



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Ramón Díaz N.

Ingeniero Supervisor
Gabriel Rodríguez S.

**PLANIFICACIÓN DE OPERACIONES PARA REHABILITACIÓN DE
BOTADEROS DE ESTÉRILES EN EXPLOTACIÓN DE CARBÓN EN
ISLA RIESCO, MINA INVIERNO.**

MARÍA FERNANDA MARTÍNEZ VALDÉS

Informe de Memoria de Título para optar al título de
Ingeniera Civil de Minas

Enero, 2020

AGRADECIMIENTOS

Estos agradecimientos son principalmente para mis padres, Gisela y Mauricio, por su incansable esfuerzo para regalarme una educación por la que siempre me he sentido privilegiada. A ellos, que con su ejemplo me han enseñado valores como la empatía, la humildad y la perseverancia. Les agradezco por la confianza que siempre han depositado en mí, porque me han amado generosamente, apoyándome en todas mis decisiones desde que era una niña. Gracias también por mis tres maravillosas hermanas, Javiera, María José y María Jesús, junto a quienes conformamos una loca pero linda familia. Espero y confío en que podré ser una profesional merecedora de todo esto.

En segunda instancia, quisiera agradecer a Pablo, mi compañero de vida, por su infinito amor, comprensión y apoyo incondicional. A su hermosa familia magallánica, quienes me abrieron las puertas de su casa y me regalaron un espacio fraterno donde sé que siempre podré volver.

También quisiera agradecer a todas las personas de Mina Invierno junto a quienes compartí enriquecedoras experiencias y muchas risas, haciendo que el cansancio y el frío en Isla Riesco pasaran siempre a segundo plano. En particular quisiera agradecer a Gabriel Rodríguez, quien más que un supervisor fue un guía, tanto en lo académico como en lo personal y a don Carlos Gatica, por su compañía y tremenda disposición para ayudarme en todo, quien además me enseñó que no hay un límite de edad para seguir aprendiendo.

Finalmente quisiera agradecer a mi profesor guía, Ramón Díaz, por todos sus consejos y recomendaciones y por su compromiso desde el primer día con este trabajo.

RESUMEN

En minería a cielo abierto, los botaderos de estériles de operaciones mineras de carbón poseen un potencial considerable de contaminación, resultando fundamental el integrar medidas de rehabilitación que puedan realizarse de manera progresiva y en conjunto con la operación, lo cual mantiene el área de afectación en un mínimo y permite disminuir el tiempo del cierre de minas. En este contexto, Mina Invierno realizó un compromiso medioambiental dispuesto en la Resolución de Calificación Ambiental y en el Plan de Cierre vigente, que consistía en rehabilitar la totalidad de superficies de sus botaderos, mediante operaciones de preparación de terreno, recubrimiento con suelo y revegetación. Sin embargo, Mina Invierno se encuentra bajo una prohibición de realizar tronaduras bajo la cota 100 ms.n.m., dictaminada por el Tribunal Ambiental de Valdivia, lo cual ha obligado a la empresa a idear una planificación para una paralización temporal de sus actividades e incluso planificar un cierre definitivo. El objetivo de este estudio fue realizar una planificación de las operaciones de rehabilitación, en el caso de una paralización temporal, y determinar la disponibilidad de recursos edáficos para compararlo con los requerimientos del mismo para el caso de un cierre definitivo. Los resultados arrojaron que el suelo disponible no alcanzaría para cubrir la totalidad del Botadero Sur, sin embargo, disminuyendo el espesor de suelo utilizado de 50 a 30 cm, se podría lograr este objetivo. Otra alternativa sería realizar un escarpe de suelo en áreas no intervenidas por la explotación, para lo cual se realizó un muestreo de suelo que permitió definir zonas de mayor disponibilidad del recurso. Por otra parte, frente a la posibilidad de realizar una paralización temporal de la mina, se realizó la planificación de operaciones de rehabilitación, determinándose la utilización de equipos requerida y realizándose una evaluación económica que permitió determinar el costo de rehabilitar una superficie de una hectárea, solo considerando costos operacionales, el cual fue estimado en un valor de 18,204 USD/ha.

ABSTRACT

In open-pit coal mining, waste dumps have a significant polluting potential. Therefore, considering the rehabilitation aspects during the design of waste dump would be of paramount importance. This can be done simultaneously with the mining operation in order to keep the affectation area in a minimum level. Besides, the mine closure time would be decreased significantly. In this context, Mina Invierno, located in south of Chile, made an environmental commitment set forth in the *Resolución de Calificación Ambiental* and in the current mine closure plan. It consisted of rehabilitating the entire surface of waste dumps, through land preparation operations, ground covering and revegetation. This strategy has been defined due to the environmental problems of the mine, which have forced the mining company to temporary shutdown its activities and even to consider a definitive closure plan. The objective of this study was to carry out a planning of the rehabilitation operations in the case of a temporary stoppage and to determine the availability of edaphic resources to in the case of a definitive closure. The results showed that the available soil would not be enough to cover the entire waste dump. However, by decreasing the thickness of soil used to 30 cm this objective could be achieved. Another alternative would be to make a scarp of soil from the areas where have not been intervened by the exploitation. The results of soil analyses of these areas confirmed greater soil resource availability. On the other hand, considering the possibility of temporary stoppage of the mine, the planning of rehabilitation operations was done, determining the use of required equipment and carrying out an economic evaluation that allowed determining the cost of rehabilitating of an area of one hectare, only considering operational costs, which was estimated on a value of USD 18,204/ha.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 Identificación y contexto del problema.....	14
1.2 Conceptos e ideas generales	15
1.2.1 Restauración y rehabilitación	15
1.2.2 Resolución de Calificación Ambiental	15
1.2.3 Plan de Cierre	16
1.2.4 Recursos edáficos	16
1.3 Objetivos de la Investigación.....	17
1.3.1 Objetivos Generales	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Alcances	18
1.5 Propuesta de Trabajo.....	19
1.5.1 Inducción a la Empresa.....	19
1.5.2 Recopilación de antecedentes	19
1.5.3 Cuantificación de recursos edáficos.....	19
1.5.4 Planificación de operaciones de rehabilitación	19
1.5.5 Análisis Económico.....	20
2 MARCO TEÓRICO	21
2.1 Botaderos de Estériles	21
2.1.1 Tamaño y Diseño.....	21
2.1.2 Implantación	22
2.1.3 Emplazamiento	22
2.1.4 Sistema de vertido	23
2.1.5 Método constructivo.....	24
2.1.6 Preparación del terreno sobre botaderos para rehabilitación	25
2.2 Rehabilitación de Botaderos.....	26
2.3 La Minería del Carbón.....	27
2.3.1 El carbón.....	27
2.3.2 Formación.....	27
2.3.3 Historia del carbón en Magallanes	29

3	ANTECEDENTES	31
3.1	Mina Invierno	31
	3.1.1 Ubicación	31
	3.1.2 Clima y Meteorología	32
	3.1.3 Geomorfología	33
	3.1.4 Geología	34
	3.1.5 Edafología y Vegetación	35
	3.1.6 Operación Minera	36
	3.1.7 Contexto Actual	37
3.2	Plan de Cierre Vigente	37
3.3	Resolución de Calificación Ambiental	39
	3.3.1 Conservación de Suelos	39
	3.3.2 Perfilamiento de botaderos	40
	3.3.3 Recubrimiento con Suelo Vegetal	40
	3.3.4 Siembra y Plantación	40
3.4	Seguimiento de Plan de Revegetación	41
3.5	Compromisos Referentes a Botaderos	42
	3.5.1 Botaderos Exteriores	42
	3.5.2 Botadero Interior	43
	3.5.3 Avance en la Rehabilitación	43
4	DESARROLLO METODOLÓGICO	45
4.1	Determinación de Disponibilidad de Recursos Edáficos	45
	4.1.1 Disponibilidad en Acopios de Cubierta Vegetal	45
	4.1.2 Disponibilidad en Áreas a Intervenir	47
4.2	Planificación de Operaciones de Rehabilitación	53
	4.2.1 Sectores de Rehabilitación	53
	4.2.2 Equipos	55
	4.2.3 Suavizamiento de Superficies	57
	4.2.4 Reperfilamiento de Talud	59
	4.2.5 Carguío y Transporte de Suelo	63
	4.2.6 Instalación de Suelo Vegetal	67
5	RESULTADOS	70
5.1	Planificación de Operaciones	70
5.2	Utilización de Equipos	71
5.3	Análisis Económico	71

5.3.1	Consumo de Combustible	72
5.3.2	Costos de Mantenimiento y Remuneraciones	72
5.3.3	Costos Operacionales Totales y Unitarios.....	72
6	CONCLUSIONES.....	75
7	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	78
8	REFERENCIAS.....	79
9	ANEXOS.....	83
9.1	Mapa de Unidades Geológicas en Isla Riesco	83
9.2	Formaciones geomorfológicas locales Mina Invierno	84
9.3	Plano general Mina Invierno.....	85
9.4	Especificaciones técnicas de equipos	86
9.4.1	Bulldozers	86
9.4.2	Excavadora Komatsu PC300	89
9.4.3	Camión Komatsu HD785	89



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Geometría de un botadero.....	22
Figura 2.2: Implantaciones de botaderos según excavación.	22
Figura 2.3: Tipos de botaderos exteriores.	23
Figura 2.4: Tipos de descarga en botaderos.	23
Figura 2.5: Tipos de botaderos de acuerdo a la secuencia de construcción.	24
Figura 2.6: Evolución del carbón	28
Figura 2.7 Zona carbonífera de Magallanes hacia 2003.....	29
Figura 3.1: Ubicación Regional de Mina Invierno	31
Figura 3.2: Climas presentes en Isla Riesco	32
Figura 3.3 Imagen satelital de la región de emplazamiento de Mina Invierno	33
Figura 3.4: Sección transversal de la Cuenca sedimentaria de Magallanes.	34
Figura 3.5: Configuración final de botaderos.	38
Figura 3.6: Avance en la revegetación de botaderos de acuerdo a compromisos RCA.....	41
Figura 3.7: Talud resultante luego de operaciones de rehabilitación.	42
Figura 3.8: Implantación Botadero Interior.....	43
Figura 3.9: Áreas revegetadas o preparadas para revegetación sobre Botadero Sur.....	44
Figura 4.1: Avance de áreas de botadero a rehabilitar en caso de cierre.	46
Figura 4.2: Relación entre volumen disponible y requerido por espesor de suelo.	47
Figura 4.3: Fases planificadas 12 a 36.....	47
Figura 4.4: Esquema general del proyecto.	48
Figura 4.5: a) Bastón Pedológico b)Gato Mecánico.....	49
Figura 4.6: Puntos de muestreo sobre área a intervenir.	50
Figura 4.7: Espesores de suelo encontrados sobre áreas a intervenir.....	51
Figura 4.8: Clases de Suelo encontradas en el área a intervenir.....	52
Figura 4.9: Secuencia de operaciones de rehabilitación de botaderos	53
Figura 4.10: Sector de descargas a piso sobre Botadero Sur.....	53
Figura 4.11: Relación de altura/ángulo de talud en pared norte de Botadero Sur.....	54
Figura 4.12: Operaciones de rehabilitación por sector.....	55
Figura 4.13: Esquema de operación de suavizamiento de superficie.	57
Figura 4.14: Compactación del terreno provocada por el flujo de equipos.....	58
Figura 4.15: Operación de reperfilamiento de talud de botadero	59
Figura 4.16: Volúmenes de material a cortar sobre topografía original de botadero	60
Figura 4.17: Material de relleno sobre diseño operativizado de rehabilitación.	61
Figura 4.18: Movimientos de material planificados en el sector Norte del Botadero Sur.....	61
Figura 4.19: Distribución de zonas de trabajo para <i>bulldozer</i> D10T.....	62
Figura 4.20: Sectores de rehabilitación, acopios y caminos.	64
Figura 4.21: Talud parcialmente rehabilitado.....	67
Figura 4.22: Puntos de descarga de suelo sobre área a rehabilitar	68
Figura 4.23: Puntos de descarga de suelo sobre talud a rehabilitar	69
Figura 5.1: Propuesta de rehabilitación	70
Figura 5.2: Distribución porcentual de costos por hectárea rehabilitada	74
Figura 9.1: Mapa de Unidades Geológicas en Mina Invierno.....	83
Figura 9.2 Mapa formaciones geomorfológicas	84

Figura 9.3: Ubicación general de obras e instalaciones en Mina Invierno.....	85
Figura 9.4: Producción calculada por distancia promedio de empuje	86
Figura 9.5 Especificaciones técnicas Bulldozer Modelos Caterpillar D6-T y D10-T	87
Figura 9.6: Presiones ejercidas sobre el suelo	88
Figura 9.7: Factores de corrección según las condiciones de trabajo.....	88
Figura 9.8: Especificaciones técnicas Excavadora PC300	89
Figura 9.9: Especificaciones técnicas Camión Komatsu HD785.....	89



INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Suelo superficial extraído por semestre.....	45
Tabla 4.2: Volumen utilizado en cubierta vegetal por año	46
Tabla 4.3: Clasificación según profundidad de suelo.....	52
Tabla 4.4: Especificaciones técnicas de <i>bulldozers</i>	56
Tabla 4.5: Especificaciones técnicas de excavadora.....	56
Tabla 4.6: Especificaciones técnicas de camión.....	57
Tabla 4.7: Factores de corrección para suavizamiento de superficies mediante <i>bulldozer</i> ...	58
Tabla 4.8: Producción y tiempos de trabajo para suavizamiento de superficies.	59
Tabla 4.9: Factores de corrección para perfilamiento de taludes mediante <i>bulldozer</i>	62
Tabla 4.10: Producción y tiempos de trabajo para perfilamiento de taludes.	63
Tabla 4.11: Acopios de suelo vegetal sobre Botadero Sur	63
Tabla 4.12: Distancias para alternativas de caminos.....	64
Tabla 4.13: Caracterización de conjunto excavadora-camión.....	65
Tabla 4.14: Tiempos de ciclo para alternativas de camino	66
Tabla 4.15: Requerimientos de suelo y distancias de transporte.....	66
Tabla 4.16: Tiempos de operación para transporte de suelo.....	67
Tabla 4.17: Producción <i>bulldozer</i> D6-T sobre área a rehabilitar	68
Tabla 4.18: Producción <i>bulldozer</i> D6-T sobre talud a rehabilitar.....	69
Tabla 4.19: Tiempo de operación para instalación de suelo	69
Tabla 5.1: Resumen de tiempos requeridos por equipo	71
Tabla 5.2: Resumen de horas efectivas de trabajo requeridas por operación.....	71
Tabla 5.3: Distribución de equipos por áreas de rehabilitación	71
Tabla 5.4: Consumo de Combustible	72
Tabla 5.5: Costos por Remuneraciones	72
Tabla 5.6: Costos operacionales totales y unitarios por operación de rehabilitación.....	73
Tabla 5.7: Costos operacionales totales y unitarios para Instalación de Suelo.....	73

NOMENCLATURA

Unidades de medida

ms.n.m.	Metros Sobre el Nivel del Mar
ha	Hectáreas
m ³	Metros cúbicos
m ³ /h	Metros cúbicos sueltos por hora
kPa	Kilopascal

Siglas y abreviaturas

RCA	Resolución de Calificación Ambiental
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
D.S	Decreto Supremo



1 INTRODUCCIÓN

Las operaciones mineras a cielo abierto generan impactos negativos considerables sobre el medio ambiente como pérdida de suelo, alteración de la calidad del aire por aumento de la concentración de material particulado, cambio en la calidad físico química de las aguas, contaminación acústica, pérdida de hábitat terrestre y alteración de la calidad del paisaje, entre otros.

Particularmente, los botaderos de estériles de operaciones mineras de carbón poseen un potencial considerable de contaminación de aire, suelo, agua y paisaje, a través de la generación de polvo, posible lixiviación y riesgos de combustión espontánea.

Debido a esto, resulta fundamental que proyectos de explotación y aprovechamiento de los recursos minerales se realicen en conjunto con los de conservación del medio ambiente para perseguir la adecuación ecológica y paisajística de los terrenos afectados, con vistas a la reinserción del área ocupada en el entorno medio-ambiental.

La rehabilitación de minas requiere que las compañías mineras realicen las labores de rehabilitación de la tierra de manera progresiva, una vez que no sea requerida para propósitos operacionales, lo cual mantiene el área de afectación en un mínimo y asegura que el uso ecológico y/o agrícola productivo de la tierra sea restaurado antes del cierre de la mina [11,14].

Siguiendo esta filosofía, Mina Invierno definió como uno de sus valores organizacionales el respeto por el medio ambiente, asumiendo un compromiso con la protección y preservación del entorno físico, la flora y la fauna y definiendo como una de las aristas primordiales de esto, la condición final con que quedarían las instalaciones mineras al término de las operaciones.

Bajo esta premisa se decidió implementar dos prácticas innovadoras para la minería nacional, de amplio uso en la minería del carbón en el mundo e implementada en proyectos regionales de carbón de menor escala [19].

La primera de ellas consiste en la disposición al interior del rajo de una parte del material estéril generado, generando un botadero interior; y la segunda, consiste en la rehabilitación de los botaderos mediante el suavizamiento de taludes, recubrimiento con suelo y revegetación. Ambas prácticas, aplicadas de manera progresiva durante la vida de la operación, reducirían de manera significativa los eventuales impactos ambientales asociados principalmente a la ocupación y

pérdida de terrenos naturales y a la intervención del paisaje, logrando de este modo una condición de cierre de alto estándar.

El presente trabajo de memoria de título se desarrolló en la Gerencia de Sustentabilidad, bajo la supervisión del Jefe de Rehabilitación Ambiental, motivado por la intención de Mina Invierno de cumplir con los compromisos medio ambientales referentes a la rehabilitación de botaderos, dispuestos en la Resolución de Calificación Ambiental¹, aprobada por el Servicio de Evaluación Ambiental de la XII Región de Magallanes y Antártica Chilena en 2011.

1.1 Identificación y contexto del problema

El compromiso de cierre progresivo asumido por la empresa se ha estado realizando desde el año 2015 y consiste en rehabilitar los botaderos una vez alcanzada su capacidad máxima de llenado de diseño, mediante la reconfiguración de la geometría de los taludes de botaderos, cuyo objetivo es el de imitar las formas naturales de los cerros para la adecuación paisajística, así como asegurar su estabilidad física. Esta operación es seguida por una instalación de suelo superficial almacenado previamente y luego por una siembra mediante la técnica de hidrosiembra para, en una etapa posterior, plantar especies arbóreas y arbustivas iguales a las encontradas en la zona antes de comenzar la explotación.

Actualmente Mina Invierno se encuentra bajo una medida cautelar dictaminada por el Tribunal Ambiental de Valdivia que prohíbe realizar tronaduras bajo la cota 100 msnm, lo cual se traduce en una dificultad severa para continuar la operación de la mina. Frente a esta situación ha surgido la posibilidad de realizar una paralización temporal de las actividades de la mina, a la espera de la respuesta definitiva del tribunal. Esto implicaría adelantar operaciones de rehabilitación sobre algunos sectores, surgiendo la necesidad de identificar aquellos donde, dadas las características actuales del terreno y las condiciones climáticas, es más urgente o más factible realizar estas operaciones.

Además, cabe mencionar que, pese a que es poco probable, existe la posibilidad de cerrar la mina definitivamente. Bajo este escenario, sería necesario rehabilitar la totalidad de superficies intervenidas a la fecha, lo cual implicaría utilizar una cantidad considerable de suelo para realizar la revegetación. De esto surge la necesidad de conocer la disponibilidad de este recurso tanto en los acopios temporales donde se almacena, como en las áreas que habían sido planificadas para la intervención minera pero que aún no han sido escarpadas.

¹ RCA n° 025.2011

Por todo lo anterior, se decidió realizar el presente estudio, el cual busca verificar el cumplimiento de compromisos medio ambientales dispuestos en la RCA referentes a la rehabilitación de botaderos, cuantificar los recursos edáficos disponibles y realizar un análisis logístico y económico de las operaciones que involucra la rehabilitación de botaderos, para generar una propuesta de utilización eficiente de los recursos disponibles, y así asegurar el cumplimiento de los compromisos antes mencionados.

1.2 Conceptos e ideas generales

1.2.1 Restauración y rehabilitación

Según la National Academy of Sciences de los Estados Unidos [25], la realización de trabajos encaminados a devolver los terrenos alterados a su estado original se llama restauración (en inglés *restoration*). Se dice rehabilitación (en inglés *rehabilitation*) si los terrenos adquieren una forma y productividad de acuerdo a un plan previo y son ecológicamente estables, de manera que no contribuyan sustancialmente al deterioro ambiental, y se integren adecuadamente en el paisaje circundante [2-3]. Así, los tratamientos de reperfilamiento, cubrimiento con suelo vegetal y revegetación sobre los botaderos en Mina Invierno, fueron considerados como medidas de rehabilitación de los mismos, puesto que no buscan devolver el sitio afectado a como era originalmente, lo cual sería imposible, sino devolverlo a un estado satisfactorio en lo que se refiere a la calidad del suelo, la fauna, los hábitats naturales, sistemas de agua dulce y el paisaje.

1.2.2 Resolución de Calificación Ambiental

La Resolución de Calificación Ambiental, de ahora en adelante RCA, es un documento administrativo que se obtiene una vez culminado el proceso de evaluación de impacto ambiental ya sea Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o Declaración de Impacto Ambiental (DIA), que coordina el Servicio de Evaluación Ambiental del Gobierno de Chile (SEA) [33].

Esta Evaluación de Impacto Ambiental concluye con una resolución que puede ser de aprobación o rechazo, RCA favorable o RCA desfavorable, respectivamente. En caso de rechazo, el proyecto o actividad no puede ejecutarse en tanto su calificación no sea favorable. En caso favorable, el documento establece las condiciones, exigencias o medidas que el titular asociado a un proyecto o actividad deberá cumplir durante su ejecución, siendo obligatorio el desarrollo de la función de seguimiento y fiscalización. La RCA favorable además certifica que el proyecto cumplió con el proceso de evaluación con los requisitos ambientales aplicables, incluyendo las medidas de

mitigación y rehabilitación y ningún organismo del Estado podría denegar las autorizaciones ambientales correspondientes [9].

1.2.3 Plan de Cierre

Un plan de cierre es un proyecto de ingeniería en el cual se presentan un conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que se derivan del desarrollo de la industria extractiva minera, en los lugares en que ésta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones, en conformidad a la normativa ambiental aplicable.

La Ley N°20.551 que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, entró en vigencia el 11 de noviembre de 2012 y obliga a todas las faenas mineras a contar con un plan de cierre aprobado por el Sernageomin², previo al inicio de las operaciones mineras, el cual debe contener la totalidad de las instalaciones de la faena.

El plan de cierre de las faenas mineras es parte del ciclo de su vida útil, y debe ser ejecutado por la empresa minera antes del término de sus operaciones, de manera tal que, al cese de éstas, se encuentren implementadas las condiciones de estabilidad física y química en el lugar en que operó la faena minera [23].

De acuerdo al D.S³. 40 de 2013 [24]:

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

1.2.4 Recursos edáficos

La edafología es una rama de la geología que estudia el suelo y sus características físicas, químicas y biológicas, así como su formación y clasificación [28]. Así, los recursos edáficos se

² Servicio Nacional de Geología y Minería

³ Decreto Supremo

definen como los recursos que pertenecen al suelo o que se encuentran influenciados por la naturaleza del mismo. Esto es lo que comúnmente se denomina como tierra o cubierta vegetal [3].

Un suelo se encuentra generalmente constituido por horizontes más o menos paralelos a la superficie, causados por diversos procesos físicos, químicos y biológicos, y es el medio natural para el desarrollo de las plantas. Su proceso de formación es extremadamente lento, por lo que en este sentido se puede considerar al suelo como un recurso no renovable [6].

Las características de los suelos varían considerablemente, dependiendo de los tipos de rocas con las que fueron formados, las condiciones de formación y la cantidad de tiempo transcurrido. Una compleja historia geológica y geomorfológica, puede resultar en un número de diferentes estratos geológicos o unidades en distancias relativamente cortas, lo cual puede generar una alta diversidad en los suelos asociada a la heterogeneidad de los materiales parentales [27].

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivos Generales

Para dar solución a los problemas presentados en este trabajo de investigación, se plantearon los siguientes objetivos generales:

1. Cuantificar la disponibilidad de los recursos edáficos.
2. Planificar operaciones de rehabilitación de los botaderos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar los objetivos generales propuestos, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar los compromisos medio ambientales asumidos por la empresa en la Resolución de Calificación Ambiental y verificar su cumplimiento.
2. Definir cantidad total de recursos edáficos necesarios para realizar el cubrimiento y posterior revegetación de botaderos.
3. Cuantificar volumen de suelo disponible en acopios temporales actuales y cantidad disponible en áreas que aún no han sido intervenidas mediante levantamiento de recurso suelo en la zona de estudio.

4. Definir orden de prioridad de zonas a rehabilitar en botaderos y determinar operaciones a realizar sobre ellas.
5. Definir horas efectivas de trabajo de equipos necesarios para labores de rehabilitación.
6. Realizar un análisis económico de las operaciones de rehabilitación.

1.4 Alcances

El presente estudio es un proyecto de ingeniería cuyo principal objetivo es planificar operaciones de rehabilitación de botaderos, mediante la cuantificación de recursos necesarios, cuyos alcances y limitaciones son los siguientes:

- El Botadero Interior forma parte de los compromisos de rehabilitación asumidos por la empresa, sin embargo, no es objetivo de este estudio realizar la planificación de esas operaciones.
- El análisis de disponibilidad de suelo considera los requerimientos de recurso edáfico con los que se encontraría la empresa frente a un eventual cierre definitivo de la faena. Sin embargo, está fuera del alcance de este estudio determinar las operaciones de rehabilitación para tal caso.
- La planificación de las operaciones de rehabilitación considera la posibilidad de realizar solo una paralización temporal de la faena.
- Las estimaciones de suelo se realizaron para tener una visión preliminar rápida de dónde podrían encontrarse suelos más profundos.
- No es objetivo de este estudio validar el modelo de predicción de la profundidad del suelo.
- Pese a que se proponen variaciones en el espesor de suelo a instalar, no es objetivo de este estudio evaluar esos casos, ni planificar las operaciones de escarpe.
- La operación de revegetación por hidrosiembra se realiza a través de una empresa externa, por lo cual no se estudiaron sus costos ni se ideó su planificación.
- El tiempo requerido para realizar las operaciones de rehabilitación es variable y depende de la disponibilidad de los equipos. Los diseños de ingeniería se realizan en la empresa considerando disponibilidad mínima de ellos.
- El análisis económico no incluye costos fijos pues tiene como objetivo determinar solo los costos operacionales. Tampoco incluye costos indirectos, los cuales corresponden a aquellos no atribuibles únicamente al uso del equipo, como gastos de consumo eléctrico, de agua y de almacenamiento, entre otros.

1.5 Propuesta de Trabajo

El presente estudio comprendió una serie de etapas, organizadas con el propósito de alcanzar satisfactoriamente los objetivos propuestos, detalladas a continuación.

1.5.1 Inducción a la Empresa

La inducción a la empresa correspondió a la recopilación de la información más relevante del proyecto minero, basándose en fuentes teóricas, como el Plan de Cierre a la fecha y la RCA; y prácticas, como las visitas a terreno en área mina y botaderos.

1.5.2 Recopilación de antecedentes

La recopilación de antecedentes consistió en la realización de un levantamiento de los compromisos medio ambientales dispuestos en la RCA realizados por la empresa, referentes a los botaderos, así como la revisión del estado del arte de técnicas de rehabilitación de botaderos y la obtención de información de diseño y de operación de los mismos.

1.5.3 Cuantificación de recursos edáficos

Esta etapa consistió en la toma de muestras del área a intervenir durante la vida útil del proyecto, para determinar la profundidad del suelo superficial disponible, labor que se realizó con la ayuda de un bastón pedológico⁴, generando un mapa de clasificación de profundidad de suelo, realizado mediante QGIS⁵.

Con lo anterior, se realizó una estimación del volumen de suelo disponible para revegetación, mediante interpolación en R⁶. Una vez realizada ésta, se determinó el volumen total de recursos edáficos disponibles, considerando tanto las áreas a intervenir como el suelo almacenado en los acopios temporales.

1.5.4 Planificación de operaciones de rehabilitación

Se realizó un análisis de la condición actual del Botadero Sur, identificando diferentes sectores o unidades de rehabilitación y estableciendo un orden de prioridad de acuerdo a las eventuales amenazas que podrían generar deslizamientos de material por los taludes. Esto permitió generar un diseño de rehabilitación y una planificación en el tiempo de las labores a

⁴ También conocido como barreno. Herramienta utilizada para realizar agujeros o pozos cilíndricos, extrayendo el material sólido perforado.

⁵ Sistema de Información Geográfica de software libre.

⁶ Entorno y lenguaje de programación con un enfoque al análisis estadístico.

realizar. Las mediciones sobre el botadero y el diseño de ingeniería fueron realizados mediante Vulcan⁷.

1.5.5 Análisis Económico

La planificación de las operaciones permitió estimar las horas de trabajo efectivas requeridas para realizar la totalidad del eventual cierre temporal de la faena. Conocido esto, se realizó un análisis del costo unitario por hectárea de cada operación de rehabilitación.



⁷ Maptek Vulcan 11. Software de planificación minera y modelado en 3D.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Botaderos de Estériles

Los botaderos mineros son depósitos de material fragmentado estéril, es decir, sin concentraciones de mineral de interés, resultantes de una explotación minera. Estos materiales de desecho plantean el problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integración en el entorno.

La elección del emplazamiento de un botadero se debe basar en criterios de diversa naturaleza como técnicos, económicos, ambientales y socioeconómicos, entre otros. Entre los criterios específicos más importantes se encuentran la distancia de transporte desde la explotación al botadero, lo cual afecta el costo total de la operación; la capacidad de almacenamiento necesaria, que viene impuesta por el volumen de estéril a mover; las alteraciones potenciales que pueden producirse sobre el medio natural y las restricciones ecológicas existentes en el área de implantación [11].

2.1.1 Tamaño y Diseño

Se considera botadero cualquier acumulación de materiales que sobrepase los 25,000 m³ de volumen, los 15 m de diferencia de altura entre su pie y la parte superior del depósito, o bien cuyo espesor de estéril sea superior a 10 m [7]. En condiciones normales de homogeneidad y humedad del material, se dividen en:

- Grandes: aquellos cuya altura sea superior a 30 m.
- Medianos: aquellos cuya altura sea superior a 20 m e inferior a 30 m.
- Pequeños: aquellos cuya altura sea superior a 15 m e inferior a 20 m.

Los valores de sus parámetros de diseño deben ser determinados por un estudio geotécnico y dependen tanto del tipo de material depositado como del suelo donde se emplace. Algunos de ellos son los siguientes, representados sobre la Figura 2.1:

- Banco: Es la unidad básica de un botadero, también denominado piso, módulo o torta.
- Berma: Distancia entre la cresta de un banco y el pie del banco sobre él.
- Ángulo de banco: Ángulo formado entre el pie y la cresta de un mismo banco, generalmente corresponde al ángulo de reposo del material estéril.

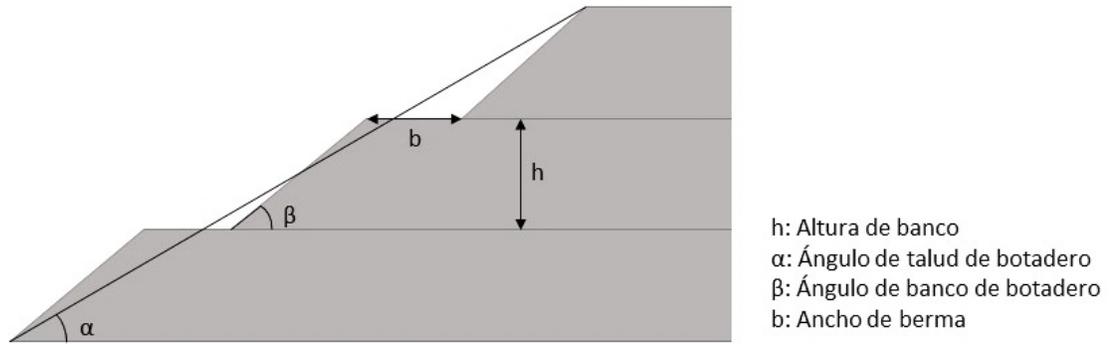


Figura 2.1: Geometría de un botadero

2.1.2 Implantación

Como se muestra sobre la Figura 2.2, según sea la implantación del botadero con respecto a la explotación, éstos se clasifican en interiores, si los estériles se depositan dentro de los propios huecos excavados tras la apertura de un hueco inicial y exteriores, cuando la morfología del yacimiento y su consiguiente explotación no permiten el relleno de la excavación creada en las primeras fases de la mina.

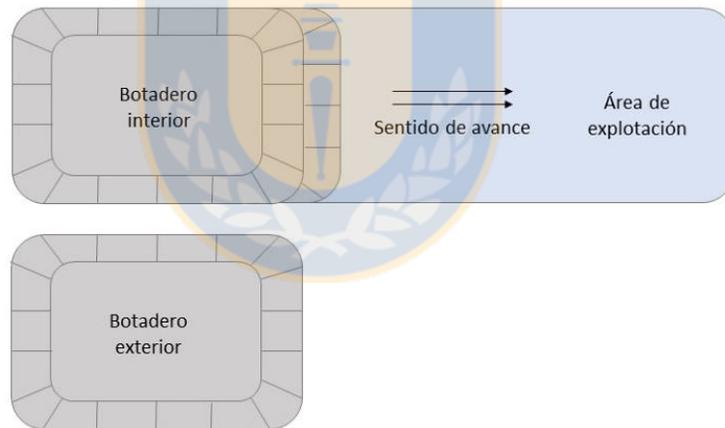


Figura 2.2: Implantaciones de botaderos según excavación.
 (Modificado de Manual de Restauración de Terrenos.1989. p. 23)

2.1.3 Emplazamiento

Luego, de acuerdo a las formas naturales del terreno, los tipos de botaderos más frecuentes son los que se muestran en la Figura 2.3, aunque es posible que en una misma área coexistan combinaciones diversas de esas estructuras, en función de la extensión que ocupe el emplazamiento.



Figura 2.3: Tipos de botaderos exteriores.
(Modificado de Vásquez et al, 1998, p. 112-113 [35])

La disposición del estéril en laderas de cerros cercanos a las operaciones es una de las más utilizadas, por la simplicidad que representa para la descarga, mantención y estabilidad del talud del botadero. La disposición sobre terrenos llanos ocurre cuando no hay laderas o quebradas cercanas a la explotación y se denomina disposición en tortas o pilas.

2.1.4 Sistema de vertido

El llenado de botadero debe realizarse de la manera más homogénea posible y de ello depende en gran medida la modalidad de vertido que se elija. Normalmente, los estériles se desplazan desde las minas hasta los vertederos por cintas transportadoras o por camiones, siendo habitual disponer de *bulldozers*⁸ para el extendido y empuje de esos materiales y acondicionamiento del piso [11].

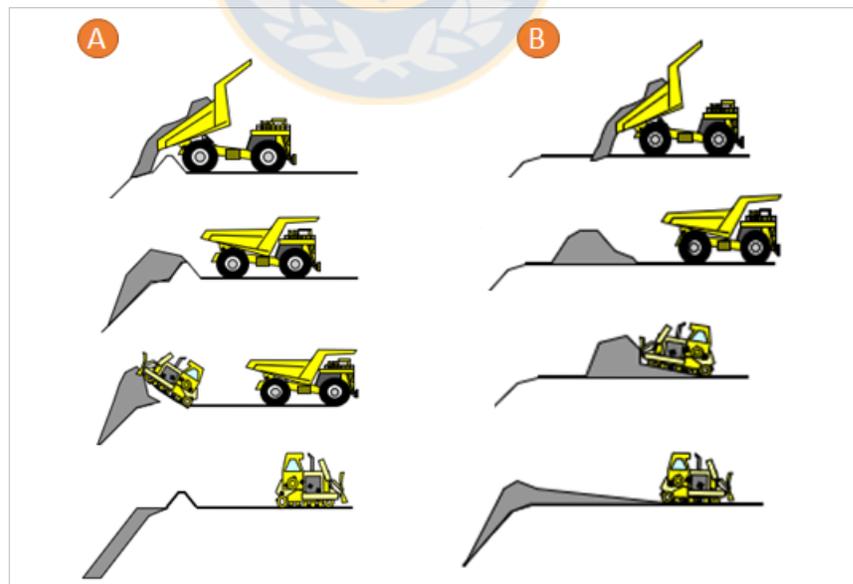


Figura 2.4: Tipos de descarga en botaderos.
A) Vertido libre hacia el talud. B) Vertido interno sobre el botadero.
(Modificado de Vasquez et al 1998 p. 119-120)

⁸ Tractores sobre cadenas

Como se ilustra en la Figura 2.4, cuando el vertido se hace mediante camiones, éste puede clasificarse de dos maneras: vertido libre hacia el talud del botadero o vertido interno sobre el botadero. Los *bulldozers* permiten a los camiones operar en mejores condiciones de seguridad, puesto que no tienen que posicionarse al borde de los taludes.

2.1.5 Método constructivo

Los tipos de botaderos que pueden distinguirse de acuerdo con la secuencia constructiva de los mismos, como se ilustra sobre la Figura 2.5.

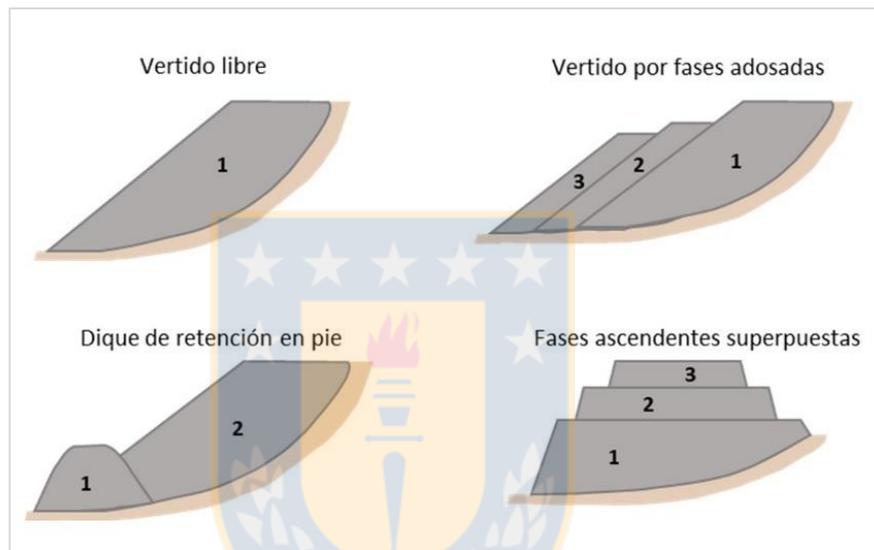


Figura 2.5: Tipos de botaderos de acuerdo a la secuencia de construcción.
(Modificado de Manual de Restauración de Terrenos, 1989. p. 25)

La formación con vertido libre es aconsejable en botaderos pequeños, cuando no existe riesgo de rodadura de material aguas abajo y se caracteriza por presentar en cada momento un talud que coincide con el ángulo de reposo de los estériles. De los cuatro tipos es el más desfavorable geotécnicamente, aunque ha sido el más utilizado hasta épocas recientes. Los botaderos con fases adosadas proporcionan unos factores de seguridad mayores, pues se consiguen unos taludes medios finales más bajos. Cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas, puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúen de muro de contención del resto de los estériles depositados. Esta secuencia constructiva es la que se suele seguir en aquellas explotaciones donde se extraen grandes cantidades de materiales arcillosos y finos, cuya deposición exigiría de otro modo grandes extensiones de terreno y presentaría un elevado riesgo de deslizamientos, o cuando las condiciones de la base de apoyo

no son buenas. El tipo de fases superpuestas por su parte aporta una mayor estabilidad, por cuanto se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

2.1.6 Preparación del terreno sobre botaderos para rehabilitación

Al analizar los terrenos sobre los que se quiere llevar a cabo la instauración de la vegetación, después de finalizada la explotación minera, se observa la dificultad o imposibilidad de desarrollar cualquier tipo de cubierta vegetal por presentar un sustrato inadecuado en el que sus características físicas, químicas y biológicas han sido alteradas. En general, el sustrato puede presentar: escasez de materia orgánica y de nutrientes, baja proporción de elementos finos que da lugar a texturas gruesas y a una baja estabilidad de los agregados arcillo-húmicos, si es que existen, valores de pH extremos, existencia de elementos tóxicos y sales en concentraciones excesivamente altas para el desarrollo de la vegetación, entre las más significativas [11].

Esta situación crea la necesidad de preparar el terreno, como paso previo y fundamental en el establecimiento de la vegetación, buscando las soluciones o métodos que ayuden a superar los problemas que dicho terreno presenta y teniendo en cuenta el tipo de actividad extractiva desarrollada y el uso que se pretenda dar al terreno en la recuperación.

Los objetivos principales que han de tenerse en cuenta en los trabajos de preparación de terreno son:

- Proporcionar un buen drenaje.
- Proporcionar medio para permitir un correcto desarrollo del enraizamiento de la vegetación.
- Reducir o eliminar la acidez o alcalinidad, así como la presencia de elementos tóxicos.
- Aumentar el suministro de nutrientes esenciales para las plantas.
- Integrar la morfología del terreno en el paisaje circundante.

Las prácticas o métodos a considerar en la preparación del terreno que ayudan a corregir los problemas que impiden el establecimiento de la vegetación en los suelos afectados son principalmente los siguientes:

- Manejo de la capa superficial del suelo.
- Descompactación del terreno.
- Enmiendas o mejoras edáficas.
- Tratamientos especiales de taludes para la preparación del terreno.

2.2 Rehabilitación de Botaderos

Los botaderos de estériles han sido tradicional e históricamente dispuestos con muy poca consideración sobre el impacto ambiental generado y el posible futuro uso de la tierra. Sin embargo, en las últimas décadas, los desafíos de rehabilitación y recuperación de botaderos y sitios mineros se han vuelto una componente importante de las estrategias de desarrollo sustentable que utilizan muchos países.

La revegetación de botaderos es una manera efectiva de reducir el escurrimiento y la erosión del suelo y es una clave fundamental en la rehabilitación de los ecosistemas en regiones ecológicamente sensibles. Esto, porque en el largo plazo la vegetación puede aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo, mejorando las propiedades físicas del suelo y disminuyendo la erodabilidad, además de reducir el escurrimiento y la erosión a niveles seguros [8,37] El procedimiento usual implica remover la capa superficial (vegetal) de suelo, subsuelo o ambos, en capas separadas, para almacenarlas y posteriormente rellenar el área del botadero para sembrarlo, luego del cierre de la mina. Sin embargo, es importante considerar que el costo económico involucrado en la remoción, almacenamiento y protección del suelo es alto. Más aún, cuando el suelo es infértil o de mala calidad para sostener la vegetación, no vale el esfuerzo ni el gasto. Además, el almacenamiento de la cubierta vegetal es a menudo muy complejo, debido a pérdidas a causa de la erosión por viento y por agua [22], por lo cual es importante realizar planes de rehabilitación con estrategias que permitan asegurar el éxito de la revegetación manteniendo costos económicos aceptables. Aunque éstos han sido poco estudiados en general, en Australia se han desarrollado dos métodos para estimar los costos totales de rehabilitación [14]. Aun así, esto solo se puede considerar como una aproximación inicial para un estudio detallado de costos.

En particular, para la rehabilitación de botaderos de minería del carbón, destacan los estudios realizados sobre la provincia de Shanxi en China, la región minera de explotación de carbón más extensa del país [17]. En la zona se han realizado numerosos proyectos de rehabilitación que datan desde los años 90s, lo que permitió que hacia el año 2000 ya se pudiera contar con una revisión de buenas prácticas en revegetación y rehabilitación de sitios degradados por minería [22], la cual resume los principios de rehabilitación ecológica que se habían adoptado históricamente en la provincia a la fecha, abriendo camino hacia nuevas investigaciones. Los estudios posteriores se dedicaron principalmente a analizar tanto las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los suelos [38] como los cambios en la diversidad de especies de plantas [15], para diferentes edades de botaderos.

Otros estudios importantes se han realizado en España, enfocados principalmente en las técnicas de siembra empleadas para estas labores. Esto, porque la fase de colonización inicial es el punto de inicio crucial para la sucesión y por tanto para la rehabilitación [1]. Entre las técnicas de revegetación más comunes destaca la hidrosiembra [10] de mezclas de semillas de especies herbáceas y/o la plantación de árboles y/o arbustos [21], técnica que ha demostrado ser bastante eficiente en taludes de alta pendiente, de acuerdo a estudios realizados en India, donde se sembró con especies herbáceas y leguminosas [18]. En este mismo país se han realizado aportes investigativos importantes en términos de monitoreo y supervisión de revegetación de botaderos [36] y en definición de criterios para la selección de especies de plantación sobre botaderos mineros [32].

Por otra parte, cabe mencionar la importancia de considerar los factores abióticos que afectan los terrenos sobre los que se realiza la siembra, dado que algunos autores sugieren que la recuperación del suelo es igualmente importante que la recuperación de vegetación en las actividades de eco-rehabilitación, al menos para zonas semi-áridas [4]. De acuerdo a un estudio realizado en Corea del Sur que recogía la opinión de expertos en ingeniería y en medio ambiente, las cinco variables que más afectan la estabilidad de la revegetación son: intensidad de la lluvia, agua de infiltración, ángulo de talud, condiciones de drenaje, y espesor de la capa de tierra instalada [12].

2.3 La Minería del Carbón

2.3.1 El carbón

En términos generales, el carbón es una roca sedimentaria originada por la acumulación de restos vegetales (truncos, hojas, cortezas, esporas, etc.) en zonas pantanosas, lacustres o marinas de poca profundidad. Los aportes sucesivos de materia vegetal y sedimentos, así como la subsidencia del terreno, configuran las condiciones ideales de presión y temperatura para su formación.

2.3.2 Formación

El proceso geológico de formación de materiales con contenido creciente en carbono a partir de los materiales orgánicos depositados en los medios anteriormente citados se denomina carbonificación. Esta transformación gradual se produce a temperaturas moderadas (sobre 250 °C), a alta presión y se realiza en dos etapas: la “diagénesis”, en la que tiene lugar la descomposición de la materia orgánica mediante bacterias hasta formar la turba, y el

“metamorfismo”, en el que se continúa la carbonificación por la acción del calor y la presión, donde el carbón mineral evoluciona desde lignito hasta antracita, como se presenta sobre la Figura 2.6.

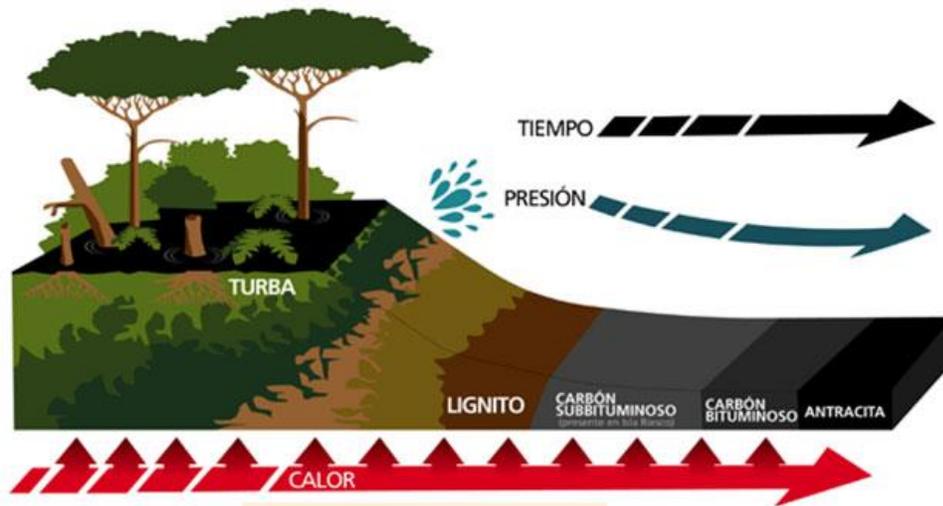


Figura 2.6: Evolución del carbón
Fuente: Formación del carbón, Mina Invierno⁹

La gran mayoría de los depósitos de carbón mineral se formaron durante el período geológico del Carbonífero (hace entre 345 y 320 millones de años) y el Pérmico (hace más de 280 millones de años). Existen también depósitos, menos abundantes pero significativos, formados durante el Triásico y el Jurásico y, en menor cantidad, en el Cretácico.

Existen diferentes tipos de carbones minerales en función del grado de carbonificación que haya experimentado la materia vegetal que originó el carbón. Éstos comprenden desde la turba, cuya materia vegetal muestra poca alteración, hasta la antracita, que es el carbón mineral con una mayor evolución.

El rango de un carbón mineral se determina en función de criterios tales como su contenido en materia volátil, contenido en carbono fijo, humedad, poder calorífico, etc. Así, a mayor rango, mayor es el contenido en carbono fijo y mayor el poder calorífico, mientras que disminuyen su humedad natural y la cantidad de materia volátil. Una de las clasificaciones más utilizadas divide a los carbones de mayor a menor rango en: “antracita”, “bituminoso bajo en volátiles”, “bituminoso medio en volátiles”, “bituminoso alto en volátiles”, “sub-bituminoso”, “lignito” y “turba”. La “hulla” es un carbón mineral de tipo bituminoso medio y alto en volátiles.

⁹ Disponible en <https://www.minainvierno.cl/formacion-del-carbon/>

2.3.3 Historia del carbón en Magallanes

Desde el comienzo de la colonización chilena en la región del Estrecho de Magallanes se tenía conocimiento de la presencia de carbón mineral lignito en el territorio. Aunque se realizaron esfuerzos por explotar carbón en este y otros lugares cercanos hasta fines del siglo XIX, éstos fracasaron. Sin embargo, a comienzos del siglo XX la explotación carbonífera recuperó su vigor, con la inversión hecha por el chileno Agustín Ross para explotar la mina Loreto, ubicada en el río del Valle de las Minas, cerca de Punta Arenas.

La actividad se expandió luego a otro distrito magallánico, principalmente en Isla Riesco donde comenzó la explotación de la mina Elena, ubicada en el sector noreste de la isla, bordeada por el seno Skyring, como se presenta sobre la Figura 2.7. De ese modo, la minería del carbón alcanzó un período culminante hacia 1943, especialmente estimulado por la exportación de carbón hacia Argentina.



Figura 2.7 Zona carbonífera de Magallanes hacia 2003.
Fuente: La minería del carbón en Magallanes entre 1868 y 2003.

Desde 1950 y durante los siguientes 30 años la actividad carbonífera decayó hasta perder toda su importancia económica. Sin embargo, desde 1984 se inició una segunda época productiva, con una tecnología moderna y una fuerte inversión de capital que permitió la explotación de la mina Pecket, ubicado en el distrito norte de la península de Brunswick, desde 1987, alcanzando una producción anual promedio de 300.000 toneladas hacia 1998 [20].

Con el crecimiento de la demanda energética de las zonas norte y centro-sur de Chile hacia el siglo XXI, resurgió el interés por los yacimientos de carbón sub-bituminoso de Isla Riesco. Así, en 2006 se constituyó la Sociedad Minera Isla Riesco S.A., hoy Mina Invierno S.A. [19].



3 ANTECEDENTES

3.1 Mina Invierno

Mina Invierno es un proyecto minero de explotación de carbón operado por la sociedad anónima cerrada Mina Invierno S.A, cuyos accionistas son Empresas Copec S.A. e Inversiones Ultraterra Limitada, perteneciente al grupo de empresas Ultramar. Las siguientes características son descritas de acuerdo a la Línea Base del EIA del Proyecto Mina Invierno, realizado por la empresa consultora Golder Associates [30].

3.1.1 Ubicación

Mina Invierno se ubica en Isla Riesco, a una distancia aproximada de 130 km al noroeste de la ciudad de Punta Arenas y a 40 km de la localidad de Río Verde en la Región de Magallanes y Antártica Chilena, como se observa en la Figura 3.1. La explotación se encuentra a una altitud media de 120 msnm y explota mediante las clásicas operaciones unitarias de la minería a cielo abierto el yacimiento Invierno, el cual es conformado por un manto carbonífero principal de 13 m de potencia promedio y otros mantos secundarios de menor espesor.

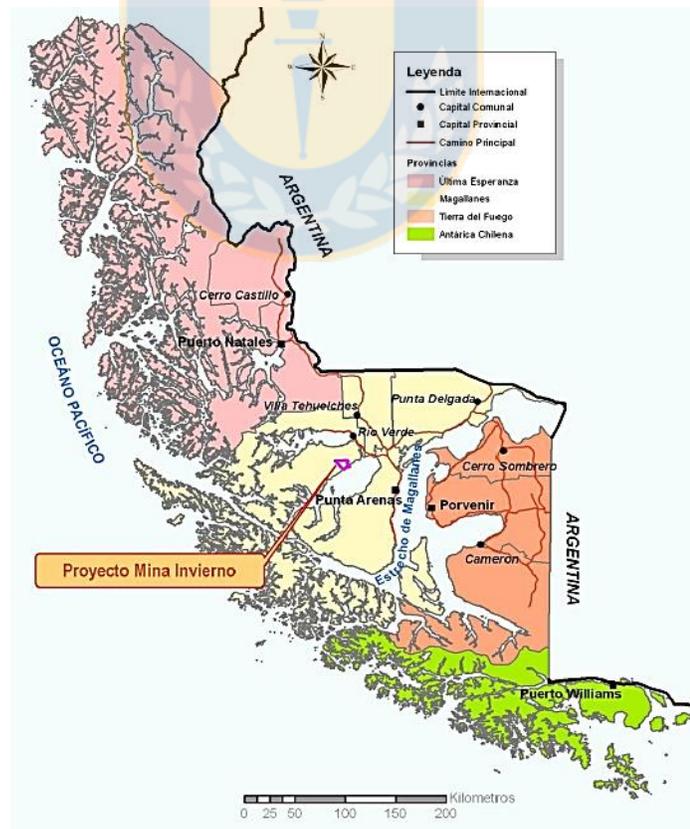


Figura 3.1: Ubicación Regional de Mina Invierno
Fuente: EIA Proyecto Mina Invierno

3.1.2 Clima y Meteorología

El clima de Isla Riesco es variado y posee todos los tipos climáticos de la Región de Magallanes y Antártica Chilena, como se presenta sobre la Figura 3.2. El área correspondiente al proyecto minero en particular tiene gran influencia de dos grandes grupos climáticos: el Clima Transandino con Degeneración Esteparia que corresponde a una zona de bosque y el Clima de Estepa Frío, correspondiente a cercanías de la costa y en forma puntual influencia los otros tipos climáticos debido a su cercanía.

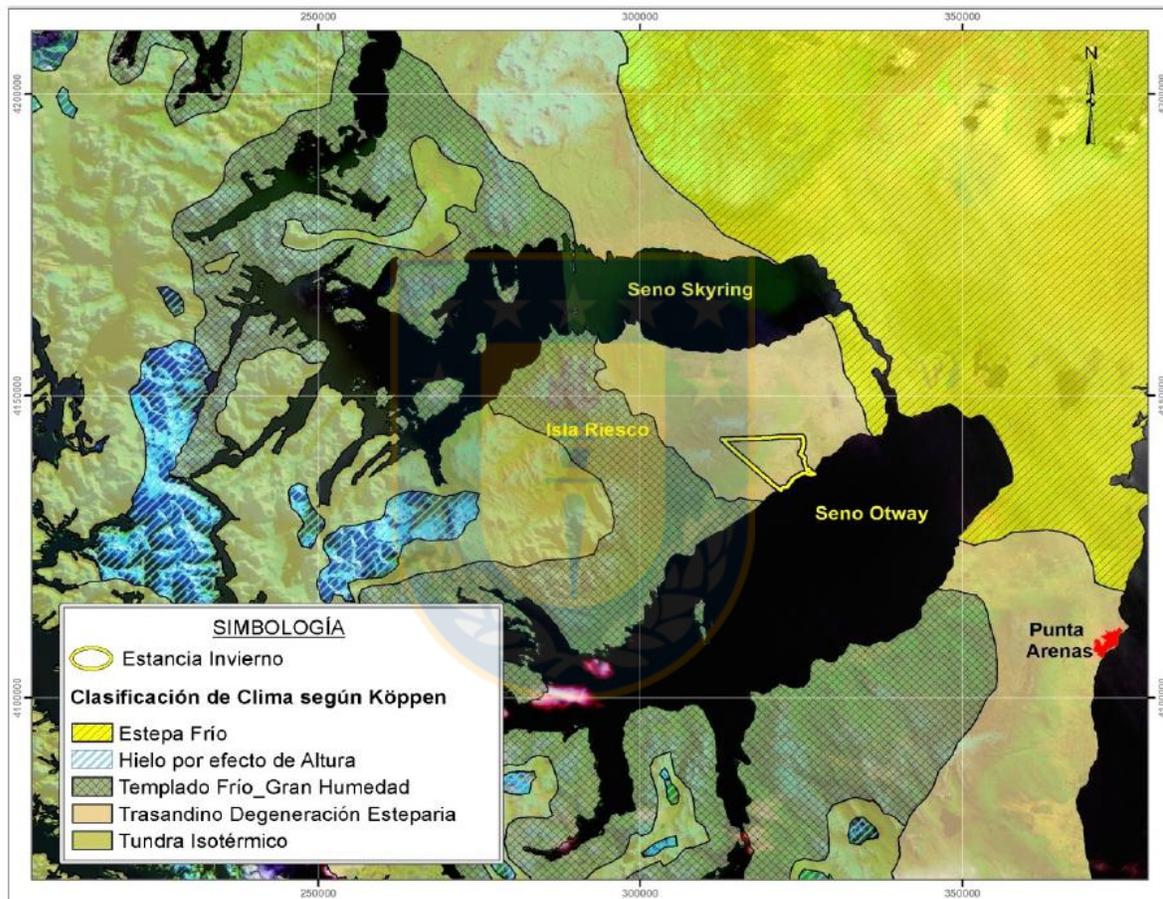


Figura 3.2: Climas presentes en Isla Riesco¹⁰
Fuente: Línea de Base, EIA Proyecto Mina Invierno

La velocidad del viento alcanza un valor promedio de 4.8 m/s, siendo la dirección predominante del mismo Oeste Noroeste y Oeste Suroeste. La temperatura media en la zona es de 6.9°C, mientras que la humedad relativa es cercana a un 76% y la radiación solar es de 122.3 W/m². El mayor valor de precipitaciones del que se tiene registro es de 1,384 mm¹¹.

¹⁰ Coordenadas UTM H19S

¹¹ Los datos meteorológicos fueron recopilados efectuando mediciones en cuatro estaciones, siendo el periodo de monitoreo comprendido entre noviembre de 2006 y agosto de 2009.

3.1.3 Geomorfología

En Isla Riesco se pueden distinguir tres unidades geomorfológicas principales. La Figura 3.3 presenta una imagen satelital donde se distingue el límite de Estancia Invierno, donde se desarrolla el proyecto minero, y su entorno topográfico, descrito a continuación.

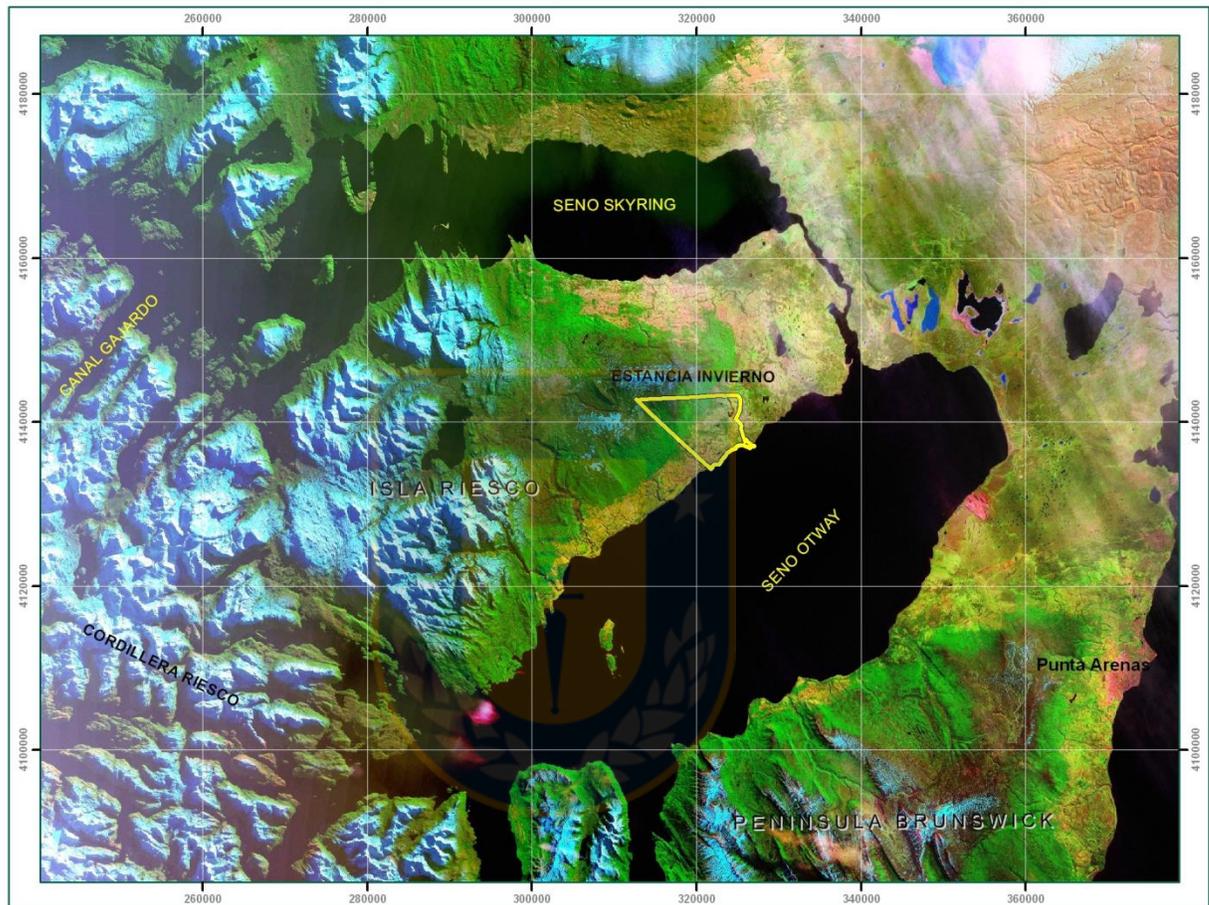


Figura 3.3 Imagen satelital de la región de emplazamiento de Mina Invierno¹²
Fuente: Línea de Base, EIA proyecto Mina Invierno, por Golder Associates 2010

En la parte occidental se aprecia una costa desmembrada con una topografía abrupta, denominada Cordillera Patagónica Insular Magallánica, con alturas máximas entre 1,722 ms.n.m, y 1,027 ms.n.m.

Inmediatamente al oriente de la Cordillera Magallánica, se presenta una topografía menos abrupta, pero de serranías bajas que es típica de sectores pre-cordilleranos y que en la Isla se denomina como Cordillera Riesco.

¹² Coordenadas UTM H19S

Al Oriente de la Isla Riesco, se observa la tercera zona que corresponde a la Pampa Magallánica, en cuyo borde occidental se alcanzan a emplazar las obras e instalaciones mineras.

Específicamente en el área del proyecto minero, se pueden distinguir subunidades geomorfológicas locales menores, como las serranías de la Cordillera Riesco, la pampa magallánica, zonas de inundación o lagos y una planicie costera¹³.

3.1.4 Geología

El marco geológico regional de Mina Invierno se inserta en la denominada Cuenca de Magallanes, la cual tiene una orientación NNW-SSE y una superficie de más de 160,000 km².

Los depósitos presentes corresponden a secuencias volcánicas, volcano-clásticas y rocas sedimentarias, cuyas edades varían desde el Jurásico hasta el Neógeno, depositadas discordantemente sobre rocas del Paleozoico. A su vez, las secuencias antes mencionadas se encuentran parcial o totalmente cubiertas por depósitos de suelos no consolidados, de diverso origen geológico: glacio-fluvial, coluvial de faldeos de cerros, morrénicos, aluviales, fluvio-lacustres y volcánicos, los cuales se encuentran sobreyaciendo discordantemente a las secuencias sedimentarias¹⁴.

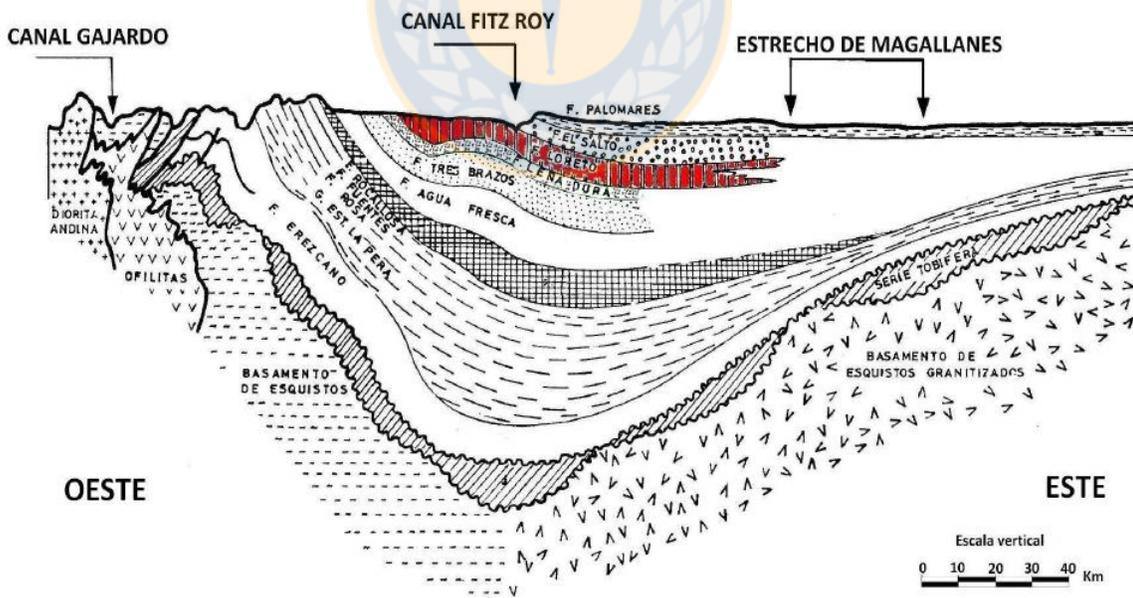


Figura 3.4: Sección transversal de la Cuenca sedimentaria de Magallanes.
Fuente: Línea Base EIA Proyecto Mina Invierno por Golder Associates, 2010

¹³ Para ver Mapa de Unidades Geomorfológicas en Mina Invierno, dirigirse a Anexo 9.2.

¹⁴ Para ver Mapa de Unidades Geológicas en Isla Riesco y zona del proyecto Mina Invierno, dirigirse a Anexo 9.1

Como se indica sobre la Figura 3.4, las unidades presentes en la zona del proyecto corresponden a rocas sedimentarias de la Formación Loreto y/o de la Formación El Salto, de edad Oligoceno-Mioceno, en contacto con la Formación Leña Dura, la Formación los Tres Brazos y la Formación Agua Fresca. Esta secuencia sedimentaria se compone principalmente de areniscas, limolitas, arcillolitas, arcillolitas carbonosas y lentes o capas de carbón. Las capas de carbón de mayor relevancia para el proyecto minero se encuentran intercaladas en los estratos de la Formación Loreto. Estas unidades se pliegan en forma de una estructura sinclinal NNW, con su eje buzando hacia el noroeste.

3.1.5 Edafología y Vegetación

Las condiciones climáticas relativamente frías, la distribución más o menos regular de las precipitaciones, la vegetación y el tipo de material generador determinan las características de los suelos de Magallanes.

Los suelos del terreno minero corresponden en su totalidad a suelos no arables, es decir, que no presentan aptitud agrícola. Las limitaciones más frecuentes son: pendientes excesivas, susceptibilidad severa a la erosión, clima desfavorable, pedregosidad excesiva, drenaje pobre o muy pobre y alto contenido de sales. Debido a la abundante acumulación de hojarasca en la superficie de los suelos de bosque, el horizonte orgánico presenta un pH de 4.5 a 5.5, pudiendo caracterizarse como ácido forestal.

Tradicionalmente el área de uso agropecuario de la región de Magallanes se ha dividido en tres regiones ecológicas: la estepa, los matorrales y el bosque decídulo. Estos últimos fueron intensamente talados o quemados para habilitar los campos para la ganadería. Tal es el caso de Isla Riesco, donde los bosques correspondientes a la porción más baja de la precordillera, entre los 0 y los 100 ms.n.m., fueron quemados para habilitar campos ganaderos. Posterior a la quema, se realizó un manejo de la vegetación arbórea y arbustiva y el apilamiento de troncos incendiados, como una forma de generar condiciones propicias para el desarrollo de especies prateras que se introdujeron o asilvestraron. Son comunes las praderas dominadas por pasto ovillo (*Dactylis glomerata*), pasto miel (*Holcus lanatus*) y trébol blanco (*Trifolium repens*).

A nivel de tipos y subtipos vegetacionales, destacan los bosques mixtos de Lengua-Coigüe con 46% del total de la superficie del área de estudio, las praderas con un 22% y la pradera arbustiva con 17% de la superficie.

A nivel de los bosques, se distingue la existencia de dos zonas claramente diferenciadas. Por una parte se observa una zona de bosques continuos y poco intervenidos, localizados en el área norte del área de estudio, los que conservan en gran parte sus condiciones de naturalidad. Estos bosques forman parte de la zona montañosa central de la Isla Riesco. En contraste con esta zona, la parte baja del área de estudio se caracteriza por presentar parches boscosos dentro de la matriz de praderas y praderas arbustivas, que constituyen remanentes de las formaciones de bosques originales, despejados por grandes incendios y posteriores procesos de maderero.

En relación a la riqueza florística del área de estudio, se ha constatado la presencia de 143 especies de plantas vasculares, de las cuales 102 (71%) son nativas de Chile y 41 (29%) son introducidas o alóctonas, no identificándose especies endémicas de Chile.

3.1.6 Operación Minera

La compañía explota desde el año 2013, el yacimiento carbonífero sub-bituminoso Invierno, cuyas reservas fueron estimadas en 73 millones de toneladas, las cuales se planificó que serían extraídas hasta el año 2026. El material extraído es transportado mediante camiones hacia el stock que forma parte de las instalaciones del complejo portuario Isla Riesco, ubicado en Punta Lackwater a 7 km de la mina, y operado por la empresa Portuaria Otway Ltda., para su almacenamiento y posterior embarque.

El proyecto minero ocupa una superficie total del orden de 1.460 hectáreas, en la que se incluye el camino mina-stock, rajo, botaderos exteriores, caminos, instalaciones mineras, centro de alojamiento, áreas entre instalaciones y otros¹⁵.

La magnitud, profundidad y configuración espacial del yacimiento Invierno hicieron factible su explotación minera a cielo abierto, mediante la técnica de “rajo móvil”, la cual consiste en ir rellenando fases explotadas con material estéril, a medida que las condiciones geotécnicas asociadas a la estabilidad de taludes lo permitiesen, configurando así un botadero interior. Las operaciones unitarias de la faena son: extracción mecánica con palas hidráulicas, carguío y transporte.

Además del relleno interior, se cuenta con dos botaderos exteriores ubicados al norte y sur del rajo, llamados Botadero Norte y Botadero Sur, respectivamente, los cuales fueron diseñados para disponer material estéril durante los primeros años de operación y en aquellos períodos del

¹⁵ Para conocer plano de proyecto Mina Invierno, dirigirse a Anexo 9.3.

plan minero en los cuales no se hubiese generado un espacio mínimo operacional para el depósito interior.

La distribución de materiales entre los botaderos Norte y Sur, se determinó de acuerdo a la capacidad de éstos y a las distancias de transporte. La secuencia de explotación de la mina se estimó que permitiría que hasta del orden de un 65% del volumen de estéril removido para la extracción del carbón, fuese depositado en el interior del rajo.

Para el caso de estos botaderos exteriores, se definieron los siguientes parámetros de diseño:

- Ángulo de talud final de 26°.
- Alturas máximas de 60 m.

Estos parámetros se determinaron buscando una mayor estabilidad de los taludes que comúnmente poseen un ángulo igual al de reposo del material estéril, que para los estériles de la mina es cercano a 37°. Esta disminución de ángulo de talud se logra realizando cortes sobre las crestas de los taludes, lo cual contribuye además a disminuir el impacto visual de estos emplazamientos, promoviendo su adecuación paisajística en el entorno.

3.1.7 Contexto Actual

Actualmente la faena se encuentra próxima a una paralización temporal e indefinida de las operaciones, programada para noviembre del presente año. Esto, debido a una prohibición para realizar tronaduras, luego de que el Tribunal Ambiental de Valdivia¹⁶ invalidara la RCA favorable con que contaba la empresa, que permitía cambiar el método de extracción mecánico por tronaduras.

3.2 Plan de Cierre Vigente

El Plan de Cierre vigente actualmente es un plan de cierre definitivo de la faena, planificado para el año 2026. Algunas de las medidas de cierre más relevantes comprometidas por la empresa están relacionadas con el rajo y los botaderos de estériles, tanto exteriores como interiores, y se describen a continuación.

Al momento del cierre, una parte del rajo estará rellena con material estéril y solamente permanecerán sin cubrimiento ambos extremos del mismo. En estas áreas se espera la formación

¹⁶ Órgano jurisdiccional especial de Chile, dedicado a resolver controversias relacionadas con el medio ambiente, con competencias sobre la zona sur-austral de Chile.

de lagunas interiores, conocidas como *pit-lakes*, a través del llenado natural producto de la recuperación del nivel freático, debido a la precipitación y a las aguas subterráneas que infiltrarán por las paredes.

Los botaderos de estéril fueron diseñados para mantener una estabilidad en el largo plazo, por lo que no se contemplan medidas de estabilización de los taludes remanentes después del cese de operaciones.

La rehabilitación de botaderos se realizará mediante el reperfilamiento, recubrimiento con suelo vegetal y revegetación, en un proceso progresivo durante la vida de la operación y que se prolongará en la etapa de cierre para aquellos sectores de botaderos que al término de la explotación aún no hayan sido rehabilitados.

Sobre la Figura 3.5 se presenta un esquema de las superficies que utilizarán los botaderos exteriores, el botadero interior y los lagos en los rajos, al término del cierre de la mina.

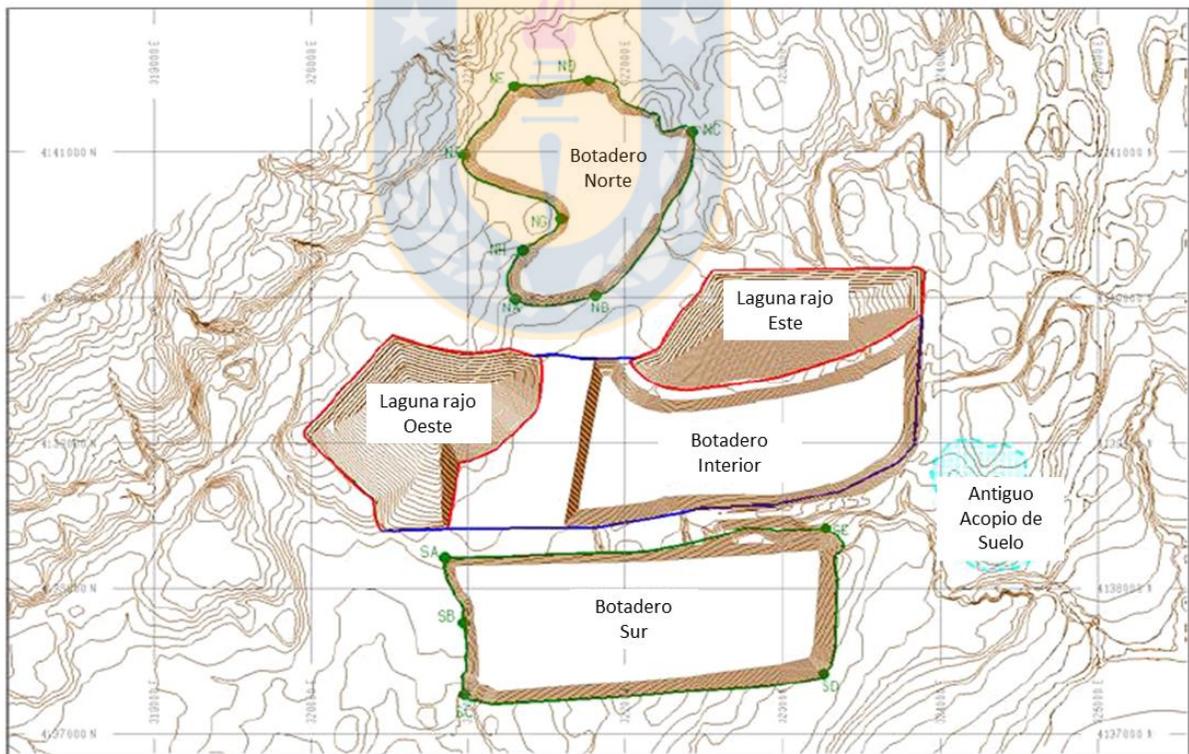


Figura 3.5: Configuración final de botaderos.
(Modificado de EIA proyecto Mina Invierno, por Golder Associates, 2010)

3.3 Resolución de Calificación Ambiental

De acuerdo a la RCA [29], Mina Invierno realizó una serie de compromisos a implementar como parte integral de la estrategia del proyecto para mitigar el impacto ambiental derivado de la explotación.

Uno de los aspectos más relevantes de las condiciones de aprobación de la RCA, es que previo a la etapa de cierre de la mina, toda la superficie del área de influencia directa del proyecto deberá encontrarse restaurada en su cubierta vegetal, no debiendo quedar áreas intervenidas sin rehabilitación, eximiendo aquellas áreas que tengan contemplada forestación, plan de intervención, caminos y accesos para cumplir con el plan de seguimiento de las variables ambientales y talud minero que por seguridad minera no podrá ser revegetado.

Esto es regulado mediante el Programa de Recuperación de la Cubierta Vegetal, cuyo objetivo principal es el de mitigar los impactos derivados de la remoción de la cubierta vegetal en las que se desarrollan las obras y actividades del proyecto. El programa busca controlar la emisión de material particulado desde botaderos y zonas intervenidas por el proyecto, además de poseer otros efectos esperados asociados a la conservación del suelo, disminución de la erosión de suelos y consecuentemente a la minimización del aporte de sólidos a las aguas de escurrimiento superficial. Para lo anterior se tomaron las medidas descritas a continuación.

3.3.1 Conservación de Suelos

La medida de Conservación de Suelos consiste en el retiro y almacenamiento temporal de los horizontes de suelo superficial y de la biomasa presente en las áreas en las que se desarrollan las obras del proyecto. Para tal fin, se habilitó un área de aproximadamente 45 hectáreas de acopio en el sector este del área del proyecto.

El acopio de cubierta vegetal cuenta con un manejo dinámico, es decir, se va incorporando y retirando material en la medida que se van despejando nuevas zonas de explotación y se avanza en la recuperación de los sectores de botadero ya consolidados, con una superficie de entre 10 y 15 ha y una altura máxima de 5 m para evitar su compactación.

En el caso de la biomasa forestal, el material es acopiado y manejado en una superficie del orden de 12 hectáreas, con una altura máxima de 4 m. En este acopio se dispone principalmente el fuste, tocones, ramas gruesas y palizadas muertas en la forma requerida para su uso posterior en la rehabilitación de los botaderos y áreas intervenidas. Por su parte, el material radicular, las

ramas delgadas y hojas son retirados desde los frentes de madereo para ser acopiados en conjunto con el suelo vegetal.

3.3.2 Perfilamiento de botaderos

La medida de Perfilamiento de Botaderos consiste, primero, en el llenado por secciones del botadero y luego, una vez alcanzada su capacidad de diseño, en la disminución del ángulo de reposo del material a 26° mediante *bulldozers*, siguiendo la tendencia de formas naturales, onduladas y sin bordes abruptos. Esto, con el objetivo de que cada sección permanezca el menor tiempo posible sin ser perfilada y sometida al proceso de revegetación, estipulándose un tiempo máximo de un año, dado que de esta forma se minimiza la ocurrencia de procesos de arrastre de sedimentos, erosión eólica o colonización por parte de malezas indeseadas.

3.3.3 Recubrimiento con Suelo Vegetal

La medida de Recubrimiento con Suelo Vegetal consiste en, una vez reperfilado el botadero, preparar la superficie del botadero para la revegetación. Para esto, utilizando camiones, se distribuye de manera homogénea el horizonte orgánico almacenado en el acopio de suelo vegetal, conformando una capa del orden de los 30 cm. Posteriormente, mediante el uso de rastras pesadas se prepara el suelo, de manera de eliminar el micro relieve resultante del vertido desde los camiones para permitir una correcta infiltración del agua y preparar el suelo para el establecimiento de la vegetación. Además, permite homogenizar las propiedades químicas y físicas del suelo y mullirlo para que las raíces alcancen una adecuada colonización y desarrollo. También se dispone en los taludes el material proveniente de la biomasa forestal almacenada, lo cual permite dar continuidad paisajística, atraer a la fauna silvestre y contribuir al control de la erosión en los sectores rehabilitados.

3.3.4 Siembra y Plantación

Luego de preparado el terreno, en época de primavera, se realiza la siembra mediante la técnica de hidrosiembra¹⁷, la cual consiste en la aplicación a presión de un chorro que transporta las semillas, las cuales son normalmente acompañadas de otros productos como *mulch*¹⁸, estabilizadores y abono. Esto se realiza con una mezcla de especies, favoreciendo aquellas de carácter rústico, rápida instalación y éxito probado en la zona, por ejemplo, trébol blanco, pasto

¹⁷ También conocida como siembra hidráulica.

¹⁸ Capa de materia orgánica suelta como paja, ramas, papel u otros materiales similares, utilizada para proteger los suelos.

ovillo y pasto miel, así como otras especies herbáceas y arbustivas naturalizadas en el área, para posteriormente, en caso que sea necesario, realizar algún manejo que facilite su adecuado establecimiento, como manejo nutricional, compactación, drenaje u otros.

3.4 Seguimiento de Plan de Revegetación

Las condiciones de aprobación de la RCA fueron acreditadas mediante la presentación a la autoridad ambiental de un plan de cumplimiento, cuyos informes de seguimiento ambiental deben ser presentados por semestre hasta la etapa de cierre del proyecto.

Uno de los indicadores de cumplimiento más importantes para este seguimiento es el de “hectáreas revegetadas”, para lo cual se realizó un plan de revegetación anual, que además forma parte del Plan de Cierre vigente de la mina, fue contemplado para la vida útil del proyecto. Sobre la Figura 3.6 se presenta la relación entre el cronograma del plan y el avance llevado a cabo a la fecha.

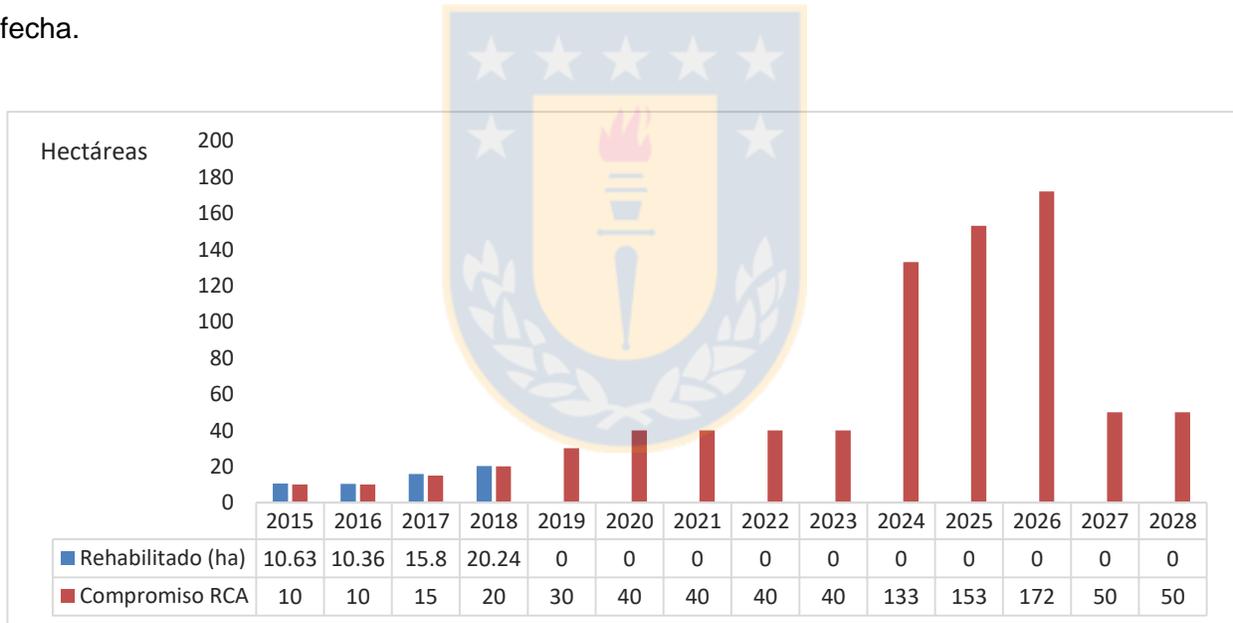


Figura 3.6: Avance en la revegetación de botaderos de acuerdo a compromisos RCA.

De acuerdo a esta planificación, al año 2028 se deberán encontrar revegetadas las 803 hectáreas de afectación directa del proyecto. Además, cabe mencionar que la totalidad de las labores de rehabilitación presentadas corresponden a áreas del Botadero Sur.

3.5 Compromisos Referentes a Botaderos

3.5.1 Botaderos Exteriores

El Botadero Sur es un botadero exterior, cuyo diseño contemplaba ángulos de talud de 26° y una altura máxima de 60 m, lo cual permite clasificarlo como uno de gran tamaño. Actualmente existen sectores que alcanzaron esa altura máxima de diseño y por tanto fueron sometidos a labores de rehabilitación. Sin embargo, la condición de ángulo de talud de ingeniería no pudo ser cumplida, debido a que los operadores de *bulldozer* solo alcanzan a trabajar sobre taludes de entre 15 y 20° , y por tanto, ese es el ángulo que tienen los sectores rehabilitados, como se observa sobre la Figura 3.7, donde se observa un talud resultante de 15° .



Figura 3.7: Talud resultante luego de operaciones de rehabilitación.

Este botadero se encuentra emplazado sobre una superficie levemente inclinada, siendo la diferencia entre el punto más bajo de la topografía y el más alto igual a 40 m, sobre una superficie que alcanza las 240 hectáreas. Debido a estas variaciones de altura, el botadero ha sido llenado de manera alternada entre fases ascendentes y adosadas, observándose descargas tanto sobre los taludes, como volteos directos sobre superficies planas.

El Botadero Norte fue diseñado con las mismas características que las del Botadero Sur; sin embargo, aún no ha sido construido y por tanto no se realizó su caracterización.

3.5.2 Botadero Interior

El depósito de material estéril al interior de la mina requiere de ciertos cuidados de seguridad, por lo que se adoptó una distancia mínima de 150 m de desfase entre el frente de explotación y la pared de avance del botadero interior. El plan de disposición para el material estéril, establecido a partir de la secuencia de explotación del rajo, considera una proporción de disposición entre botadero interior y botaderos exteriores de aproximadamente 65% y 35%, respectivamente.

Sobre la Figura 3.8 se observa la implantación del Botadero Interior dentro del área de explotación del proyecto, el cual alcanza actualmente una superficie de alrededor de 52 ha.

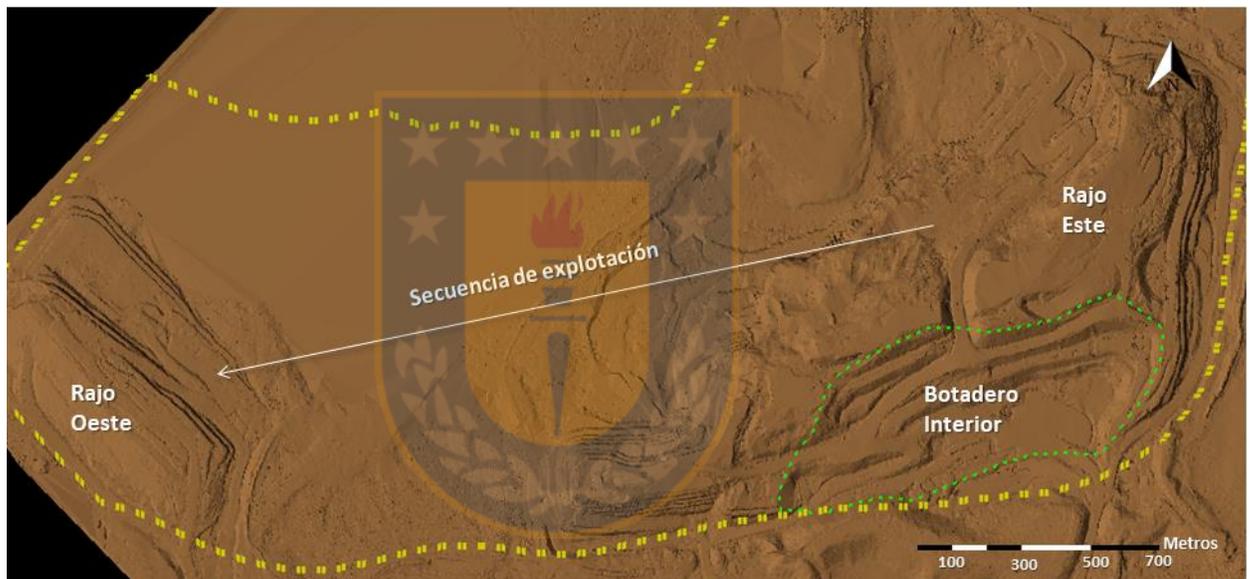


Figura 3.8: Implantación Botadero Interior

3.5.3 Avance en la Rehabilitación

La Figura 3.9 corresponde a un esquema del Botadero Sur, donde se presentan las zonas ya rehabilitadas entre los años 2014-2018 y áreas que se encuentran próximas a ello.

El compromiso de rehabilitación para el año 2019 corresponde a una superficie de botadero de 30 ha. Actualmente se encuentran 21.6 ha de terreno preparadas para la siembra, es decir, sectores donde se ha reperfilado el talud e instalado cubierta vegetal. Esto se debe a que las operaciones de reperfilamiento e instalación de suelo se pueden realizar durante cualquier estación del año, mientras que la siembra debe realizarse por fuerza en primavera.

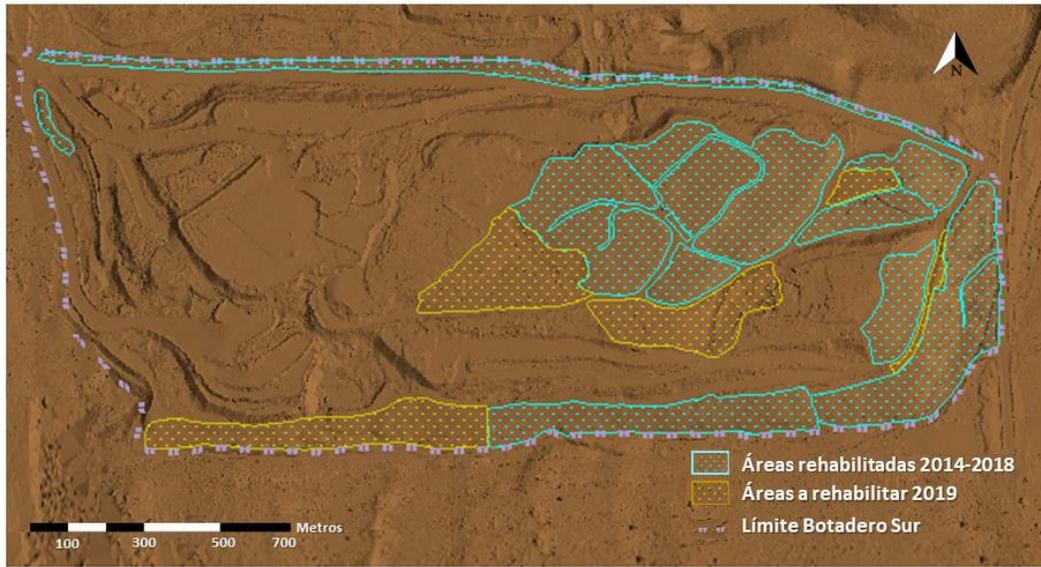


Figura 3.9: Áreas revegetadas o preparadas para revegetación sobre Botadero Sur.

El área faltante para completar las 30 ha es parte de la propuesta de este estudio y se detalla en el inciso 4.2.



4 DESARROLLO METODOLÓGICO

4.1 Determinación de Disponibilidad de Recursos Edáficos

Para realizar la cuantificación de los recursos edáficos disponibles, fue necesario en primera instancia determinar el volumen de material dispuesto sobre los acopios temporales de suelo vegetal y posteriormente el volumen de recurso disponible sobre las áreas a intervenir en el proyecto, es decir, áreas que estuviesen contempladas dentro del diseño del rajo o de los botaderos, que aún no hubiesen sido escarpadas.

4.1.1 Disponibilidad en Acopios de Cubierta Vegetal

Al inicio del proyecto minero, se rescataron las primeras capas superficiales de suelo en todos los sectores que fuesen a ser intervenidos por la operación. Este suelo fue acopiado en sectores aledaños a las áreas que serían revegetadas, específicamente sobre el Botadero Sur, y en los años siguientes, se fue almacenando en un acopio temporal, ubicado cercano a las fases desde donde se ha ido escarpando terreno, es decir, siguiendo la secuencia de explotación.

La remoción de la capa vegetal se realiza mediante *bulldozers* y ocasionalmente con pala hidráulica. Las cantidades de volumen extraídos por semestre corresponden a las presentadas sobre la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Suelo superficial extraído por semestre.
Fuente: Acopios de Vegetal 01-04-2019, Mina Invierno.

PERIODO	EXTRACCIÓN [m ³]
2012-2013	277,814
S1-2014	159,903
S2-2014	223,899
S1-2015	182,912
S2-2015	36,298
S1-2016	43,990
S2-2016	42,396
S1-2017	73,902
S2-2017	6,780
S1-2018	27,954
S2-2018	4,651
S1-2019	15,311
TOTAL	1,095,810

El material es luego cargado por excavadoras a camiones tolva que lo transportan a los acopios temporales de suelo vegetal. El material es transportado nuevamente desde los acopios a

las zonas de rehabilitación, donde es descargado y luego distribuido mediante *bulldozers*. La cantidad de suelo utilizado sobre las áreas rehabilitadas fue determinada y se detalla en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Volumen utilizado en cubierta vegetal por año

Año	Área rehabilitada [ha]	Espesor de Cubierta Utilizada [cm]	Volumen Utilizado [m ³]
2014	2.05	65	13,325
2015	8.58	50	42,900
2016	10.36	35	36,260
2017	15.8	48.4	76,472
2018	20.25	45	91,125
2019	21.58	50	107,900
Total	78.62	-	367,982

Esto implica que el material remanente alcanza un volumen total de 727,828 m³. Así, fue posible determinar la duración de la disponibilidad de acopios. En el eventual caso de un cierre de la totalidad de las operaciones, el suelo debiese alcanzar un volumen suficiente para la rehabilitación de las 240 hectáreas que comprende el Botadero Sur y las 52 hectáreas que alcanza actualmente el Botadero Interior. Sobre la Figura 4.1 se presenta una comparación entre el total de áreas a rehabilitar en el caso antes mencionado y su correspondiente avance.

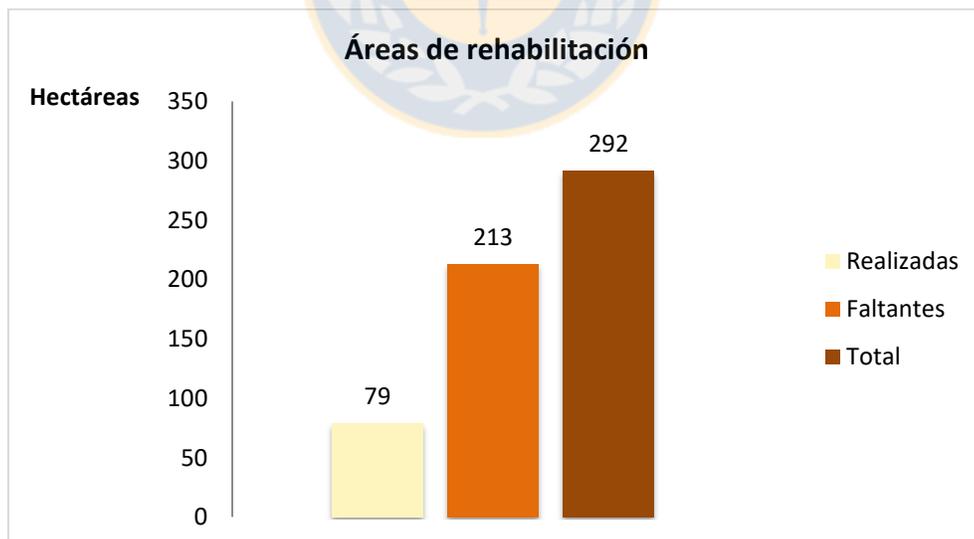


Figura 4.1: Avance de áreas de botadero a rehabilitar en caso de cierre.

Como se indica sobre la Figura 4.2, si se realizara la instalación de suelo con un espesor de 30 cm, el suelo disponible en los acopios sería suficiente para cubrir la totalidad de los botaderos.

Sin embargo, el espesor de suelo óptimo para asegurar el éxito de la revegetación es de 50 cm, para lo cual se requeriría de 1,065,000 m³, lo cual significa un déficit de suelo de 337,172 m³.

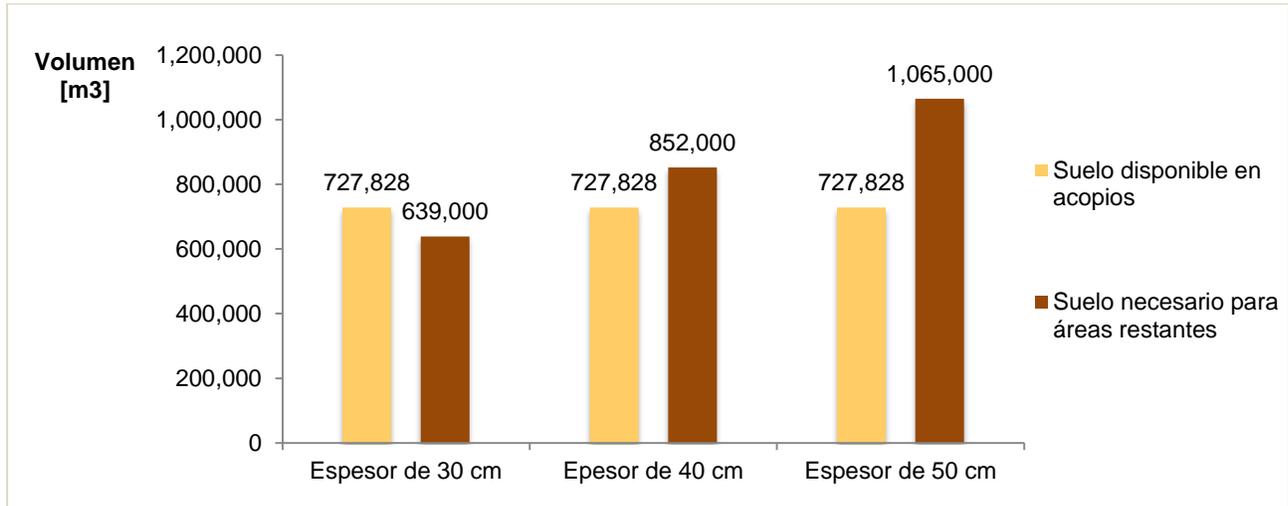


Figura 4.2: Relación entre volumen disponible y requerido por espesor de suelo.

Una alternativa para este problema sería remover una parte del suelo que se encuentra en áreas consideradas en el proyecto que aún no han sido intervenidas, para lo cual fue necesario realizar un levantamiento del recurso edáfico.

4.1.2 Disponibilidad en Áreas a Intervenir

4.1.2.1 Áreas a Intervenir

Sobre la Figura 4.3 se presentan las fases planificadas a explotar una vez terminada la fase de explotación actual del proyecto. Esto implica que el área comprendida entre los dos rajas que se observan sobre la figura en colores corresponde al área a intervenir por la explotación minera.

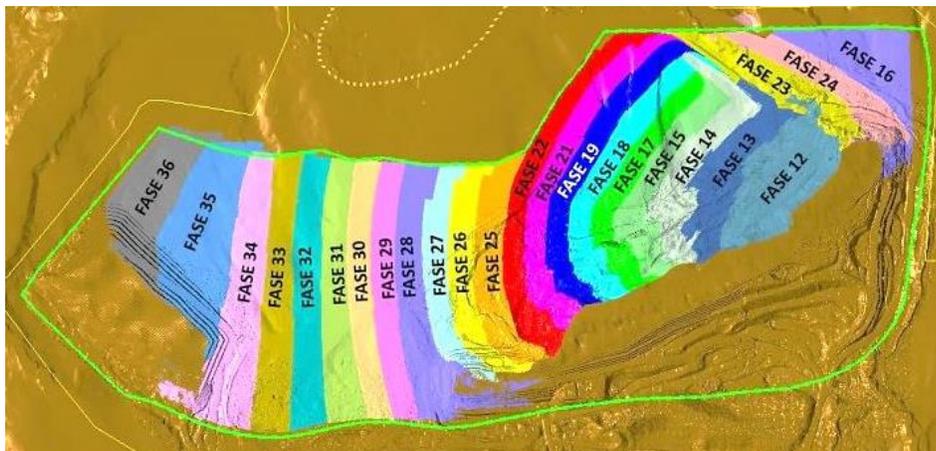


Figura 4.3: Fases planificadas 12 a 36.
Fuente: Planificación Mina (Informe Interno)

Dentro de este sector se identificaron áreas a las cuales no se podía acceder debido a la presencia de caminos mineros y escorrentías de agua y que por tanto no fueron considerados como área a escarpar. Sobre la Figura 4.4 se presenta la distribución de terrenos sobre el área total del proyecto minero.

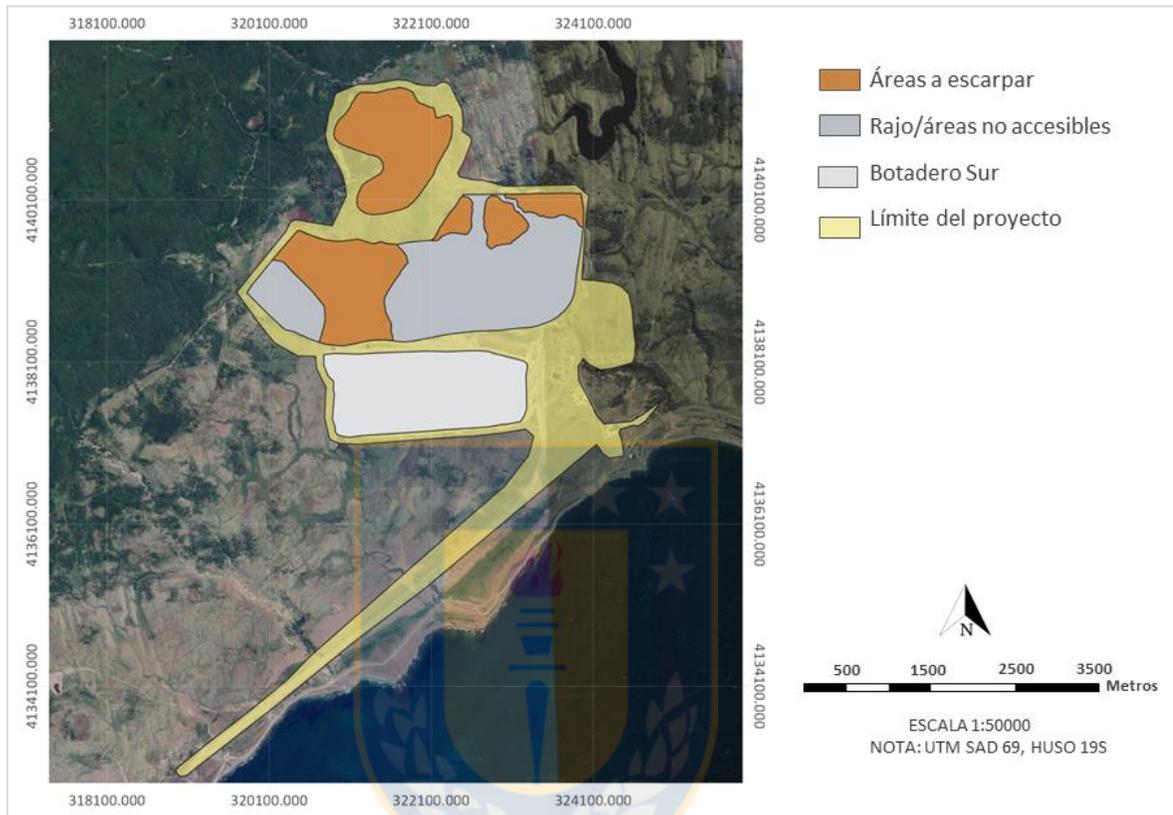


Figura 4.4: Esquema general del proyecto.

La superficie total a escarpar comprende así los sectores donde se planea expandir los rajos y el correspondiente al futuro emplazamiento del botadero norte. Sobre el área correspondiente al límite sur del proyecto, se ubican diferentes instalaciones, incluyendo centros de alojamiento y el puerto. Además, cabe mencionar que el Botadero Sur ocupa la totalidad de su superficie planificada, por lo cual no se consideró esa área como posible terreno de escarpe.

4.1.2.2 Levantamiento del Recurso Suelo

El análisis de la información obtenida a partir de parámetros edáficos de muestras superficiales, así como su interpretación, son de gran utilidad práctica en procesos de rehabilitación medio ambiental, por lo que actualmente muchos de los trabajos de rehabilitación realizados sobre terrenos mineros parten de la reposición de materiales edáficos sobre las zonas denudadas o cubiertas de estériles, como ocurre en el lugar de estudio.

En la práctica, para conocer las características del suelo, generalmente se confía en características externas que se cree están asociadas a la génesis del suelo, siendo la más distinguida la geomorfología y la vegetación/uso del suelo [27]. Sin embargo, estudios realizados previamente mediante calicatas sobre la zona del proyecto minero indicaron que elementos visibles del terreno, como el tipo de comunidad vegetal, no podían explicar el comportamiento de la profundidad de suelo.

Considerando que el área a muestrear era del orden de los cientos de hectáreas y que las mediciones se esperaban del orden de los centímetros, se tomó la decisión de realizar un estudio de dos dimensiones, considerando el espesor de suelo como una variable regionalizada. Esto quiere decir que, por ejemplo, el espesor de suelo en un punto tiende a tener alta correlación o similitud con los espesores medidos en puntos cercanos y baja correlación con posiciones alejadas. De acuerdo a como indica la bibliografía [34], cuando se estudia un medio bidimensional, si el área a muestrear no tiene una geometría rectangular, se recomienda definir aleatoriamente las coordenadas x e y de las muestras.

El muestreo se realizó mediante un bastón pedológico o barreno, presentado sobre la Figura 4.5, el cual se entierra en el suelo, se gira y se retira, para obtener la muestra del suelo. Las mediciones de profundidad de suelo se realizaron directamente sobre el bastón, de acuerdo a las observaciones de diferencias de color en los estratos y presencia de raíces.



Figura 4.5: a) Bastón Pedológico b) Gato Mecánico

Cabe mencionar que las condiciones del terreno no fueron las óptimas para realizar el muestreo, puesto éste fue realizado en invierno, época en la que los suelos son más difíciles de perforar ya que se encuentran muchas veces congelados. Esto implicó un esfuerzo físico

considerable para el enterramiento y retiro del bastón pedológico, por lo cual fue necesario realizarlo con la ayuda de un gato mecánico, ver Figura 4.5, para retirar la muestra. Sumado a esto, se presentaron dificultades por adversidades climáticas, lo cual fue determinante en el número de muestras realizadas.

Debido a lo anterior, se decidió realizar un muestreo con 15 observaciones en el área a intervenir entre los rajos y 7 observaciones en la zona correspondiente al área planificada del Botadero Norte, ambas distribuidas aleatoriamente, como se indica sobre la Figura 4.6 y realizadas mediante bastón pedológico.



Figura 4.6: Puntos de muestreo sobre área a intervenir.

Generalmente, para el levantamiento de suelos, se establece una profundidad de muestreo arbitraria, determinada por el esfuerzo necesario para mapear a esa profundidad [27]. En el caso de estudio ésta se definió de acuerdo a lo máximo permitido por la herramienta de muestreo, es decir, un metro.

4.1.2.3 Resultados de muestreo

Pese a que existen numerosos criterios para definir qué es suelo, para el alcance de este estudio se consideró la definición del diccionario, la cual indica que el suelo es un conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal [26]. Esta última afirmación implica que es posible identificar la profundidad del suelo de acuerdo a la presencia de raíces.

Además, es importante mencionar que los operadores de pala que realizan la remoción del recurso generalmente definen qué es suelo de acuerdo a una clasificación por color, la cual considera colores café oscuro como “capa vegetal”, es decir, suelo superficial. En efecto, lo que se realiza intuitivamente es un método cualitativo que fue definido por el Ministerio de Medio Ambiente de Nueva Zelanda como Método VSA¹⁹ y que se basa en evaluar las propiedades visuales del terreno, comparándolas con una serie de fotografías incluidas en el manual, para clasificar la condición de suelo como pobre, moderado o bueno [31].

Debido a lo anterior, las mediciones sobre el bastón pedológico se realizaron considerando ambos criterios, es decir, primero realizando una estimación visual del espesor y luego midiendo hasta donde se encontrase la presencia de raíces. Los resultados obtenidos son presentados sobre la Figura 4.7, donde los suelos más profundos son presentados en colores más oscuros y los menos profundos en colores más claros.

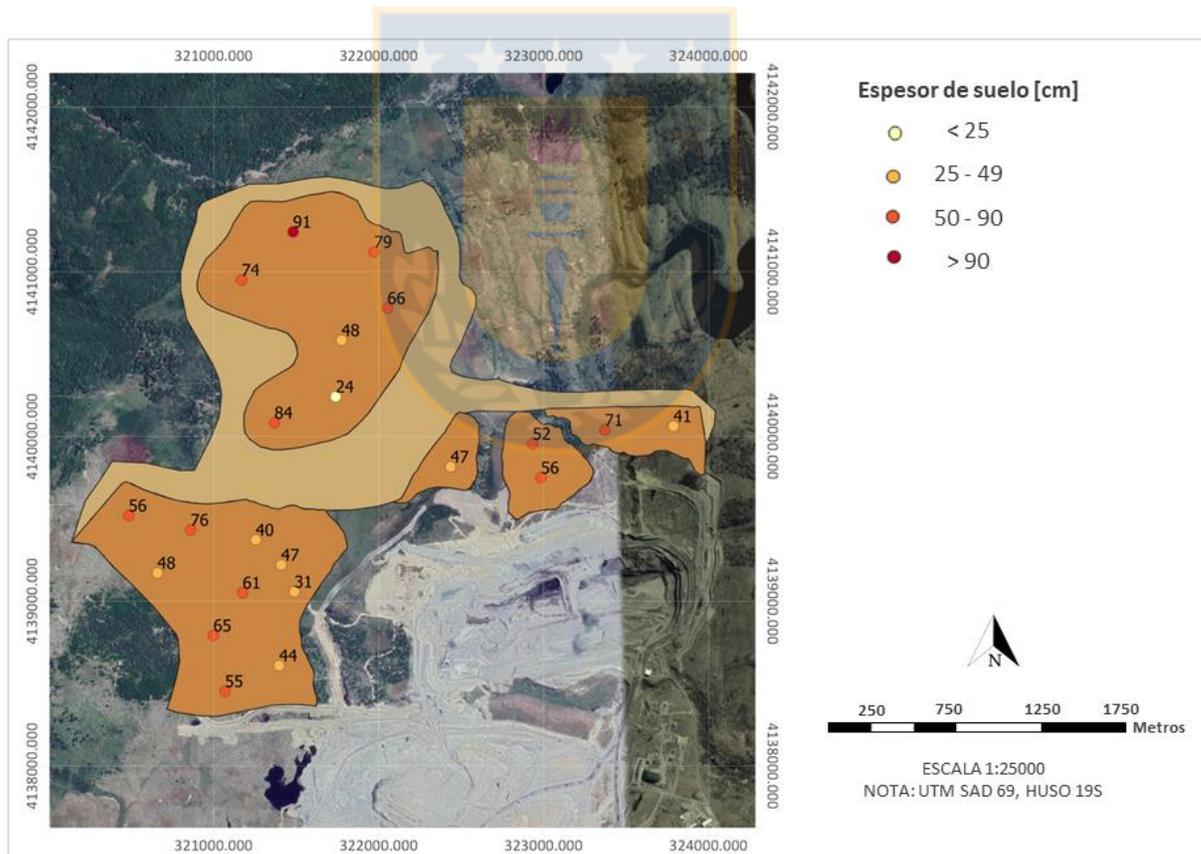


Figura 4.7: Espesores de suelo encontrados sobre áreas a intervenir.

¹⁹ En inglés *Visual Soil Assessment*.

4.1.2.4 Estimación de Recursos Edáficos

Para tener una idea general del valor de la profundidad de suelo en todo el área de interés, se realizó una interpolación por splines cúbicos, técnica que utiliza segmentos de polinomios entre pares coordenados de datos para predecir valores en ubicaciones sin muestrear.

Los resultados obtenidos fueron clasificados de acuerdo a la Tabla 4.3, para obtener una estimación de sectores donde se esperaría encontrar suelos más profundos para su aprovechamiento, como se muestra sobre la Figura 4.8.

Tabla 4.3: Clasificación según profundidad de suelo
(Modificado de GAYOSO-guía de conservación de suelos forestales, 1999)

Clase	Profundidad
Profundo	Mayor a 90 cm
Moderado	Entre 50 y 90 cm
Delgado	Entre 25 y 50 cm
Muy delgado	Menor a 25 cm

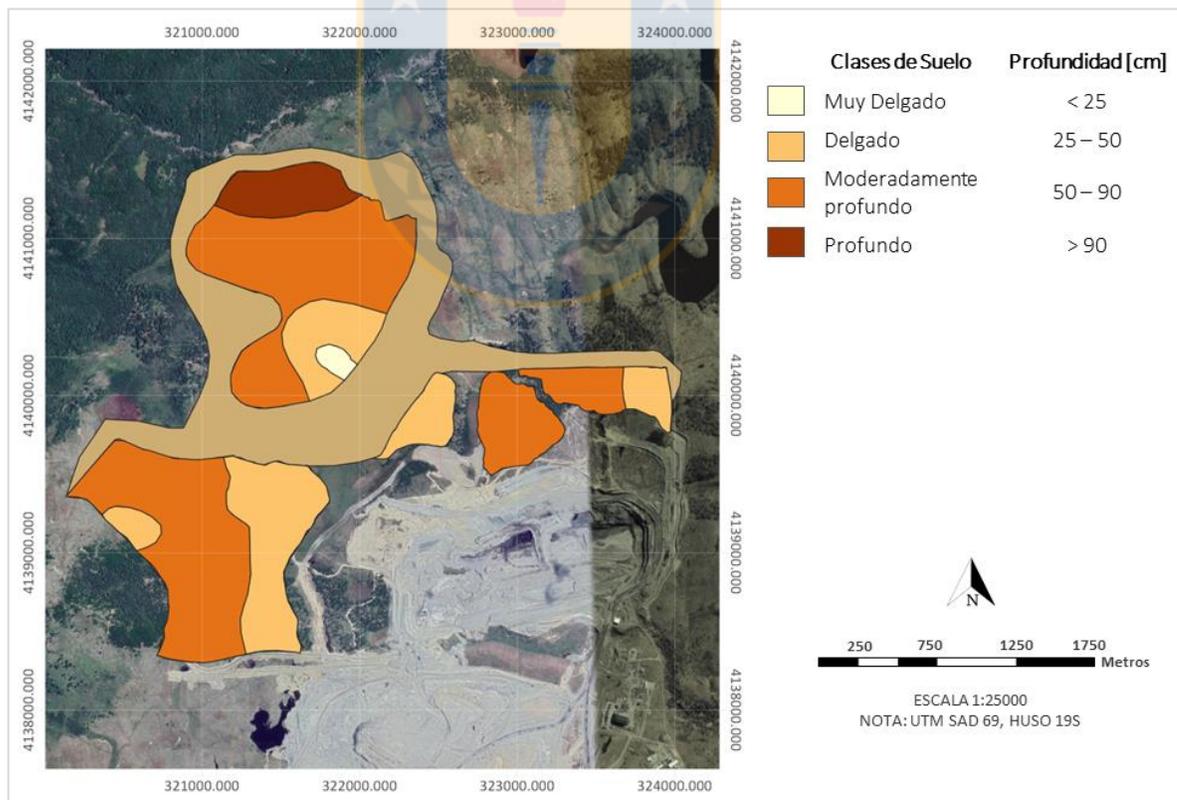


Figura 4.8: Clases de Suelo encontradas en el área a intervenir.

4.2 Planificación de Operaciones de Rehabilitación

Como se explicó anteriormente, la rehabilitación se realiza una vez alcanzada la capacidad de diseño por sector del botadero y consiste principalmente en las etapas que se presentan sobre la Figura 4.9.



Figura 4.9: Secuencia de operaciones de rehabilitación de botaderos

4.2.1 Sectores de Rehabilitación

Para determinar los sectores más probables o más deseables de preparar para la rehabilitación se utilizaron diferentes criterios.

El primero de ellos fue buscar una zona que ya hubiese alcanzado su altura de diseño, con el objetivo de no perder capacidad de disposición de material estéril. Esta condición se cumplía en el polígono delimitado en azul sobre la Figura 4.10, un sector ubicado al centro del botadero, contiguo a una zona ya rehabilitada, donde se descargaron volquetes de camión, comúnmente conocidos como descargas a piso, el cual alcanza una superficie de 6.14 ha.

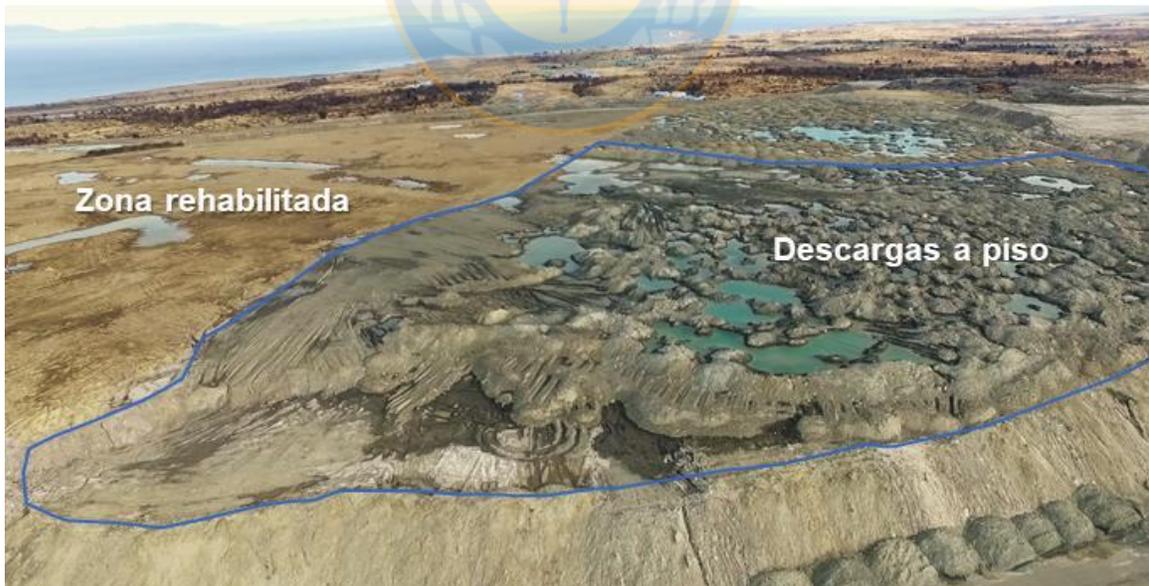


Figura 4.10: Sector de descargas a piso sobre Botadero Sur

Como una medida de preparación del terreno para la instalación de suelo y siembra, se planificó realizar un suavizamiento de la superficie, operación detallada en la sección 4.2.3.

El segundo criterio fue el de identificar los taludes que generaran mayor afectación negativa operacional y ambiental, lo cual se cumplía en los taludes delimitados sobre la Figura 4.11, donde se detalla la relación entre la altura y el ángulo de cada talud. Estas relaciones fueron las más significativas encontradas sobre todo el botadero y son las causantes de que, en condiciones climáticas adversas como eventos de lluvia y nieve, se provocara una fuerte erosión del material de los taludes, generando un arrastre importante de sedimentos al camino que pasa al pie del botadero, dificultando y muchas veces imposibilitando el tránsito de camiones. Además, el arrastre de sedimentos afecta negativamente la calidad física y química del agua que pasa por los canales que rodean el botadero.



Figura 4.11: Relación de altura/ángulo de talud en pared norte de Botadero Sur.

Debido a lo anterior, se planificó disminuir los ángulos de taludes que generaban afectación directa sobre el camino, mediante la técnica de reperfilamiento, explicada con mayor detalle en la sección 4.2.4. Sin embargo, para no perder capacidad de disposición de material estéril, y considerando que el suelo es un recurso escaso, se decidió postergar la instalación de suelo y siembra, estableciendo medidas alternativas de control de la erosión.

Este no es el caso del talud de mayor altura, el cual además de encontrarse a su capacidad de diseño, genera un gran impacto en el aporte de sedimentos a los canales que bordean el botadero, por lo cual se decidió que sería sometido a todas las operaciones de rehabilitación.

Sobre la Figura 4.12 se resumen las operaciones a realizar por cada sector, de acuerdo a los criterios descritos.

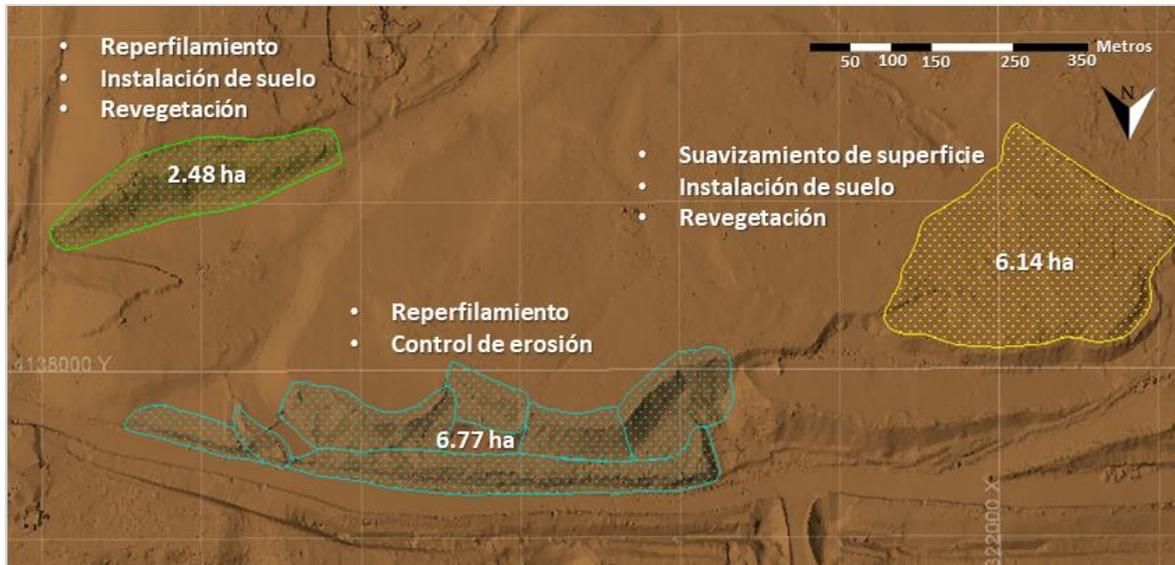


Figura 4.12: Operaciones de rehabilitación por sector.²⁰

4.2.2 Equipos

En Mina Invierno se ha considerado un sistema de trabajo de jornada continua de 365 días/año con dos turnos de 12 horas/día. No obstante, solamente se programan 310 días/año asumiendo que se pierden en total 55 días/año por clima (85% disponibilidad climática). La decisión de asumir jornada continua los 365 días del año, aunque se reconocen 55 días perdidos por clima adverso, se justifica por el comportamiento aleatorio de los fenómenos climáticos y fueron deducidos de la experiencia de quienes trabajan en la zona.

4.2.2.1 Bulldozers

Los *bulldozers* son utilizados para el suavizamiento de superficies, reperfilado de talud e instalación de suelo. Los modelos utilizados son los Caterpillar D6-T y D10-T.

El modelo Caterpillar D10-T es un equipo de grandes dimensiones, ideal para movimientos de material, por lo cual es utilizado para realizar el suavizamiento de superficies y cortes de taludes. Sin embargo, genera una presión sobre el suelo equivalente a 116kPa, lo cual genera una considerable compactación sobre el sitio en que se mueve. Esto afecta negativamente la operación de revegetación debido a que se requieren suelos lo más esponjados posibles para permitir la aireación del mismo, por lo cual para la operación de instalación de suelo se utilizan equipos más livianos, como el modelo Caterpillar D6-T que genera una presión sobre el suelo de

²⁰ Coordenadas UTM SAD69 H19S

alrededor de 43 kPa. Algunas de sus especificaciones técnicas más relevantes se detallan sobre Tabla 4.4, obtenidas del manual de rendimiento del fabricante [5].

Tabla 4.4: Especificaciones técnicas de *bulldozers*.²¹

	Unidad	D6-T	D10-T
Máxima inclinación de trabajo	°	45	45
Capacidad de la hoja	m ³	5.6	18.5
Velocidad de avance	km/h	7.3	8
Presión ejercida sobre el suelo	kPa	42.8	116.2
Distancia de empuje	m	18	15
Producción óptima ²²	m ³ /h ²³	600	2250

4.2.2.2 Excavadora

La excavadora disponible para las operaciones de rehabilitación corresponde al modelo Komatsu PC300, utilizada para cargar el suelo superficial desde los acopios y ocasionalmente para realizar reperfilamiento de taludes cuyo ángulo se desee más pronunciado que el que alcanzan los *bulldozers*. Sus especificaciones técnicas fueron obtenidas del catálogo de fabricante [13] y son presentadas en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Especificaciones técnicas de excavadora²⁴

	Unidad	Komatsu PC 300
Capacidad de balde	m ³	1.3
Altura máxima de descarga	m	6
Peso operativo	ton	32.3
Presión sobre el suelo	kPa	65.7

4.2.2.3 Camiones

El equipo de transporte asignado para las operaciones de rehabilitación corresponde a un camión Komatsu HD 785. Éste es cargado con suelo por una excavadora desde los acopios, luego se traslada hasta el botadero y realiza la descarga del material por volteo.

Sobre la Tabla 4.6 se presentan algunas especificaciones técnicas obtenidas del catálogo de fabricante [13].

²¹ Para ver especificaciones técnicas, dirigirse a Anexo 9.4.1

²² La producción óptima depende de las distancias de transporte de material y se determinaron de acuerdo a los gráficos presentados en el Anexo 9.4.

²³ Metros cúbicos sueltos por hora

²⁴ Para ver especificaciones técnicas, dirigirse a Anexo 9.4.2

Tabla 4.6: Especificaciones técnicas de camión²⁵

	Unidad	Valor
Capacidad máxima de carga	ton	91
Capacidad colmada (2:1)	m ³	90
Altura hasta la tolva	m	4.3
Ancho de camión	m	5.2
Peso operacional vacío	ton	72.0
Velocidad media en botadero ²⁶	km/h	20

4.2.3 Suavizamiento de Superficies

4.2.3.1 Descripción de la operación

La instalación de suelo sobre el botadero requiere que las superficies presenten condiciones adecuadas para que los equipos puedan trabajar. Este no es el caso de las zonas donde, por motivos operacionales, camiones realizaron descargas a piso.

La tarea de suavizamiento de estas superficies se realiza mediante *bulldozer*. Como se explica en la Figura 4.13, el equipo debe ir realizando cortes en la parte superior de cada descarga, las cuales tienen una altura media de dos metros, y mover ese material a los intersticios que quedan entre descarga y descarga.

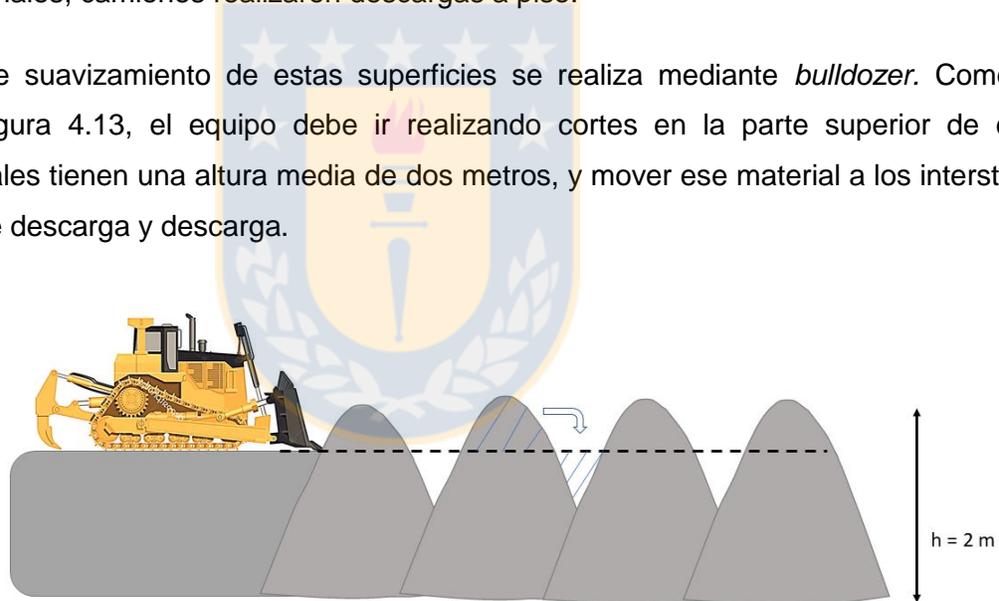


Figura 4.13: Esquema de operación de suavizamiento de superficie.

El trabajo se distribuye desde el centroide del área destinada a ser suavizada, hacia los bordes del polígono dibujado. Luego, el terreno queda como se describe en la figura 4.14. Pese a que no queda completamente plano, el flujo constante de otros equipos genera la compactación necesaria para que el terreno quede en óptimas condiciones.

²⁵ Para ver especificaciones técnicas de camión, dirigirse a Anexo 9.4.3

²⁶ Velocidad obtenida de datos históricos de mina.

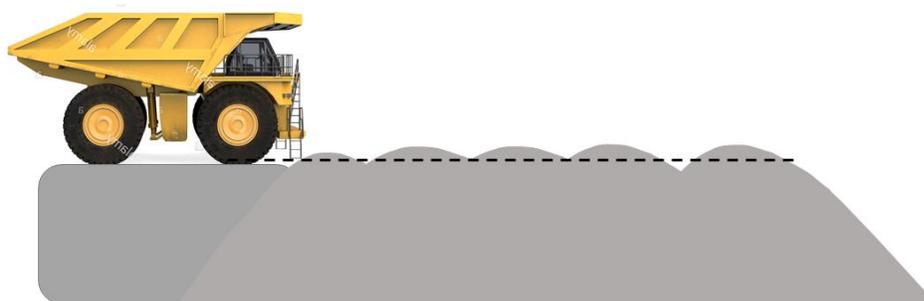


Figura 4.14: Compactación del terreno provocada por el flujo de equipos.

4.2.3.2 Tiempo de operación – Suavizamiento de Superficies

La operación antes descrita se realiza únicamente mediante el modelo de *bulldozer* D10-T. De acuerdo a lo especificado en los manuales de rendimiento de los equipos, la producción debe ser estimada de acuerdo a una serie de consideraciones como las características de los materiales, la experiencia del operador y las condiciones de trabajo, las cuales se traducen en factores de corrección²⁷.

De acuerdo a las especificaciones técnicas del equipo, la producción máxima es igual a 2250 m³/h, lo cual se alcanza por distancias de empuje máximas de 15m. De acuerdo a lo descrito anteriormente, los cortes que se van realizando sobre cada descarga se transportan por distancias inferiores a 5 metros, entre descarga y descarga, por lo cual se aplicó el factor de corrección para este ritmo de producción.

En particular, para el suavizamiento de superficies, estos factores fueron determinados de acuerdo a la Tabla 4.7. El factor final de corrección se obtuvo de la multiplicación de los factores antes mencionados.

Tabla 4.7: Factores de corrección para suavizamiento de superficies mediante *bulldozer*

Consideración	Factor de corrección
Operador	0.6
Tipo de Material	0.6
Condición de Pendiente	0.8
Factor Final	0.29

Los resultados de la producción y los tiempos estimados de trabajo son presentados sobre la Tabla 4.8 y corresponden al esfuerzo requerido para suavizar una superficie de 6.14 ha.

²⁷ Para más información sobre factores de corrección, dirigirse a Anexo 9.4

Tabla 4.8: Producción y tiempos de trabajo para suavizamiento de superficies.

	Unidad	Valor calculado
Volumen a mover	m ³	59,345
Producción estimada	m ³ s/h	648
Tiempo efectivo	h	91.6
Tiempo real de trabajo	días	7

4.2.4 Reperfilamiento de Talud

La operación de reperfilamiento es fundamental para la rehabilitación de talud, puesto que entrega las condiciones adecuadas que requieren los equipos para instalar el suelo sobre él. Además, realiza un aporte considerable a la adecuación paisajística, al dar formas naturales de cerros al botadero minero.

4.2.4.1 Descripción de la operación.

La operación en sí, consiste en el movimiento de material desde la cresta del talud, hasta el pie del mismo, como se representa sobre la Figura 4.15. Lo anterior permite disminuir el ángulo de talud²⁸, pasando de entre 35° y 40° a uno de diseño de 26°. Además, permite provocar la caída controlada de rocas, piedras o masas de suelo que se encuentren inestables o en peligro de derrumbarse.

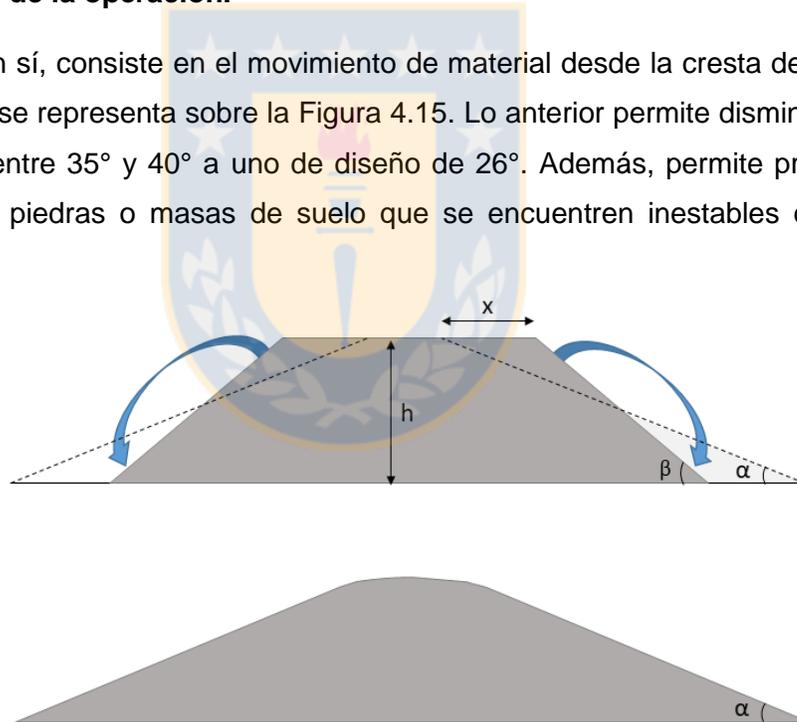


Figura 4.15: Operación de reperfilamiento de talud de botadero

Para operativizar el diseño de ingeniería, se calculó la distancia de corte sobre el talud, la cual corresponde a la distancia existente entre la cresta natural del talud y la cresta deseada, de acuerdo a la ecuación (4.1).

²⁸ El ángulo de talud natural depende del ángulo de reposo del material, el cual alcanza un valor promedio de 37°

$$x = \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\tan(\alpha)} - \frac{h}{\tan(\beta)} \right) \quad (4.1)$$

Donde

x : distancia de corte

h : altura de banco

α : ángulo de talud deseado

β : ángulo natural (de reposo del material)

4.2.4.2 Diseño operativizado

Esto fue calculado para los 8 taludes mencionados en el punto 6.1. Además, cabe mencionar que, en la práctica, como se mencionó anteriormente, los operadores de *bulldozer* solo han logrado trabajar a ángulos de talud cercanos a los 15°, por lo cual se operativizó el diseño tomando estas consideraciones.

Lo siguiente a realizar fue calcular los cortes a realizar por los equipos y los rellenos que quedarían sobre los taludes para alcanzar el diseño propuesto. Sobre la Figura 4.16 se representa el material a cortar de los taludes originales del botadero.

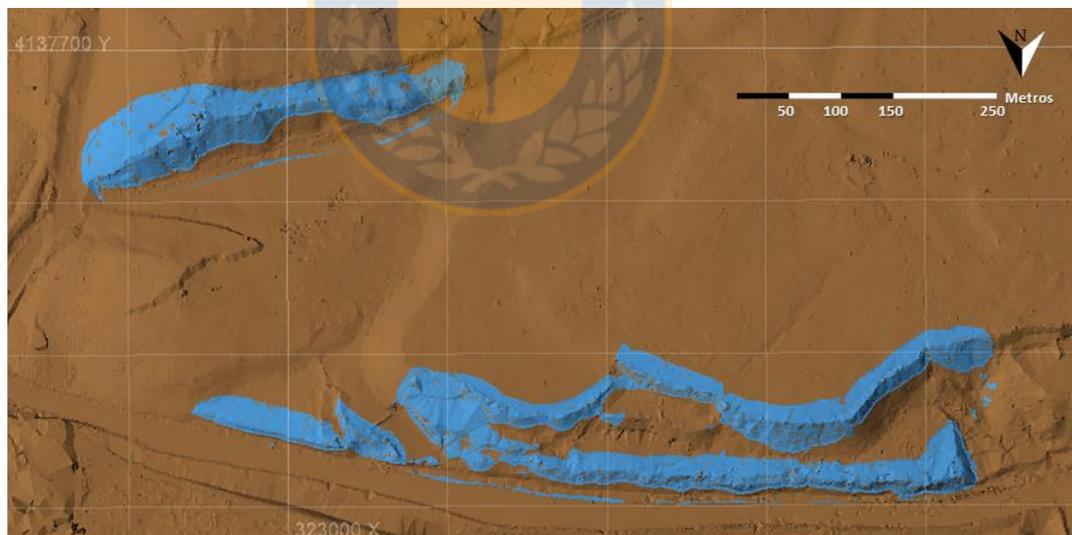


Figura 4.16: Volúmenes de material a cortar sobre topografía original de botadero

Los taludes resultantes son presentados sobre la Figura 4.17, con ángulos menores y superficies suavizadas. El volumen de relleno corresponde al material perteneciente al talud original, que al ser cortado de la cresta fue rellenando espacios sobre el pie que conforma el nuevo talud.

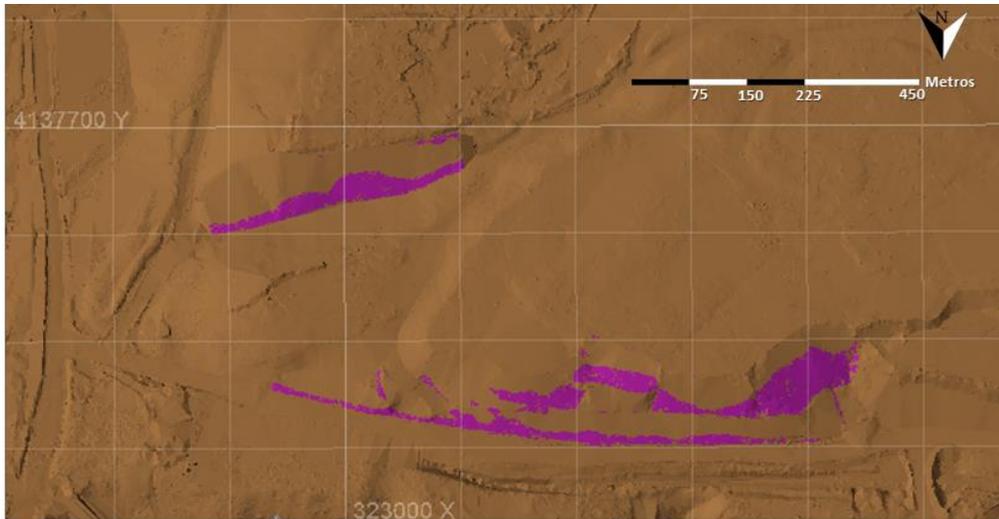


Figura 4.17: Material de relleno sobre diseño operativizado de rehabilitación.

El volumen de material a cortar es considerablemente mayor que el volumen que se utiliza como relleno, por lo cual al realizar estas operaciones existiría un excedente de material que debiese ser removido. Una parte de este material puede ser utilizado para rellenar otros sectores, lo cual implicaría, al momento de realizar el corte, dirigir el material en algún sentido particular para evitar que ese material deba ser removido. En los sectores donde no se encontró el espacio suficiente para realizar lo anterior, se definió que el material sobrante sería cargado mediante excavadoras a camiones para ser descargados como parte del botadero en otro sector. Los movimientos de material descritos son representados sobre la Figura 4.18

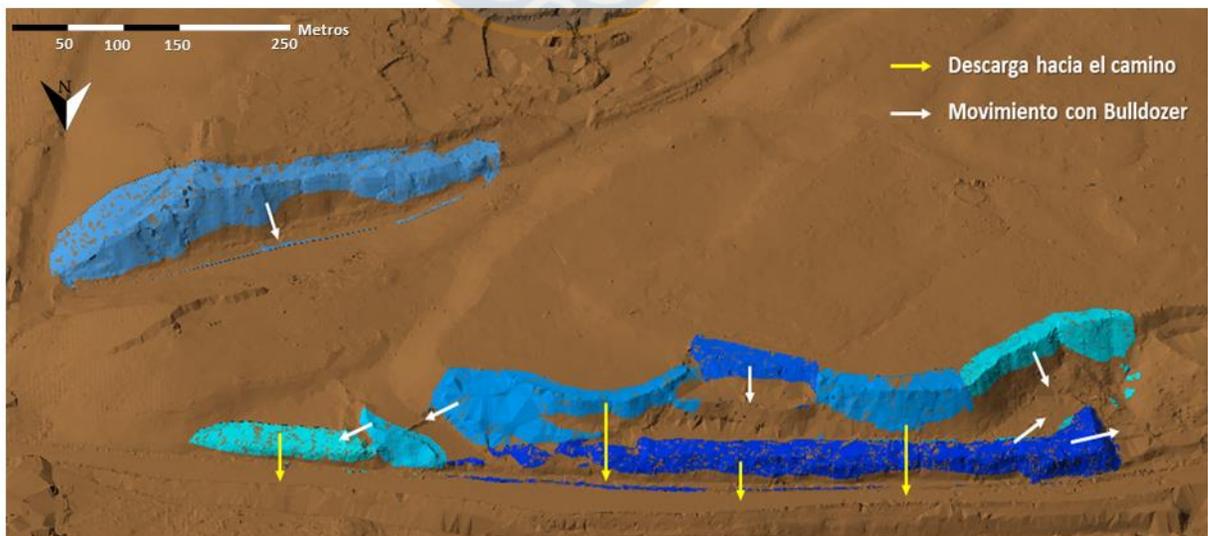


Figura 4.18: Movimientos de material planificados en el sector Norte del Botadero Sur.

Las flechas blancas indican la dirección en que se realizarán los cortes sobre los taludes, de manera tal de dejar la menor cantidad posible de material para remover. Las flechas amarillas, por

su parte, indican movimiento de material desde el talud hasta el camino que pasa por el pie del botadero. Este es el material que deberá ser cargado mediante excavadoras a camiones y enviado a otro sector del botadero.

4.2.4.3 Tiempo de operación - Reperfilamiento

Como se mencionó anteriormente, el *bulldozer* es un equipo cuya producción es bastante variable. Uno de los factores que la afectan directamente son las distancias a lo largo de las cuales deben empujar material. Sobre la Figura 4.19 se presenta un talud que debe ser cortado. Al lado derecho de este talud se encuentra una zona que puede ser rellenada, sin embargo, el *bulldozer* debería recorrer una distancia demasiado larga empujando material. Debido a esto, se consideró una distancia de 150 m, la cual se dividió en dos trabajos donde el equipo deberá empujar por un largo máximo de 75 m. Debido a esto, su producción será considerablemente menor que si recorriera su distancia de empuje óptima.

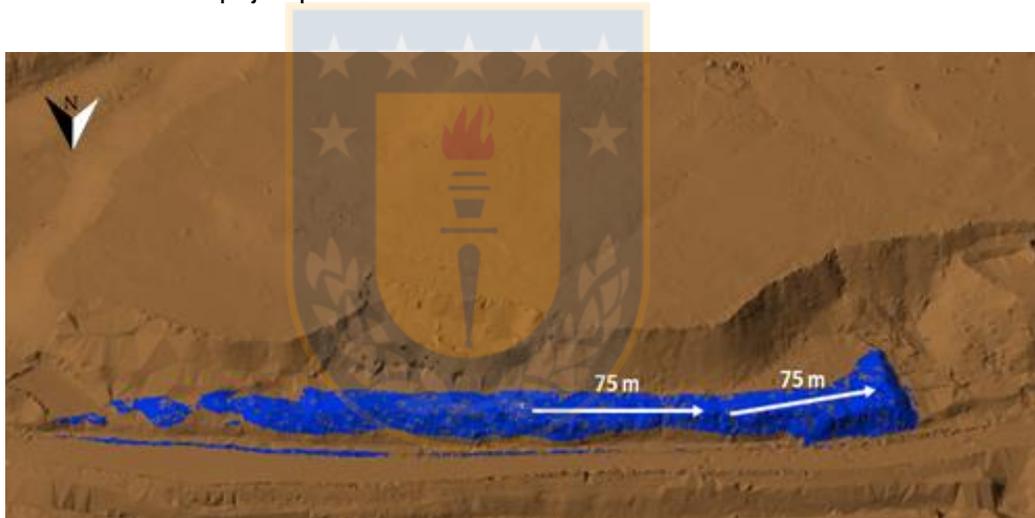


Figura 4.19: Distribución de zonas de trabajo para *bulldozer* D10T

Estas consideraciones se tomaron para cada uno de los taludes analizados, así como los factores de corrección detallados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Factores de corrección para perfilamiento de taludes mediante *bulldozer*

Consideración	Factor de corrección
Operador	0.6
Tipo de Material	0.6
Condición de Pendiente	1.1
Factor Final	0.4

Con esto, se obtuvo la producción y los tiempos de trabajo que se detallan en la Tabla 4.10, considerando que la operación de reperfilado en sí se realiza únicamente mediante el modelo de *bulldozer* D10-T y que luego el material sobrante es cargado por una excavadora PC300 sobre un

camión 785, el cual debe transportar el material hacia otro sector cercano del botadero. Además, cabe mencionar que estos tiempos fueron determinados de acuerdo a la disponibilidad de equipos que cuenta la mina, que corresponde a un *bulldozer*, una excavadora y dos camiones.

Tabla 4.10: Producción y tiempos de trabajo para perfilamiento de taludes.

	Unidad	Bulldozer	Excavadora - Camión
Volumen a mover	m ³	59,345	33,654
Producción estimada	m ³ /h	891	144 ²⁹
Tiempo efectivo	h	283	234
Tiempo real de trabajo	días	19	16

4.2.5 Carguío y Transporte de Suelo

El carguío de suelo se realiza mediante una excavadora que carga un camión, seguido por el transporte hacia el lugar donde se quiere instalar el suelo.

Sobre el Botadero Sur existen dos acopios de suelo, los cuales fueron identificados como Acopio 1 y Acopio 2. El primero de ellos, ubicado en el sector suroeste del botadero, a una cota de 110 m.s.n.m; el segundo, en el sector sureste del botadero, a una cota de 130 m.s.n.m. Éstos fueron cubicados para conocer el volumen real disponible de suelo, lo cual se presenta sobre la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Acopios de suelo vegetal sobre Botadero Sur

Sector	Unidad	Volumen de suelo disponible
Acopio 1	m ³	22,010
Acopio 2	m ³	217,432

Sobre la Figura 4.20 se presenta un esquema de los sectores propuestos para ser rehabilitados, y los caminos disponibles para acceder a ellos desde los acopios.

Debido a la contigüidad entre el talud a rehabilitar y el Acopio 2, no se planificó la operación de carguío y transporte en ese sector, debido a que el suelo podría ser directamente distribuido por un *bulldozer* desde la cresta del talud.

²⁹ Producción de excavadora se determinó considerando datos históricos operacionales de carguío de camiones con suelo vegetal

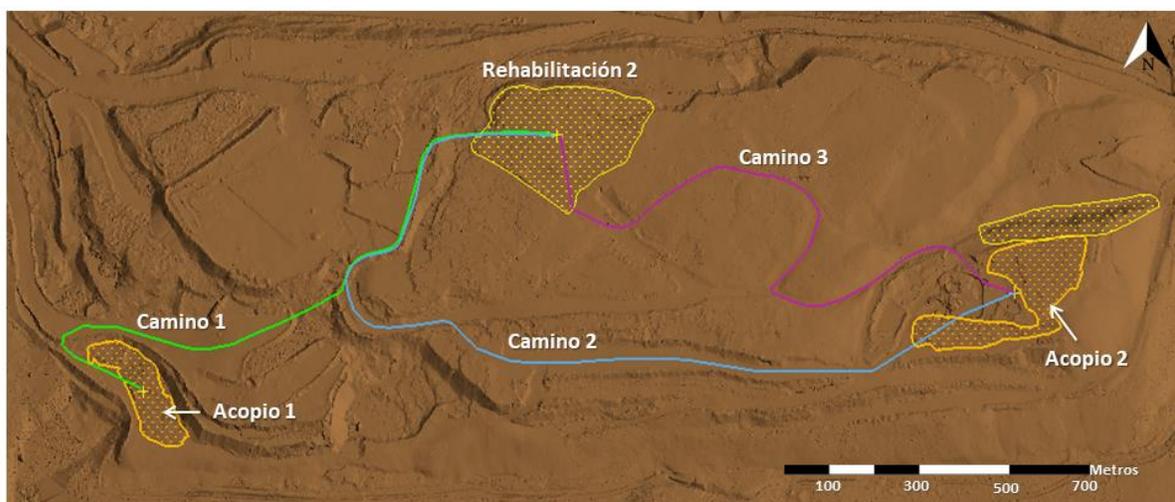


Figura 4.20: Sectores de rehabilitación, acopios y caminos.

Los caminos presentados poseen diferentes características que fueron analizadas para encontrar la mejor combinación de transporte de suelo por el botadero. Las distancias estimadas para cada camino son presentadas en la Tabla 4.12

Tabla 4.12: Distancias para alternativas de caminos

	Unidad	Camino 1	Camino 2	Camino 3
Distancia	m	1,460	2,125	1,517

El Camino 1 representa la ruta más corta para llegar al área de rehabilitación y posee un ancho suficiente para permitir el tránsito de dos camiones, sin embargo, utilizar este camino implica la construcción de una rampa y dos accesos al sector. El Camino 2 representa la ruta más larga para llegar al destino, posee un ancho suficiente para el tránsito de dos camiones y su utilización implica la construcción de un acceso. El Camino 3 por su parte, representa una distancia de ruta entremedia entre los dos mencionados antes, sin embargo, presenta un ancho muy angosto que solo permite el tránsito de un camión; además, su utilización implicaría pasar por encima de un sector ya rehabilitado, cuya reposición generaría un gasto económico importante. Este último punto fue determinante para descartar esta opción, restando los Caminos 1 y 2.

4.2.5.1 Flota de carguío y transporte

Lo siguiente a determinar fue la flota de equipos necesaria para mover estas cantidades de suelo. El número de pases o ciclos requeridos por la excavadora para llenar a capacidad un camión se determinó de acuerdo a la ecuación (4.2).

$$n^{\circ} \text{ de pases} = \frac{\text{capacidad colmada tolva de camión [m}^3\text{]}}{\text{capacidad cucharón [m}^3\text{]} * \text{factor de llenado}} \quad (4.2)$$

Esta ecuación es válida cuando la capacidad en volumen es la limitante del proceso de carguío. Sin embargo, es necesario considerar que las tolvas de los camiones 785 son carboneras, lo cual quiere decir que fueron diseñadas para materiales muy livianos. Dado que la densidad del carbón promedio es cercana a 1 ton/m³³⁰ y la de suelo vegetal es cercana a los 1.6 ton/ m³³¹, si se llenara la capacidad volumétrica de la tolva, se estaría excediendo la capacidad máxima de carga en masa de la tolva.. Así, la ecuación (4.2) queda redefinida a la ecuación (4.3)

$$n^{\circ} \text{ de pases} = \frac{\text{Capacidad máxima de carga de camión [ton]}}{\text{Capacidad cucharón [m}^3\text{]} * \text{factor llenado}^{32} * \text{densidad material} \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right]} \quad (4.3)$$

Luego, el tiempo de carguío, que corresponde a la suma entre el tiempo de carguío de la tolva del camión y el tiempo de aculatamiento del mismo, se determinó de acuerdo a como indica la ecuación (4.4).

$$\text{Tiempo de carguío} = n^{\circ} \text{ de pases} * \text{Tiempo de ciclo excavadora} + \text{Tiempo aculatamiento} \quad (4.4)$$

Sobre la Tabla 4.13 se presentan los resultados obtenidos de tiempo de carguío para la combinación de un camión con una excavadora.

Tabla 4.13: Caracterización de conjunto excavadora-camión

	Unidad	Excavadora PC300-Camión 785
Tiempo de ciclo excavadora ³³	s	14.6
N° de pases	#	39
Toneladas por pase	ton	2.3
Tiempo aculatamiento camión	min	1
Tiempo de carguío	min	10.5

Así, el tiempo de transporte para ambos caminos se determinó de acuerdo a la ecuación (4.5), donde el tiempo de descarga corresponde al tiempo de volteo de la carga de suelo en el punto a distribuir por el *bulldozer*, y el tiempo de viaje, al tiempo ida y vuelta para recorrer las distancias establecidas en la Tabla 4.14.

$$\text{Tiempo de transporte} = \text{Tiempo de viaje} + \text{Tiempo de descarga} \quad (4.5)$$

³⁰ Valor promedio de densidad de carbón, medición realizada en Mina Invierno.

³¹ Densidad correspondiente a material suelto.

³² Depende del tipo de material. Para suelo vegetal con rocas = 110%.

³³ Valor promedio obtenido de mediciones de tiempo en terreno.

Tabla 4.14: Tiempos de ciclo para alternativas de camino

	Unidad	Camino 1	Camino 2
Tiempo de carguío	min	10.5	10.5
Tiempo de descarga	min	0.7	0.7
Tiempo de transporte	min	5.1	7.1
N° de camiones disponibles	#	2	2
Tiempo de cola camión	min	5.4	3.4

De acuerdo a los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 4.14 utilizar la alternativa de Camino 1, implicaba tener tiempos de espera de camión mayores a los de la alternativa de Camino 2, pese a poseer una distancia menor de transporte. Así, los tiempos de carguío y transporte quedarían determinados por el trabajo de la excavadora, lo que, sumado a la dificultad operacional de generar accesos y construir una rampa para utilizar el Camino 1, permitieron elegir como ruta el Camino 2.

Sobre la Tabla 4.15 se presenta el volumen de suelo vegetal requerido para ambos sectores, considerando un espesor de suelo de 50 cm y la distancia de transporte desde el acopio hasta el área a rehabilitar.

Tabla 4.15: Requerimientos de suelo y distancias de transporte

Sector	Superficie [ha]	Volumen de suelo requerido [m ³]	Distancia de transporte [m]
Talud	2.48	12,400	³⁴
Área plana	6.14	30,700	2,125

Considerando todo lo anterior, el volumen de suelo restante disponible se encontraría en el Acopio 2 y alcanzaría un volumen de 174,332 m³, el cual podría ser utilizado para futuras labores de rehabilitación cercanos a ese sector como es la pared sur del botadero.

4.2.5.2 Tiempo de operación – Carguío y Transporte

Una vez determinados los tiempos de ciclo de la operación de carguío y transporte, se estimó la cantidad de tiempo real requerida para completar el movimiento de tierra desde los acopios hasta los sectores a rehabilitar, detallados en la Tabla 4.16. Cabe mencionar que el suelo almacenado en los acopios posee una densidad estimada de 1.7 ton/m³, levemente mayor a la densidad del material suelto, debido a la compactación que se produce por el peso del suelo.

³⁴ El material puede ser directamente distribuido desde el acopio por el talud hacia abajo, mediante bulldozer, por lo cual no se contempla carguío ni transporte.

Tabla 4.16: Tiempos de operación para transporte de suelo

	Unidad	Valor
Tonelaje a mover	ton	52,190
Material movido por ciclo	ton	180
N° ciclos requeridos	#	290
Tiempo efectivo requerido	h	101.5
Tiempo real requerido	días	7

4.2.6 Instalación de Suelo Vegetal

La instalación de suelo vegetal es una operación elemental para realizar la rehabilitación de espacios mineros debido a que afecta directamente la probabilidad de éxito de la siembra que se realiza posterior a ella. La operación consiste en tres etapas: una de carguío de material, la cual se realiza mediante excavadoras y camiones; la siguiente, de transporte del material; luego, se deposita por volteo el suelo ya sea en la cresta de un talud reperfilado o bien sobre una superficie plana y finalmente, se distribuye el suelo mediante *bulldozer*. Sobre la Figura 4.21 se presenta un talud ubicado en la pared norte del Botadero Sur que ha sido cubierto con suelo y revegetado parcialmente.



Figura 4.21: Talud parcialmente rehabilitado

La depositación de suelo vegetal se realiza mediante volquetes de material de los camiones, para luego ser esparcido por un *bulldozer* modelo Caterpillar D6-T.

4.2.6.1 Distribución de suelo

Para planificar la distribución de suelo, se dibujó una grilla de 30 x 30 m, como se muestra sobre la Figura 4.22. Esto, con el objetivo de establecer puntos de descarga de suelo que

optimizaran el trabajo del *bulldozer*, de manera tal que el equipo tuviese que empujar suelo por distancias medias de 15 m, lo cual maximiza su producción.



Figura 4.22: Puntos de descarga de suelo sobre área a rehabilitar

De acuerdo a los requerimientos de suelo, y considerando que por cada camionada se descargan alrededor de 56 m³, se estimó que por cada punto se harían alrededor de 10 descargas, lo que sumaría un total de 580 descargas a distribuir.

Definido esto, se determinó la producción esperada por el *bulldozer*. El factor de corrección empleado corresponde al presentado en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Producción *bulldozer* D6-T sobre área a rehabilitar

	Unidad	Valor
Producción de catálogo ³⁵	m ³ /s/h	600
Factor de corrección	-	0.29
Producción real	m ³ /s/h	174

Para planificar la distribución de suelo sobre el talud, se dibujó la misma grilla de 30 x 30 m, para optimizar las distancias de empuje. Sin embargo y como se muestra en la Figura 4.23, dado que las condiciones de operación son diferentes, se definieron puntos de distribución, situados sobre la cresta del talud, desde los cuales el *bulldozer* deberá empujar el material hasta cubrir el pie del talud con suelo.

³⁵ De acuerdo a gráfico de producción óptima en Anexo 9.1.

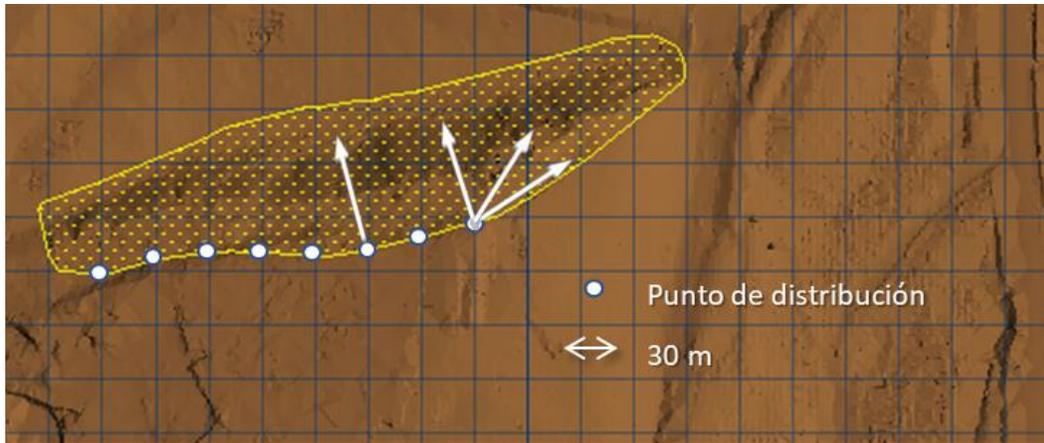


Figura 4.23: Puntos de descarga de suelo sobre talud a rehabilitar

Sobre la Tabla 4.18 se presenta la producción esperada del equipo sobre el talud, para distancias de empuje medias de 60 m.

Tabla 4.18: Producción *bulldozer* D6-T sobre talud a rehabilitar.

	Unidad	Valor
Producción de catálogo	m ³ /h	250
Factor de corrección	-	0.4
Producción real	m ³ /h	100

4.2.6.2 Tiempo de operación: Instalación de Suelo

De acuerdo a la planificación descrita anteriormente, se estimaron los tiempos de operación para completar la instalación de suelo sobre ambos sectores propuestos, los cuales son detallados en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19: Tiempo de operación para instalación de suelo

	Unidad	Área a rehabilitar	Talud a rehabilitar
Volumen de suelo requerido	m ³	30,700	12,400
Producción <i>bulldozer</i>	m ³ /h	174	100
Tiempo efectivo requerido	h	176.4	124
Tiempo real requerido	días	12	9

5 RESULTADOS

5.1 Planificación de Operaciones

La planificación de los sectores a rehabilitar se determinó de acuerdo a la Figura 5.1, donde las áreas rehabilitadas corresponden a sectores donde se planificó realizar una preparación de terreno, ya sea mediante suavizamiento de superficie o reperfilamiento de talud, y posterior revegetación. Las áreas de control de erosión correspondientes a la pared noreste del botadero serán sometidas solo a reperfilamiento, debido a que aún no se encuentran en su capacidad de diseño, sin embargo es imperativo disminuir el arrastre de sedimentos de sus taludes.

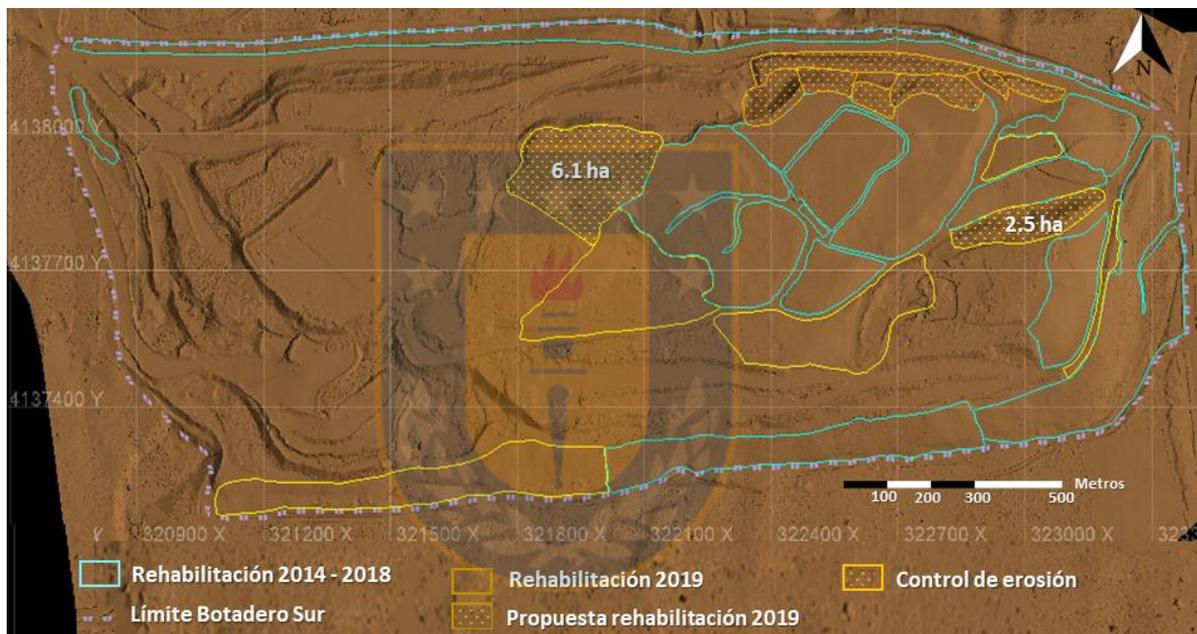


Figura 5.1: Propuesta de rehabilitación

El área previamente planificada para rehabilitación en 2019 alcanzaba una superficie de 21.6 ha, por lo tanto la propuesta fue de 8.6 ha, a fin de alcanzar la superficie de 30 ha comprometidas para el presente año. Considerando esto, el volumen de suelo restante disponible en los acopios alcanzaría un volumen de 174,332 m³.

5.2 Utilización de Equipos

Sobre la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los tiempos requeridos por equipo y su disponibilidad, para realizar todas las labores planificadas. Sobre la Tabla 5.2 se presenta un desglose de las horas de trabajo efectivas requeridas por cada operación de rehabilitación.

Tabla 5.1: Resumen de tiempos requeridos por equipo

	Unidad	Bulldozer D10-T	Bulldozer D6-T	Excavadora	Camión
Tiempo efectivo	h	374.6	300.4	335.5	335.5
Tiempo real	días	26	21	23	23
Equipos disponibles ³⁶	#	1	1	1	2

Tabla 5.2: Resumen de horas efectivas de trabajo requeridas por operación

	Unidad	Bulldozer D10-T	Bulldozer D6-T	Excavadora	Camión
Suavizamiento de superficie	h	91.6	0	0	0
Reperfilamiento de talud	h	283	0	234	234
Carguío y transporte de suelo	h	0	0	101.5	101.5
Instalación de suelo	h	0	300.4	0	0

Además, sobre la Tabla 5.3 se resumen los equipos requeridos por cada operación de rehabilitación y las áreas asociadas a cada tarea.

Tabla 5.3: Distribución de equipos por áreas de rehabilitación

	Unidad	Suavizamiento de superficie	Reperfilamiento de talud	Carguío y Transporte de Suelo	Instalación de Suelo
Superficie	ha	6.14	9.25	8.62	8.62
Equipo utilizado	m ³	Bulldozer D10-T	Bulldozer D10-T Excavadora Camión	Excavadora Camión	Bulldozer D6-T

5.3 Análisis Económico

Los costos totales directos de realizar las labores de rehabilitación descritas se denominan costos operacionales y resultan de la suma entre los costos de consumo de combustible, mantención y remuneraciones de los operadores.

³⁶ La disponibilidad de equipos fue considerada como la menor posible para analizar el peor escenario, es decir, tener solo un equipo de servicio y dos camiones.

5.3.1 Consumo de Combustible

Sobre la Tabla 5.5 se presentan los costos por consumo de combustible, los cuales fueron determinados según el rendimiento de los equipos por horas efectivas de trabajo, considerando un precio de combustible de 0.7 USD/l.

Tabla 5.4: Consumo de Combustible

	Unidad	Bulldozer D10-T	Bulldozer D6-T	Excavadora	Camión
Consumo de combustible ³⁷	l/h	62	23	30	71
Costo por hora por equipo	USD/h	44	17	22	50

5.3.2 Costos de Mantenición y Remuneraciones

Los costos de mantención dependen directamente de la utilización de los equipos y se definieron como un 60% de los costos de consumo, mientras que las remuneraciones se determinaron considerando turnos de 7x7 día y noche, es decir, considerando una cuadrilla por equipo. Además se consideró un costo adicional asociado a la estadía de los operadores en faena, transporte, seguros y otros beneficios, de acuerdo a como se indica en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Costos por Remuneraciones

	Unidad	Valor
Sueldo	USD	1,900
Hotel y transporte	USD	1,052
Beneficios y seguros	USD	460
Costo mensual por operador	USD	3,400
Costo por cuadrilla	USD	13,600
Costo diario remuneraciones por equipo	USD/día	453.4

5.3.3 Costos Operacionales Totales y Unitarios

Los costos operacionales totales se determinaron considerando el consumo de combustible total requerido para las horas efectivas de trabajo, los costos de mantención proporcionales a ellos y los costos por remuneraciones considerando los días reales de trabajo, para una eficiencia de trabajo de 15 horas al día, lo cual corresponde a un estándar utilizado en la empresa que considera principalmente las horas perdidas por clima. Estos costos fueron determinados para cada operación con el objetivo de determinar el costo unitario por operación de rehabilitación, es decir, determinar el costo por hectárea rehabilitada.

³⁷ Obtenido de datos históricos de la mina.

Los resultados obtenidos para el suavizamiento de superficies, reperfilamiento de talud y carguío y transporte de suelo se detallan sobre la Tabla 5.6

Tabla 5.6: Costos operacionales totales y unitarios por operación de rehabilitación

	Unidad	Suavizamiento de Superficies	Reperfilamiento de Talud	Carguío y Transporte
Días reales de trabajo D10-T	días	7	19	-
Días reales de trabajo Camiones	días	-	16	7
Días reales de trabajo Excavadora	días	-	16	7
Costo consumo Bulldozer D10-T	USD	3,975	3,975	-
Costo consumo Camiones	USD	-	23,400	10,750
Costo consumo Excavadora	USD	-	5,148	2,233
Costos por mantención	USD	2,385	19,513	7,430
Costos por remuneraciones	USD	3,174	30,378	9,521
Costo total	USD	9,534	82,414	29,334
Costo unitario	USD/ha	1,553	8,910	3,403

Cabe señalar que en particular, para la instalación de suelo se utiliza un *bulldozer D6-T* arrendado a una empresa externa, por lo cual no se incurre en costos de mantención ni remuneración. En cambio, fue necesario considerar el costo de arriendo del equipo, el cual se determina de acuerdo a una tarifa fija por posesión equivalente a 609.2 UF³⁸/mes y una tarifa variable por hora de utilización del equipo de 0.95 UF/h, más el costo de consumo de combustible.

Luego, los costos operacionales para la instalación de suelo se determinaron de acuerdo a como se presenta sobre la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Costos operacionales totales y unitarios para Instalación de Suelo

	Unidad	Valor
Días reales de trabajo D6-T	días	21
Costo consumo Bulldozer D6-T	USD	5,107
Tarifa fija de arriendo	USD	21,992
Tarifa variable de arriendo	USD	10,292
Costo total	USD	37,391
Costo unitario	USD/ha	4,338

Con todo lo anterior, se determinó el costo operacional directo de realizar todas las operaciones de rehabilitación sobre una superficie equivalente a una hectárea, el cual alcanzó un valor de 18,204 USD, distribuido por operación de acuerdo a como indica la Figura 5.2.

³⁸ Unidad de Fomento, a la fecha equivalente a 36.1 USD

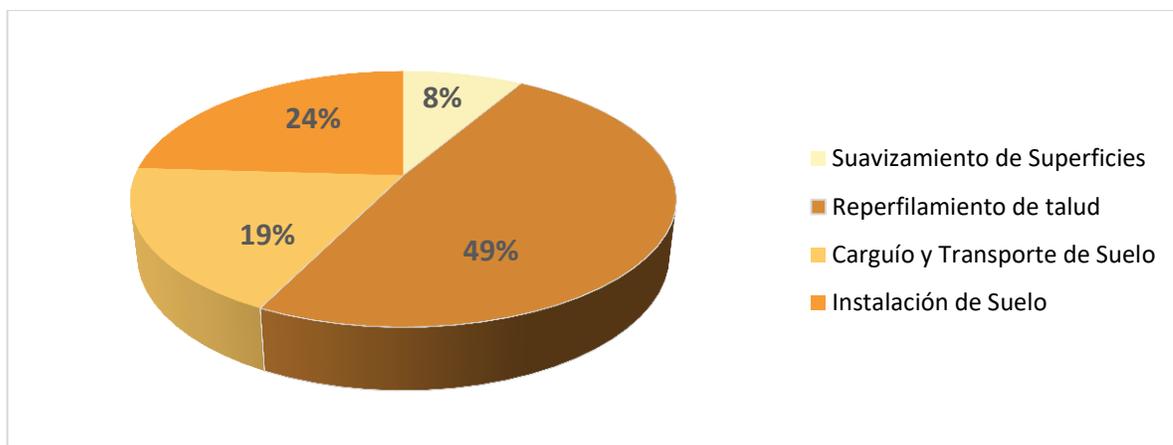


Figura 5.2: Distribución porcentual de costos por hectárea rehabilitada

De acuerdo a como indica la distribución porcentual de los costos por hectárea rehabilitada, la operación de reperfilamiento de talud realizada por el Bulldozer D10-T representa casi la mitad del costo total. Esto se debe a que las cantidades de material a mover por área son mucho mayores a las necesarias en otras operaciones como la de suavizamiento de superficies, lo cual aumenta el tiempo de operación y por tanto de remuneraciones y mantención.

Caso contrario es lo que ocurre para los costos de instalación de suelo, donde las cantidades de material a mover no son significativas. Sin embargo, es importante destacar que el equipo utilizado es arrendado a una empresa externa, lo cual duplica su costo. Además, la producción del Bulldozer D6-T es considerablemente menor que la del Bulldozer D10-T, lo cual se traduce en mayor tiempo de operación.

Los costos de carguío y transporte por su parte, se explican por la cantidad de equipos que se requieren trabajando simultáneamente.

6 CONCLUSIONES

La compleja situación en la que se encuentra Mina Invierno, debido a la prohibición de realizar tronaduras bajo la cota 100 ms.n.m dictaminada por el Tribunal Ambiental de Valdivia, ha obligado a la empresa a pensar en los peores escenarios: una paralización temporal o un cierre definitivo de la faena. Frente a esta última posibilidad, se decidió realizar una revisión de los compromisos medio ambientales asumidos por la empresa y dispuestos en la RCA, así como los asumidos de acuerdo al Plan de Cierre vigente al 2019. Estos documentos comprometen la revegetación total de las áreas intervenidas al fin de la vida útil del proyecto, por lo cual se planteó como uno de los principales objetivos el determinar la disponibilidad de suelo, para compararla con los requerimientos del mismo.

La cuantificación de recursos edáficos se logró cubriendo la totalidad de los acopios destinados para su almacenamiento y realizando un muestreo de suelo que permitió identificar las zonas de mayor profundidad de suelo en áreas posibles de escarpar, y por tanto, de mayor disponibilidad del recurso.

El espesor de suelo utilizado en los últimos semestres para la rehabilitación de los botaderos ha sido de 50 cm, valor que representa un espesor ideal para el éxito de la siembra. Las cubicaciones realizadas determinaron que el suelo disponible en los acopios alcanzaba un volumen de 727,828 m³, insuficiente para realizar el cubrimiento total de los botaderos expuestos utilizando 50 cm de suelo, pero suficiente para realizarlo con espesores de 30 cm, valor que corresponde al declarado en la RCA. Esto se traduce en dos opciones para afrontar el problema: utilizar un espesor de suelo de 30 cm o utilizar espesores de 50 cm, escarpando áreas que aún no han sido intervenidas y realizar una siembra en el lugar posteriormente.

Por otra parte, frente a la posibilidad de realizar una paralización temporal de la mina, se planteó como segundo objetivo principal el de planificar las operaciones de rehabilitación del Botadero Sur.

Esto se realizó en primera instancia, determinando la prioridad de rehabilitar ciertas áreas del botadero por sobre otras, según las condiciones operacionales y los riesgos que podrían generar al mantenerse sin rehabilitar durante la paralización. Así, se consideró realizar reperfilamiento de taludes en sectores que afectaban negativamente las condiciones medioambientales al ser fuertemente erosionables, y suavizamiento de superficies donde se han realizado numerosas

descargas a piso. Ambas medidas fueron consideradas como una preparación de terreno para la posterior revegetación.

La suma entre las áreas rehabilitadas durante el año 2019 y las propuestas, alcanzaría una superficie de 30,22 ha, lo cual permitiría cumplir con el objetivo de rehabilitación de 30 ha dispuesto en el Plan de Cierre y RCA. Considerando esto, el volumen de suelo restante disponible alcanzaría un volumen de 174,332 m³, el cual podría ser utilizado para futuras labores de rehabilitación cercanos como es la pared sur del botadero.

Con todo lo anterior, se elaboró un plan de utilización de equipos que contempló operaciones unitarias de reperfilamiento de talud, carguío y transporte de suelo e instalación de suelo.

La planificación de las operaciones se realizó considerando una flota de un *Bulldozer* Caterpillar D10-T, para reperfilamiento y suavizamiento de superficies, un *Bulldozer* Caterpillar D6-T para distribuir el suelo sin generar significativa compactación, una Excavadora Komatsu PC300 para cargar suelo y dos Camiones Komatsu 785 para transportarlo. El equipo requerido en más sectores y que por tanto limita el tiempo de operación global fue el *Bulldozer* Caterpillar D10-T, el cual es utilizado para reperfilamiento y suavizamiento de superficies. Es importante señalar que estas labores podrían realizarse simultáneamente, reduciendo el tiempo de operación; sin embargo, no se cuenta con la disponibilidad de equipos óptima.

Pese a que los sectores a rehabilitar definidos requieren de diferentes combinaciones de labores, se estableció un caso modelo de rehabilitación, a fin de conocer su costo unitario, es decir, el costo de realizar todas las operaciones descritas en una superficie estándar de una hectárea, el cual alcanzó un valor de 18,204 USD/ha. Además se determinó el costo unitario de cada operación, con el objetivo de establecer una comparación entre ellas.

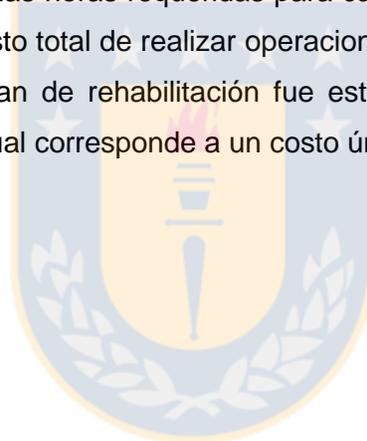
La operación de mayor costo estimado fue la de reperfilamiento de talud, debido a la cantidad de material a mover por unidad de área. Este costo podría ser considerablemente reducido, incluso a cero, si se integrara el diseño final de rehabilitación en la planificación de construcción del botadero, lo cual permitiría evitar el manejo de material por segunda vez, como se hace actualmente.

La siguiente operación de mayor costo la de instalación de suelo, lo cual tiene una relación directa con los altos costos de arriendo del equipo utilizado. Este costo podría ser reducido hasta la mitad si se contara con equipo propio. Si no es posible la compra de un equipo, una forma de reducir el costo sería aumentar la utilización del equipo al máximo posible.

Los costos de carguío y transporte se explican por la cantidad de equipos requeridos, puesto que se utilizan tres y por tanto se incurre en un mayor gasto de mano de obra. Estos costos difícilmente podrían ser reducidos puesto que esta operación es una de las más optimizadas en la industria.

La operación de suavizamiento de superficie es la que representa menor influencia en el costo de la rehabilitación, sin embargo, es importante mencionar que es un costo que podría ser reducido e incluso eliminado si se realizaran las descargas de los volquetes de camión de manera ordenada y siendo compactadas inmediatamente. Las descargas de manera desordenada generan además grandes acumulaciones de agua que afectan negativamente la estabilidad química y física del botadero, que obligan a realizar un drenaje previo al suavizamiento, lo cual también genera un costo económico adicional y gasto importante de tiempo.

Teniendo conocimiento de las horas requeridas para cada equipo, se realizó una evaluación económica para cuantificar el costo total de realizar operaciones de rehabilitación para realizar una paralización temporal. Así, el plan de rehabilitación fue estimado de una duración de 1 mes y valorizado en 137,203 USD, el cual corresponde a un costo únicamente operacional.



7 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo corresponde a un proyecto de planificación a corto plazo para rehabilitar un botadero, con el objetivo de cumplir compromisos medio ambientales asumidos por la empresa. Sin embargo, es importante señalar que no se puede comprobar la estabilidad física de las medidas tomadas y por tanto no se puede asegurar la estabilidad del botadero en el tiempo. Los taludes a rehabilitar debiesen ser analizados uno por uno mediante perfiles topográficos y estudios piezométricos, a fin de comprobar su estabilidad física y química en el tiempo.

El análisis económico debiese considerar los costos fijos, relacionados con la adquisición inicial del equipo, como costos de depreciación, impuestos y seguros, de manera tal de obtener resultados más reales. Luego el análisis económico debiese validarse para poder calcular los errores de estimación y realizar un análisis de mayor exactitud. Además, se sugiere realizar un análisis modificando la disponibilidad de equipos para entender cómo afectan los tiempos y los costos de operación.

Finalmente es importante destacar la imperatividad de considerar los trabajos de rehabilitación de botaderos de estériles dentro de la planificación minera. Esto permitiría disminuir el riesgo económico al conocer previamente los costos involucrados tanto en operación como en compras de equipos óptimos y eficientes para cada labor. Además, esto evitaría manejar reiteradamente el mismo material, como ocurre frecuentemente en el lugar de estudio y permitiría llevar un seguimiento exhaustivo de la disponibilidad de los recursos indispensables como lo son los recursos edáficos.

8 REFERENCIAS

- [1] ALDAY, J.G., MARRS, R.H., MARTÍNEZ-RUIZ, C. The importance of topography and climate on short-term revegetation of coal wastes in Spain. *Ecological Engineering*. 2010, no.36, pp.579-585 DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.005
- [2] ARRANZ-GONZÁLEZ, J.C. Medio ambiente y actividades mineras a cielo abierto. Restauración de espacios degradados por minería a cielo abierto. *Memorias del XXI Curso Internacional de Postgrado en Metalogenia*. ISPFIGEMPA, Universidad Central del Ecuador. 2002. pp.1-26.
- [3] ARRANZ-GONZÁLEZ, J.C. Rehabilitación o remediación de espacios degradados por minería a cielo abierto: investigación, desarrollo e innovación en España. *Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid, 2015.
- [4] BIAN, Z., DONG, J., LEI, S., LENG, H., MU, S., WANG, H. The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland. *Environmental Geology*. 2009. Vol. 58, Issue 3, pp. 625-634. DOI: 10.1007/s00254-008-1537-0
- [5] CAT®. Manual de Rendimiento Caterpillar®, 2009.
- [6] DE LA ROSA, D. Evaluación Agro-ecológica de Suelos. *Ediciones Mundi-Prensa*. Madrid, 2008. pp. 52-54. ISBN: 978-84-8476-361-1 (e-book Google)
- [7] DONAIRE MARQUEZ, M.J., LÓPEZ JIMENO, C., ADUVIRE PATACA, O., GARCÍA BERMÚDEZ, P., VAQUERO DIAZ, I. Guía para el diseño y construcción de escombreras. 2015.
- [8] ESPIGARES, T., MERINO-MARTÍN, L., MORENO-DE LAS HERAS, M., NICOLAU, J.M. Intensity of ecohydrological interactions in reclaimed Mediterranean slopes: effects of run-off redistribution on plant performance. *Ecohydrology*. 2013. No.6, pp. 836-844. DOI: 10.1002/eco.1307
- [9] Gestión en Recursos Naturales GRN. Providencia, Santiago de Chile. Obtenido desde: <https://www.grn.cl/permiso-ambiental-sectorial-pas/permiso-ambiental/resolucion-de-calificacion-ambiental-rca.html>
- [10] GONZÁLEZ-ALDAY, J., MARTÍNEZ-RUIZ, C. Cambios en la comunidad vegetal sobre estériles de carbón tras hidrosiembra. *Ecología*. 2007. N°.21, pp. 59-70. ISSN 0214-0896

[11] INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Madrid, 1989. p.1-4. Serie: Ingeniería Medioambiental. Ministerio de Industria y Energía. ISBN: 84-7840-019-2

[12] KIL, S.H., LEE, D.K., KIM, J.H., LI, M.H., NEWMAN, G. Utilizing the Analytic Hierarchy Process to Establish Weighted Values for Evaluating the Stability of Slope Revegetation based on Hydroseeding Applications in South Korea. *Sustainability*. 2016. Vol.8, n° 58, DOI: 10.3390/su8010058

[13] Komatsu ®. Specifications & Application Handbook. Ed.28, 2007.

[14] LECHNER, A.M., KASSULKE, O., UNGER, C. Spatial assessment of open cut coal mining progressive rehabilitation to support the monitoring of rehabilitation liabilities. *Resources Policy*. 2016, no.50, pp.234-243. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.10.009

[15] LEI, H., PENG, Z., YIGANG, H., YANG, Z. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*. 2016, no.94, pp. 638-646. DOI:10.1016/j.ecoleng.2016.06.108

[16] Ley N° 20.819. *Modifica la Ley N° 20.551 que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras e Introduce Otras Modificaciones Legales*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2015. Recuperado desde: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1075399&idVersion=2015-03-14>

[17] LIU, X., GUO, P., GUO, S. Assessing the eco-efficiency of a circular economy system in China's coal mining areas: Energy and data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2019. no. 206, pp. 1101-1109. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.09.218

[18] MAITI, S.K., MAITI, D. Ecological restoration of waste dumps by topsoil blanketing, coir-matting and seeding with grass-legume mixture. *Ecological Engineering*. 2015. N° 77, pp. 74-84. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.01.003

[19] MARTINIC, M. El carbón en Magallanes: Historia y Futuro. Punta Arenas, 2015. Segunda Edición, pp.116-118. ISBN: 978-956-9011-00-9

[20] MARTINIC, M. La minería del carbón en Magallanes entre 1868 – 2003. Instituto de Historia, Pontificia Universidad Católica de Chile. 2004. *HISTORIA* N° 37, Vol. I, pp. 129-167. ISSN: 0073-2435

[21] MERINO-MARTÍN, L. Ecology of restored slopes from opencast coal mining: ecohydrological interactions. *Tesis de doctorado, Universidad de Alcalá*. 2010.

[22] MIAO, Z., MARRS, R. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China. *Journal of Environmental Management*. 2000, no.59, pp. 205-215. DOI:10.1006/jema.2000.0353

[23] MINISTERIO DE MINERÍA. *Aprueba Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras*. Decreto 41. Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2012. Recuperado desde: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1045967&idVersion=2012-11-22>

[24] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. *Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*. Decreto 40. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2013. Recuperado desde: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053563>

[25] NAS (National Academy of Sciences). *Rehabilitation potential of western coal lands*. Ballinger Pool. CO, Cambridge, 1974. Mass. 184 p.

[26] Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*. 2018. Versión electrónica 23.2. Consultado en: <https://dle.rae.es/?w=diccionario>

[27] ROSSITER, D.G. *Metodologías para el Levantamiento del Recurso Suelo*. Vargas Rojas, Ronald (trad.). 2ª Versión. Cochabamba: 2004.

[28] SARMIENTO, F. *Diccionario de Ecología: Paisajes, Conservación y Desarrollo Sustentable en Latinoamérica*. 2000, p. 108

[29] SEA (Servicio de Evaluación Ambiental, Magallanes y Antártica Chilena). *Resolución de Calificación Ambiental (RCA)*. 2011. Expediente disponible en: http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=4326580

[30] SEA (Servicio de Evaluación Ambiental, Magallanes y Antártica Chilena). *Línea Base, Estudio de Impacto Ambiental (EIA)*. 2010. Expediente disponible en: https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=4326580#-1

[31] SHEPHERD, G. Visual Soil Assessment: Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. *Horizons.mw & Landcare Research, Palmerson North*. 2000. Vol.1. pp.84. ISBN: 1-877221-92-9

[32] SINGH, A.N., RAGHUBANSHI, A.S., SINGH, J.S. Plantation as a tool for mine spoil restoration. *Current Science*. 2002. Vol. 82, n°12, pp. 1436-1441. ISSN 0011-3891

[33] Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (Snifa). Superintendencia del Medio Ambiente, Gobierno de Chile. Obtenido desde: <http://snifa.sma.gob.cl/v2/Instrumento>

[34] KULHAWY, F. H., MAYNE, P.W. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. 1990.

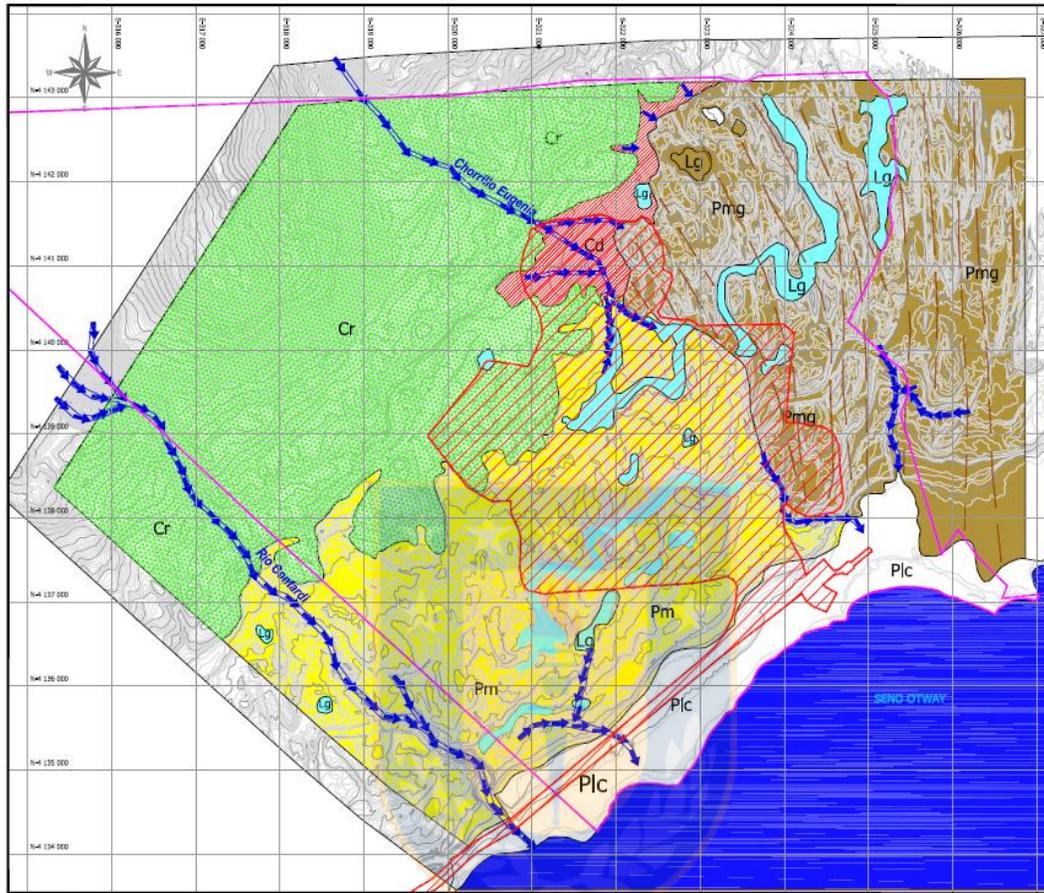
[35] VASQUEZ, A., GALDAMEZ, B., LE-FAUX, R. Diseño de operaciones de minas a cielo abierto. 1998. pp. 110-125.

[36] WEI, S., ZHONG-PING, S., DAO-LIANG, L., RAAJ, R., XIANG, Z., XIANG-YUN, G. Vegetation Recovery Monitoring over the Waste Dump in Haizhou Opencast Coalmine Area, China, During 1975-2000 using NDVI and VF Index. *J. Indian Soc. Remote Sens.* 2009. N° 37, pp. 631-645

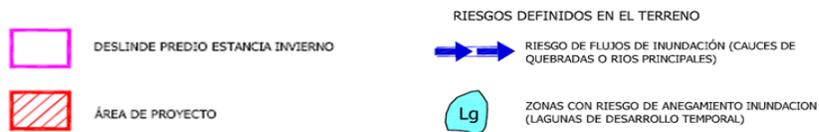
[37] ZHANG, L., WANG, J., BAI, Z., LV, C. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena*. 2015, no.128, pp.44-53 DOI:10.1016/j.catena.2015.01.016

[38] ZHAO, Z., SHAHROUR, I., BAI, Z., FAN, W., FENG, L., LI, H. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*. 2013, no.55, pp.40-46 DOI: 10.1016/j.ejsobi.2012.08.006

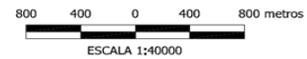
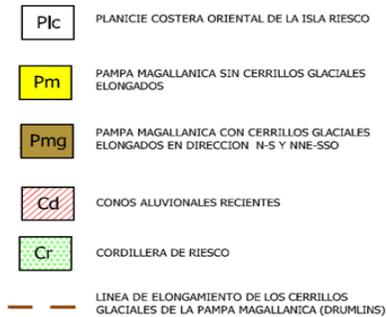
9.2 Formaciones geomorfológicas locales Mina Invierno



CARTOGRAFÍA BASE PROYECTO



UNIDADES GEOMORFOLOGICAS ISLA RIESCO Y ZONA DEL PROYECTO



NOTA:
-MAPA TOMADO POR GOLDER (2007)
-UTM SAD - 69 HUSO 19

PROYECTO			
ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL MINA INVIerno MINERA INVIerno S.A.			
TÍTULO			
LINEA BASE GEOMORFOLOGIA MAPA FORMACIONES GEOMORFOLOGICAS Y AREAS DE RIESGO			
PROYECTO N°	852-153035	ARCHIVO N°	PMI04_444101
DISEÑO	J.V. DIC. 09	ESCALA	1:40.000
REVISIÓN	J.V. DIC. 09	REV	1
CHEQUEO	J.V. DIC. 09		
REVISO	J.V. DIC. 09		
Golder Associates		FIGURA_4.6.6	

Figura 9.2 Mapa formaciones geomorfológicas
Fuente: Línea Base, EIA Proyecto Mina Invierno por Golder Associates 2010

9.3 Plano general Mina Invierno

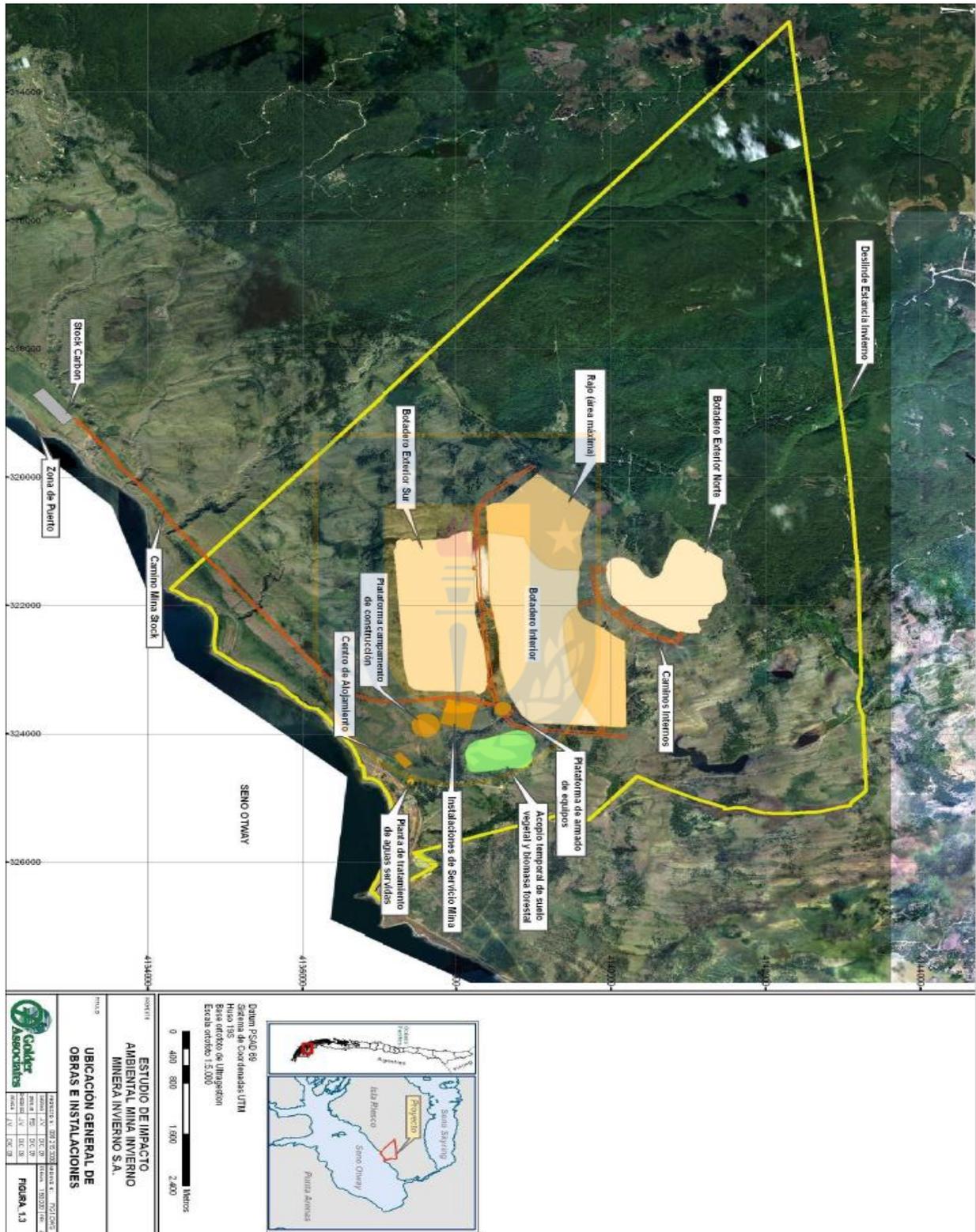
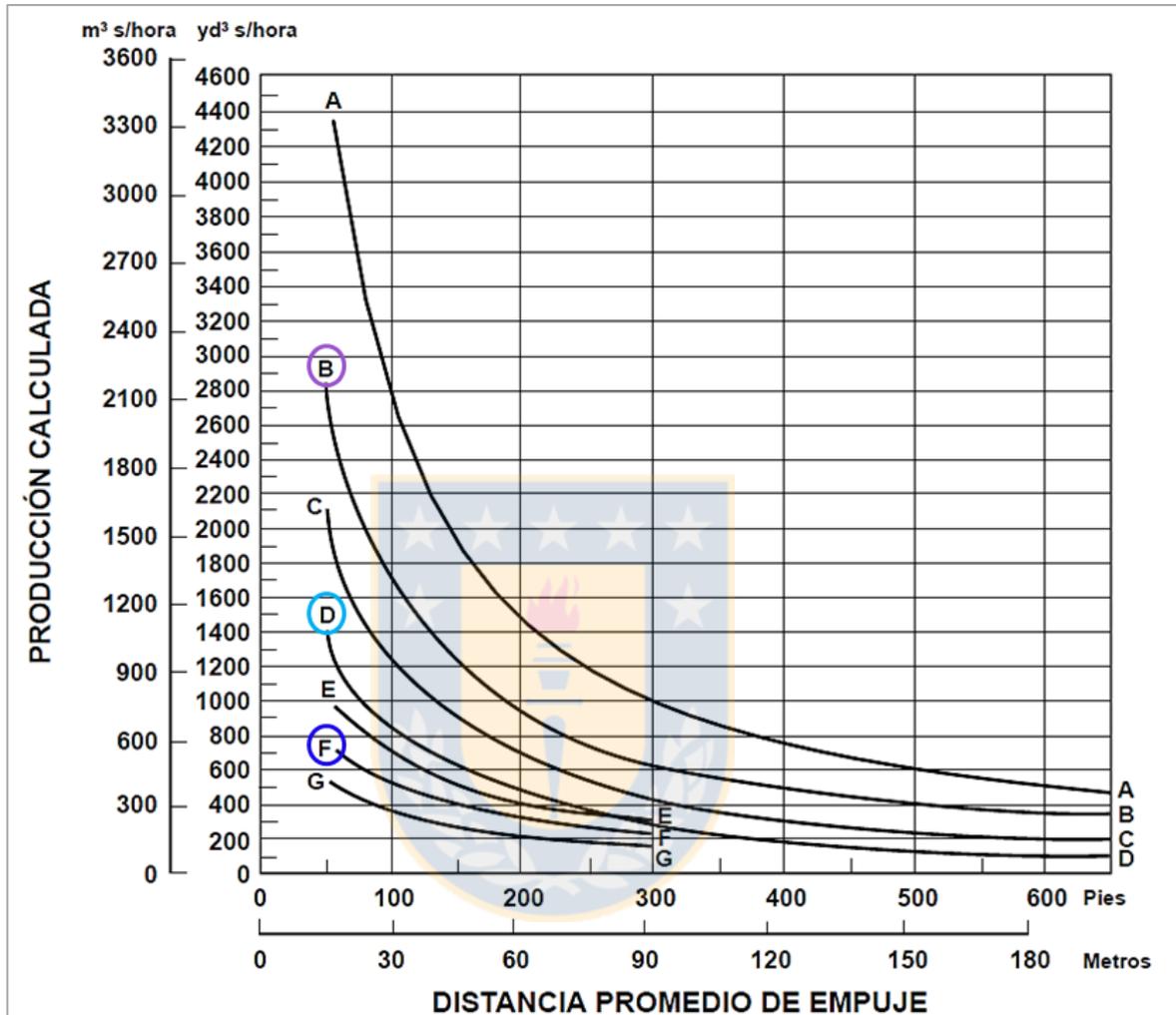


Figura 9.3: Ubicación general de obras e instalaciones en Mina Invierno
Fuente: EIA Proyecto Mina Invierno, por Golder Associates, 2010

9.4 Especificaciones técnicas de equipos

9.4.1 Bulldozers



CLAVE

- A — D11R-11SU
- B — D10T-10SU
- C — D9R/D9T-9SU
- D — D8R/D8T-8SU
- E — D7R Serie 2-7SU
- F — D6T/D6R Serie 3
- G — D6N-6SU

NOTA: Esta gráfica se basa en gran número de pruebas y estudios en condiciones y trabajos diversos (consulte los factores de corrección que hay después de estas gráficas).

Figura 9.4: Producción calculada por distancia promedio de empuje
Fuente: Manual de rendimiento Caterpillar, 2009.

	 MODELO D6T		 MODELO D10T	
Potencia en el volante	138 kW	185 hp	433 kW	580 hp
Peso en orden de trabajo: [*]				
Servotransmisión con dirección diferencial Hoja SU	18.393 kg	40.550 lb	66.451 kg	146.500 lb
Modelo de motor	C9 ACERT		C27 ACERT	
RPM del motor: (con servotransmisión)	1850		1800	
Número de cilindros	6		12	
Calibre	112 mm	4,4"	137 mm	5,4"
Carrera	149 mm	5,9"	152 mm	6"
Cilindrada	8,8 L	537 pulg ³	27 L	1647,5 pulg ³
Rodillos inferiores (cada lado)	6		8	
Ancho de zapata estándar VPAT	560 mm	22"	610 mm	24"
Longitud de cadena en el suelo	2,63 m	8'8"	3,88 m	12'9"
Área de contacto con el suelo (con zapata estándar) VPAT	2,94 m ²	4557 pulg ²	4,74 m ²	7347 pulg ²
Entrevía	1,88 m	74"	2,55 m	8'4"
DIMENSIONES GENERALES:				
Altura ^{**} (sin techo) ^{***}	2,40 m	7'10"	3,222 m	10'7"
Altura ^{**} (hasta la parte superior del techo ROPS)	3,20 m	10'6"	4,26 m	14'0"
Altura ^{**} (hasta la parte superior de la cabina ROPS)	3,11 m	10'2"	4,01 m	13'2"
Longitud total (sin hoja)	3,86 m	12'8"	Longitud total: (con hoja SU y desgarrador SS) ^{***} (sin hoja ni desgarrador) [†]	
Con hoja S	4,90 m	16'1"	9,16 m	30'1"
Con hoja SU	5,10 m	16'9"	5,331 m	17'6"
Con hoja VPAT	—	—	3,74 m	12'3"
Con hoja orientable	5,01 m	16'5"	3,30 m	10'10"
Ancho (con muñón)	2,64 m	8'8"	571 mm	1'10"
Ancho (sin muñón — cadena estándar)	2,44 m	8'0"	Espacio libre sobre el suelo ^{††}	
Espacio libre sobre el suelo ^{**}	384 mm	1'3"	Tipos y anchos de hoja:	
Tipos y anchos de hoja:			Tractor topador	
Recta	3,36 m	11'0"	Universal	
Recta orientable	4,17 m	13'8"	Semiversal	
Orientable 25°	3,78 m	12'5"	Capacidad de llenado del tanque de combustible	
Semiversal	3,26 m	10'8"	Capacidad de llenado del tanque de combustible (capacidad extra)	
VPAT			—	
Recta	—	—	5,26 m	17'3"
Orientable 24°	—	—	4,86 m	15'11"
Capacidad de llenado del tanque de combustible	425 L	112 gal. EE.UU.	1204 L	318 gal. EE.UU.

Figura 9.5 Especificaciones técnicas Bulldozer Modelos Caterpillar D6-T y D10-T
Fuente: Manual de rendimiento Caterpillar, 2009

PRESIONES SOBRE EL SUELO

Presiones calculadas a partir de los valores de peso en orden de trabajo indicados anteriormente en esta sección, en las tablas de especificaciones.

MODELO	ANCHO DE ZAPATA		ÁREA DE CONTACTO		PRESIÓN SOBRE EL SUELO	
	mm	pulg	m ²	pulg ²	kPa	lb/pulg ²
D6T LGP	610	24	3,99	6192	53,5	7,76
	760	30	4,99	7740	42,8	6,20
	915	36	5,99	9288	35,7	5,17
	991	39	6,49	10.062	32,9	4,77
D7G	508	20	2,76	4280	73,0	10,60
	559	22	3,04	4708	66,0	9,60
	610	24	3,31	5136	60,0	8,80
D7G Serie 2	508	20	2,76	4280	74,5	10,81
	560	22	3,04	4708	67,7	9,81
	610	24	3,31	5136	62,2	9,01
D7G Serie 2 LGP	865	34	5,25	8138	42,3	6,13
D7R Serie 2	510	20	2,94	4560	83,4	11,71
	560	22	3,24	5016	76,0	10,69
	610	24	3,53	5472	69,8	9,87
	660	26	3,82	5928	64,0	9,17
D7R Serie 2 XR	560	22	3,43	5315	71,5	10,16
	610	24	3,75	5808	65,9	9,37
	660	26	4,06	6282	61,2	8,70
D7R Serie 2 LGP	760	30	4,80	7504	55,1	7,74
	915	36	5,82	9029	46,0	6,55
D7R Serie 2 LGP ERF*	915	36	6,49	10.060	42,0	6,09

MODELO	ANCHO DE ZAPATA		ÁREA DE CONTACTO		PRESIÓN SOBRE EL SUELO	
	mm	pulg	m ²	pulg ²	kPa	lb/pulg ²
D8R/D8T	610	24	3,91	6062	94,9	13,76
	660	26	4,23	6559	87,7	12,71
	710	28	4,55	7056	81,5	11,82
D8R LGP/ D8T LGP	965	38	6,20	9746	54,0	7,82
D9R/D9T	560	22	3,89	6031	124,8	18,10
	610	24	4,24	6569	114,6	16,62
	685	27	4,74	7374	102,0	14,80
	760	30	5,28	8185	92,0	13,34
D10T	610	24	4,74	7321	135,7	19,63
	710	28	5,52	8551	116,2	16,86
	800	31,5	6,22	9635	103,1	14,97
D11T	710	28	6,31	9781	162,4	23,57
	810	32	7,20	11.159	142,4	20,66
	915	36	8,13	12.605	126,0	18,29
	915	36	8,13	12.594	136,7	19,76

NOTA: El área de contacto con el suelo = ancho de la zapata × largo de cadena en el suelo × 2.

$$\text{Presión sobre el suelo} = \frac{\text{peso en orden de trabajo}}{\text{área de contacto con el suelo}}$$

* Bastidor de rodillos alargado.
◀ Zapata estándar.

Figura 9.6: Presiones ejercidas sobre el suelo
Fuente: Manual de rendimiento Caterpillar, 2009

	TRACTOR DE CADENAS	TRACTOR DE RUEDAS
OPERADOR —		
Excelente	1,00	1,00
Bueno	0,75	0,60
Deficiente	0,60	0,50
MATERIAL —		
Suelto y amontonado	1,20	1,20
Difícil de cortar; congelado; — con cilindro de inclin. lateral	0,80	0,75
sin cilindro de inclin. lateral	0,70	—
Difícil de empujar; se apelmaza (seco, no cohesivo) o material muy pegajoso.	0,80	0,80
Rocas desgarradas o de voladura	0,60-0,80	—
EMPUJE POR MÉTODO DE ZANJA CON DOS TRACTORES JUNTOS	1,20	1,20
VISIBILIDAD:	1,15-1,25	1,15-1,25
Polvo, lluvia, nieve, niebla, oscuridad	0,80	0,70
EFICIENCIA DEL TRABAJO —		
50 min/hr	0,83	0,83
40 min/hr	0,67	0,67
HOJAS*		
Ajuste según la capacidad SAE de la hoja básica que se usa en las gráficas de los cálculos de producción.		
PENDIENTES — Vea gráfica sig.		

Figura 9.7: Factores de corrección según las condiciones de trabajo.
Fuente: Manual de Rendimiento Caterpillar, 2009

9.4.2 Excavadora Komatsu PC300

Item		Model	●PC290NLC-8	●PC300-8	●PC300-7E0	PC300-7**
Source			UK	Japan	Japan	Japan
OPERATING WEIGHT*		kg (lb)	29400 (64,820)	31100 (68,560)	30800 (67,900)	30800 (67,900)
HORSEPOWER (SAE) SAE J1995 Gross ISO9249 /SAE J1349 Net Hyd. fan at max. speed Net		kW (HP)/RPM kW (HP)/RPM kW (HP)/RPM	149 (200)/2050 140 (187)/2050	194 (260)/1950 184 (246)/1950	194 (260)/1950 184 (246)/1950	180 (242)/1900
BUCKET CAPACITY RANGE (SAE)		m ³ (cu.yd)	0.85 ~ 2.02 (1.11) (2.64)	0.52 ~ 1.80 (0.68) (2.35)	0.52 ~ 1.80 (0.68) (1.83)	0.52 ~ 1.80 (0.68) (1.83)
PERFORMANCE:						
Swing speed		RPM	10.5	9.5	9.5	9.5
Max travel speed		Hi Mi Lo	5.5 (3.4) 4.1 (2.5) 3.0 (1.9)	5.5 (3.4) 4.5 (2.8) 3.2 (2.0)	5.5 (3.4) 4.5 (2.8) 3.2 (2.0)	5.5 (3.4) 3.2 (2.0)
DIMENSIONS: See the page of dimensions.						
ENGINE:						
Model			KOMATSU SAA6D107E-1	KOMATSU SAA6D114E-3	KOMATSU SAA6D114E-3	KOMATSU SAA6D114E-2
No. of cylinders-bore × stroke		mm (in)	6-107 × 124 (4.21 × 4.88)	6-114 × 135 (4.49 × 5.31)	6-114 × 135 (4.49 × 5.31)	6-114 × 135 (4.49 × 5.31)
Piston displacement		ltr. (cu.in)	6.69 (408)	8.27 (505)	8.27 (505)	8.27 (505)
HYDRAULIC SYSTEM:						
Hydraulic pump			2 × Variable Piston	2 × Variable Piston	2 × Variable Piston	2 × Variable Piston
Max. oil flow		ltr. (U.S. Gal)/min.	450 (119)	535 (141)	535 (141)	535 (141)
Max. oil pressure (Implement)		kg/cm ² (PSI)	380 (5400)	380 (5400)	380 (5400)	380 (5400)
Track shoe width/ground pressure		mm (in)/ kg/cm ² (PSI)	600 (24)/ 0.56 (7.96)	600 (24)/ 0.64 (9.1)	600 (24)/ 0.64 (9.1)	600 (24)/ 0.64 (9.1)
CAPACITY (Refilled):						
Fuel tank		ltr. (U.S. Gal)	400 (105.7)	605 (160)	605 (160)	605 (160)
Hydraulic oil tank			132 (34.9)	188 (49.7)	188 (49.7)	188 (49.7)
MACHINE SPEC:						
Boom		mm (ft.in)	5850 (19.2)	6470 (21' 3")	6470 (21' 3")	6470 (21' 3")
Arm		mm (ft.in)	2500 (8'2")	3185 (10' 5")	3185 (10' 5")	3185 (10' 5")
Bucket (SAE)		m ³ (cu.yd)	1.74 (2.26)	1.4 (1.83)	1.4 (1.83)	1.40 (1.83)

Figura 9.8: Especificaciones técnicas Excavadora PC300
Fuente : Manual de rendimiento Komatsu , 2007

9.4.3 Camión Komatsu HD785

Item		Model	HD605-7	HD785-7	HD785-5
WEIGHT:		kg (lb)			
Empty vehicle weight*			45900 (101,190)	72000 (158,730)	66930 (147,550)
Distribution (front)			21575 (47,560)	33840 (74,600)	31460 (69,360)
(rear)			24325 (53,630)	38160 (84,130)	35470 (78,200)
Gross vehicle weight			108975 (240,250)	163080 (359,530)	158010 (348,350)
Distribution (front)			34870 (76,870)	51370 (113,250)	52140 (114,950)
(rear)			74105 (163,370)	111710 (246,280)	105865 (233,390)
Max. gross vehicle weight**			109900 (242,290)	166000 (366,000)	166000 (366,000)
Gross horsepower		kW (HP)/RPM	551 (739)/2000	895 (1200)/1900	783 (1050)/2000
Net horsepower		kW (HP)/RPM	533 (715)/2000	879 (1178)/1900	753 (1010)/2000
HAULING CAPACITY:					
Maximum load		m. ton (US ton)	63 (69)	91 (100)	91 (100)
Heaped capacity (2:1)		m ³ (yd ³)	40 (52.3)	60 (78.5)	60 (78.5)
PERFORMANCE:					
Maximum speed		km/h(MPH)	70 (43.5)	65 (40.4)	65 (40.4)
Turning radius		m (ft.in)	8.5 (27'11")	10.1 (33'2")	9.9 (32'6")
ENGINE:					
Model			KOMATSU SAA6D170E-3	KOMATSU SAA12V140E-3	KOMATSU SA12V140-1
No. of cylinders-bore × stroke		mm (in)	6 170 × 170 (6.69 × 6.69)	12 140 × 165 (5.51 × 6.50)	12 140 × 165 (5.51 × 6.50)
Displacement		ltr. (in ³)	23.15 (1413)	30.48 (1860)	30.48 (1860)
DIMENSION:			See DIMENSIONS		
TIRES:					
Front tire			24.00 R35 × 2	27.00 R49 × 2	27.00 R49 × 2
Rear tire			24.00 R35 × 4	27.00 R49 × 4	27.00 R49 × 4
CAPACITY: Fuel tank		ltr.(U.S. Gal)	780 (206.1)	1308 (346.6)	1250 (330.3)

Figura 9.9: Especificaciones técnicas Camión Komatsu HD785
Fuente: Manual de rendimiento Komatsu, 2007

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Planificación de operaciones para rehabilitación de botaderos de estériles en explotación de carbón en Isla Riesco, Mina Invierno.	
Nombre Memorista: María Fernanda Martínez Valdés	
Modalidad	Profesor (es) Patrocinante (s) Prof. Ramón Díaz N. Ingeniero Supervisor: Gabriel Rodríguez S. Institución: Mina Invierno
Concepto	
Calificación	
Fecha	
Prof. Roberto Fustos T.	
Comisión (Nombre y Firma)	
Prof. Asieh Hekmat	Prof. Roberto Fustos T.
Resumen	
<p>En minería a cielo abierto, los botaderos de estériles de operaciones mineras de carbón poseen un potencial considerable de contaminación, resultando fundamental el integrar medidas de rehabilitación que puedan realizarse de manera progresiva y en conjunto con la operación, lo cual mantiene el área de afectación en un mínimo. En este contexto, Mina Invierno realizó un compromiso medioambiental dispuesto en la Resolución de Calificación Ambiental y en el Plan de Cierre vigente, que consistía en rehabilitar la totalidad de superficies de sus botaderos, mediante operaciones de preparación de terreno, recubrimiento con suelo y revegetación. Sin embargo, Mina Invierno se encuentra bajo una prohibición de realizar tronaduras bajo la cota 100 ms.n.m., dictaminada por el Tribunal Ambiental de Valdivia, lo cual ha obligado a la empresa a idear una planificación para una paralización temporal de sus actividades e incluso planificar un cierre definitivo. El objetivo de este estudio fue realizar una planificación de las operaciones de rehabilitación, en el caso de una paralización temporal, y determinar la disponibilidad de recursos edáficos para compararlo con los requerimientos del mismo para el caso de un cierre definitivo. Los resultados arrojaron que el suelo disponible no alcanzaría para cubrir la totalidad del Botadero Sur, sin embargo, disminuyendo el espesor de suelo utilizado de 50 a 30 cm, se podría lograr este objetivo. Otra alternativa sería realizar un escarpe de suelo en áreas no intervenidas por la explotación, para lo cual se realizó un muestreo de suelo que permitió definir zonas de mayor disponibilidad del recurso. Por otra parte, frente a la posibilidad de realizar una paralización temporal de la mina, se realizó la planificación de operaciones, determinándose la utilización de equipos requerida y realizándose una evaluación económica que permitió determinar el costo de rehabilitar una superficie de una hectárea, solo considerando costos operacionales, el cual fue estimado en un valor de 18,204 USD/ha.</p>	

