

Gymnophyton robustum:

Conocida como Monte de Burro, esta especie pertenece a la familia de arbustos Apiaceae, por lo que se destaca con un peculiar olor aromático intenso, que durante la época de los pirquineros de la Región de Coquimbo, se empleaba como indicadora de anomalías de cobre, ya que estaba asociada a concentraciones elevadas de minerales.

Mediante pruebas realizadas a esta especie se pudo determinar que es tolerante constitutiva a cobre, es decir, tiene la capacidad de tolerar altos contenidos de cobre biodisponible (Ginocchio, 2008).

Distribución natural y hábitat:

El Monte de Burro es una especie endémica de Chile. Crece desde la Región de Atacama a la Región de Coquimbo, a pleno sol, en laderas o planicies (Chile bosque, 1999-2016), ver Figura 3-2.

Figura 3- 2. Flores de Monte de Burro (Gymnophyton robustum)

Fuente: Gentileza de Ricardo Martini

Acacia Caven:

Árbol nativo en Chile, conocido comúnmente como Espino, Espino Maulino. Pertenece a la familia Fabaceae o de las fabáceas.

Mediante pruebas realizadas a esta especie, se determinó que es muy tolerante a concentraciones de cobre. Además se destaca por ser colonizadora espontánea de depósitos de relaves abandonados y de mineralizaciones superficiales.

Distribución natural

La especie Acacia caven es nativa en chile, también se le puede encontrar en Argentina. En Chile crece en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana de Santiago, O'Higgins, Maule, Biobío (Chile bosque, 1999-2016), ver Figura 3-3.

Figura 3- 3. Detalle de flores y hojas de espino, Acacia caven

Fuente: Fotografía de Diego Alarcón. Chile bosque

Polypogon australis

A este tipo de flora se le denomina Cola de Zorro; es una especie nativa de la región de Coquimbo, y dentro de sus características destaca su alta tolerancia a terrenos con presencia de metales pesados como el cobre, Además, no sólo tienen la particularidad de crecer en estos medios, sino que también pueden acumular metales en sus raíces, aumentando las probabilidades de una fitoestabilización exitosa, ver Figura 3-4.

Figura 3- 4. Imagen de cola de zorro.

Fuente: http://sernecportal.org/portal/taxa/index.php?taxon=841

Baccharis linearis (romerillo)

Corresponde a un tipo de arbusto, básicamente a vegetación leñosa que, presentan características como las de alcanzar una altura adecuada causando un efecto nodriza para plantas que se desarrollan por sus lados más cercanos, las que constituyen a hierbas que abastecen a la fauna propia del sector. Y finalmente destacar que este arbusto tiene cualidades pseudometalofitas que le dan un mejor posicionamiento al momento de incorporarse en terrenos con altos contenidos de cobre, ver Figura 3-5.

Figura 3- 5. Fotografía de romerillo.

Fuente:www.chileflora.com

3.6.- Metodología de remediación de la Planta Manuel Antonio Matta Goyenechea.

Mediante el análisis de nueve especies sometidas al proceso de remediación, se determinó la acumulación de cobre que tenía cada una en sus raíces y hojas, por lo cual se propuso la técnica fitoextractora o fitoestabilizadora para cada especie. Schinus polygamus y Atriplex deserticola son especies endémicas de la región de Copiapó, las cuales tuvieron la capacidad de acumular cobre en sus hojas sobre 1,2 gr/kg, exhibiendo características pseudometalófitas para el metal de interés. Para el proceso de fitoextracción del cobre, se seleccionaron cinco especies y para el proceso de fitoestabilizar, fueron escogidas cuatro especies. Por ende, fue posible escoger las plantas más idóneas para ser utilizadas en el proceso de remediación, por medio de la identificación de especies que nacen en sitios contaminados con cobre. (Ortiz-Calderón, 2008).

Este proyecto, además entregó información de la capacidad y cantidad que tuvo cada especie de retener concentraciones de cobre en su Biomasa seca, ver Tabla 3-3.

Tabla 3- 4. Retención de cobre en raíces y hojas de las especies utilizadas en tranque de relave Matta (En Biomasa seca)

Especie de Planta	Cu contenido en hojas mg/ Kg de MO seca	Cu contenido en raíces mg/ Kg de MO Seca	hojas + raíces mg/ Kg de MO Seca
Baccharis salicifolia	667,9 ± 2,4	71,3 ± 0,4	739,2
Schinus polygamus	1213,5 ± 8,9	260 ± 0,9	1473,5
Casuarina equisetifolia	470,2 ± 3,3	2923,3 ± 7,7	3393,5
Atriplex deserticola	1357,7 ± 3,5	2160 ± 71	3517,7
Acacia melanoxylon	158,6 ± 1,6	484,0 ± 8,9	642,6
Pennisetum clandestinum	259,2 ± 6,2	866,4 ± 7,1	1125,6
Scirpus asper	459,3 ± 5,0	250,7 ± 6,1	710
Cynodon dactylon	246,5 ± 8,1	81,4 ± 0,6	327,9
Polypogon australis	669,5 ± 5,9	223 ± 16	892,5

Fuente: (Ortiz-calderón, 2008)

Mediante la tabla se determinó que la especie Schinus polygamus, obtuvo una de las mayores concentraciones de cobre en sus hojas, por lo cual fue una de las especies que se decidió escoger en el proyecto de remediación, junto con Polypogon australis la cual, si bien no refleja una de las mejores recuperaciones de Cu tanto en hojas como raíces, presenta altas probabilidades de adaptación a las condiciones del medio que a fin de cuentas, será bastante eficiente en este proceso. Cabe destacar que estas plantas no sólo servirán para fitoestabilizar el lugar, sino también para fitoextraer el cobre del tranque de relave en cuestión.

La ubicación del Tranque 3 en este punto juega un papel importante, ya que el relave utilizado para Fitoestabilizar el relave de Planta Matta se encuentra a una distancia de 514 Km App(Google maps, 2017) con el Tranque que será utilizado en esta investigación. Variando en una longitud que comprende a escala País la IV y III Región. lo que en sí deja claro, una importante diferencia al momento de llevar a cabo esta técnica en la comuna de Punitaqui, pero la similitud en las condiciones climáticas facilitan utilizar los mecanismos y especies vegetales contempladas en el tranque de las Región de Atacama. Además, las especies escogidas corresponden al origen de tipo nativo de la Región de Coquimbo.

Con la información que entrega el proyecto realizado por la Dra. Rosanna Ginocchio, “Uso de Recursos Filogenéticos Nativos para la Fitoestabilización de Relaves Mineros en la Región de Coquimbo” y la exitosa fitoestabilización realizada en la Región de Atacama en la planta Matta, (Ortiz-Calderón, 2008), se logró escoger las plantas más idóneas para realizar la Fitoestabilización.

3.7.- Estimaciones de Resultados

La cantidad de plantas estimadas para abastecer la totalidad de la superficie del tranque, se distribuirán de 2 formas diferentes, una será el área donde se ubiquen las plantas enfocadas para realizar el procesos de fitoestabilización y las otras serán para hacer la fitoextracción, con un total de 5 especies analizadas anteriormente, de las cuales tres corresponden a la primera técnica y dos a la segunda, respectivamente.

La distancia entre cada planta será de 2 m, lo que quiere decir que se encontraran 8 plantas por cada 16 m^2; este procedimiento de distribución se basa en disposición de especies vegetales usadas en el proyecto de Planta Matta(Rojas, 2016).ver Tabla 3-4.

Tabla 3- 5. Cálculo total de plantas para el tranque III, es el siguiente

	ÁREA m^2	Plantas
8 plantas por cada	16	8
Área del tranque a plantar	179.142	89.571

Fuente: Cálculos producto de trabajo de titulación.

Como la superficie a usar para sembrar del Tranque III es: 179.142 m^2

El número de plantas necesarias para fitoestabilizar el tranque corresponde a:

179.142 m^2/ 16 m^2 = 11.196,3

Nº de Plantas = 8 x 11.196,3 = 89.571

Tabla 3- 6 “Costo total de plantas a utilizar”

Especie	Valor unitario	Cantidad	Total
Acacia caven	$ 5900	10.116	$ 59.684.400
Gymnophyton robustum	$ 2800	20.103	$ 56.288.400
Polypogon australis	$ 2500	20.555	$ 51.387.500
Baccharis linearis	$ 3500	20.104	$ 70.364.000
Shinus polygamus	$ 3500	18693	$ 65.425.500
			$303.149.800

Fuente: Vivero y jardín Pumahuida Ltda. 2016

Tabla 3- 7 “Costos complementarios para el cultivo de plantas”

Sistema de riego	Cantidad	Longitud	Valor unitario	Total
Acoples	270 bolsas	No aplica	$400	$108.000
Acoples en L	3 bolsas	No aplica	$590	$97.980
Acoples en T	142 bolsas	No aplica	$690	$1.770
Moto bomba	10	No aplica	$199.990	$1.999.900
Mangueras pvc	980	100 m	$15.990	$15.670.200
				$17.877.850

Fuente: Homcenter Sodimac Ltda, 2017

Tabla 3- 8 “Costos complementarios de Mitigación de Riegos y Recursos Humanos”

Implementos	Cantidad	Longitud	Valor unitario	Total
Malla		2.318 m	$ 990	$ 3.393.720
Polines	555	4 mt alto	$ 6.650	$ 3.690.750
Polines	494	2,44 mt alto	$ 2.490	$ 1.230.060
Palas	50	No aplica	$ 4.390	$ 219.500
Mano de obra	50	No aplica	$300.000	$ 45.000.000
				$53.534.030

Fuente: Homcenter Sodimac Ltda, 2017

Tabla 3- 9 "Gasto total de parámetros considerados para la plantación"

Implementos a utilizar	Total
Costo total de plantas a utilizar	303.149.800
Costos sistema de riego	$17.877.850
Costos mitigación de polución- roedores	$53.534.030
	$ 374.561.680

Basándose en la cuantificación económica estimada de implementos realizada previamente, es posible determinar que para aplicar la técnica de fitoestabilización a las 18,2 ha calculadas del Tranque III, se necesitaría un capital que asciende a la cifra $ 374.561.680. Si bien refleja un gran gasto, se debe tener presente que este estudio se desarrolló tomando en cuenta la totalidad del tranque, lo que limitándolo a valor por hectárea daría $ 20.580.312,09 demostrando que su viabilidad es alta por su bajo costo. El gasto que se presenta, solo abarca la inversión inicial, ya que la mantención y mano de obra no genera grandes consumos, porque no se necesitan personal especializado para su manejo. Los beneficios asociados que tendría la puesta en marcha de un proyecto de esta envergadura, se verían a largo plazo, partiendo entre los primeros 15 a 20 años, mejorando sus características geomecánicas y atenuando la concentración de metales pesados, diseminados a través de la masa rocosa, de forma que los acumularía y/o absorbería hacia su biomasa, según propiedades de la planta, hasta posteriormente conformar un bosque nativo que se lograría en un plazo de a lo menos 200 años, donde se crearía un ecosistema para albergar fauna propiamente del lugar, disminuyendo los focos de contaminación de suelos y ambiental.

Conclusiones Recomendaciones

Se tiene conocimiento que la industria minera es uno de los principales rubros en donde se genera más contaminación a nivel mundial; Chile no es la excepción. El mayor ejemplo de ello son los fenómenos naturales que han afectado en mayor medida a este País. El hecho de utilizar la técnica de fitoestabilización, influye de manera significativa en dichos fenómenos, ya que su consigna establece el mejoramiento por acción natural de los suelos contaminados, acumulando los metales pesados en sus raíces e impidiendo escurrimientos a napas subterráneas.

Al momento de iniciar actividades de construcción de un relave, se genera una serie de impactos las que afectan directa e indirectamente a ciertos sectores de la comuna de Punitaqui, lo que trae consigo expropiaciones tanto a nivel vegetal como animal; luego de tener establecida la obra da paso a otros impactos que requieren su mitigación como lo es la emisión material particulado acrecentado por las zonas áridas; para solucionar esto, se ha propuesto una cortina de malla la que evitara la erosión superficial acompañada de una disminución significativa de la polución en el ambiente, otra parte importante trata sobre la estabilidad de la infraestructura que por sus diferencias granulométricas generan un riesgo latente para sectores aledaños, mediante la fitoestabilización se pretende dar mayor firmeza a los taludes del relave para de este modo disminuir la probabilidad de deslizamientos rotacionales del suelo.

Por ello la prefactibilidad técnica de la fitoestabilización es la alternativa más acertada para desarrollar en el Tanque de relave III de la Planta los Mantos, porque el uso posterior que se le dará a este método, servirá para crear, reservas forestales para especies predominantes del sector y a su vez, las que se encuentren en peligro de extinción.

En Chile, si bien, no se comprende a cabalidad el tema en cuestión, los países desarrollados han tenido buenos resultados, lo que ha dado pie para que países menos desarrollados, como es el caso de Chile, se implemente en tranques cuyas concentraciones reflejen anomalías de metales pesados, a lo largo de la historia se les ha denominado como Pasivos Ambientales Mineros. Cabe destacar, que el presente trabajo de titulación se ha sustentado en la experiencia de la Planta Matta, la cual ha tenido resultados exitosos en esta materia, consolidándose como una empresa pionera en remediación de relaves a lo largo del país.

En cuanto a la selección de especies, se usó como base la guía N° 3 de fitoestabilización, donde se emplearon plantas del tipo nativas de la región de Coquimbo, las que son: Acacia caven, Gymnophyton Robustum, y Baccharis Linearis,

cuya cualificación refleja mayores acumulaciones de metales en sus raíces en comparación con otras. En cuanto a la fitoestabilización de planta Matta mencionada en el párrafo anterior, se seleccionaron dos tipos de especies vegetales, que cumplen la función de fitorremediar el tranque, que son; Schinus Polygamus y Polypogon Australis, dejando un total 5 especies vegetales nativas, que según la literatura técnica reúnen las características de adaptabilidad, para enfrentarse a las condiciones climáticas, pretendiendo lograr al término del proceso la exitosa rehabilitación a largo plazo de los suelos afectados.

Para los cálculos se basó en el esquema de cultivo de Planta Matta, que de acuerdo a lo indicado en el capítulo 3, el relave daría cabida a un total de 89.571 especies vegetales, atribuyéndole un gasto de inicial de $ 374.561.680, lo que refleja el costo total para las 18,2 ha que posee el Tranque III, posicionándose como una práctica de bajo costo y estéticamente agradable para el público.

Bibliografía

- SERNAGEOMIN. Chile país minero, además de cobre. [en línea]. <http://www.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/CHILE-PAIS-MINERO-ADEMAS-DE-COBRE.pdf>. [consulta: 22 junio 2017].
- MWH Global. Declaración de impacto ambiental construcción tranque de relave "Tranque III" Punitaqui – IV región. [en línea]. Chile: MWH, Las condes, Julio de2007.<http://www.e-seia.cl/archivos/DIA _Tranque_III_ __CMP.pd f> . [consulta: 20 mayo de 2017].
- RAMIREZ, Nelson A. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. [en línea]. Chile: Departamento de Seguridad Minera, diciembre de 2007.<http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>.[consulta: 21 mayo de 2017].
- Comisión Nacional del Medio Ambiente. Norma Chilena Oficial N°1.333. documentos electrónicos 2001. Santiago, Chile: Diario oficial 1978. 4-6 p.
- Ley 19.300. Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. Chile: Diario oficial, Santiago, 09 de marzo de 1994. 59 p.
- Turismo Monte Patria. Antecedentes generales []en línea] <http://www.munimontepatria.cl/turismo/?action=documento&id_documento=94> [16 junio 2017].
- SERNAGEOMIN, Consultora CEGA Ingenieros Ltda. Guía: Construcción y operación de tranques de relaves. [en línea]. 2003. <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/ambiente/construccion_operacion_tranques.pdf>. [consulta: 16 junio 2017].
- Universidad de la Serena. Estado de Conservación de la Flora Regional. [en línea]. 2014. <http://www.biouls.cl/lrojo/capeta_htm/resultados02.htm> [consulta: 16 junio 2017].
- POCH Ambiental. Declaración de impacto ambiental peraltamiento Tranque III Minera Altos de Punitaqui. [en línea]. Abril, 2013. <http://seia.sea.gob.cl/archivos/d7a_DIA_Compilado_-_Peraltamiento_Tranque_III.pdf> [consulta: 16 junio 2017].
- Castor y Polux Ltda., Gobierno regional, CONAF, SERNATUR. Fauna: Región de Coquimbo. [en línea]. <http://www.mapasdechile.com/faunaregion04/index.htm>. [consulta: 18 junio 2017].
- SERNAGEOMIN. Catastro de depósitos de relaves: Depósitos de relaves activos y no activos 2010. [en línea]. < http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/estudios/CATASTRO_DEPOSITOS_DE_RELAVES_2010.pdf > [consulta: 12 julio 2017].

- SERNAGEOMIN. Levantamiento catastral de los tranques de relave en Chile. Etapa B, regiones IV, V y VII. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago, Chile: Sernageomin, 1990 [consulta: 14 julio 2017].
- LEY 20.551: Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras. Diario oficial de la República de Chile, Santiago, 11 noviembre de 2011. 5-19 p.
- CHILE. MINISTERIO de minería. Guía Metodológica de evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras. [en línea]. <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/14.03.24-GuiadeEvaluaciondeRiesgosparaelCierreFaenasMineras.pdf> [consulta: 14 julio 2017].
- CARMONA, M. Empresa nacional de minería: Planta Manuel Antonio Matta Ruiz. [en línea].Santiago. ENAMI. < file:///C:/Users/JorgeAntonio/Downloads/310541621-PLANTA-MATTA-enami-tranque-de-relaves.pdf>. [consulta: 18 julio 2017].
- ALVARADO, H y TINTTIN, A. Manual De Estabilidad De taludes. [en línea]. <http://cdjbv.ucuenca.edu.ec/ebooks/ti742.pdf>. [consulta: 19 julio 2017].
- LAGOS, G (1997). Impactos Ambientales de la Minería en Chile. [En línea]. <https://www.researchgate.net/publication/242415121_Impactos_ambientales_de_la_mineria_en_Chile >. [Consulta: 19 julio 2017]. 13p.
- HERNANDEZ, Jaime. Manual de Métodos y Criterios para la Evaluación y Monitoreo de la Flora y la Vegetación. [en línea] <http://www.gep. uchile.cl/Publicaciones/Manual%20de%20M%C3%A9todos%20y%20Criterios%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20y%20Monitoreo%20%20de%20la%20Flora%20y%20la%20Vegetaci%C3%B3n.pdf>. [consulta: 11 julio de 2017].
- LEÓN, P. GINOCCHIO, R. BAKER, A. 2011. Fitoestabilización de Depósitos de Relaves en Chile, Guía N°3: Flora y Vegetación Asociadas a Relaves Mineros Abandonados; Centro de Investigación Minera y Metalúrgica; Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Ortiz-Calderón, C. Alcaide, O. Li Kao, J. 2008. Distribución de cobre en hojas y raíces de plantas que crecen sobre relaves mineros de cobre en el norte de Chile. Revista Chilena de Historia Natural, 81: 489-499.
- Mesa Quillayes. Charlas ambientales para las comunidades del valle alto del choapa. [en línea]. 04 de mayo de 2017 http://www.mesaquillayes. cl/ w/wp-content/uploads/2012/06/Fitoestabilización%C3%B3n-segunda-charla - ambiental.pdf. [consulta: 20 Julio 2017].
- Distancia entre Copiapó a Punitaqui. Google earth. Esc 1:500.000, color. Chile: 2017.
- GINOCCHIO, Rosanna, LEON, Pedro. Recursos Genéticos para Fitoestabilización: Plantas que reducen la contaminación por desechos mineros.

[en línea]. INIA Tierra adentro. Julio - Agosto, 2007 <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR34426.pdf>. [consulta: 13 julio 2017].

- GINOCCHIO, Rossana. Uso de recursos fitogenéticos nativos para la fitoestabilización de relaves mineros en la región de Coquimbo. [en línea]. Centro de investigación minería y metalurgia, INIA-Intihuasi. marzo de 2008<http://repositoriodigital.corfo.cl/bitstream/handle/11373/3150/04CR9IXD-01_ITF.pdf?sequence=1>. [consulta: 20 de julio de 2017].
- CHILE, MINISTERIO de salud. Protocolo toma de muestras de suelos [en línea].<http://www.sag.cl/sites/default/files/Protocolo%20toma%20muestras%20suelo.pdf>. [consulta: 14 julio 2017].
- NN. Chilebosque. [en línea]. 1999-2016. <http:// www.chilebosque.cl/Ind ex .html>.
- Ley Número 20.551, Regula el cierre de faenas e instalaciones Mineras. Ministerio de Minería. Noviembre, 2011.
- REVISTA Electrónica. Minera Altos de Punitaqui: El pequeño gigante. [en línea]. Chile: Grupo Editorial Editec, 2013.<http://www.mch.cl /reportajes /minera-altos-de-punitaqui-el-pequeno-gigante-del-limari/#>. [Consulta: 02 de mayo de 2017]. ISSN 0716-1042.