



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA
SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN Y POTENCIALES
INESTABILIDADES FÍSICAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES
ESTUDIO DE CASO: COMUNA DE COPIAPÓ, CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN
GEOLOGÍA

FRANCISCO JAVIER RAMÍREZ NAVARRO

PROFESORA GUÍA:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARISOL LARA CASTILLO
SERGIO SEPÚLVEDA VALENZUELA
CÉSAR PASTÉN PUCHI

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Magíster en Ciencias con
mención en Geología
POR: Francisco Javier Ramírez Navarro
FECHA: enero 2020
PROFESORA GUÍA: Sofía Rebolledo Lemus

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE EROSIÓN Y
POTENCIALES INESTABILIDADES FÍSICAS EN DEPÓSITOS DE RELAVES
ESTUDIO DE CASO: COMUNA DE COPIAPÓ, CHILE

El presente estudio tiene como objetivo general desarrollar una metodología capaz de evaluar la susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves, particularmente las generadas por los mecanismos de **deslizamiento** en el muro del depósito, **licuación** de este, **rebalse** del depósito, o **erosión** del muro causada **por agua** o **por viento**.

Para conseguir el objetivo antes planteado, primero se identificaron los factores condicionantes que impactan en cada mecanismo (geotécnicos, geométricos, geográficos, climáticos e hidrogeológicos), y los parámetros influyentes para cada uno de estos factores. Luego se confeccionaron 5 matrices de susceptibilidad, donde se determinaron rangos de valores para cada parámetro identificado, asignándosele un puntaje. Finalmente, se definió el Índice de Susceptibilidad (IS), como el resultado obtenido al sumar los puntajes asociados al valor de cada parámetro evaluado en el depósito de relaves. Dependiendo del valor de IS, se determinó una susceptibilidad **baja, media y alta**.

Posteriormente, se procedió a aplicar las matrices de susceptibilidad y el cálculo de IS asociado, a cada uno de los depósitos de relaves presentes en la comuna de Copiapó: de un total de 84 existentes, con diferentes estados de actividad (activo, inactivo, abandonado), fue posible obtener valores de parámetros para 46 de ellos. La estimación de IS para los depósitos de relaves de la comuna de Copiapó dio en general de **medio a alto**. Para el caso de depósitos **activos**, se obtuvieron dos con **IS alto** por deslizamiento, cuatro por licuación, uno por erosión eólica y cuatro por rebalse; mientras que, en inactivos, cinco poseen **IS alto** por deslizamiento y cinco por erosión por agua. Los depósitos **abandonados** solo presentaron **IS medio**.

Para finalizar, se debe destacar que este trabajo permite una nueva visión para futuros análisis de peligro relacionados con depósitos de relaves, al considerar parámetros a escala regional que pueden ser influyentes, principalmente los relacionados con la ubicación geográfica y los climáticos. En adición, es una metodología fácil y rápida de implementar, con bajo costo económico. Es importante mencionar, sin embargo, que la metodología desarrollada funciona solo como una primera aproximación para futuros análisis, pero de ninguna manera reemplazará a un estudio detallado de la estabilidad física que pueda desarrollarse en un depósito de relaves: es importante considerarla solamente como referencial y ser cuidadoso con las conclusiones que puedan desprenderse de su aplicación.

“Hasta que la dignidad se haga costumbre...”

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a Sofía Rebolledo, mi profesora guía. Fue ella quien presencié todos los aciertos, desaciertos, tropiezos y cambios que surgieron a lo largo de este estudio. No fue un proceso sencillo, pero siempre se aseguró de ofrecerme una palabra sincera, el apoyo y guía necesarios en los momentos difíciles, tanto en el estudio mismo como en temas de índole personal. Una excelente profesora y ser humano a quien agradeceré por siempre.

Al profesor Sergio Sepúlveda por dar el apoyo económico para poder realizar esta investigación, además de formar parte de la comisión revisora, contribuyendo con útiles observaciones durante la parte final.

A los demás miembros de la comisión, César Pastén y especialmente a Marisol Lara: siempre con tiempo para aportar con observaciones interesantes y generar un gratísimo espacio de discusión; varios de sus consejos se vieron reflejados en la versión final de este trabajo.

A otros profesores que aportaron en alguna parte de este trabajo: Katja Deckart por sus revisiones y entusiasmo al principio de este estudio y Valentina Flores por sus observaciones y sugerencias sedimentológicas, que fueron de muchísima utilidad durante el desarrollo de esta tesis.

A las personas que por un motivo u otro terminaron aportando con un granito de arena en las diferentes fases de mi investigación, incluso en los caminos que tuve que descartar. Ordenados temporalmente: Natascha Bucarey, Karen Kotthoff, Manuel García, Alondra Flores y Karina Monsalve.

A mi familia, pilar fundamental de mi equilibrio en más de una ocasión, otorgándome vías de escape, comprensión y apoyo en los momentos difíciles; y también acompañándome a celebrar los pequeños triunfos durante todo el proceso, recordándome por qué estaba haciendo todo esto.

A Grace, quien fue una fuente importantísima de apoyo y ánimo cuando las ganas flaqueaban. Gracias a ti pude sacar adelante a esta tesis; cuando no veía alternativas, siempre me mostraste un camino y me motivaste a seguir. Nunca olvidaré lo importante que fuiste en esta etapa de mi vida.

A mis amigos que vivieron parte de este proceso junto a mí, y me escucharon y aconsejaron en los momentos de júbilo y también de desaliento, especialmente a Nicolás y Andrea (¡jo, tía!). También con quienes pude contar durante la parte final: Daniel y Matías; gracias por los valiosos consejos para exponer de la mejor manera mi trabajo. También agradezco a Diana, quién fue capaz de iluminarme estos últimos meses, con una perspectiva fuera del mundo geológico.

A los compañeros de postgrado fueron parte de mi día a día durante estos años; algunos ya partieron, otros siguen ahí. Mención especial a Barbi, Lore, Timo, Jipi, Cami P, Romi, Fran M, Manu, Mati y Daniel. Muchos buenos almuerzos, y conversaciones durante la tarde para distender un poco el ambiente laboral de la sala, buscando maneras de mejorar el mundo.

Finalmente, agradecer a todas las personas que siguieron creyendo en mí, a pesar de yo haber perdido el norte en más de una ocasión. Gracias a su apoyo pude sacar adelante este trabajo, ¡qué vaya que me costó!

Tabla de Contenido

Resumen	i
Agradecimientos	iii
Tabla de Contenido	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	viii
1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Ubicación del área de estudio	4
2. Contexto geológico, geomorfológico y climático del área de estudio	5
2.1. Marco Geológico	5
2.1.1. Introducción	5
2.1.2. Fallas activas y/o potencialmente activas	8
2.1.3. Geomorfología.....	9
2.1.4. Hidrología e hidrogeología.....	11
2.2. Clima	13
2.3. Antecedentes de aluviones.....	14
3. Depósitos de relaves	19
3.1. Introducción	19
3.2. Definiciones.....	19
3.3. Tipos de depósitos de relaves	20
3.3.1. Tranques de relaves.....	21
3.3.2. Embalses de relaves	24
3.3.3. Depósitos de relaves espesados	25
3.3.4. Depósitos de relaves filtrados	27
3.3.5. Depósitos de relaves en pasta.....	28
3.3.6. Otros depósitos de relaves.....	29
3.4. Depósitos de relaves en Copiapó.....	29
4. Eventos de inestabilidad en depósitos de relaves	34
4.1. ¿Por qué fallan las presas de relaves?.....	34
4.2. Antecedentes de fallas a nivel mundial	34
4.3. Tipos de fallas o mecanismos generadores de inestabilidad física	38
5. Metodología para la evaluación de susceptibilidad.....	43

5.1.	Introducción	43
5.2.	Factores condicionantes de falla en depósitos de relaves	43
5.2.1.	Características geotécnicas del muro.....	44
5.2.2.	Características geométricas de la presa.....	47
5.2.3.	Ubicación del muro de contención o de los relaves.....	50
5.2.4.	Clima.....	53
5.2.5.	Hidrogeología	54
5.3.	Obtención de parámetros	54
5.4.	Factores desencadenantes de falla en depósitos de relaves	56
5.5.	Influencia de factores condicionantes en inestabilidad de depósitos de relaves	57
5.6.	Evaluación de la susceptibilidad.....	59
5.6.1.	Introducción	59
5.6.2.	Matrices de susceptibilidad.....	59
5.6.3.	Índice de Susceptibilidad	71
6.	Resultados	72
6.1.	Evaluación de la susceptibilidad en la comuna de Copiapó.....	72
6.2.	Análisis de resultados	80
7.	Discusión	82
8.	Conclusiones	86
9.	Bibliografía	88
10.	Anexos.....	94

Índice de Figuras

Figura 1.1. Mapa con la división político-administrativa de la Región de Atacama	4
Figura 2.1. Extracto de mapa geológico escala 1:100.000, correspondiente a Copiapó	6
Figura 2.2. Leyenda de litologías expuestas en mapa de Figura 2.1.	7
Figura 2.3. Principales fallas corticales activas y/o potencialmente activas, identificadas en la comuna de Copiapó.....	8
Figura 2.4. Geomorfología de Copiapó.....	9
Figura 2.5. Perfil topográfico W – E a la latitud de 27°20', correspondiente a la cuenca del río Copiapó	10
Figura 2.6. Información hídrica de la Cuenca del río Copiapó	12
Figura 2.7. Diagrama Climático Ombrotérmico, sector Embalse Lautaro, río Copiapó.....	13
Figura 2.8. Gráfico de precipitación mensual acumulada en mm en la estación Amolana Copiapó 2, durante el período julio 2014 - junio 2015.....	14
Figura 2.9. Algunos de los efectos del aluvión de marzo de 2015, en la zona de estudio	16
Figura 2.10. Gráfico de precipitación acumulada anual en mm en la estación Amolana Copiapó 2, durante el período 2012-2015	17
Figura 2.11. Ubicación estación meteorológica Amolana Copiapó 2, Tierra Amarilla, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (en verde), cercana a Tranque Lautaro.....	17
Figura 2.12. Área de estudio sector de Copiapó.....	18
Figura 3.1. Esquema representativo de un depósito de relaves	19
Figura 3.2. Método de construcción del muro aguas arriba.	22
Figura 3.3. Método Aguas Abajo	22
Figura 3.4. Comparación de diferentes métodos constructivos del muro de arenas de tranques de relaves.....	24
Figura 3.5. Muro construido con material de empréstito	25
Figura 3.6. Ejemplos de posibles disposiciones que podrían desarrollarse para Relaves Espesados, dependiendo de las condiciones topográficas (Método Robinsky).....	26
Figura 3.7. Depósitos de relaves en la comuna de Copiapó.....	30
Figura 3.8. Depósitos de relaves ubicados a menos de 10 km del centro urbano de Copiapó.....	31
Figura 3.9. (a) Cantidad de depósitos en la comuna de Copiapó vs total de la región, (b) Depósitos de Copiapó vs total nacional	32
Figura 3.10. Estado de actividad de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó	33
Figura 4.1. Eventos de falla mundiales a lo largo del tiempo	35
Figura 4.2. Distribución de fallas en tranques de relaves, por región a nivel mundial	35
Figura 4.3. Distribución de fallas en tranques de relaves, identificadas por causas.....	36
Figura 4.4. Distribución de fallas por altura del muro del embalse.....	37
Figura 4.5. Distribución de fallas por capacidad de contención.....	37
Figura 4.6. Incidente de rebalse: (a) dique de retención y cuenca del embalse de relaves de arena; (b) fallo de flujo en sentido descendente.....	39
Figura 4.7. Inestabilidad de la pendiente: (a) superficie de falla de tipo circular; (b) Deslizamiento de taludes generados en el momento de un evento sísmico	40
Figura 4.8. Vista esquemática del proceso de erosión interna (Piping) en el muro de una presa .	41
Figura 4.9. Erosión causada por el aluvión de marzo 2015 en la comuna de Copiapó. Depósito inactivo Ojancos de minera Sali Hochschule.....	42

Figura 4.10. (a) Planta Matta (ENAMI), en ladera este de la quebrada Paipote. Depósito activo, el cual presentaba en el año 2003 erosión eólica en su cara suroeste (b)Profundidad de los surcos originados por la erosión eólica en muro de depósito de relaves de Planta Matta	42
Figura 5.1. Factores condicionantes considerados en el presente estudio.....	44
Figura 5.2. Diagrama de Hjulström-Sundborg	45
Figura 5.3. Velocidad del viento necesaria para movilizar diferentes tamaños de partículas, considerando distintos mecanismos de transporte: suspensión, saltación y arrastre.....	46
Figura 5.4. Variación de la velocidad del viento con la altura	48
Figura 5.5. Superficies de tasa de erosión, que relaciona el largo del talud y su ángulo con la pérdida por erosión y rugosidad.....	49
Figura 5.6. Comparación de las escalas de magnitud.....	51
Figura 5.7. Zonificación sísmica de la III Región	52
Figura 5.8. Parámetros utilizados para el deslizamiento	61
Figura 5.9. Parámetros utilizados para el rebalse	63
Figura 5.10. Parámetros utilizados para la licuación.....	65
Figura 5.11. Parámetros utilizados para la erosión por agua.....	67
Figura 5.12.Parámetros utilizados para la erosión eólica	69
Figura 6.1. Mapa de susceptibilidad por deslizamiento en la comuna de Copiapó.....	75
Figura 6.2. Mapa de susceptibilidad por licuación en la comuna de Copiapó	76
Figura 6.3. Mapa de susceptibilidad por rebalse en la comuna de Copiapó.....	77
Figura 6.4. Mapa de susceptibilidad a erosión por agua en la comuna de Copiapó.....	78
Figura 6.5. Mapa de susceptibilidad a erosión eólica en la comuna de Copiapó	79
Figura 7.1. Grupos y factores asociados a mecanismos de fallas en un depósito de relave.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Cronología de grandes fallas de depósitos de relave en Chile	1
Tabla 3.1. Distribución de depósitos por región, según su estado de operaciones.....	32
Tabla 3.2 Detalle de tipos de depósitos de relaves en la comuna de Copiapó	33
Tabla 5.1. Valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad.....	49
Tabla 5.2. Valor de la aceleración efectiva A_0	52
Tabla 5.3. Simplificación de las zonas climáticas de Chile y sus principales características	54
Tabla 5.4. Rangos de los diversos parámetros considerados en las matrices de susceptibilidad y sugerencias para su obtención	55
Tabla 5.5. Incidentes en depósitos de relaves, para cada uno de los mecanismos estudiados en este trabajo.....	60
Tabla 5.6. Matriz de Susceptibilidad por Deslizamiento del muro.	62
Tabla 5.7. Matriz de Susceptibilidad por Rebalse.	64
Tabla 5.8. Matriz de Susceptibilidad por Licuación.....	66
Tabla 5.9. Matriz de Susceptibilidad por Erosión por agua.	68
Tabla 5.10. Matriz de Susceptibilidad de estabilidad del muro por Erosión eólica	70
Tabla 5.11. Rangos de valores de IS para cada grado de susceptibilidad.	71
Tabla 6.1. Índice de Susceptibilidad (IS) de los 5 tipos de falla estudiados, calculado para cada depósito de relaves con que se contaba con información suficiente de los parámetros.....	73
Tabla 6.2. Resumen de rangos de IS calculados en 46 depósitos de relaves de la comuna de Copiapó, para cada uno de los mecanismos de falla e inestabilidad presentados en este estudio	80
Tabla 6.3. Detalle de depósitos de relaves de la comuna de Copiapó que presentaron IS alto al aplicarle alguna de las matrices de susceptibilidad.....	81
Tabla A: Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó	94
Tabla B. Datos administrativos y de construcción de los depósitos de relaves.....	100
Tabla C. Factores condicionantes geotécnicos y geométricos de los depósitos de relaves analizados	103
Tabla D. Factores condicionantes geográficos, climáticos e hidrogeológicos de los depósitos de relaves analizados.....	105

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

Los relaves mineros son “una suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El vocablo se aplica, también, a la fracción sólida de la pulpa que se ha descrito precedentemente” (DS 248, Ministerio de Minería, 2007).

Dada la composición acuosa de los relaves, que le confieren fluidez, pudiendo así desplazarse hacia abajo en presencia de un gradiente gravitatorio (terreno en declive), es necesario confinarlos en depósitos *ad hoc*, denominados depósitos de relaves. Estos normalmente están formados por un muro de contención y una cubeta que es donde se deposita el fluido. Lentamente se va decantando la parte sólida en el fondo, generando una laguna de aguas claras donde la mayoría del agua es recuperada, y otra parte se evapora. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos.

Los depósitos de relaves, debido a las características del material que contienen, deben ser monitoreados durante toda su vida útil para asegurar su correcto funcionamiento y prevenir alguna desgracia debido a la liberación del material. Sin embargo, en la práctica se tienen registros de incidentes en los cuales el muro de contención de los relaves colapsa, con las consecuencias posteriores asociadas; en Chile se registran varios accidentes en los últimos 100 años (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Cronología de grandes fallas de depósitos de relave en Chile. Modificado de Lottermoser (2007).

Fecha	Ubicación	Tipo de Incidente	Material liberado	Impactos
27/02/2010	Pencahue	Falla del tranque durante un sismo	200.000 m ³	4 fallecidos
03/11/2003	Cerro Negro	Falla de la pared del tranque	50.000 ton	Contaminación local
03/03/1985	Veta de Agua	Tranque falla debido a licuación por un terremoto	280.000 m ³	Relaves fluyen 5 km aguas abajo
03/03/1985	Cerro Negro	Tranque falla debido a licuación por un terremoto	500.000 m ³	Relaves fluyen 8 km aguas abajo
28/03/1965	El Cobre	Licuación de 11 tranques de relaves, durante un terremoto	2.000 ton	250 fallecidos
15/12/1928	Barahona	Licuación de relaves durante un terremoto	4.000 ton	54 fallecidos

Las causas principales de incidentes de depósitos de relaves son rebalse y fallas de estabilidad de taludes. Otros mecanismos de falla a largo plazo para presas de relaves incluyen daño acumulado (por ejemplo, erosión interna de la presa y eventos sísmicos múltiples), peligros geológicos (aluviones, deslizamientos de tierra, etc.), licuación inducida por carga estática y cambios en los patrones climáticos (ICOLD, 2001).

El colapso de los depósitos de relaves puede ocurrir durante una actividad sísmica, o bien, por exceso de agua en la cubeta que contiene los relaves. Este exceso puede provenir del mismo proceso de tratamiento o debido a la intensidad de las aguas lluvias, o bien, por acción de un cauce de agua que por alguna razón fue desviado hacia la cubeta, lo que puede causar el colapso del depósito de relaves.

El caso de la actividad sísmica es importante, considerando el contexto geológico chileno. Un terremoto puede actuar a través del proceso conocido como licuación, el cual consiste en la pérdida de cohesión de las partículas del depósito, desencadenado por la onda sísmica. Como se apreció en la Tabla 1.1, la mayoría de los incidentes que han tenido depósitos de relaves en el país, están asociados a este mecanismo.

Diseñar tanto para el rebalse como para los terremotos requiere una predicción del evento hidrológico o sísmico más grande que la presa de relaves experimentará potencialmente durante su vida útil, y en cada uno de estos casos la duración requerida es casi siempre de perpetuidad. Los criterios de diseño más conservadores implican asumir la magnitud máxima de los eventos hidrológicos y sísmicos que podría experimentar una presa de relaves. Se necesitan mejores datos, mejores métodos de predicción y el uso de pautas conservadoras para asumir el peor evento probable para remediar estos problemas. Los períodos de tiempo de cuidado son muchos milenios, pero la recopilación de datos sísmicos existente a menudo se limita a décadas, en el mejor de los casos (NPS, 2015).

Según el Catastro de depósitos de relaves elaborado por el SERNAGEOMIN y actualizado en abril de 2019, la comuna de Copiapó es la segunda con mayor concentración de depósitos de relaves dentro de Chile, con cerca del 50% de depósitos a nivel regional y un 10% a nivel nacional. Actualmente existen 84 depósitos de relaves en la comuna: 16 se encuentran activos, 61 están paralizados (inactivos), seis en la calidad de abandonados y uno actualmente en construcción (SERNAGEOMIN, 2019). Si bien inicialmente los depósitos de relaves se encontraban en las afueras de la ciudad, debido al sostenido crecimiento demográfico, los límites urbanos de Copiapó se han ido expandiendo durante las últimas décadas, lo cual ha llevado a incorporar estos depósitos al paisaje de la ciudad.

Tomando en cuenta que “la susceptibilidad consiste en la posibilidad de que se genere en un territorio un determinado proceso geológico” (Cartaya *et al.*, 2006), en la actualidad no existe ningún sistema que permita realizar este análisis para los depósitos de relaves, frente a los

fenómenos antes mencionados (inestabilidad, licuación y rebalse), lo cual genera la inquietud que da paso a este estudio.

Es importante indicar que el presente estudio es de carácter **referencial**. Puede ser utilizado en una primera fase para evaluar la susceptibilidad de los depósitos de relaves, pero de ninguna manera reemplaza a un minucioso análisis de estabilidad del muro de un depósito. Se debe ser cuidadoso y responsable al interpretar los resultados que puedan obtenerse a partir de la utilización de esta metodología.

1.2. Objetivos

El presente estudio tiene como objetivo general desarrollar una metodología capaz de evaluar la susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves, particularmente las generadas por los fenómenos de deslizamiento en el muro del depósito, licuación del mismo, rebalse del depósito, o erosión del muro causada por agua o acción eólica.

Adicionalmente, como objetivos específicos, se busca:

- Identificar qué tipos de inestabilidades en depósitos de relaves son estimables a escala regional.
- Determinar la importancia relativa entre los parámetros considerados para cada Matriz de Susceptibilidad desarrollada en este estudio.
- Evaluar la susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves en la comuna de Copiapó.

1.3. Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde a la comuna de Copiapó, ubicada en la Región de Atacama. Esta limita al norte con las comunas de Diego de Almagro y Chañaral, al oeste con la comuna de Caldera, al sur con las comunas de Tierra Amarilla, Huasco y Vallenar y al este con Argentina (Figura 1.1).

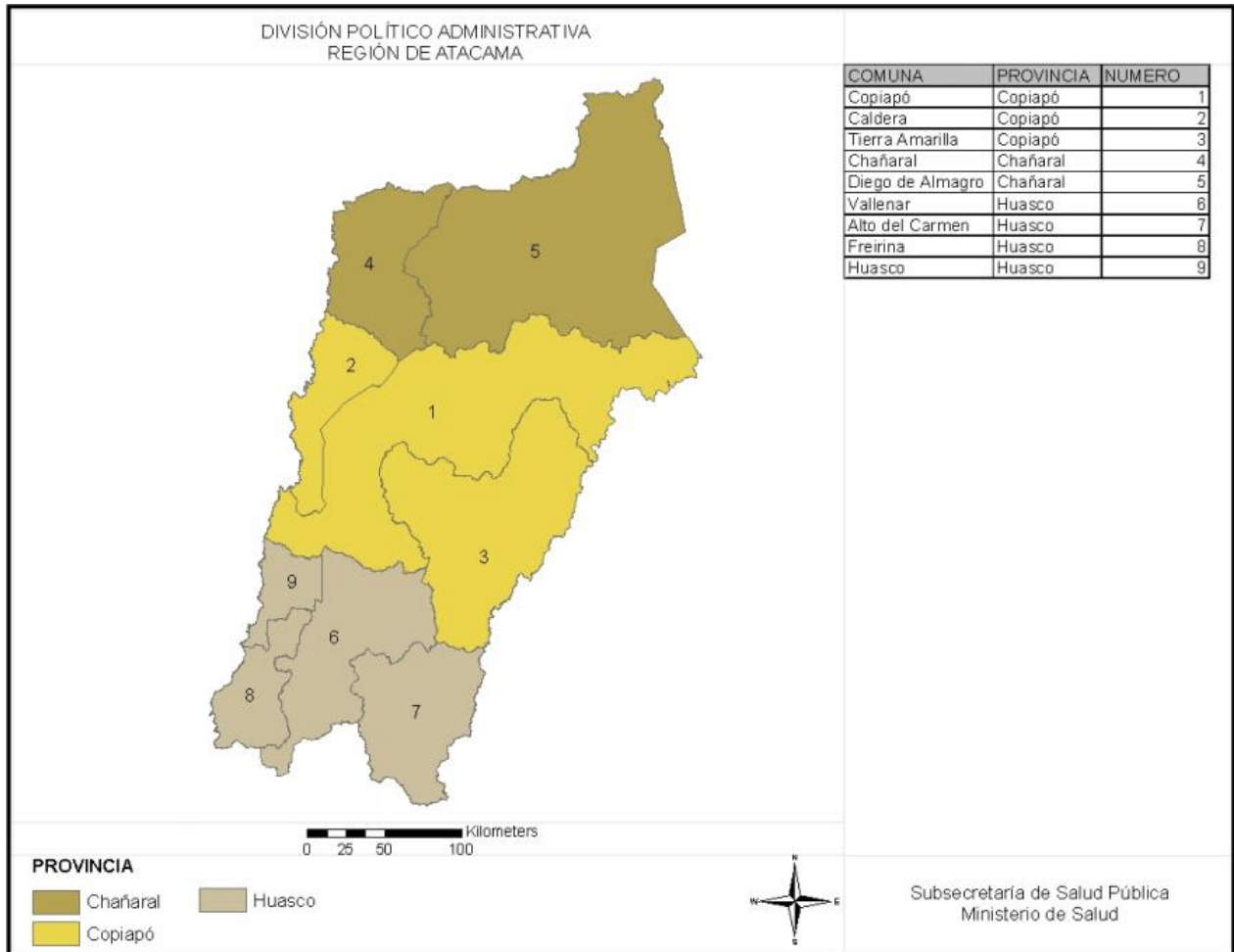


Figura 1.1. Mapa con la división político-administrativa de la Región de Atacama. El área de estudio, correspondiente a la comuna de Copiapó, se encuentra señalizada con el número 1 (Seremi de Salud de Atacama, 2010).

2. Contexto geológico, geomorfológico y climático del área de estudio

2.1. Marco Geológico

El Marco Geológico presentado a continuación es de carácter referencial y corresponde a información sintetizada del área de estudio.

2.1.1. Introducción

En la comuna de Copiapó se reconocen dos dominios morfológicos marcados, el primero perteneciente a la Cordillera de la Costa en el sector occidental, y el segundo, a la Precordillera en la zona oriental del área de estudio.

La Cordillera de la Costa se encuentra dividida por la traza principal nornoreste del Sistema de Fallas de Atacama, identificándose dos franjas de rocas intrusivas una de edades jurásico superior a cretácico inferior baja (franja occidental), y otra de edad cretácico inferior alta (franja oriental). La franja occidental está formada por tres plutones de rumbo nornoreste y edades decrecientes hacia el este. La franja oriental está formada por cinco plutones mayores los que, a diferencia de sus contrapartes occidentales, están orientados según rumbo nornoroeste y por dos grupos de stocks e hipabisales menores. Rocas volcánicas y volcanoclásticas del Jurásico (Formación La Negra), Jurásico-Cretácico Inferior (Formación Punta del Cobre) y del Cretácico Inferior (Formación Bandurrias) aparecen como paredes y techos plutónicos de los intrusivos mayores, lo que indica para esta franja un nivel de exhumación menor que el de su contraparte occidental (Arévalo, 2005).

Por otro lado, en el dominio de la Precordillera, la formación volcánica La Negra, las formaciones calcáreas marinas del Grupo Chañarcillo y las formaciones volcánicas, volcanoclásticas y epiclásticas Punta del Cobre y Bandurrias, forman una banda nornoreste de afloramientos inmediatamente al borde este de la franja plutónica oriental y representan deposición en el ámbito del arco jurásico (Formación La Negra, Jln) y del trasarco del Jurásico Superior a Cretácico Inferior (Formaciones Punta del Cobre, JKpc, y Bandurrias, Kib, y Grupo Chañarcillo). Más al este, la Formación Cerrillos (Kc), de edad cretácica inferior a superior, documentaría la acumulación en una cuenca continental extensional, de alrededor de 4000 m de espesor de sedimentos principalmente clásticos (Arévalo, 2005).

Ambos dominios se encuentran cubiertos por depósitos miocenos conocidos como Gravas de Atacama, depósitos aluviales y coluviales antiguos de edad mioceno-plioceno y depósitos aluviales, eólicos y fluviales cuaternarios.

La Figura 2.1 muestra la geología del área de estudio, obtenida de la Carta Geológica de Copiapó, publicada por el SERNAGEOMIN (Arévalo, 2005), mientras que la Figura 2.2 muestra la leyenda litológica correspondiente a dicho documento.

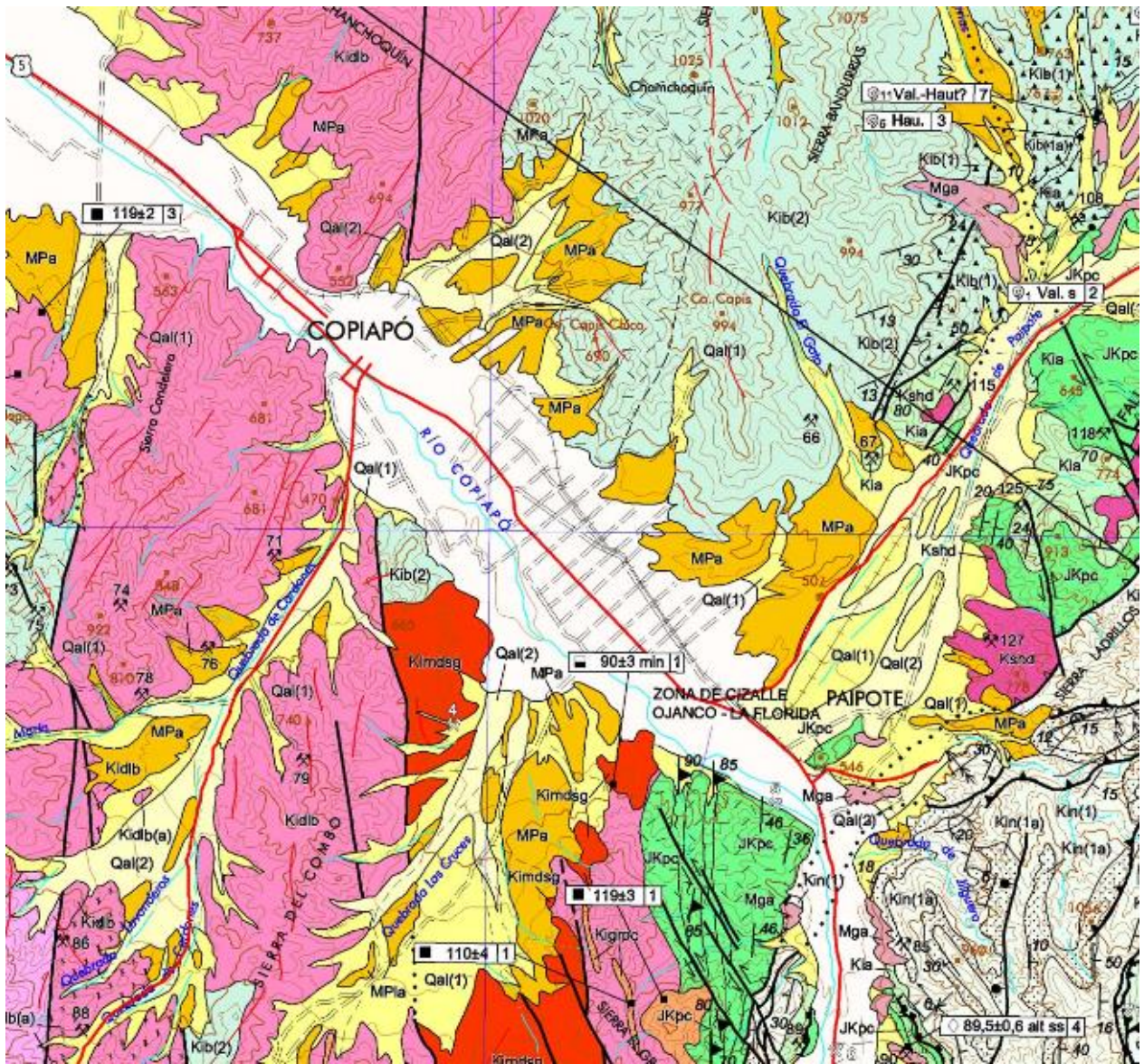


Figura 2.1. Extracto de mapa geológico escala 1:100.000, correspondiente a la zona de estudio. La leyenda de litologías se encuentra disponible en la Figura 2.2. Modificado de Arévalo (2005).

L E Y E N D A

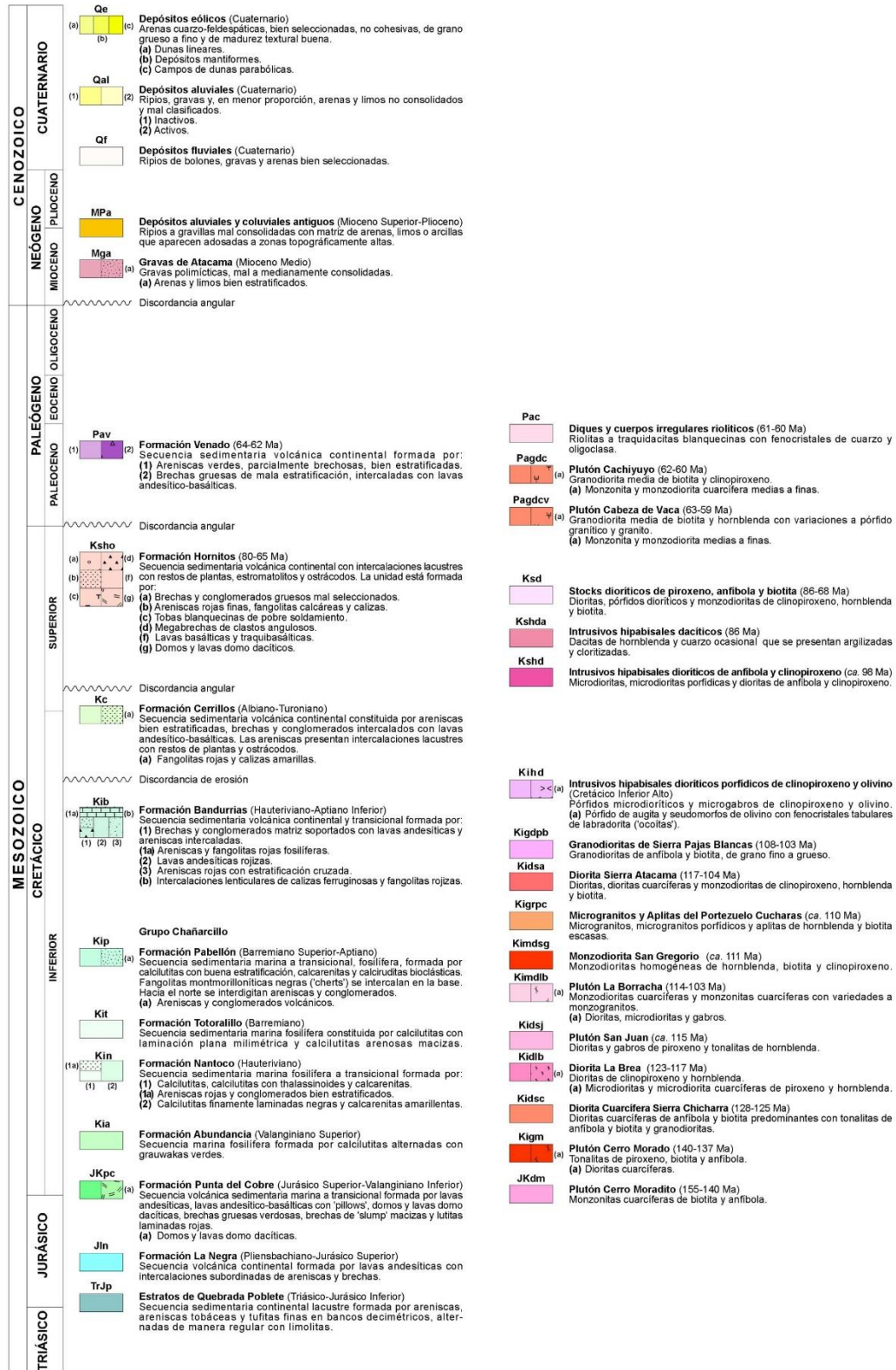


Figura 2.2. Leyenda de litologías expuestas en mapa de Figura 2.1. Modificado de Arévalo (2005).

Una falla normal de bajo ángulo (Despegue Punta del Cobre) despega parcialmente la Formación Abundancia de la Formación Punta del Cobre que la subyace. Un sistema estructural de flor positiva (Faja Plegada y Corrida de Paipote), enraizado en una falla normal de alto ángulo (Zona de Cizalle Ojancos-La Florida), y una serie de anticlinales, desplazan y deforman las secuencias del Cretácico Inferior y la Formación Cerrillos a lo largo de un alineamiento nornoreste de estructuras de échelon, que coincide con el límite entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera. Este sistema estructural se habría formado durante un episodio de transpresión sinistral durante el Cretácico Superior temprano (93-80 Ma) (Arévalo, 2005).

2.1.2. Fallas activas y/o potencialmente activas

Santibáñez *et al.* (2019) realizan una completa recopilación de las fallas corticales de los Andes chilenos, con evidencia de actividad neotectónica. La Figura 2.3 corresponde a un extracto del mapa que allí se presenta, la cual muestra las principales estructuras reconocidas en el sector de Copiapó, pertenecientes mayoritariamente al Sistema de Fallas de Atacama. La zona de estudio se encuentra seccionada por dicho sistema al Oeste de la ciudad de Copiapó, con estructuras de orientación nornoreste.

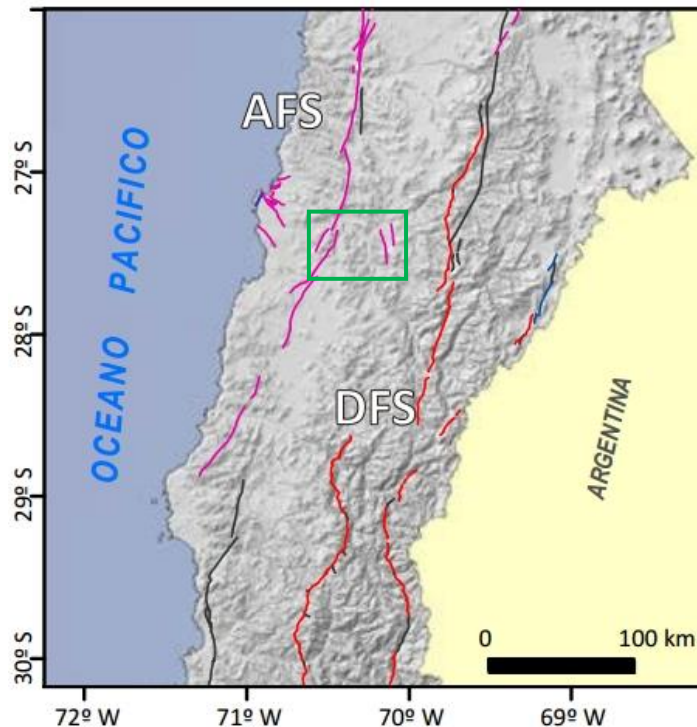


Figura 2.3. Principales fallas corticales activas y/o potencialmente activas, identificadas en la comuna de Copiapó (dentro de rectángulo verde). AFS: Sistema de Fallas de Atacama, DFS: Sistema de Fallas de Domeyko. Modificado de Santibáñez *et al.* (2019).

2.1.3. Geomorfología

La cuenca del río Copiapó presenta un relieve muy irregular y accidentado, predominando la alternancia de los valles en sentido transversal con interfluvios montañosos denominados serranías (MOP, 2004).

Desde el punto de vista geomorfológico, existe una serie de elementos fisiográficos que se pueden identificar claramente; los grupos principales son: Cordillera de los Andes, Precordillera, Valles Transversales y Depresión de los salares, y Cordillera de la Costa (Figura 2.4).



Figura 2.4. Geomorfología de Copiapó. Modificado de Griem (2016).

La Cordillera de los Andes se presenta con grandes alturas, destacando cerro Piuquenes (5.591 m s.n.m.) en el sector alto de la subcuenca del río Manflas; cerro Cárdenas (4.280 m s.n.m.) sector alto de la subcuenca del río Jorquera y cerro Estancilla (3.556 m s.n.m.) perteneciente a la subcuenca del río Pulido. El sector precordillerano tiene alturas comprendidas entre 3.000 y 4.500 metros, caracterizado por la continuación hacia el Sur de la Cordillera de Domeyko que presenta un conjunto de valles transversales (MOP, 2004).

El río Copiapó, desde su nacimiento en la unión de los tributarios Jorquera, Pulido y río Manflas (28° latitud Sur), y a lo largo de sus 162 km posee un curso general en sentido noroeste hasta su desembocadura en el mar (27° 17' latitud Sur). En sus primeros kilómetros hasta el sector de la localidad de Lautaro, su cauce presenta un escurrimiento de tipo recto y valle escarpado. La precordillera Andina en este sector presenta alturas comprendidas entre los 2.500 por el poniente a 2.700 m s.n.m. por el sector oriente, destacando el cerro Vizcacha con una altura de 2.744 m s.n.m. (MOP, 2004).

Desde la localidad de Lautaro hasta el sector de Paipote el río sigue con escurrimiento recto, recorriendo sectores del valle central, con terrazas fluviales de mayor amplitud (Figura 2.5). Las elevaciones (cerros y lomajes) que se presentan en este sector del valle central, están comprendidas entre los 1.200 y 2.700 m s.n.m. por el oriente y entre los 900 y 2.300 m s.n.m. por el sector poniente.

El tramo final del río Copiapó (desde el sector de Paipote hasta la desembocadura), el cauce del río presenta en algunos sectores (Aguirre, Toledo, Valle Fértil y Angosturas), un escurrimiento recto – meándrico y de tipo anastomosado en el sector de Valle Fértil. Las alturas más significativas del relieve en esta zona corresponden a las del cerro Chanchoquín (1.020 m s.n.m.) y Tía Ramos (1.076 m s.n.m.) en el sector norte del río Copiapó y los cerros Bramador (1.172 m s.n.m.), Pata de Gallina (732 m s.n.m.) y Totalillo (397 m s.n.m.) en el sector sur del cauce. Las terrazas laterales del valle en este tramo, específicamente desde el sector de San Pedro hasta San Camilo, son significativamente más extensas con amplitudes comprendidas entre 5 y 11 km. Las planicies litorales en la desembocadura del río Copiapó, son bastante extensas. (IGM, 1986)

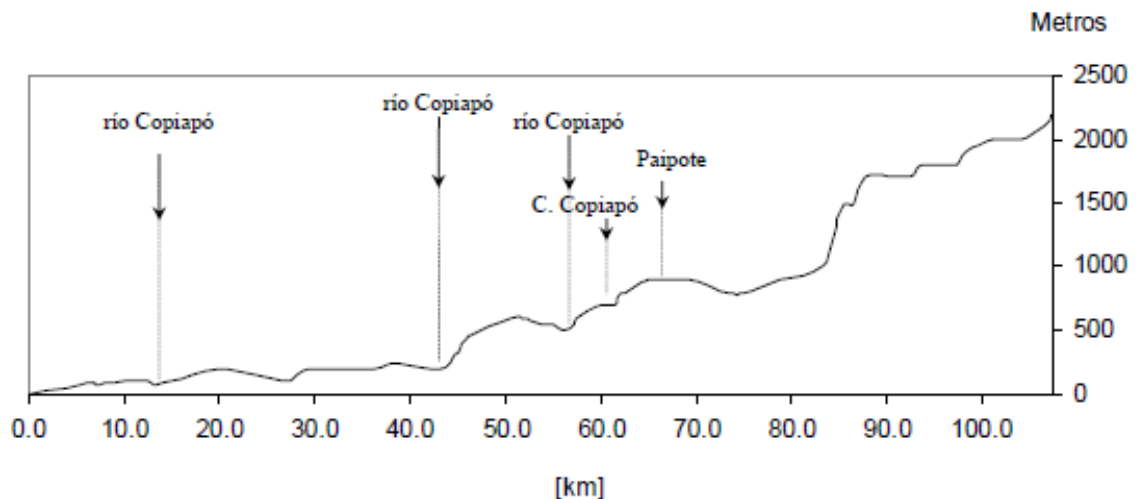


Figura 2.5. Perfil topográfico W – E a la latitud de 27°20', correspondiente a la cuenca del río Copiapó (IGM, 1986).

2.1.4. Hidrología e hidrogeología

La cuenca hidrográfica del río Copiapó, se extiende desde la latitud 26°43' por el norte, hasta la latitud 28°34' por el sur. En el sector alto, destaca la existencia de permeabilidad muy baja debido a la existencia de rocas volcánicas, sedimentario – volcánicas y plutónicas e hipabisales (MOP, 2004).

Destacan además dos tipos de escurrimientos: uno en dirección SSW que corre paralelo a la quebrada de Paipote por un lecho de rocas del período terciario sedimentario volcánico y cretácico mixto sedimentario y volcánico de muy baja permeabilidad hasta su confluencia con el río Copiapó.

El otro acuífero se origina de la confluencia de las aguas subterráneas desde los ríos Manflas a Jorquera que se unen en el sector de Embalse Lautaro. El lecho por el cual escurre el agua subterránea es principalmente de rocas plutónicas del Paleozoico y volcano-sedimentarias del Jurásico. A partir del sector Embalse Lautaro, escurre paralelo al río Copiapó en dirección NNW hasta la altura de Copiapó con profundidades freáticas que varían de los 53 a 11 m (Copiapó). Esta zona se destaca por tener un intenso uso para riego.

A partir de Copiapó hasta Caldera, el curso cambia de dirección NNW a W con profundidades de 16 a 0,7 m en la desembocadura, las aguas subterráneas escurren por depósitos no consolidados, relleno del período cuaternario de alta permeabilidad y volcano-sedimentarias del período terciario.

La Figura 2.6, obtenida del sitio de la Dirección General de Aguas, representa las características hidrológicas generales de la cuenca hidrográfica del río Copiapó.

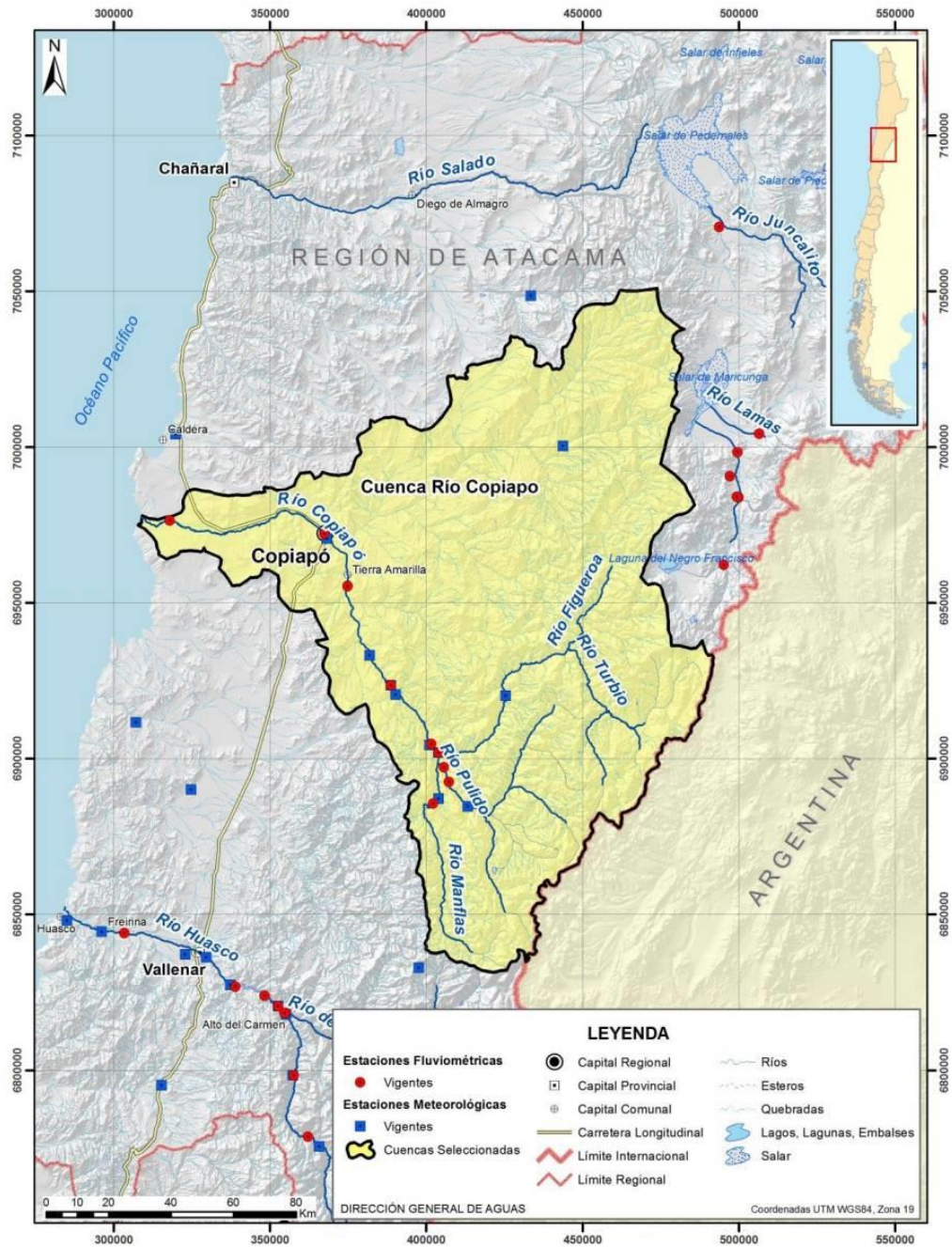


Figura 2.6. Información hídrica de la Cuenca del río Copiapó (DGA, 2015a)

2.2. Clima

La Región de Atacama se caracteriza por un clima semiárido y por la presencia de desiertos. Debido al aumento paulatino hacia el sur de las precipitaciones invernales, desde Copiapó hasta el límite norte regional, el clima es muy árido, similar al de la segunda región (MOP, 2004).

Al sur de la ciudad de Copiapó, el clima se transforma en desierto marginal para dar paso paulatinamente al clima de estepa cálido. Se destacan en la cuenca tres subclimas:

- El clima desértico litoral: la principal característica de este clima es la abundante nubosidad matinal. En la cuenca, dicho clima se localiza a lo largo de toda la franja costera, penetrando al interior del valle de Copiapó. Las precipitaciones aumentan hacia el sur, alcanzando 18 mm anuales, mientras las temperaturas anuales promedian 16,1°C, con humedad relativa de 74%.
- Clima desértico de interior: se localiza en la franja intermedia de la cuenca, especialmente en los relieves de las Pampas. Sus principales características son las elevadas temperaturas durante el día, ausencia de nubosidad y de precipitaciones.
- Clima desértico marginal de altura: se localiza en la zona Andina por sobre los 2.000 metros de altitud. Las precipitaciones son más abundantes, sobre los 250 mm anuales, y en las cumbres más altas predominan las precipitaciones sólidas. La presencia de nieve en esta región permite el desarrollo de ríos de alimentación pluvionival, con cursos permanentes durante todo el año y de carácter exorreicos. Las temperaturas son bajas y la amplitud térmica entre el día y la noche es acentuada (Apicultura.cl, 2003).

En el siguiente diagrama climático (Figura 2.7), se presentan los montos de precipitación y temperaturas medias históricas mensuales del río Copiapó en el sector de Embalse Lautaro.

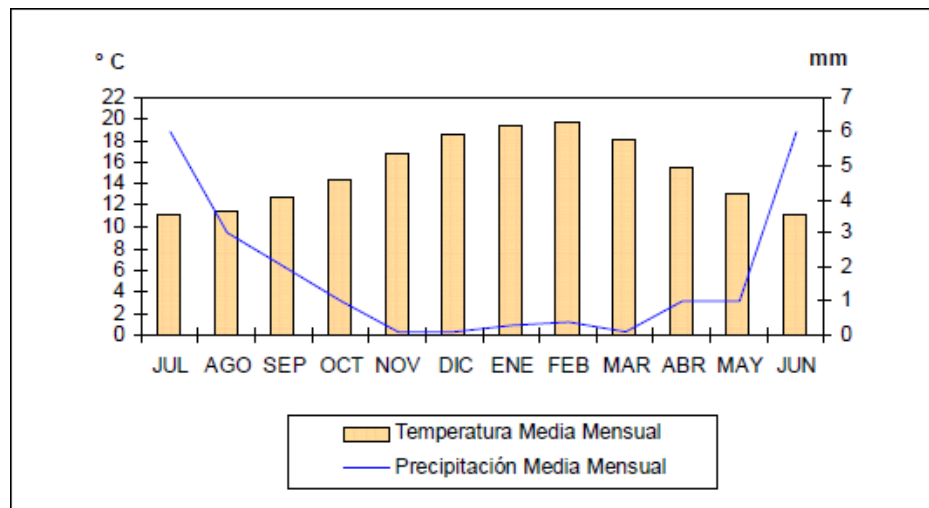


Figura 2.7. Diagrama Climático Ombrotérmico, sector Embalse Lautaro, río Copiapó. (R & Q Ingeniería Ltda., 1993).

En la figura anterior, se identifican claramente las estaciones secas y húmedas. El período seco, se manifiesta en los meses de agosto a mayo con precipitaciones medias mensuales que varían entre 0,1 a 3 mm y temperaturas de 16,6 a 21,4°C (febrero). El período húmedo, se presenta únicamente en los meses de junio y julio con precipitaciones medias mensuales de 6 mm (en ambos meses) y temperaturas de 15 y 15,7°C respectivamente (MOP, 2004)

A pesar de lo anterior, en el año 2015 ocurrió un evento de precipitaciones anormales debido al descenso de la isoterma 0 durante el mes de marzo, el cual causó aluviones en el área de estudio. Esto se puede constatar contrastando los valores representados en la Figura 2.8, con la información aportada por la estación meteorológica Amolana Copiapó 2, Tierra Amarilla, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Figura 2.10). Adicionalmente, según el informe de Precipitaciones Mensuales del Ministerio de Obras Públicas indicó que, en el sector del Embalse Lautaro, durante el mes de marzo había 70 mm de precipitaciones acumulados a la fecha (DGA, 2015b).

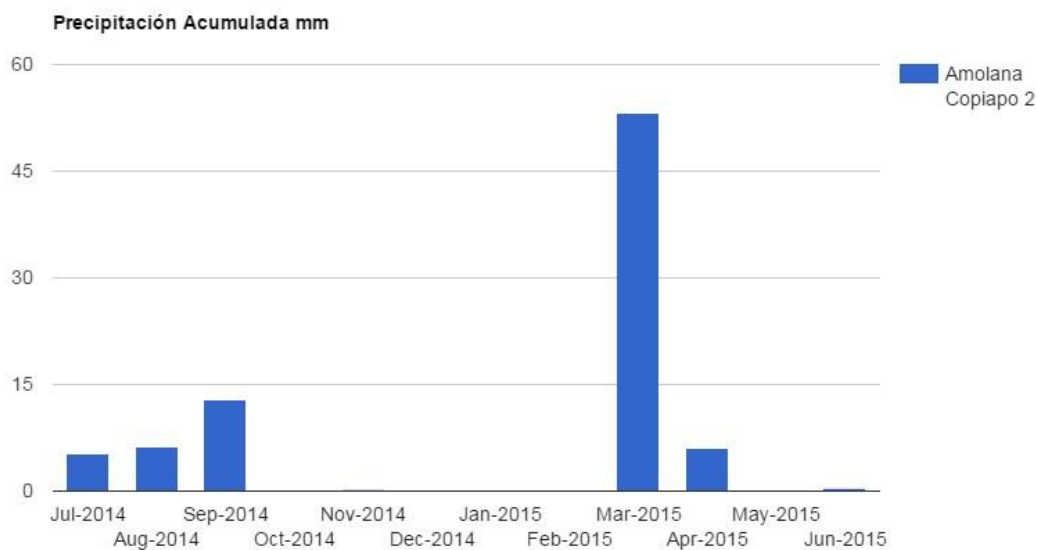


Figura 2.8. Gráfico de precipitación mensual acumulada en mm en la estación Amolana Copiapó 2, durante el período julio 2014 - junio 2015. (Agromet, 2016).

2.3. Antecedentes de aluviones

A continuación, se resumen los eventos de aluviones más importantes ocurridos desde comienzos del siglo XX en Chile.

1906

Fuertes inundaciones y aluviones en Vallenar y en el valle del río Huasco. En Copiapó se registraron 6 mm de precipitaciones (Griem, 2015). Corte total de la producción de plata en el sector Río Copiapó por destrucción de la línea férrea en el sector por aluviones.

Marzo 1927

Las aguas arrasaron los poblados de San Antonio, Hornitos, Nantoco, Tierra Amarilla, Paipote y el Pueblo de San Fernando.

12 de febrero 1972

En 1972 el invierno boliviano trajo al altiplano una cantidad inusual de precipitaciones. La lluvia cayó intensamente en el sector cordillerano de Chañaral, trasladándose hacia la costa de manera violenta. El torrente destruyó a su paso la línea férrea y la carretera que une los pueblos de Llanta, Diego de Almagro y el Salado con el puerto (Monroy, 2017).

14 de mayo 1985

El día 14 de mayo de 1985, un violento aluvión, con un volumen total estimado de $5 \times 10^6 \text{ m}^3$, se precipitó por el valle del río Manflas, afluente del río Copiapó. El material movilizado, incluyendo gran cantidad de piedras y restos vegetales, en una matriz de arena y lodo con elevado contenido de humedad, tras recorrer aproximadamente 15 km, se descargó a la cubeta del embalse Lautaro, donde se depositó. En su punto de origen, el flujo habría alcanzado un caudal de 11.000 m^3 (Peña, 1985).

18 de junio 1991

En esta fecha la lluvia caída en Caldera fue de 39,4 mm en 24 horas; en Copiapó de 31,7 mm y en Chañaral 41,4 mm, según Hauser (1997), a partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile. El mismo autor indica que estos eventos de lluvias intensas provocaron crecidas y desbordes de los ríos Copiapó y Huasco, causando inundaciones en las calles y viviendas de las ciudades de Copiapó, Vallenar y Huasco. Existen también registros de cortes de caminos y de las líneas férreas ocurridas por activación de las quebradas y generación de flujos con alto contenido de carga sólida (Castro *et al.*, 2010).

12 de junio de 1997

Las precipitaciones más altas de los últimos tiempos (148,7 mm) afectaron Copiapó y la Región de Atacama. Flujos de detritos y barro ocurrido en la ciudad de Copiapó provocaron la muerte de 7 personas y severos daños en la zona urbana, en sectores donde las quebradas de descarga estaban ocupadas por viviendas (SERNAGEOMIN, 2015a).

25-26 de marzo de 2015

Intensas precipitaciones en el desierto de Atacama, de características líquidas en la alta cordillera, generaron desbordes en los ríos e inundaciones en la Región de Atacama. La extensión y duración del evento provocó desbordes de los ríos y aluviones en las localidades del valle de Copiapó, ocasionando pérdidas humanas y materiales. Se registró alrededor de 70 mm acumulados durante

el evento, en una zona que normalmente precipita del orden de 15 mm al año (Dirección Meteorológica de Chile, 2015).

El evento mencionado causó la crecida y desborde de los ríos Copiapó y El Salado, lo cual provocó deslizamientos de tierra, cortes de rutas, viviendas destruidas y cortes de energía eléctrica y de fibra óptica (Figura 2.9). En el último reporte por parte de ONEMI publicado el 7 de junio de ese año estableció en 31 los fallecidos, 16 desaparecidos y 16588 damnificados (ONEMI, 2015). El fenómeno meteorológico fue calificado por el gobierno como “el mayor desastre pluviométrico en 80 años”.



Figura 2.9. Algunos de los efectos del aluvión de marzo de 2015, en la zona de estudio. Fotografías obtenidas de medios de comunicación digital (Emol, La Tercera).

Las precipitaciones caídas durante el evento alcanzaron los máximos valores de los últimos años (Figura 2.10), según la comparación que se puede efectuar de los datos de la estación meteorológica Amolana Copiapó 2, Tierra Amarilla, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, ubicada en la latitud -27.959806 y longitud -70.01, a una elevación de 1090 m s.n.m (Figura 2.11).

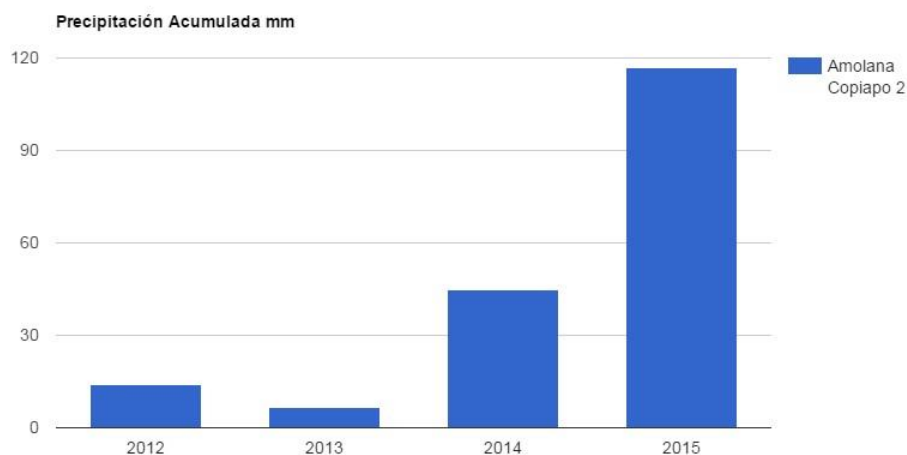


Figura 2.10. Gráfico de precipitación acumulada anual en mm en la estación Amolana Copiapo 2, durante el período 2012-2015. (Agromet, 2016)



Figura 2.11. Ubicación estación meteorológica Amolana Copiapo 2, Tierra Amarilla, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (en verde), cercana a Tranque Lautaro (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 2015).

La zona de inundación del aluvión queda delimitada por el estudio desarrollado por el SERNAGEOMIN, post emergencia marzo 2015, la cual puede verse en la Figura 2.12.

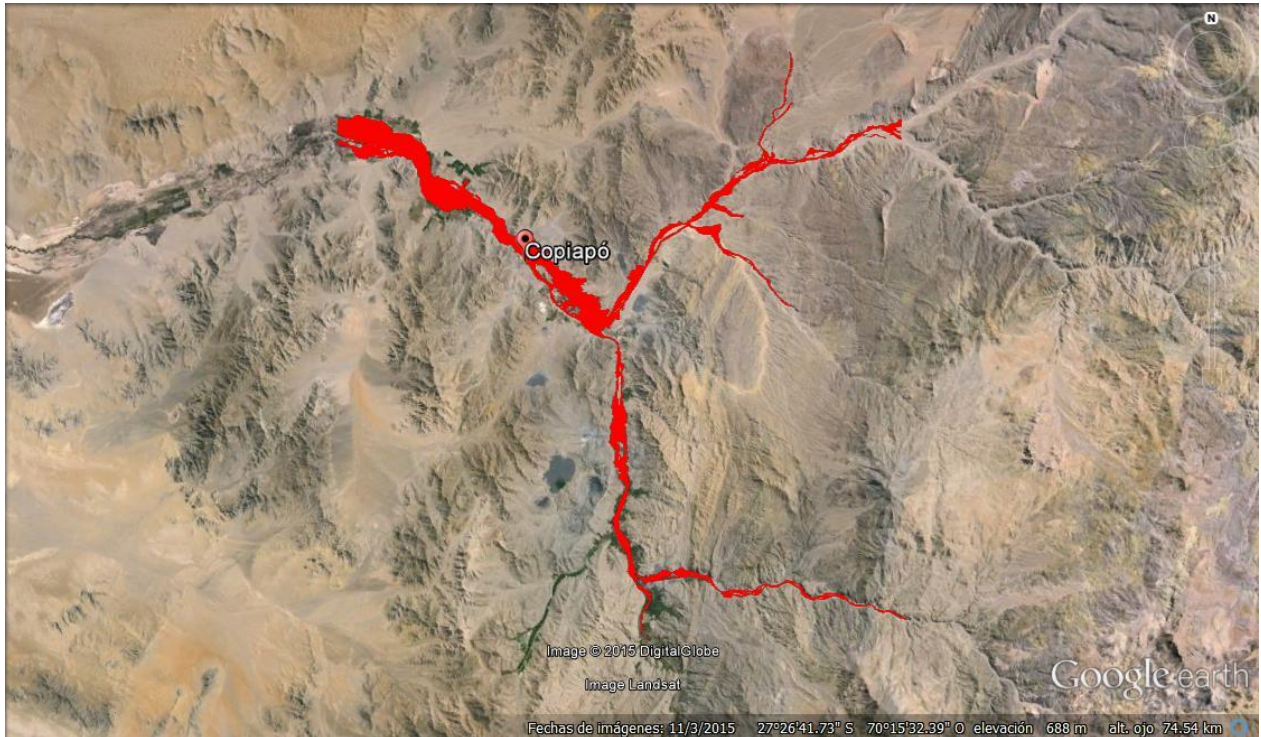


Figura 2.12. Área de estudio sector de Copiapó. En rojo se indican las zonas inundadas por el aluvión del mes de marzo de 2015. Imagen obtenida de Google Earth, con la gentileza de datos aportados por el SERNAGEOMIN (SERNAGEOMIN, 2015b).

13 de mayo de 2017

El evento meteorológico generó más de 1.400 albergados, al menos 9.155 clientes sin suministro eléctrico y 40.300 hogares sin agua, provocando los desbordes de los ríos Salado y Copiapó.

Chañaral fue una de las comunas más dañadas. Entre las dos y las tres de la madrugada se produjeron dos aluviones: uno en la quebrada de Conchuelas y otro en la de El Cabrito, dividiendo en dos la ciudad.

Además de Chañaral, las comunas de Diego de Almagro, Tierra Amarilla, Alto del Carmen y Vallenar también se vieron afectadas. En Copiapó, en tanto, un 70% de los hogares quedó sin agua potable durante el evento (La Tercera, 2017)

3. Depósitos de relaves

3.1. Introducción

El relave corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación, de roca previamente triturada. Este residuo, también conocido como cola o lamas, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares especialmente habilitados, denominados depósitos de relaves (Ministerio de minería, sf). Estos normalmente están formados por un muro de contención y una cubeta que es donde se deposita el fluido (Figura 3.1). Lentamente se va decantando la parte sólida en el fondo, generando una laguna de aguas claras donde la mayoría del agua es recuperada, y otra parte se evapora. El material queda dispuesto como un depósito estratificado de materiales sólidos finos.

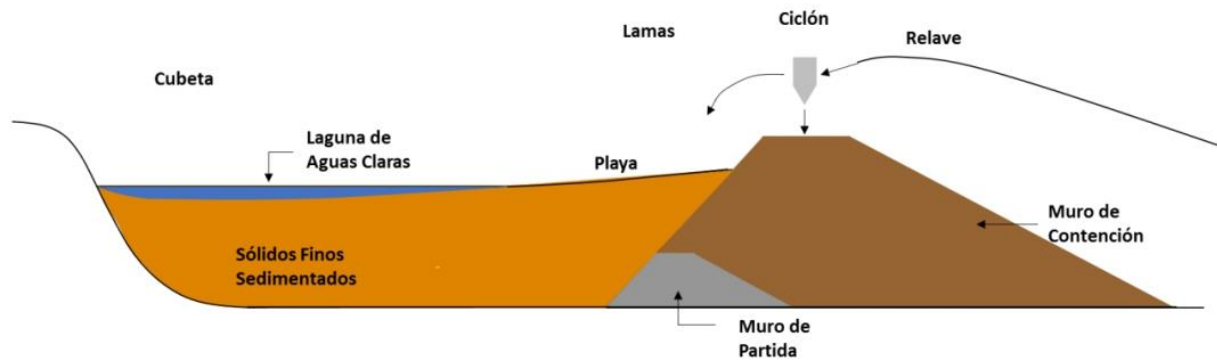


Figura 3.1. Esquema representativo de un depósito de relaves (Carvajal, 2018).

Por otro lado, las actividades mineras producen, tanto si son superficiales como subterráneas, una gran cantidad de materiales de desecho que plantean el problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integración en el entorno. Las rocas estériles procedentes de la cobertura de las operaciones de cielo abierto o de las labores de preparación en las subterráneas se depositan, generalmente, como fragmentos gruesos en montones que constituyen las denominadas escombreras o botaderos. También se almacenan de la misma manera los rechazos de las plantas de tratamiento y concentración con una granulometría inferior a la de los materiales anteriores, pero sin llegar al rango de las arenas y limos/arcillas.

3.2. Definiciones

A continuación, se definirán algunos conceptos utilizados a lo largo de este trabajo.

Ángulo de talud natural o de reposo

Corresponde a la pendiente máxima que el muro de contención de un depósito de relaves puede alcanzar sin que se produzca deslizamiento de material, asegurando su estabilidad física. Para cada depósito variará, y dependerá del tamaño de las partículas que lo componen, así como de su forma.

Altura máxima

Es la mayor altura que puede alcanzar un muro de contención, asegurando su estabilidad frente a deslizamientos. Dependerá, al igual que el ángulo de descanso natural, de las características específicas de cada depósito, como el tamaño de las partículas que lo componen y su forma, así como el contenido de agua.

Revancha

Corresponde a la distancia entre el nivel de la laguna de aguas claras del depósito de relaves, y la parte superior del muro de contención (o también conocido como coronamiento).

Estado de actividad

Para depósitos de relaves, se habla de su estado de actividad para evaluar su funcionamiento. En particular, se identifican 3 estados, basados en la clasificación del SERNAGEOMIN disponible en su sitio web:

- Activo: Depósito con dueño conocido y operando.
- Inactivo (Paralizado): Depósito con dueño conocido, pero fuera de operación, sea de forma temporal o definitiva, excluyendo detenciones por razones operacionales, de mantenimiento u otras habituales en una instalación minera en operación.
- Abandonado: Depósitos que no tienen dueño conocido. También se consideran abandonados si en terreno se verifica tal condición, o si se tiene información oficial o fidedigna que indique que no se efectuó ninguna medida de cierre.

3.3. Tipos de depósitos de relaves

En esta sección se expondrá lo detallado en “Guía Técnica de operación y control de depósitos de relaves” (SERNAGEOMIN, 2007a).

Dentro de la disposición de relaves existen diferentes y variadas formas de deposición de relaves, los cuales dependen de diversos factores como son las cercanías al concentrador, capacidad de almacenamiento de relaves, topografía del lugar, producción del yacimiento. Se deberá seleccionar la forma más apropiada para disponer estos relaves.

Atendiendo a lo indicado anteriormente, los distintos tipos de “depósitos de relaves” que se consideran en la actualidad en Chile indicados en el “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves” (SERNAGEOMIN, 2007b), son los siguientes:

- Tranques de Relaves
- Embalses de Relaves
- Depósito de Relaves Espesados
- Depósito de Relaves Filtrados
- Depósito de Relaves en Pasta

A continuación, se realiza una breve descripción general de estas formas de deposición de relaves.

3.3.1. Tranques de relaves

Depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave, compactado, proveniente de un hidrociclón (operación que separa sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua). La parte fina, denominada lama, se deposita en la cubeta del depósito. En la actualidad existen tres alternativas de construcción del muro de arenas de los tranques de relave, las cuales se procederán a explicar.

Construcción del muro, Método Aguas Arriba

El Método Aguas Arriba consiste en un muro inicial construido con material de empréstito compactado sobre el cual se inicia la deposición de los relaves, utilizando clasificadores denominados “hidrociclones”; la fracción más gruesa o arena, se descarga por el flujo inferior del hidrociclón (underflow) y se deposita junto al muro inicial, mientras la fracción más fina o lamas, que sale por el flujo superior del hidrociclón (overflow) se deposita hacia el centro del tranque en un punto más alejado del muro, de modo tal que se va formando una especie de playa al sedimentar las partículas más pesadas de lamas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de partículas en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, que pueden ser las denominadas torres de evacuación, o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante. Una vez que el depósito se encuentra próximo a llenarse, se procede al levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas arriba y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se continúa sucesivamente la construcción en la forma indicada.

Con este método, en la práctica, se pueden alcanzar alturas de hasta 25 metros (Figura 3.2). Si bien este método es el que requiere un menor volumen de material arenoso, por lo que ha sido utilizado en la pequeña minería para construir numerosos tranques, es el que produce el tipo de muro menos resistente frente a oscilaciones sísmicas. Por ello en la actualidad en Chile no está contemplado aprobar este tipo de proyecto de tranques de relaves en la legislación vigente.

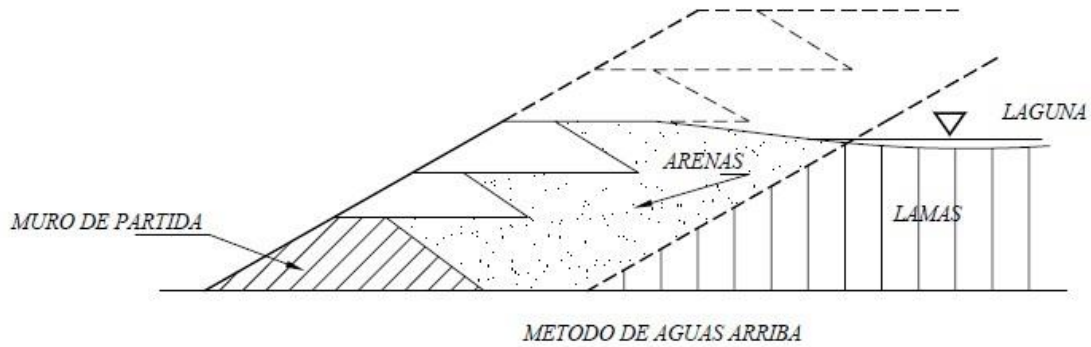


Figura 3.2. Método de construcción del muro aguas arriba (SERNAGEOMIN, 2007a).

Construcción del muro, Método Aguas Abajo

En el Método Aguas Abajo la construcción se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena cicloneada hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba. Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente, usualmente 2 a 4 m, se efectúa el levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y peralte del muro. A veces se dispone también de un segundo muro pre-existente aguas abajo (Figura 3.3). Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el manteo del talud del muro de partida, o bien, disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida.

Este método de aguas abajo requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica.

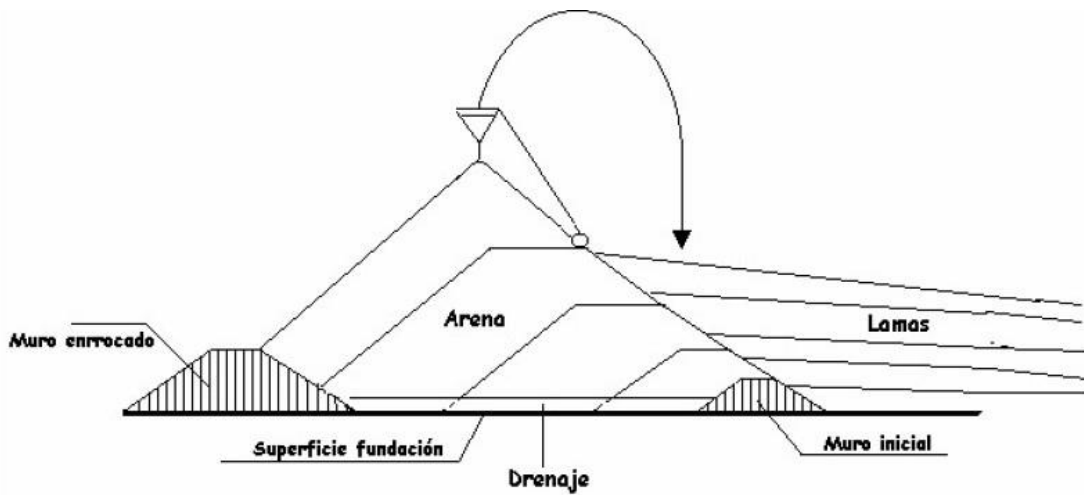


Figura 3.3. Método Aguas Abajo (capas de arenas inclinadas) (SERNAGEOMIN, 2007a).

Construcción del muro, Método Eje Central o Mixto

El Método Eje Central o Mixto se inicia al igual que los métodos anteriores con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba (Figura 3.4). Una vez completado el vaciado de arenas y lamas correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida. Lo anterior permite lograr un muro de arenas cuyo eje se mantiene en el mismo plano vertical, cuyo talud de aguas arriba es más o menos vertical, y cuyo talud de aguas abajo puede tener la inclinación que el diseño considera adecuada.

Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los 2 métodos anteriores, y permite lograr muros suficientemente estables.

Estos métodos constructivos del muro de arenas de los tranques de relaves mencionados anteriormente son sobradamente conocidos en Chile, siendo los métodos de aguas abajo y eje central los que contempla hoy la legislación en los proyectos de tranques de relaves que se presentan al Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) para su aprobación.

La inseguridad que muchas veces despiertan los tranques de arenas de relave no deben atribuirse al material con que se construyen, sino al sistema de construcción por relleno hidráulico que puede inducir elevadas presiones de poros e incluso la licuación total en caso de un sismo. Sin embargo, las técnicas modernas de diseño, construcción y control permiten obtener estructuras seguras a base de buenos sistemas de drenaje, de un eficiente sistema de cicloneo y disposición de las arenas, y también de una buena compactación de la arena que permita alcanzar una elevada densidad, utilizando un equipo adecuado para ello. Lo anterior, complementado con un control piezométrico en el cuerpo del prisma resistente, deja al tranque de arenas de relave en condiciones de estabilidad semejantes a la de otras obras de ingeniería de importancia.

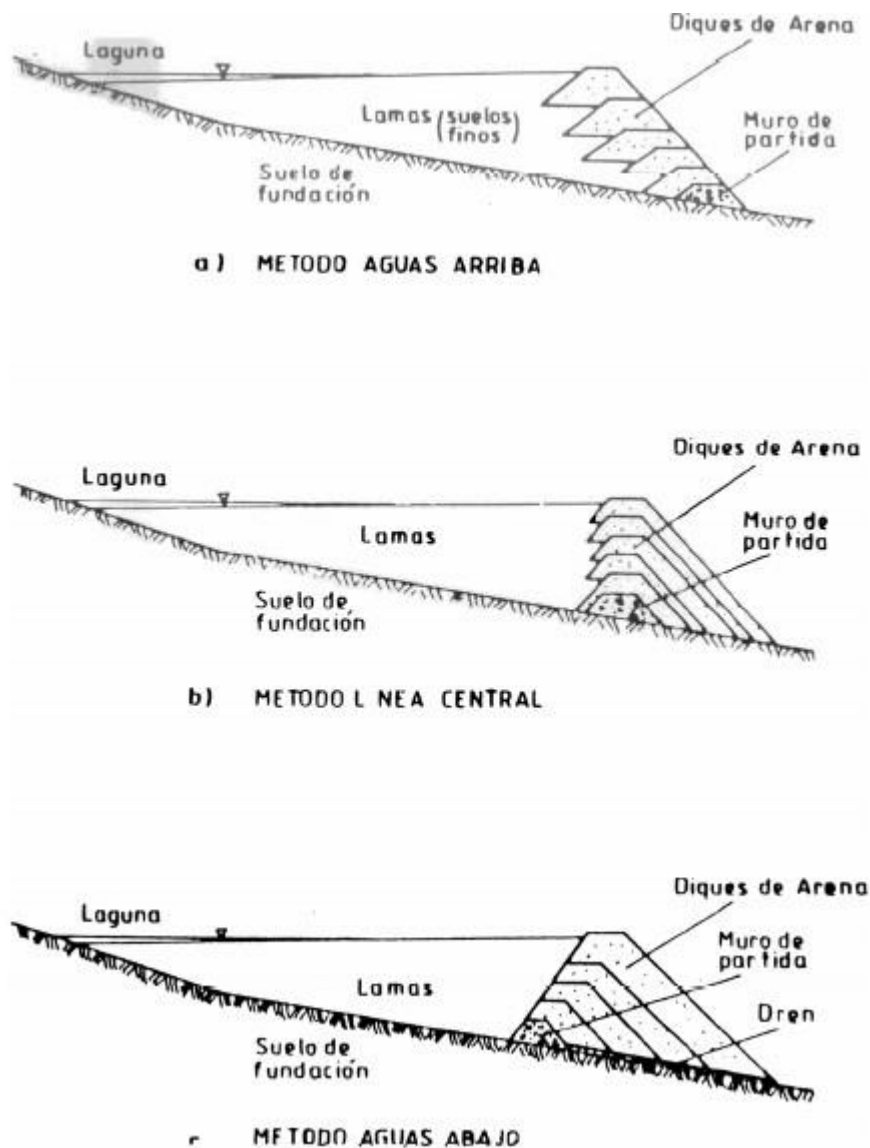


Figura 3.4. Comparación de diferentes métodos constructivos del muro de arenas de tranques de relaves. Se muestran los métodos Aguas Arriba, Eje o Línea Central y Aguas Abajo (SERNAGEOMIN, 2007a).

3.3.2. Embalses de relaves

Este tipo de depósito de relaves consiste en construir un muro resistente hecho totalmente de material de empréstito, compactado y, por otra parte, se impermeabiliza el talud interior del muro y también parte o todo su coronamiento. Los relaves se depositan completos en la cubeta sin necesidad de clasificación, pero también deben disponer de un sistema de evacuación de las aguas claras de la laguna que se forma. Los embalses de relaves no se diferencian esencialmente de las presas de embalse de aguas, las que constituyen una técnica ampliamente desarrollada en todo el mundo. Es interesante destacar, no obstante, que las técnicas de diseño evolucionan con gran rapidez y cada día se descubren nuevos métodos.

Tal vez, la diferencia fundamental entre un embalse destinado a la acumulación de agua y uno destinado a relaves es que mientras el embalse para agua se construye de una vez con su capacidad definitiva, el embalse para relaves se puede ejecutar por etapas a medida que se avanza con el depósito de los relaves, a fin de no anticipar inversiones y reducir a un mínimo su valor presente. La construcción por etapas obliga a que la zona impermeable de la presa se diseñe como una membrana inclinada cercana y en la dirección del talud de aguas arriba. Un perfil como éste, limita los grados de libertad en el diseño de las presas de tierra, cuando están destinadas a contener relaves (Figura 3.5).

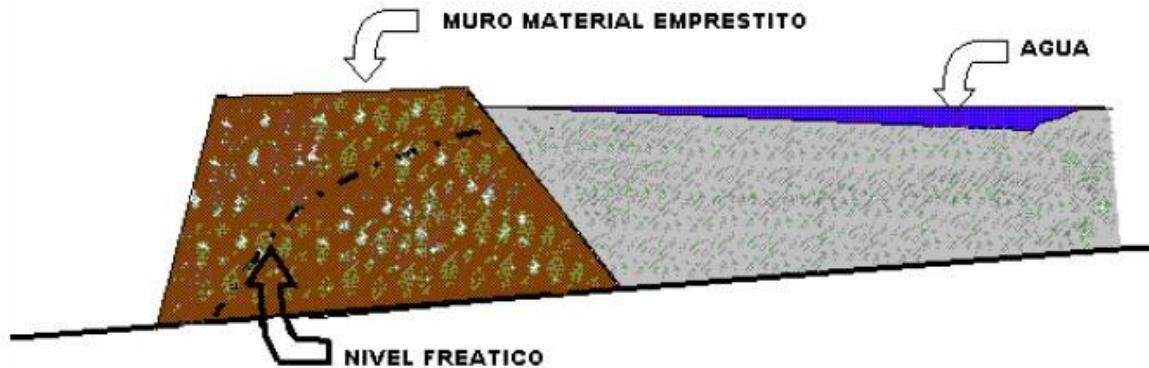


Figura 3.5. Muro construido con material de empréstito (SERNAGEOMIN, 2007a).

Del punto de vista sísmico, los embalses de relaves son más resistente que cualquiera de los métodos indicados para los tranques de relaves.

3.3.3. Depósitos de relaves espesados

El ingeniero canadiense Eli I. Robinsky, en 1975 desarrolló un sistema de depósito que no requiere de un dique o muro contenedor para su construcción. El procedimiento se basa en la mayor viscosidad que alcanza la pulpa de relave al aumentar la concentración de sólidos. El autor propone una curva en que relaciona el ángulo de descanso natural del relave con el contenido de sólidos de la pulpa. Para concentración del orden de 53% en peso, la pendiente de reposo es del 2% y ésta aumenta hasta un 6% si la concentración sube a 65%. De esta manera pueden disponerse los relaves en forma de un cono cuya pendiente será la que corresponde a la respectiva concentración de sólidos. Si se trata, por ejemplo, de depositar relaves en un valle plano desde la ladera que limita dicho valle, se puede iniciar el depósito desde pequeña altura con una pulpa relativamente diluida para luego elevar el punto de descarga simultáneamente con un aumento de la concentración a fin de disponer para las capas siguientes de una pendiente más pronunciada. El punto de descarga puede luego ser desplazado lateralmente con el objeto de formar un depósito de base ovoidal (Figura 3.6).

No obstante que este tipo de depósito no requiere la construcción de un dique para limitar el área comprometida, se recomienda la construcción de un pequeño terraplén algo alejado del borde exterior del depósito, el cual sirve para contener un volumen para el depósito del agua desalojada

por el relave, la cual es captada por un vertedero u otro dispositivo para ser bombeada y recirculada. Este pequeño terraplén sirve a la vez para coleccionar las aguas lluvias y conducir las hacia cauces naturales.

Otro principio básico de este tipo de depósito se deriva de la diferencia en lo que a segregación del material se refiere, entre una pulpa diluida y otra concentrada.

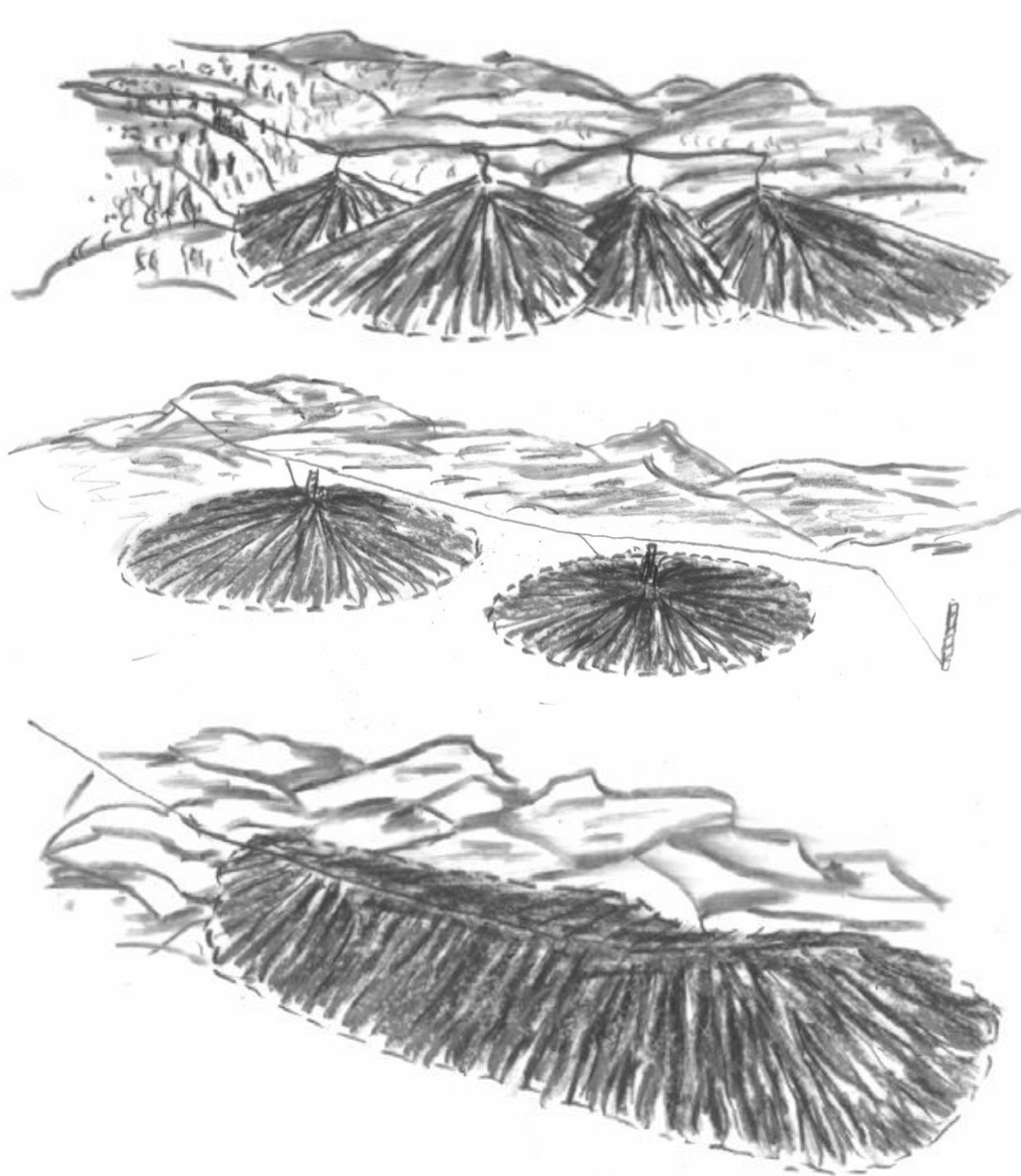


Figura 3.6. Ejemplos de posibles disposiciones que podrían desarrollarse para Relaves Espesados, dependiendo de las condiciones topográficas (Método Robinsky) (SERNAGEOMIN, 2007a).

En efecto, si la concentración de sólidos es baja, el escurrimiento de la pulpa produce una segregación de materiales, depositándose en primer lugar los granos mayores y a continuación y separadamente, los más finos. Es el fenómeno usual en el depósito de lamas en un tranque y más aún el que ocurre en los tranques construidos por el método de aguas arriba. Si, por el contrario, la pulpa es concentrada (del orden del 50% o más), la pulpa escurre como un todo sin ocasionar segregación. Es el caso que ocurre con el escurrimiento de relaves por tuberías, en que es conveniente evitar la segregación mediante el uso de concentraciones del orden del 50% ya que con el uso de pulpas más diluidas, los granos gruesos se separan y ruedan por el fondo aumentando la abrasión de la tubería, según el autor, en un escurrimiento libre ocurre el mismo fenómeno, y al evitarse la segregación se obtiene una mayor densidad que impide que el relave depositado sea erosionado por el agua desalojada por el propio relave, por las aguas lluvias o por el viento.

El procedimiento propuesto por Robinsky resulta aparentemente muy atractivo especialmente en aquellos casos en que la topografía es favorable. La relativa baja altura de los depósitos al tener estos una pendiente máxima del tipo 6%, causa que ocupen grandes extensiones relativamente planas o de poca inclinación. Existen sin embargo algunas interrogantes que no están claramente especificados por su autor. En efecto, la obtención de concentraciones de pulpa tan alta como 65% de sólidos es un problema que el autor no ha explicado cómo se puede obtener. Solamente ha sugerido en forma general, que podrían usarse espesadores cónicos profundos, métodos centrífugos y de filtración y vacío. Por otra parte, si las pulpas así concentradas tienen un ángulo de descanso natural de 6%, su escurrimiento por tubería desde el concentrador hasta el vértice del cono implica una pérdida de carga hidráulica superior a dicho 6% en forma que una conducción, por ejemplo, a 2 Km., significaría una pérdida de energía del orden de 150 m, lo que resultaría muy costoso si el relave debe ser bombeado. No siempre es posible la instalación del espesador junto al vértice del depósito.

En resumen, el método de deposición de relaves espesados es una posibilidad muy interesante que merece ser investigada en profundidad para resolver los interrogantes que se plantean. Es posible que puedan ser utilizados en forma experimental con un grado de espesamiento del orden de 53% de sólidos el que puede ser alcanzado por métodos corrientes, usando para el depósito un terreno casi horizontal ya que el talud de reposo del relave así espesado sería del tipo 2%.

3.3.4. Depósitos de relaves filtrados

Este tipo de depósitos de relaves es muy similar al de los relaves espesados, con la diferencia de que el material contiene menos agua debido al proceso de filtrado utilizando equipos similares a los que se emplean para filtrar concentrados, como son los filtros de prensa o de vacío.

El relave una vez filtrado se transporta al lugar de depósito mediante cintas transportadoras, o bien mediante equipos de movimiento de tierra y/o camiones. En el primer caso, se logra un domo de material similar al método de Robinsky; mientras que en el segundo caso se utiliza el equipo de movimiento de tierras para ir construyendo módulos de material compactado, los cuales permiten conformar un depósito aterrazado de gran volumen. Es importante señalar que en este método, aunque el contenido de humedad que se logra (20% a 30%) permite su manejo con equipos de movimiento de tierra, es suficientemente alto como para tener un relleno prácticamente saturado,

por lo que es posible que se produzcan infiltraciones importantes de las aguas contenidas en estos relaves si el suelo de fundación es relativamente permeable. También es necesario señalar que la presencia de algunas arcillas, yeso, etc. en los materiales de relaves pueden reducir significativamente la eficiencia de filtrado.

3.3.5. Depósitos de relaves en pasta

Los relaves en pasta corresponden a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundantes partículas finas y un bajo contenido de agua, de modo que esta mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad.

Una buena pasta de relaves requiere tener al menos un 15% de concentración en peso de partículas de tamaño menor a 20 micrones. La mejor propiedad de las pastas de relaves es que pueden ser eficientemente transportadas en tuberías sin los problemas de segregación o sedimentación que ocurren normalmente en las pulpas de relaves y permiten una gran flexibilidad en el desarrollo del concepto del sitio de emplazamiento; una vez depositados los relaves, se dejan secar, luego acopiar, permitiendo así minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves.

La consistencia alcanzada permite que una pasta permanezca estable aun cuando esté varias horas sin moverse. La pasta puede formarse a partir de una gran variabilidad de componentes como cuarzo, feldespatos, arcillas, micas y sales.

Es posible producir materiales con la consistencia de pasta a partir de un amplio rango de concentración de sólidos en peso y sobre la base de la variación de la distribución de tamaño de las partículas. Es decir, la producción de pasta es específica para cada tipo de material.

Cuando se dispone pasta de relaves en superficie, una muy pequeña fracción de agua podrá drenar o infiltrarse, ya que la mayor parte de la humedad es retenida en la pasta debido a la tensión superficial de la matriz de suelo fino. La flexibilidad que permiten las pastas en cuanto al desarrollo del lugar de emplazamiento del depósito puede ser extendida al uso de técnicas de construcción aguas arriba, donde las consideraciones de diseño antisísmico de otra manera serían prohibidas. Con la alternativa de pasta no se requiere una solución tipo embalse.

Para faenas de pequeña escala, la pasta puede ser transportada en camiones desde las instalaciones de operación y descargadas en el lugar de disposición final. Una vez depositada, se deja secar y se puede acopiar. Esta forma de acumular permite minimizar la superficie de suelo cubierto con relaves, realizar un cierre progresivo y al cese de operaciones, el depósito puede ser dejado sin requerir medidas adicionales de cierre.

Para faenas de mayor tamaño, por economía de escala para el manejo de materiales, el sistema considera el uso de bombas o cintas transportadoras hasta un repartidor que realiza la disposición

final. Cabe destacar que, debido a su alta densidad, las pastas son transportadas mediante el uso de bombas de desplazamiento positivo.

3.3.6. Otros depósitos de relaves

A continuación, se mencionan otros tipos de Depósitos de Relaves que en otros países son factibles de desarrollar. Sin embargo, en Chile en la actualidad existen grandes restricciones de las autoridades competentes; del punto de vista legal, de la seguridad de las personas y del medio ambiente, para otorgar permisos a los proyectos que pudieren presentarse, de modo tal que no los contempla la legislación del país, aunque se debe reconocer que en el pasado se realizaron proyectos en Chile que utilizaron las técnicas de Depósitos de Relaves que se nombran a continuación:

- a) Depósitos en Minas Subterráneas en Explotación
- b) Depósitos en Minas Subterráneas Abandonadas
- c) Depósitos en Minas Explotadas a Cielo Abierto
- d) Depósitos Relaves Radiactivos
- e) Depósitos costeros
- f) Depósitos submarinos

3.4. Depósitos de relaves en Copiapó

Considerando la información provista por SERNAGEOMIN en abril de 2019, se tiene que en la comuna de Copiapó existen 84 depósitos de relaves (Figura 3.7), de los cuales 4 se encuentran a distancias mayores a 10 km del centro del centro urbano apreciable en la Figura 3.8. El detalle de estos se puede encontrar en el Anexo 1, Tabla A, en donde puede verse el nombre de la faena, su dueño, la ubicación, recursos minerales que se extraían en la faena y estado de operaciones, entre otros.

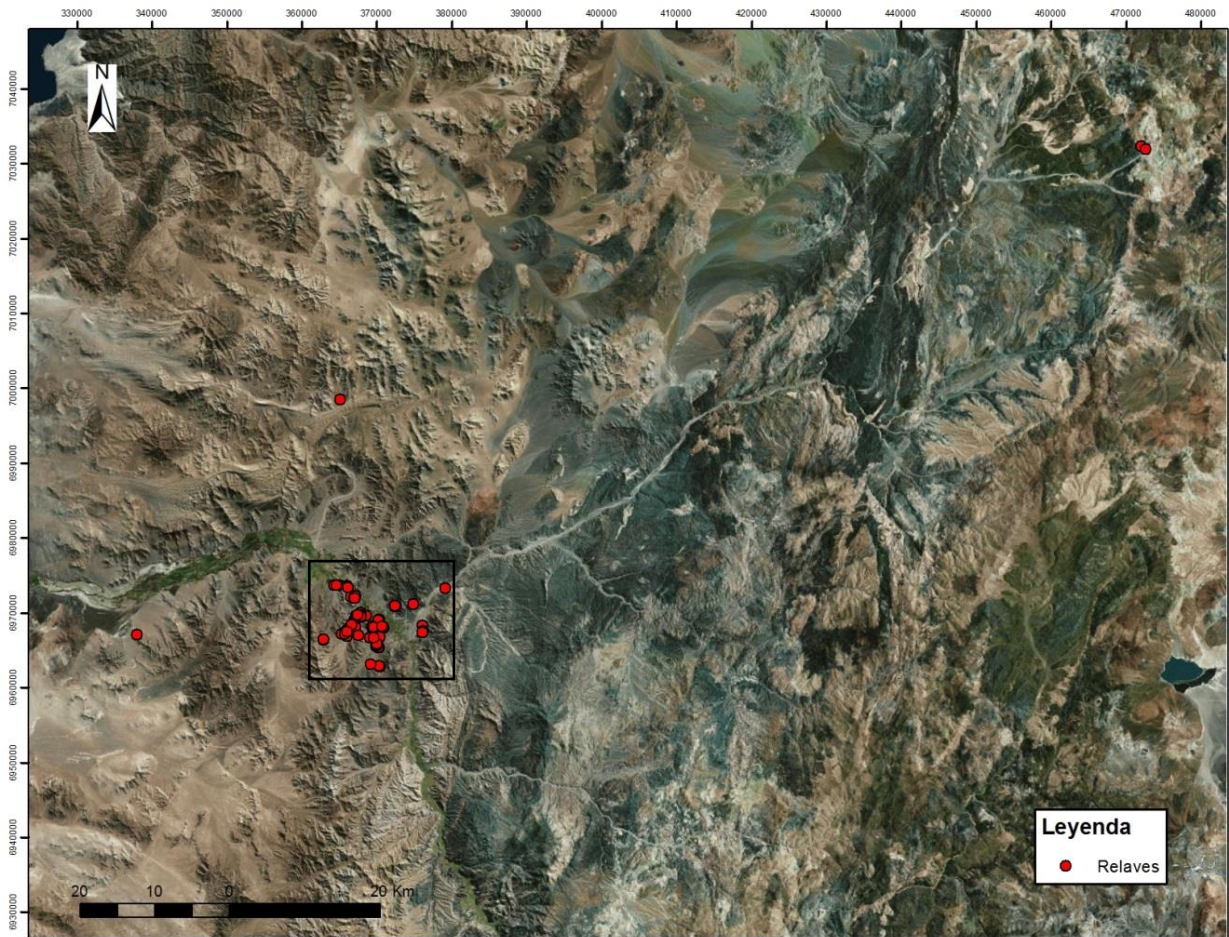


Figura 3.7. Depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. El rectángulo de contorno negro señala el área considerada para la Figura 3.8. Este mapa fue confeccionado para este trabajo a partir de los datos obtenidos del Catastro de Relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

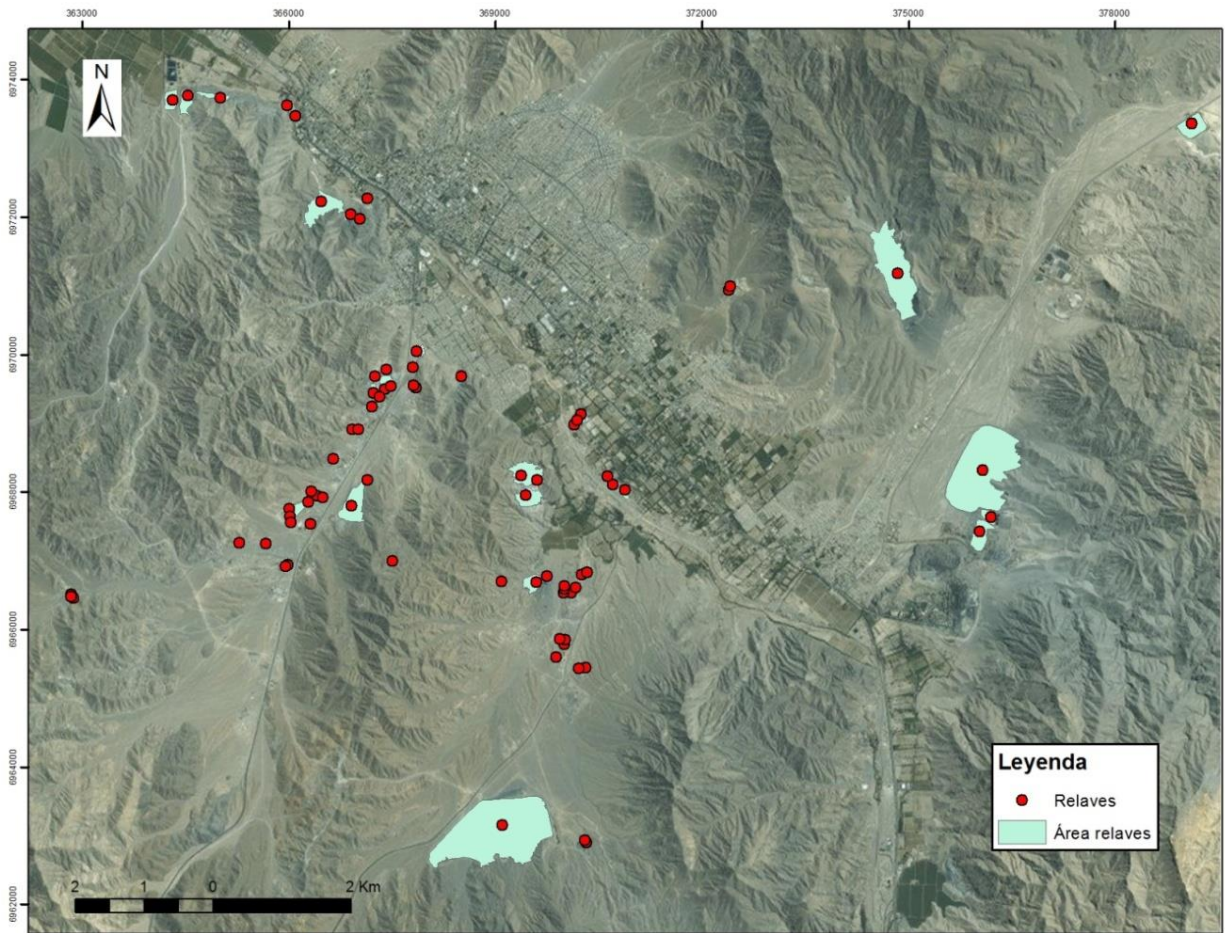
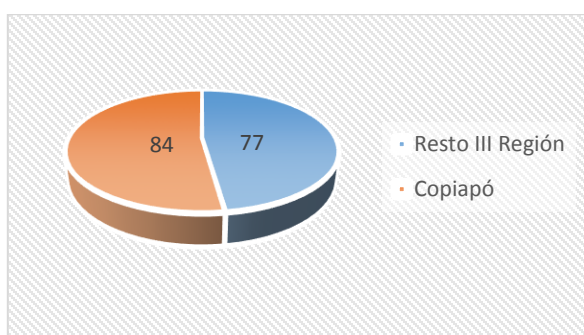


Figura 3.8. Depósitos de relaves ubicados a menos de 10 km del centro urbano de Copiapó. Para el caso de los relaves de mayor tamaño, se ha incluido un polígono indicando sus límites aproximados. Mapa confeccionado a partir de Catastro de Relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

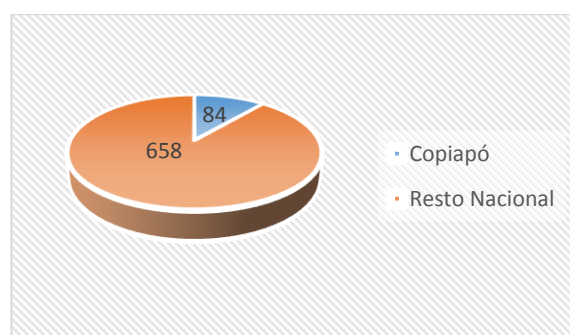
Considerando a nivel país la cantidad de depósitos (Tabla 3.1), se aprecia que de los 742 existentes, los 84 de la comuna de Copiapó corresponden aproximadamente al 52% a nivel regional, y a un 11.3% de la realidad nacional (Figura 3.9, a y b), lo cual sugiere el gran impacto de este estudio para la estimación de la susceptibilidad asociada a estas obras de ingeniería.

Tabla 3.1. Distribución de depósitos por región, según su estado de operaciones. Confeccionado con datos de Catastro de Relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

Región	Total Depósitos	Estado de Actividad			
		Activos	Inactivos	Abandonados	En Construcción
I	7	1	0	6	0
II	51	13	22	16	0
III	161	30	106	23	2
IV	385	32	247	106	0
V	78	14	53	11	0
RM	26	6	14	6	0
VI	19	3	15	1	0
VII	6	4	2	0	0
XI	9	1	4	4	0
NACIONAL	742	104	463	173	2



(a)



(b)

Figura 3.9. (a) Cantidad de depósitos en la comuna de Copiapó vs total de la región, (b) Depósitos de Copiapó vs total nacional. Basado en Catastro de depósitos de relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

El catastro mencionado (SERNAGEOMIN, 2019) considera cinco tipos de depósitos de relave: tranque, embalse, pasta, espesado y filtrado. En la Tabla 3.2 se puede observar el desglose por tipo de depósito, para la comuna de Copiapó.

Tabla 3.2 Detalle de tipos de depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. (SERNAGEOMIN, 2019).

Tipo de depósito	Cantidad
Tranque	59
Embalse	22
Pasta	1
Espesado	0
Filtrado	2
Total	84

Con respecto al estado de actividad, se tiene que, del total de depósitos, una gran cantidad de estos se encuentran inactivos o ya han sido abandonados, mientras que solo una pequeña porción está actualmente funcionando (Figura 3.10).

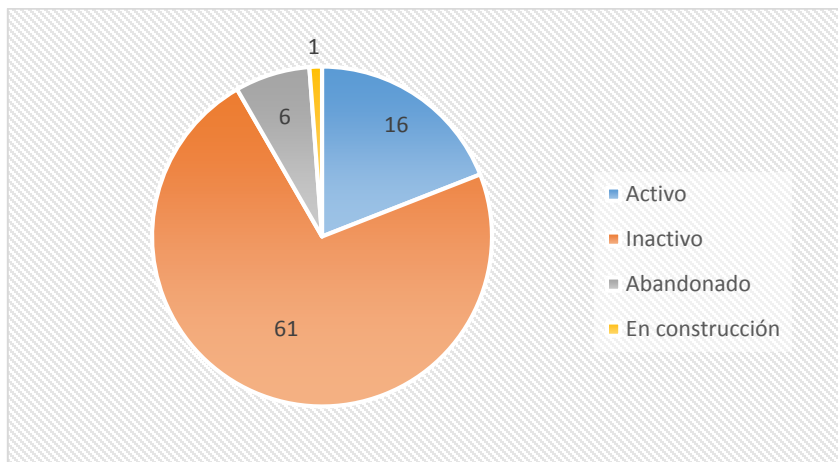


Figura 3.10. Detalle del estado de actividad de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. Basado en Catastro de depósitos de relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

4. Eventos de inestabilidad en depósitos de relaves

4.1. ¿Por qué fallan las presas de relaves?

Las dos causas principales de incidentes de presas de relaves son rebalse y fallas de estabilidad de taludes. Otros mecanismos de falla a largo plazo para presas de relaves incluyen daño acumulado (por ejemplo, erosión interna de la presa y eventos sísmicos múltiples), peligros geológicos (aluviones, deslizamientos de tierra, etc.), licuación inducida por carga estática y cambios en los patrones climáticos (ICOLD, 2001).

Diseñar tanto para el rebalse como para los terremotos requiere una predicción del evento hidrológico o sísmico más grande que la presa de relaves experimentará potencialmente durante su vida útil, y en cada uno de estos casos la duración requerida es casi siempre de perpetuidad. Los criterios de diseño más conservadores implicarían asumir la magnitud máxima de los eventos hidrológicos y sísmicos que podría experimentar una presa de relaves. Se necesitan mejores datos, mejores métodos de predicción y el uso de pautas conservadoras para asumir el peor evento probable para remediar estos problemas. Los períodos de tiempo de cuidado son muchos milenios, pero la recopilación de datos sísmicos existente a menudo se limita a décadas, en el mejor de los casos (NPS, 2015).

Los incidentes de la presa que afectan la estabilidad del muro, la cimentación y las categorías estructurales, se pueden atribuir en gran medida al diseño de ingeniería o fallas en la construcción. Las prácticas rigurosas de diseño y construcción, y la adopción de mayores márgenes de seguridad en los diseños, podrían abordar estas dificultades, pero las estadísticas de falla de presas de relaves indican que todavía hay problemas sin resolver. A pesar de una comprensión básica de los mecanismos que causan fallas en las presas de relaves y una recolección convincente de datos empíricos sobre el impacto de éstas, las presas de relaves han continuado fallando a un ritmo relativamente constante en las últimas cinco décadas.

Según Rico *et al.* (2008), son varias las características que hacen a los tranques de relaves más vulnerables que estructuras de retención de otros tipos, como son las presas de retención de agua. En concreto, ellos mencionan (1) terraplenes formados por rellenos colectados localmente (suelo, residuos gruesos, sobrecarga de operaciones mineras y relaves); (2) muros posteriormente levantados como material sólido acoplado con un severo incremento en el efluente (más escorrentía por precipitación); (3) falta de regulaciones sobre criterios de diseño específicos; (4) falta de los requisitos de estabilidad de la presa con respecto al monitoreo continuo y control durante el emplazamiento, construcción y operación; (5) alto costo de trabajos de mantenimiento para presas de relaves después del cierre de actividades mineras.

4.2. Antecedentes de fallas a nivel mundial

Azam y Li (2010) realizaron una recopilación y resumen a nivel mundial de las fallas ocurridas a tranques de relaves en los últimos 100 años, en donde analizaron una serie de estadísticas disponibles públicamente. Sus observaciones se resumen a continuación.

Entre las décadas de los '60s y '80s ocurrieron la mayor cantidad de eventos de falla, asociados a la demanda global de metales, minerales y materia prima post Segunda Guerra Mundial (Figura 4.1). Un detalle de la cantidad de minas por continente y el porcentaje que ha fallado se puede ver en la Figura 4.2, donde se puede diferenciar un predominio en los sectores de Norteamérica (36%), Europa (26%) y Sudamérica (19%) hasta el año 2000, descendiendo notablemente los eventos, posiblemente atribuible al desarrollo de mejores prácticas ingenieriles. Por otro lado, desde comienzos de siglo, la mayoría de los casos se han registrado en Europa y Asia, sumando más del 60%. Esto se debe principalmente al auge de la economía de China y su consecuente demanda de metales y recursos minerales, al igual que de Europa del Este después de la caída del comunismo.

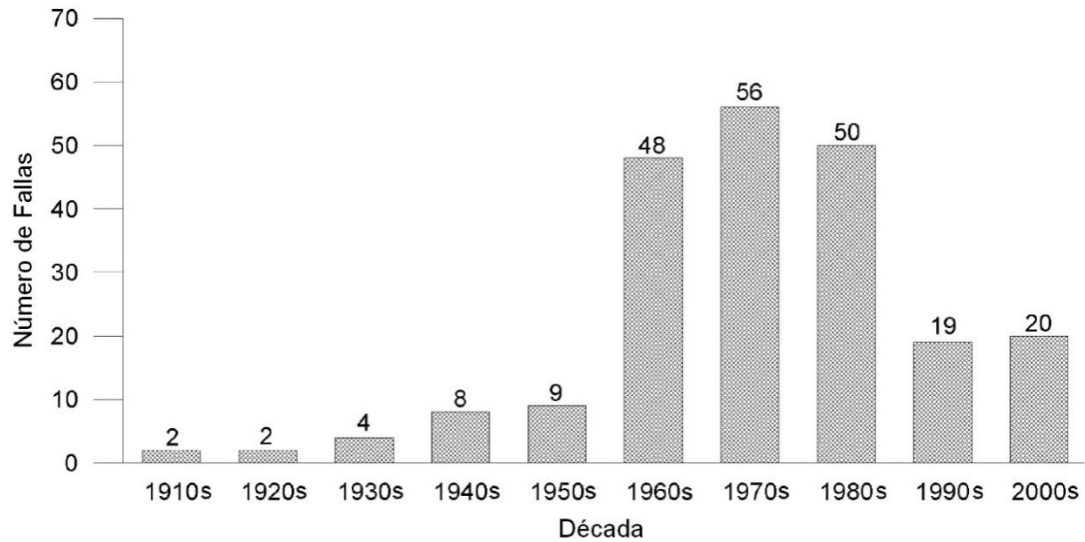


Figura 4.1. Eventos de falla mundiales a lo largo del tiempo. Los números sobre cada barra corresponden a la cantidad asociada a cada categoría. Modificado de Azam y Li (2010).

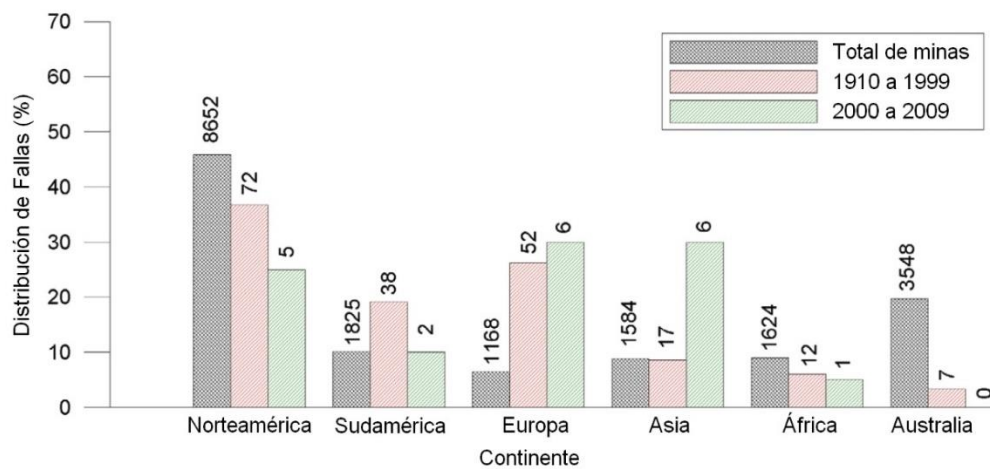


Figura 4.2. Distribución de fallas en tranques de relaves, por región a nivel mundial. Los números sobre cada barra corresponden a la cantidad asociada a cada categoría. Modificado de Azam y Li (2010).

La Figura 4.3 expone las causas principales que generan fallas en los tranques de relaves. La primera de éstas se debe a eventos atmosféricos que generan fenómenos climáticos poco frecuentes (tiempo inusual), principalmente lluvias intensas. Éstas pueden atribuirse a los cambios recientes en las condiciones climáticas que ha experimentado el planeta en las últimas décadas. El segundo motivo de falla de los tranques de relaves se debe a las malas gestiones de los tranques de relaves, donde se puede diferenciar entre procedimientos de construcción inadecuados del tranque, estructuras de drenaje deficientes, y programas inadecuados de monitoreo a largo plazo.

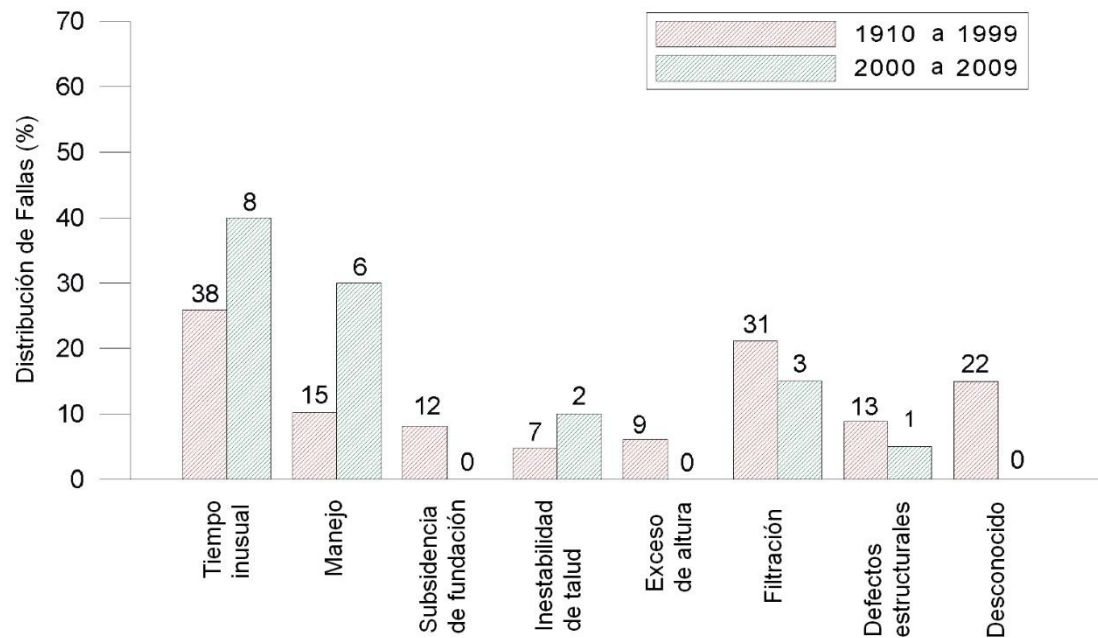


Figura 4.3. Distribución de fallas en tranques de relaves, identificadas por causas. Los números sobre cada barra corresponden a la cantidad asociada a cada categoría. Modificado de Azam y Li (2010).

Azam y Li (2010) identificaron que las alturas de los tranques de relaves que más comúnmente fallan son las que se encuentran hasta los 30 metros (Figura 4.4), debido posiblemente a que el material no consolidado con alta presión de poro en tranques de poca altura está aún desarrollando un cizalle adecuado para contrarrestar las fuerzas resistentes, especialmente en el caso de depósitos con el método de construcción aguas arriba (Vick, 1990). Por otra parte, considerando el volumen contenido, es posible ver en la Figura 4.5 que los tranques de tamaño pequeño a medio, con hasta $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de relaves son los que han presentado mayores problemas hasta el año 2000, condiciéndose con los datos relacionados a la altura. Sin embargo, se puede apreciar un incremento de los eventos relacionados a fallas de grandes tranques de relaves desde el año 2000, llegando hasta un 40% de los eventos registrados a nivel mundial.

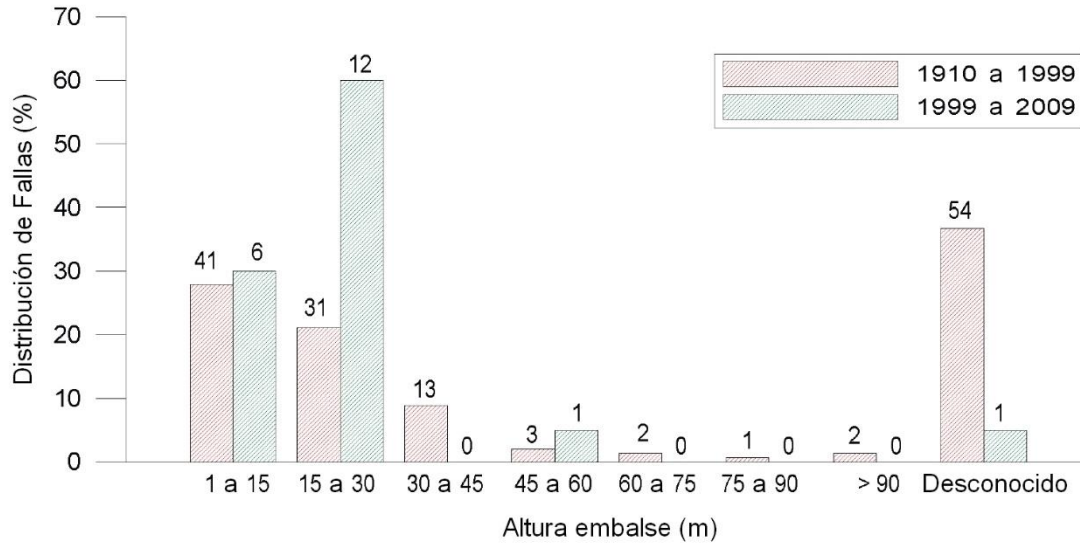


Figura 4.4. Distribución de fallas por altura del muro del embalse. Los números sobre cada barra corresponden a la cantidad asociada a cada categoría. Modificado de Azam y Li (2010).

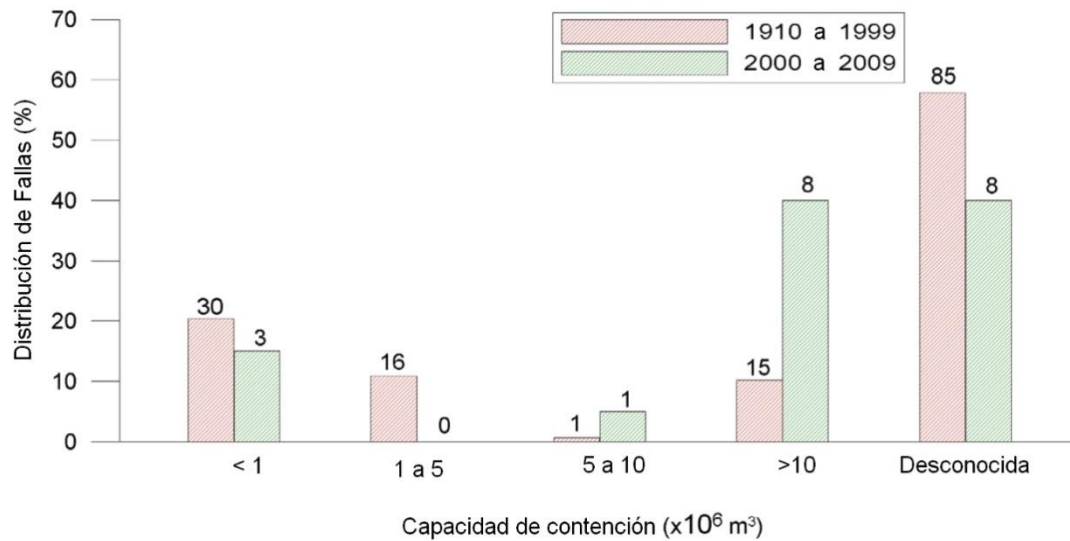


Figura 4.5. Distribución de fallas por capacidad de contención. Los números sobre cada barra corresponden a la cantidad asociada a cada categoría. Modificado de Azam y Li (2010).

4.3. Tipos de fallas o mecanismos generadores de inestabilidad física

Considerando lo anteriormente expuesto, y basándose además por lo dicho por diversos autores (Davies, 1966; Smith y Connell, 1982; Villavicencio *et al.*, 2014, entre otros), las fallas, mecanismos o incidentes más comunes que pueden llevar al colapso del muro y la posible liberación del material de un depósito de relaves pueden ser atribuidos a cargas de agua desfavorables en forma de:

- Rebalse (Overtopping)
- Deslizamiento
- Licuación
- Erosión interna (Piping)
- Erosión superficial

Algunos de los incidentes ocurrirán rápidamente con poca o nula advertencia (por ejemplo, licuación), mientras que en otros la estructura mostrará signos de peligro durante un período de tiempo significativo (desarrollo de cárcavas, agrietamiento, turbidez, etc). Si la operación de eliminación de relaves no ha finalizado (Davies, 1966), generalmente habrá tiempo disponible para proporcionar mantenimiento correctivo. Las combinaciones de estas cargas de agua e incidentes pueden ocurrir, y con frecuencia ocurren; por ejemplo, la erosión superficial puede conducir al piping, y un deslizamiento puede ser seguido por rebalse.

Rebalse (Overtopping)

Una de las causas más comunes de falla es el rebalse por inundaciones, causado por lluvias intensas. Debido a la gran susceptibilidad de materiales descohesionados a sufrir erosión, los diques de contención construidos de relaves gruesos nunca deben ser rebasados, o puede generarse una brecha y pérdida de los limos semilíquidos contenidos (Figura 4.6). Se deben tomar medidas para evitar grandes inundaciones alrededor de un embalse de relaves. Generalmente, el problema es de mayor importancia en los depósitos ubicados en valles, donde la desviación del río puede ser un factor crítico. Sin embargo, también se debe considerar el peligro de inundación y desbordamiento de los embalses de un depósito lateral.



Figura 4.6. Incidente de rebalse: (a) dique de retención y cuenca del embalse de relaves de arena; (b) fallo de flujo en sentido descendente (Villavicencio *et al.*, 2014).

Deslizamiento

El exceso de presión de poros puede reducir las tensiones efectivas dentro de los relaves y puede provocar una disminución de la resistencia al corte. Ésta podría causar problemas de inestabilidad de la pendiente de muchas variaciones desde el desprendimiento local de partículas en áreas aleatorias a lo largo de la cara de un terraplén hasta enormes deslizamientos de arco circular.

Villavicencio *et al.* (2014) indican que incluso en ausencia de presiones de poro en exceso suficientemente altas, las tensiones dinámicas (fuerzas inerciales sísmicas) todavía pueden dar lugar a inestabilidades en las pendientes, lo que compromete significativamente la integridad estructural y la estabilidad operacional de una presa de relaves. Esta inestabilidad puede ser generada por (i) pendientes cercanas o en su ángulo natural de reposo; (ii) variaciones en la posición del nivel freático en relación con el valor del diseño; (iii) presencia de una capa de baja resistencia en el dique de retención y (iv) disminución de la resistencia al corte del suelo de la cimentación, o geometría inadecuada del dique de retención.

Las observaciones han permitido la identificación de diversas superficies de falla que tienen una forma semicircular o una morfología de cuña (Figuras. 4.7 (a) y 4.7 (b), respectivamente). De acuerdo con los estudios realizados por Troncoso (1997), los mecanismos de falla en los diques de arena de relaves construidos usando los métodos aguas arriba y de línea central generalmente desarrollan superficies de falla de tipo cuña deslizante.



Figura 4.7. Inestabilidad de la pendiente: (a) superficie de falla de tipo circular; (b) deslizamiento de taludes generados en el momento de un evento sísmico (Villavicencio *et al.*, 2014).

Licuación

La licuación es un fenómeno que puede ocurrir en los depósitos de relave en donde el material suelto, saturado y de grano fino está sujeto a un gran aumento de la presión del agua intersticial debido a la falta de drenaje, lo que provoca la pérdida de estrés efectivo. Debido a su naturaleza a menudo catastrófica, la mayoría de los fallos de depósito de relaves que han recibido publicidad han sido los resultantes de la licuación. Tales fallas ocurren instantáneamente sin advertencia. Pueden desencadenarse por vibraciones sísmicas u otras vibraciones, propagación de cimientos o alguna forma de colapso del dique.

Según Villavicencio *et al.* (2014), durante los eventos sísmicos, se ha demostrado que los diques de arena de relaves son muy susceptibles a la licuación sísmica, específicamente los fenómenos llamados falla de flujo o licuación verdadera (Verdugo, 2005). Tales fallas usualmente son el resultado de la generación de presiones de poro excesivas durante los eventos sísmicos. Este exceso de presión de poros no se puede disipar lo suficientemente rápido como para evitar que las condiciones de carga sin drenar prevalezcan. La presión efectiva de confinamiento puede reducirse a cero, o cerca de cero, y la resistencia al corte de los relaves sin cohesión se aproxima a cero. Este tipo de falla se caracteriza por el corto período de tiempo que lleva, unos pocos minutos, y por las grandes deformaciones de la masa de los relaves.

Con respecto a los casos de presas de relaves de arena chilenas, los análisis permiten la identificación de los siguientes factores contribuyentes (Troncoso 1997; Blight *et al.* 2000; Verdugo 2011): (i) presencia de agua que causa un rápido aumento de las presiones del agua de los poros durante la aplicación de cargas sísmicas; (ii) baja densidad de arena de relaves utilizada para la construcción del dique de retención; (iii) alto contenido de limo en los diques de retención y (iv) el método de construcción aguas arriba creó fallas debido a la licuación del material debajo del dique de retención.

Erosión interna (Piping)

La erosión interna, piping o tubificación, corresponde al arrastre de material fino a lo largo de una vía de filtración, a través o bajo un depósito, formando una red de microtubos, permitiendo el flujo constante a través de ellos (Figura 4.8). La tubificación se puede generar a partir de filtraciones existentes en la cara de un depósito, con suficiente velocidad para causar la erosión interna. Los espacios resultantes vaciados promueven la progresiva erosión desde aguas arriba, en el peor de los casos la filtración puede dar resultado a la creación de un canal directo desde la cubeta a la cara de la presa (Palma, 2016).

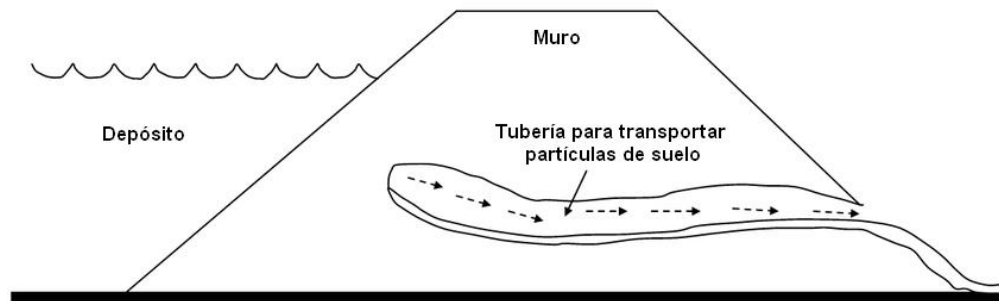


Figura 4.8. Vista esquemática del proceso de erosión interna (piping) en el muro de una presa. Modificado de Goodarzi *et al.* (2010).

Erosión superficial por agua

La pérdida de material de superficie debido a la lluvia directa o al flujo de agua superficial puede provocar una falla o incidente por erosión. En áreas de fuertes lluvias, generalmente se requiere alguna forma de protección contra la erosión. Como una sola tormenta rara vez causa un daño importante, generalmente se considera que el problema es de mantenimiento; sin embargo, si se descuida el mantenimiento, los efectos acumulativos de la erosión intermitente pueden producir una falla. Un caso excepcional es cuando un depósito se encuentra en el paso de un flujo aluvial, como el ocurrido en marzo del año 2015 en la zona norte del país, en donde se puede generar erosión muy marcada con transporte de material parcial o total, como se puede apreciar en la Figura 4.9.



Figura 4.9. Erosión causada por el aluvión de marzo 2015 en la comuna de Copiapó. Depósito inactivo Ojancos de minera Sali Hochschild (Medvinsky-Roa *et al.*, 2016).

Erosión eólica

En adición a los tipos de falla antes mencionados, se puede incluir dentro de estos la inestabilidad generada por la acción erosiva del viento sobre el muro de un depósito de relaves. Si bien el proceso es marcadamente más lento y remediable, es posible que frente a la acción continua del viento se pueda generar cárcavas, las cuales podrían causar deslizamientos en el muro de contención debido a la pérdida de cohesión de las partículas ubicadas inmediatamente sobre el área afectada por la erosión. En el año 2003 se detectó en la comuna de Copiapó, específicamente en el depósito activo Planta Matta perteneciente a ENAMI, el deterioro del muro de contención por su sector suroeste (Figura 4.10). La situación fue remediada a la actualidad, evitando posibles efectos posteriores.



(a)



(b)

Figura 4.10. (a) Planta Matta (ENAMI), en ladera este de la quebrada Paipote. Depósito activo, el cual presentaba en el año 2003 erosión eólica en su cara suroeste (circunferencia roja). Imagen obtenida de Google Earth. (b) Profundidad de los surcos originados por la erosión eólica en muro de depósito de relaves de Planta Matta (Bialostocki y Salinas, 2003).

5. Metodología para la evaluación de susceptibilidad

5.1. Introducción

En este capítulo se expondrá la metodología para estimar la susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas de muros de depósitos de relaves, la que consiste en los siguientes pasos principales:

- Considerando los cinco mecanismos generadores de inestabilidades físicas y de erosión en los depósitos de relaves (Subcapítulo 4.3), se determinan los factores condicionantes que influyen en la generación de cada uno de estos. Se diferencian entre factores geotécnicos, geométricos, geográficos, climáticos e hidrogeológicos, cada uno de estos regidos por diferentes parámetros. Se identifica la importancia relativa entre estos parámetros en la generación de los procesos, para el siguiente paso.
- Luego, se elaboran matrices de susceptibilidad para cada uno de los 5 mecanismos, basadas en los factores condicionantes previamente identificados, y sus respectivos parámetros. Para ello se seleccionan solo los parámetros relevantes en la generación de los procesos, y se determinan los rangos de valores en los cuales la susceptibilidad de generar el mecanismo analizado es mayor. Así, se definen de dos a tres rangos para cada parámetro, asignándoseles puntajes a cada uno de estos.
- Finalmente, se define el Índice de Susceptibilidad (IS), como el resultado obtenido al sumar los puntajes asociados al valor de cada parámetro evaluado en el depósito de relaves; los valores de IS se encuentran entre 30 y 100. La susceptibilidad para cada mecanismo viene dada por el rango entre el cual se encuentre el IS, así, se tendrá susceptibilidad baja (30-49), media (50-69) y alta (70-100).

A continuación, se expondrá en detalle cada uno de los pasos antes mencionados.

5.2. Factores condicionantes de falla en depósitos de relaves

Se denomina factor condicionante a todo aquel que pueda aportar o generar una situación potencialmente peligrosa, y que por lo tanto controla la susceptibilidad de generar algún tipo de falla, ya sea de liberación o movilización de material en los depósitos de relaves. Cada uno de dichos tipos presenta génesis y dinámica distintas; así, habrá factores con mayor influencia que otros dependiendo del mecanismo a estudiar.

Los factores condicionantes que afectan a la estabilidad física de los depósitos de relaves se pueden reunir en los siguientes 5 grandes grupos, expuestos en la Figura 5.1.

Factores Condicionantes

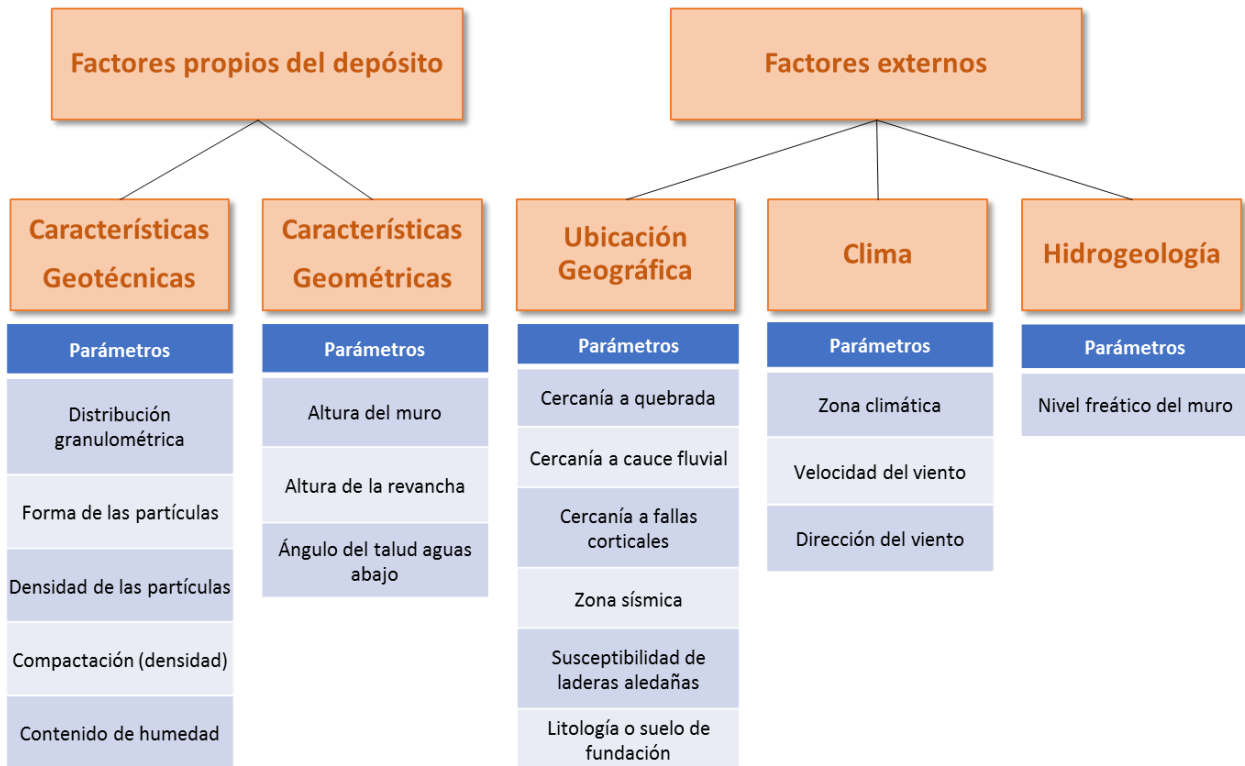


Figura 5.1. Factores condicionantes considerados en el presente estudio. Elaboración propia.

Si bien existen más parámetros que podrían ser considerados, los anteriormente expuestos corresponden a los que tienen mayor reconocimiento en la literatura como los influyentes en los mecanismos de inestabilidad abordados por esta metodología, como puede verse en Dobry y Álvarez (1967), Castro y Troncoso (1989), Troncoso (2002), Bray y Sancio (2006), Blight (2007), Sun *et al.* (2012), Villavicencio *et al.* (2014), Igwe y Fukuoka (2014); entre otros.

A continuación, se detallará en qué consiste cada uno de estos parámetros para los diferentes factores condicionantes, para evidenciar la relevancia que poseen dentro del análisis de susceptibilidad de este trabajo, ya sea por colapso del muro en el caso de los depósitos de relaves que cuenten con ello, o en los depósitos abandonados.

5.2.1. Características geotécnicas del muro

Las características geotécnicas del depósito jugarán un papel fundamental en la estabilidad del depósito de relaves, ya sea en su muro, de particular interés para depósitos activos, o en los relaves contenidos, para depósitos inactivos o abandonados. En esta sección se considerarán la distribución

granulométrica, la forma y densidad de las partículas, el grado de compactación y el contenido de humedad.

Distribución granulométrica

Este parámetro hace referencia a las diferencias apreciables entre los distintos tamaños que pueden tener los granos que conforman un depósito de relaves. En general, los muros de estos depósitos se construyen con una granulometría tamaño arena, con un porcentaje de finos (bajo malla 200) inferior al 20%, según lo solicitado por el Decreto Supremo 248 (Ministerio de Minería, 2007). Por otro lado, para el caso de los relaves, la dimensión de las partículas varía dependiendo de los procesos que se realicen durante el proceso extractivo, teniéndose una combinación típicamente del tamaño del limo, en el rango de 0,001 a 0,6 mm (The Mining Association of Canada, 2017). La distribución granulométrica afectará a diferentes tipos de fallas analizadas en este estudio, en concreto a la licuación, erosión por agua y erosión eólica.

En el caso de la licuación, el proceso desencadenado por un sismo se vería potenciado por una menor presencia de finos: según González de Vallejo *et al.* (2002), esto ocurre si el depósito tiene predominio de granos tamaño arena, con menos de un 10% de finos.

Analizando el diagrama de Hjulström-Sundborg (Figura 5.2), en el caso de la erosión por agua, se tiene que las partículas tamaño arena son más susceptibles a ser erosionadas a bajas velocidades del flujo que esté actuando en el proceso.

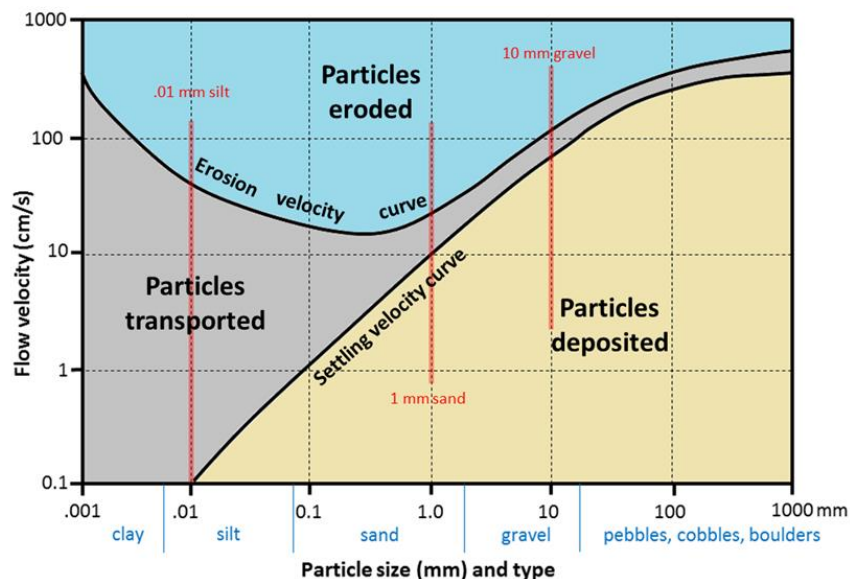


Figura 5.2. El diagrama de Hjulström-Sundborg muestra la relación entre el tamaño de partícula y su tendencia a ser erodado, transportado o depositado por flujos de agua a diferentes velocidades de corriente (Earle, 2019).

Para la erosión causada por el viento, en la Figura 5.3 se puede apreciar que incluso a bajas velocidades de este agente de transporte, el tamaño de grano afectado se encuentra dentro de un amplio rango, incluyendo a granos de limo, arcilla y arena.

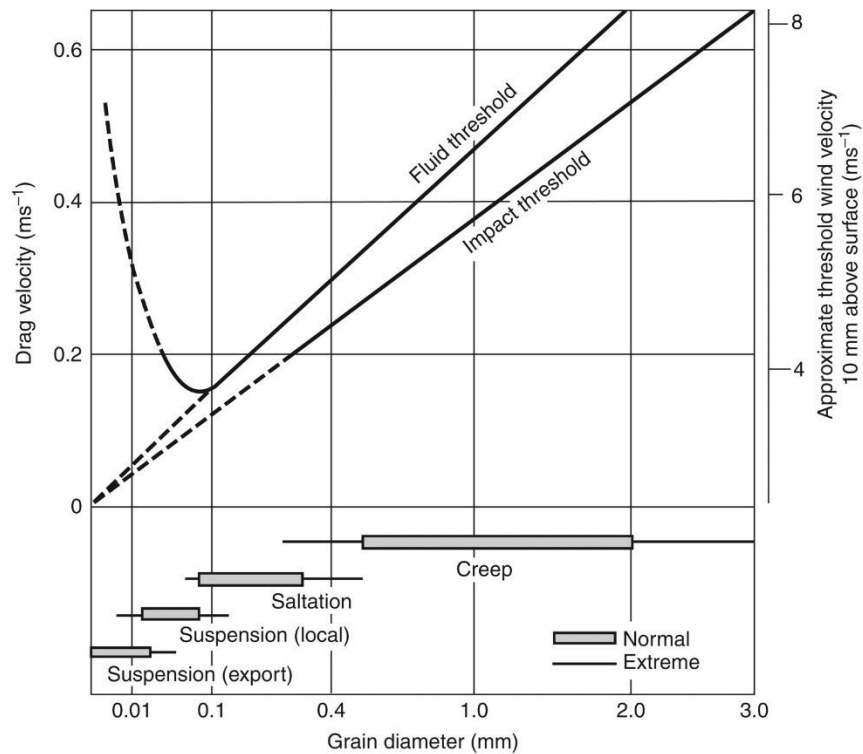


Figura 5.3. Velocidad del viento necesaria para movilizar diferentes tamaños de partículas, considerando distintos mecanismos de transporte: suspensión, saltación y arrastre (Walker, 2012).

Forma de las partículas

Las partículas pueden caracterizarse por dos aspectos texturales visibles a simple vista: la angularidad de sus cantos (redondez), y la razón entre sus tres dimensiones (esfericidad). Marot *et al.* (2012) determinaron la influencia de la angularidad de la fracción gruesa de un depósito sedimentario en los procesos de erosión, determinando que, a menor redondez, menor será el efecto erosivo de un flujo. Por otro lado, un grano con formas más irregulares, es decir, con baja esfericidad, es más propenso a trabarse y será más difícil de ser transportado por un flujo (Willets, 1983). Es importante indicar que este parámetro se considerará para los tipos de falla generados por erosión por agua y erosión eólica.

Densidad de las partículas

La densidad de las partículas juega un papel fundamental en el transporte que éstas puedan sufrir por agentes como el viento o el agua: una menor densidad facilitará el efecto que estos producirían en el proceso erosivo, aunque el efecto es más marcado a menores velocidades de transporte del

viento (Willetts, 1983). Considerando lo anterior, es importante indicar que este parámetro se considerará para los tipos de falla generados por erosión por agua y erosión eólica.

Grado de compactación

El grado de compactación de una presa condicionará su respuesta frente a diferentes fenómenos analizados en este estudio, como licuación, deslizamiento o rebalse. No existen valores exigidos dentro de la legislación chilena acerca de cuanto es el grado óptimo por alcanzar, como por ejemplo en el Decreto 248 (MOP, 2007) relacionado con la aprobación de proyectos de diseño, construcción operación y cierre de depósitos de relaves. Sin embargo, según Villavicencio *et al.* (2011): “aunque la normativa no lo establece, la práctica ingenieril considera como aceptable un grado de compactación igual o superior al 95% OPN (Proctor Estándar Óptimo), en estructuras o rellenos donde es posible aceptar cierto nivel de deformaciones, como es el caso de tranques de relave”.

Contenido de humedad

La humedad puede condicionar la respuesta del material del depósito, debido a la presión de poro que ésta puede generar entre los granos. Es por ello que mientras mayor sea el contenido de humedad, aumenta la susceptibilidad de licuación, deslizamiento, y erosión por agua. Caso contrario sucede con la susceptibilidad por erosión eólica, en donde a menor contenido de humedad, el proceso erosivo se ve favorecido: modelos para ver la influencia de la humedad en general consideran contenidos menores al 8% (Namikas y Sherman, 1995; Ellis y Sherman, 2013).

5.2.2. Características geométricas de la presa

Las características geométricas del depósito se centrarán en tres aspectos principales, ya sea en su muro, de particular interés para depósitos activos, o en los relaves contenidos en depósitos inactivos o abandonados: la altura del muro, o de la denominada “torta” (relaves secos y sin aporte de nuevo de material), el ángulo de reposo del muro o de la “torta” y la revancha del muro en el caso de depósitos activos (diferencia de cota entre el nivel de aguas claras y el coronamiento del muro).

Altura del muro

La altura que puede alcanzar el muro de un depósito de relaves afectará la susceptibilidad de este frente a diferentes tipos de falla, particularmente deslizamiento, licuación y erosión eólica.

Por un lado, si aumenta la altura de la presa de relaves, esto podría generar una elevación en el nivel freático, con la consecuente disminución en la estabilidad del muro (Liu *et al.*, 2018), generando mayor susceptibilidad frente al deslizamiento o licuación de éste.

Por otro lado, la erosión eólica podría verse favorecida con alturas mayores del muro, si se tiene en cuenta que el viento se comporta de manera erosiva al alcanzar cierta velocidad y se encuentra

con obstáculos, y que la velocidad media que puede alcanzar éste aumenta exponencialmente con la altura (Espinace *et al.*, 2006), como se puede ver en la Figura 5.4. Quiere decir que a medida que la altura del muro del depósito de relaves sea mayor, la velocidad del viento que lo afectará será mayor y, consecuentemente, la acción erosiva de este sobre el muro irá aumentando.

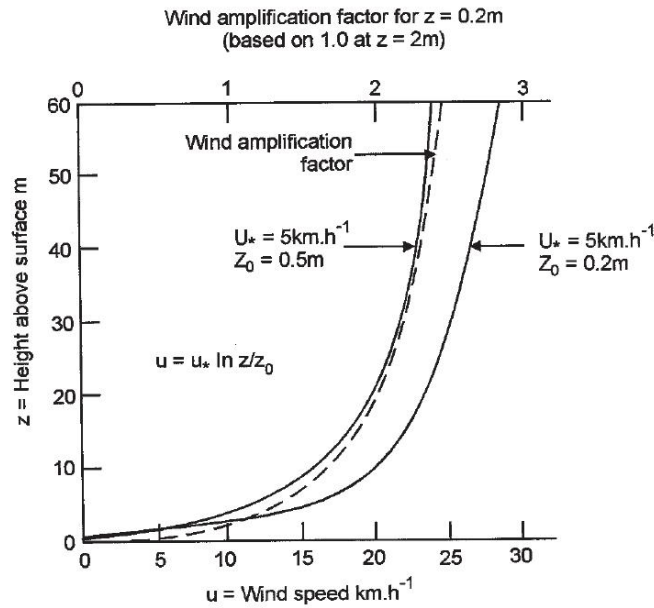


Figura 5.4. Variación de la velocidad del viento con la altura (Blight, 2007).

Se seleccionaron rangos de altura basándose en el Decreto 50 del Ministerio de Obras Públicas (MOP, 2015), el cual clasifica a los embalses o tranques de relaves en 3 categorías, como se detalla a continuación:

- a) Categoría A: Pequeños, de altura de muro máxima mayor a 5 m e inferior a 15 m, o bien de capacidad superior a 50.000 m³ e inferior a 1.500.000 m³.
- b) Categoría B: Medianos, de altura de muro máxima mayor o igual a 15 m e inferior a 30 m, o bien de capacidad igual o superior a 1.500.000 m³ e inferior a 60.000.000 m³.
- c) Categoría C: Grandes, de altura máxima de muro igual o superior a 30 m, o bien de capacidad igual o superior a 60.000.000 m³.

Finalmente, existe una consideración con respecto a la altura relacionada a la revancha de los depósitos de relaves activos (distancia entre el nivel de aguas claras del depósito y el coronamiento o punto más alto del muro), puesto que éste tendrá especial significancia al analizar la falla por rebalse: una altura menor a la norma podría significar que de existir eventos de oleaje debido a una remoción en masa, vientos intensos o aumento repentino del nivel de los relaves debido a lluvias intensas, podría verse superado el muro y generar el mencionado rebalse.

Ángulo del talud aguas abajo

El ángulo de talud afectará a la estabilidad de los depósitos de relaves. En particular, y considerando el ángulo de descanso natural de los materiales utilizados para la construcción del muro, dominados por la granulometría de arena, se tiene que los ángulos de estabilidad están entre el rango de los 34-40° para arena bien graduada con compactación media o medianamente densa (Tabla 5.1). Dicho ángulo condicionará la estabilidad del muro frente a fallas por deslizamiento y licuación.

Tabla 5.1. Valores del ángulo de rozamiento interno en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y la compacidad (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Tipo de suelo	Ángulo de rozamiento interno (ϕ) en función de la compactación del material		
	Flojo	Medianamente denso	Denso
Limo no plástico	26-30	28-32	30-34
Arena uniforme fina a media	26-30	30-34	32-36
Arena bien graduada	30-34	34-40	38-46
Mezclas de arena y grava	32-36	36-42	40-48

Considerando ahora la erosión eólica que puede sufrir el muro, en la Figura 5.5 se puede apreciar cómo las tasas de erosión aumentan con ángulos de pendiente dentro de los 30-35° y son bajas tanto con ángulos de pendiente muy planos como muy inclinados.

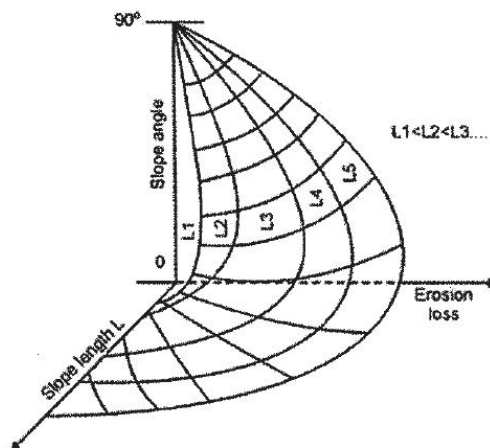


Figura 5.5. Superficies de tasa de erosión, que relaciona el largo del talud y su ángulo con la pérdida por erosión y rugosidad (Blight, 2007).

El "vientre" de la tasa de erosión, apreciable en la figura anterior, "apunta" en ángulos de pendiente intermedios, los cuales representan el rango que se utiliza normalmente para las presas de relaves (25° a 35°), siendo los peores ángulos de pendiente posibles para las pérdidas por erosión.

5.2.3. Ubicación del muro de contención o de los relaves

La ubicación geográfica del muro de contención en el caso de los depósitos activos, o de los relaves inactivos y abandonados es importante, debido a que pueden favorecerse condiciones ambientales que afecten la estabilidad del muro. Es así, como se considera la proximidad del depósito de relaves a quebradas, cauces fluviales y fallas corticales. Adicionalmente, la zona sísmica según la NCh433 (INN, 2009), será un parámetro importante por considerar, debido a la influencia de esta en las aceleraciones efectivas que pueda experimentar el depósito de relaves frente a un sismo, ya sea cortical o de subducción.

Cercanía a quebrada y cercanía a cauce fluvial

La ubicación de un depósito de relaves será un factor condicionante al momento de evaluar su susceptibilidad. Un depósito ubicado dentro de una quebrada captará las aguas provenientes de estas durante los eventos de lluvia que pueda haber. Una consideración análoga puede hacerse con respecto a la distancia a la que se encuentre un depósito de un cauce de aguas, y de si se emplaza en una planicie de inundación o sobre una terraza fluvial. En el primer caso, de manera natural frente a una crecida del río se espera que el agua invada el sector donde se encuentren los relaves, mientras que dependiendo de la fuerza erosiva con que cuente el río, en el segundo se puede generar un derrumbe en la terraza fluvial. Por lo anterior, para ambos parámetros se considerarán los rangos: en quebrada/cauce fluvial, o fuera de estos.

Cercanía a fallas corticales

La proximidad a fallas geológicas corticales también es significativa al momento de evaluar la susceptibilidad, puesto que un sismo experimenta atenuaciones de su aceleración a medida que se incrementa la distancia a la traza de la falla.

Ambraseys y Douglas (2003), seleccionaron 186 registros de campo libre principalmente de movimiento fuerte triaxial de 42 terremotos que siguen la definición de campo libre entregada por Joyner y Boore (1981), utilizando el criterio de una magnitud M_s mayor a 5.8 y de profundidad menor o igual a 20 km y una distancia más cercana a la fuente ≤ 15 km. El modelo utilizado tiene la siguiente forma:

$$\log(y) = b_1 + b_2M_s + b_3d + b_A S_A + b_S S_S \quad (1)$$

Donde $b_1 = 0.659$, $b_2 = 0.202$, $b_3 = 0.0238$, $b_A = 0.020$ y $b_S = 0.029$. M_s es la magnitud superficial, d es la distancia a la proyección en superficie del plano de ruptura. S_A y S_S toman valores de 0 y 1 dependiendo del material del terreno, tomando el valor de 0 para roca. Reemplazando los valores, la ecuación general de atenuación, asumiendo un suelo tipo roca, sería la siguiente:

$$\log(y) = -0.659 + 0.202M_s - 0.0238d \quad (2)$$

En función de la gravedad g , se determina la aceleración sísmica horizontal máxima (*Peak Ground Acceleration*, PGA):

$$PGA = \frac{10^{-0.659+0.202M_W-0.0238d}}{g} \quad (3)$$

En la ecuación (2), la magnitud utilizada es la magnitud superficial (M_S), y la magnitud calculada en (3) corresponde a la magnitud de momento (M_W). Esta última, corresponde a una medida más confiable con respecto a la energía liberada durante un sismo. La magnitud superficial puede ser comparada con la magnitud de momento. Kanamori (1983) observó que los valores de M_S se aproximan a la curva de M_W entre magnitudes de 6 y 8. Otras comparaciones, como la de Zangeneh *et al.* (2013) muestra que las curvas no son tan similares, y observa que M_S toma valores inferiores a M en el rango aproximado de 7.5 a 8.

A partir del gráfico de la Figura 5.6, se puede estimar M_S a partir de M_W . En particular, para este estudio se eligieron los casos de $M_W = 7$ y 8 como se muestra en las líneas roja y azul, donde se obtiene que M_S toma el valor de 7 y 8.1, respectivamente.

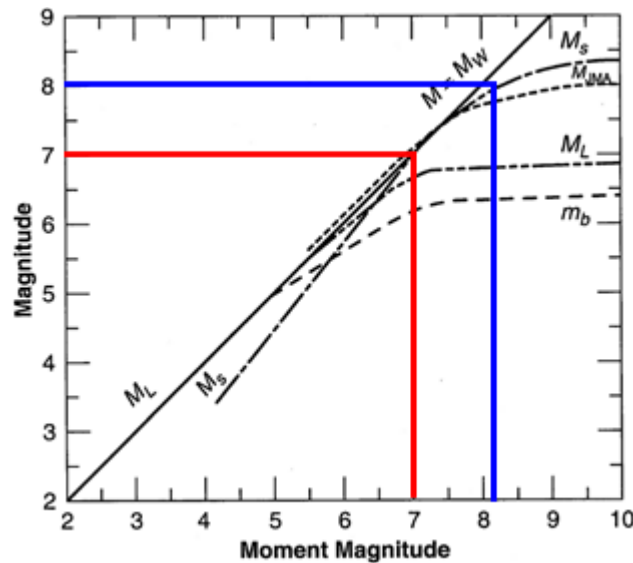


Figura 5.6. Comparación de las escalas de magnitud. Las líneas rojas corresponden a la intersección de un sismo M_W 7 con la recta $M = M_W$ y las azules, a uno de 8 (Zangeneh *et al.*, 2013).

Con lo anterior, y además considerando un PGA de 0.4 en este estudio ($A_0 = 0.4$ g, explicado en la sección siguiente relacionada a la aceleración efectiva), al reemplazar estos valores en la ecuación (3) se tiene como distancia de influencia un valor cercano a 7 km considerando un sismo con M_W de 7, de 7 a 15 km como una distancia media, tomando un sismo de M_W igual a 8, y mayor a 15 km como áreas de baja influencia, debido a la atenuación de las aceleraciones a estas distancias con respecto a los sismos de M_W 7 y 8.

Aceleración efectiva

Según la Norma Chilena 433 diseñada por el Instituto Nacional de Normalización (2009), se divide el territorio nacional en 3 zonas sísmicas, cada una de las cuales estará caracterizada por una aceleración efectiva A_0 , como se detalla en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valor de la aceleración efectiva A_0 (INN, 2009)

Zona sísmica	A_0
1	0,20 g
2	0,30 g
3	0,40g

Al momento de evaluar en este trabajo la susceptibilidad de los depósitos de relaves de la comuna de Copiapó, es necesario destacar que estos siempre se encontrarán en la zona 3, correspondiente al sector con mayores aceleraciones efectivas, como puede apreciarse en la Figura 5.7.

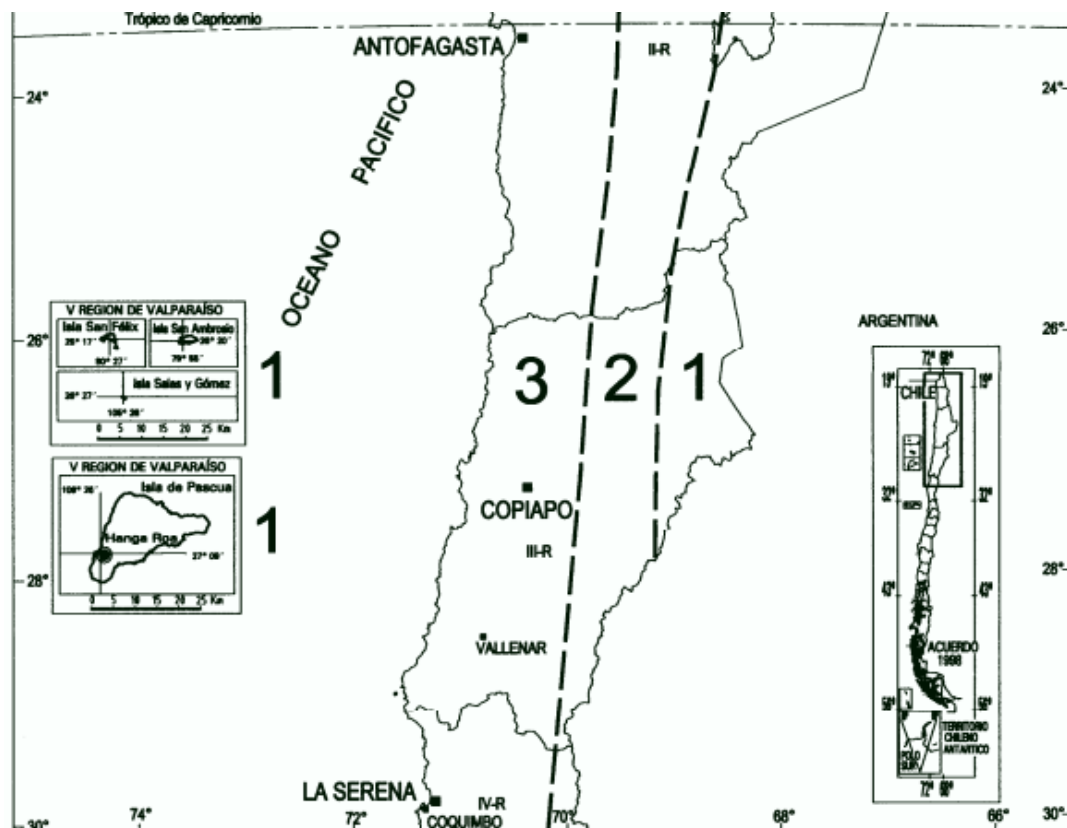


Figura 5.7. Zonificación sísmica de la III Región. Modificado de INN (2009).

Susceptibilidad de remoción en masa en laderas aledañas

Si bien no es un factor condicionante directo, la inestabilidad de laderas en las cuales se encuentre un depósito de relaves podría ocasionar una remoción en masa, afectando directamente al muro o generando un evento de oleaje no previsto inicialmente. En este último caso, ocurriría un aumento súbito del nivel de los relaves en la cubeta del depósito, al existir olas mayores a la altura crítica con que fue diseñada la revancha del muro del depósito. La susceptibilidad de laderas será considerada de manera general, basado en el análisis de susceptibilidad de laderas propuesto por Lara (2007).

Litología desfavorable

Una consideración importante para tomar en cuenta al momento de evaluar la estabilidad física de un depósito de relaves, ya sea en su muro o en los relaves, reside en el suelo de fundación de éste, debido a que podría actuar como amplificador de aceleraciones generadas por un sismo. Si bien puede parecer básica esta observación, Mujica *et al.* (2014) exponen antecedentes de depósitos de relaves que han colapsado debido exactamente a este motivo, como los tranques Ramayana en Olmué, El Sauce en Cabildo y Bellavista en San Felipe, entre otros. Por lo anterior, se ha considerado pertinente incluirlo dentro de los factores condicionantes, aunque de manera muy general y diferenciando entre litologías favorables (rocas competentes), las cuales solo transmiten, pero no amplifican las ondas sísmicas; y desfavorables (suelos, principalmente), que tendrían el efecto inverso, pudiendo amplificar las ondas sísmicas.

5.2.4. Clima

El clima juega un papel importante debido a la posibilidad de generar eventos de lluvia o vientos intensos, capaces de desencadenar fenómenos hidrometeorológicos extremos. Dentro de los factores condicionantes relacionados con el clima, se encuentra la zona climática en la cual se encuentre el depósito de relaves, y la velocidad y dirección del viento.

Zona climática

La zona climática en la cual se encuentre el depósito de relaves estudiado influirá en diversos factores tanto condicionantes como desencadenantes, puesto que controlará la cantidad y duración de precipitaciones, el grado de saturación del suelo y el nivel freático, la velocidad e intensidad del viento, entre otros factores. Es por ello que en este estudio se realiza una separación general de las zonas climáticas de Chile considerando diferentes latitudes (Tabla 5.3), y basados en promedios históricos de precipitaciones. La simplificación es utilizada como una primera aproximación; sin embargo, se sugiere que, para futuros estudios, este parámetro sea considerado con mayor detalle para asegurar una mejor caracterización.

Tabla 5.3. Simplificación de las zonas climáticas de Chile y sus principales características. Elaboración propia.

Zona	Regiones	Características
Norte / Árida	Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama	Muy bajas precipitaciones, salvo los meses de Invierno Boliviano. Vientos con alto poder erosivo.
Centro / Templado	Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule	Precipitaciones moderadas a bajas, baja velocidad del viento
Sur / Lluvioso	Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos, Aysén, Magallanes	Precipitaciones intensas durante todo el año. Viento con bajo poder erosivo

Velocidad y dirección del viento

El viento como agente erosivo es un factor condicionante para considerar en los análisis de estabilidad. Dependiendo de la velocidad e intensidad que posea, es capaz de realizar incisiones o cárcavas en los muros de un depósito de relaves, condicionando su firmeza. La dirección y el ángulo con el cual el viento actúa en el muro también es influyente: si el viento incide de manera perpendicular al muro del depósito, la erosión tiende a ser menor, y a medida que se aumenta el ángulo, la acción erosiva se incrementa (USDA, [s.a]).

5.2.5. Hidrogeología

Nivel freático del muro o depósito

El nivel freático influye en la incorporación de agua en suelos y macizos rocosos (Lara, 2007). El agua es un elemento condicionante de la estabilidad en taludes tanto directa como indirectamente, jugando un papel negativo debido a que genera presiones intersticiales que reducen la resistencia, aumentan los esfuerzos de corte por el incremento de peso del terreno, creando fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades (González de Vallejo *et al.* en Muñoz, 2013). González de Vallejo *et al.* (2002) sugieren que, con niveles freáticos de menos de 3 metros de profundidad, la susceptibilidad de generar efectos negativos en el material es mayor, y desde los 5 metros de profundidad el efecto es mucho menos importante en la estabilidad.

5.3. Obtención de parámetros

La Tabla 5.4 muestra los rangos generales manejados para cada uno de los parámetros mencionados en los subcapítulos 5.2.1 a 5.2.5, utilizados en esta metodología, además de una sugerencia para la obtención de estos. Para mayor detalle, consultar cada Matriz de Susceptibilidad (Tablas 5.6 a 5.10).

Tabla 5.4. Rangos de los diversos parámetros considerados en las matrices de susceptibilidad y sugerencias para su obtención. Esta información es de carácter referencial, y debe verse con más detalle en las Tablas 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10.

Factores condicionantes	Parámetros	Rangos considerados (susceptibilidad)			Sugerencia de obtención
		Baja	Media	Alta	
Características geotécnicas de la presa	Distribución granulométrica	Grava	Arena	Limo/arcilla	Tamizaje de muestra
	Forma de las partículas	Angulosa	Subangulosa a subredondeada	Redondeada	Análisis con lupa
	Densidad de las partículas	>2.8 g/cm ³	2.5-2.8 g/cm ³	<2.5 g/cm ³	Ensayo de densidad
	Grado de compactación	>95% OPN	90-95% OPN	<90% OPN	Ensayo de compactación Proctor Estándar
	Grado de saturación	<20% de agua en poros	20-80% de agua en poros	>80% de agua en poros	% de humedad mediante método gravimétrico
Características geométricas de la presa	Altura del muro	<15 m	15-30 m	>30 m	Análisis DEM o medición <i>in situ</i>
	Altura de la revancha	>5 m	2-5 m	<2 m	Análisis DEM o medición <i>in situ</i>
	Ángulo de talud aguas abajo	<32°	32°-36°	>36°	Análisis DEM o medición <i>in situ</i>
Ubicación del muro o depósito	Cercanía a fallas corticales	>15 km	7-15 km	<7 km	Imágenes satelitales
	Cercanía a quebradas	Fuera de la quebrada	Dentro de la quebrada		Imágenes satelitales
	Cercanía a cauce fluvial	Fuera del cauce fluvial	Dentro del cauce fluvial		Imágenes satelitales
	Zona sísmica por NCh433	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Imágenes satelitales
	Susceptibilidad de laderas aledañas	Baja	Media	Alta	Metodología Lara (2007)
	Litología desfavorable	Favorable	Desfavorable		Carta Geológica
Clima	Zona climática	Árida	Templada	Lluviosa	Carta Geológica
	Velocidad del viento	<1 m/s	1-6 m/s	>6 m/s	Dirección meteorológica
	Dirección del viento	Desfavorable	Favorable		Dirección meteorológica
Hidrogeología	Nivel freático	>5 m	3-5 m	<3 m	Medición <i>in situ</i>

5.4. Factores desencadenantes de falla en depósitos de relaves

Existen factores que modifican la estabilidad y contención de los depósitos de relaves y desencadenan la ocurrencia de un evento en donde se libere parte o la totalidad de su material, conocidos como factores desencadenantes. Entre los más comunes se cuentan las lluvias de gran intensidad y los sismos; también puede considerarse, aunque con menor relevancia, el efecto de vientos intensos.

Lluvia

Las lluvias como factor desencadenante están relacionadas con su intensidad, duración y distribución (González de Vallejo *et al.*, 2002), siendo precipitaciones de poca o alta intensidad en periodos largos de tiempo, factores desencadenantes de falla en depósitos de relaves, y otras de gran intensidad, pero en periodos cortos, un potencial factor desencadenante de eventos superficiales, como aluviones.

Las precipitaciones actúan aumentando el grado de saturación de los materiales y con ello, disminuyen su resistencia durante un tiempo. Además, las precipitaciones intensas aumentan la escorrentía superficial, lo que se traduce en un efecto erosivo en los muros de los depósitos de relaves, pudiendo generar algún deslizamiento. Adicionalmente, dichas precipitaciones pueden generar un rebalse del nivel máximo de contención del tranque, desencadenando una liberación abrupta de material.

Sismos

Los sismos son un importante factor desencadenante de remociones en masa en diversos escenarios geológicos y topográficos, en particular en depósitos de relaves. En estos casos, las aceleraciones sísmicas generan un cambio temporal en el régimen de esfuerzos tanto normales como de corte al que está sometido el muro de contención del depósito de relaves, pudiendo producir su inestabilidad.

Chile es uno de los países más sísmicos del mundo, siendo testigo de terremotos que han ocasionado tanto pérdidas humanas como materiales. En ingeniería, el peligro sísmico es una de las herramientas más utilizadas en la prevención de dichas pérdidas (Leyton *et al.*, 2010). La aceleración sísmica generalmente utilizada en este tipo de análisis es la aceleración sísmica horizontal máxima (“peak ground acceleration” o PGA). Este valor de PGA es usado comúnmente debido a su relación con fuerzas inerciales sobre los cuerpos afectados, donde las más altas fuerzas dinámicas inducidas son cercanas a él (Lara, 2007).

Viento

Muchos de los depósitos donde se disponen los relaves, pueden ser erosionados por acción del viento, lo cual puede desencadenar la desestabilización del talud por pérdida de material arrastrado desde la cubeta y/o los muros de contención.

La erosión eólica puede ser una de las principales causas de la pérdida y dispersión del material de relaves desde una presa de relaves hasta su entorno circundante. Dicha dispersión de polvo puede ser una molestia grave, además de un peligro para la salud de los habitantes de los asentamientos cercanos, y también puede dañar la salud de los animales, degradar los cultivos, hacerlos menos comercializables y causar contaminación del suelo y el agua. El problema de la erosión eólica puede afectar las presas de relaves en todo tipo de clima, pero empeora a medida que aumenta la aridez climática. (Blight, 2007).

5.5. Influencia de factores condicionantes en inestabilidad física de depósitos de relaves

Los parámetros mencionados en el Subcapítulo 5.2 serán empleados para la estimación del Índice de Susceptibilidad de los depósitos de relaves, mediante la creación de Matrices de Susceptibilidad, presentadas en el Subcapítulo 5.5.2. A continuación, se detallan los diferentes factores condicionantes que tienen influencia en cada uno de los distintos tipos de falla que pueden sufrir los depósitos de relaves, identificados por este estudio.

Factores asociados a deslizamiento

La ocurrencia de deslizamientos tendrá una fuerte influencia de los siguientes factores condicionantes: entre los factores geotécnicos, se considera la densidad o compactación del muro, así como también el contenido de humedad entre las partículas que lo conforman; en los factores geométricos, la altura de éste y su ángulo aguas abajo, ambos siendo los más importantes dentro de este mecanismo de inestabilidad.

Adicionalmente, dentro de los factores geográficos, se debe considerar si el depósito de relaves se encuentra emplazado en las cercanías de una falla cortical, al igual que la zona sísmica donde fue construido, ya que las aceleraciones efectivas a las que puede verse sometido éste frente a un movimiento sísmico podrían generar inestabilidades físicas, tanto en el muro como en el material de relaves depositado. Finalmente, y relacionado con los factores hidrogeológicos, importará la profundidad del nivel freático en el muro, el cual puede generar un aumento en la presión de poro del material, con la consecuente pérdida de cohesión de este.

Factores asociados a rebalse

El factor condicionante más influyente está relacionado con la geometría, particularmente la altura de la revancha del depósito de relaves.

Con respecto a la ubicación del depósito, el parámetro más importante de todos para generar rebalse será la cercanía a quebradas, aunque particularmente será mucho más delicado cuando se emplace dentro de la misma quebrada ya que de existir lluvias muy intensas en corto tiempo, podría generarse rebalse debido a la gran escorrentía asociada que confluiría al depósito. Se espera una situación análoga producto de aluviones que podrían provenir y encauzarse en esta quebrada. La susceptibilidad a remociones en masa de las laderas aledañas al depósito es otro parámetro a tener

en cuenta, debido a los posibles tsunamis que se generarían en caso de existir algún fenómeno de remoción en masa en estas laderas. Así mismo, la cercanía a fallas corticales influirá en una mayor susceptibilidad a sismos generados en estos tipos de falla, así como también la aceleración efectiva que pueda alcanzar el terreno, según la zona sísmica definida en la NCh433 (INN, 2009).

Finalmente, entre los factores condicionantes relacionados con el clima que influirán en el rebalse, el parámetro más relevante será la zona climática en la cual se encuentre el depósito de relaves, ya que en zonas más lluviosas es más fácil que se rebalse su nivel máximo de aguas. Además, se considerará el viento, dado que este puede generar grandes olas en caso de eventos extremos.

Factores asociados a licuación

La licuación, considerando los factores geotécnicos, ya sea del muro o de los relaves secos (“tortas”), estará condicionada por la compactación del muro y su distribución granulométrica: a menor contenido de finos (tamaño limo y arcilla) y mayor de arenas, el fenómeno de licuación es más probable que ocurra; y el grado de saturación que posea el material del muro o los relaves. En particular estos últimos serán los parámetros más influyentes en este mecanismo de inestabilidad. Con respecto a los factores geométricos, importará el ángulo del muro o “torta” aguas abajo.

Dentro de los factores geográficos, los parámetros más relevantes serán la cercanía a fallas corticales, así como la aceleración efectiva resultante, considerando las zonas sísmicas definidas en la NCh433 (INN, 2009), y la litología sobre la cual se ha fundado el depósito de relaves.

Considerando que el fenómeno de licuación está condicionado por la presencia de agua, el nivel freático influirá de manera directa, ya sea en el muro en el caso de depósitos activos, o en los relaves abandonados (coloquialmente llamados “tortas”).

Factores asociados a erosión superficial por agua

En la erosión superficial influirán prácticamente todos los factores condicionantes relacionados con las características geotécnicas del muro, es decir la distribución granulométrica de las partículas, su forma y densidad; así como las geométricas relacionadas con la altura del muro de empréstito y el ángulo del talud aguas abajo. Por otro lado, la ubicación que tenga el depósito de relaves será importante, principalmente si está emplazado en una quebrada o cauce fluvial. Finalmente, la zona climática afectará directamente, siendo las zonas lluviosas las que condicionarán una mayor susceptibilidad de generar erosión superficial por agua.

Factores asociados a erosión superficial por viento

Dentro de los factores condicionantes relacionados con las características geotécnicas del muro del depósito, la forma de las partículas, su densidad y el contenido de humedad que pueda contener tendrán un papel importante; dentro de las características geométricas, la altura del muro y su ángulo aguas abajo.

Por otro lado, los factores relacionados con el clima serán la velocidad del viento y su dirección, y la zona climática en la cual se encuentre el depósito de relaves, considerando en esta ocasión que climas áridos serán los que ocasionarán una mayor susceptibilidad a la erosión eólica.

5.6. Evaluación de la susceptibilidad

5.6.1. Introducción

Según Cartaya *et al.* (2006), cuando se habla de susceptibilidad, se desea analizar la posibilidad de que se genere en un territorio un determinado proceso geológico. Para realizar la evaluación de la susceptibilidad en este trabajo, se siguieron varias etapas. Inicialmente, se identificó de manera preliminar los posibles fenómenos naturales a los cuales puede verse sometido un depósito de relaves, y cómo estos afectarían su estabilidad física. Así, se tomaron en cuenta procesos como lluvias intensas y vientos de alto poder erosivo, aparte de eventos extremos, como aluviones y fuertes sismos. Luego, se procedió a analizar la influencia que estos fenómenos tendrían sobre el depósito estudiado, mediante lo cual se identificaron los diversos mecanismos de inestabilidad física que se podrían causar por ellos, en particular los cinco detallados en el subcapítulo 5.3 (exceptuando el fenómeno de piping debido a su dificultad de evaluación, como se mencionó previamente). Todo lo anterior se contrastó con lo disponible en la literatura relacionada (Dobry y Álvarez, 1967; Castro y Troncoso, 1989; Troncoso, 2002; Villavicencio *et al.*, 2014; entre otros), así como también mediante conversaciones con expertos en el tema.

El siguiente paso consistió en identificar todos los posibles factores condicionantes medibles tanto de las características geotécnicas del material con el cual es construido el muro de empréstito de un depósito de relaves, así como la geometría del depósito, y factores externos que podrían influir en la estabilidad física de éste, como los geográficos, climáticos e hidrogeológicos, logrando diferenciarse la importancia relativa entre estos. Finalmente, teniendo en consideración los factores condicionantes influyentes en los cinco mecanismos estudiados, se procedió a diseñar matrices de susceptibilidad para cada uno y se asignó un valor numérico a cada factor que influía en dicho mecanismo. Cada matriz entregó una ponderación diferente a los factores relevantes, donde la sumatoria de estos valores representa el Índice de Susceptibilidad (IS), el cual oscila entre los valores de 30 y 100. Con esto, se consideró una susceptibilidad baja en caso de tener valores entre 30 y 49; susceptibilidad media, entre 50 y 69; y susceptibilidad alta, entre 70 y 100.

5.6.2. Matrices de susceptibilidad

Las matrices de susceptibilidad de este estudio se construyeron a partir de la influencia que tienen determinados parámetros de los factores condicionantes, como fue mencionado en el Subcapítulo 5.5. Para cada uno de los mecanismos generadores de inestabilidad (deslizamiento, licuación, rebalse, erosión por agua y eólica), se desarrolló una matriz diferente, en la cual se identificaron los rangos de valores críticos para cada parámetro que generarían el fenómeno en cuestión, basado en lo expuesto en el Subcapítulo 5.2. Así, se determinaron los intervalos que marcan una mayor, media y baja susceptibilidad al fenómeno, asignándosele un puntaje dentro de cada tabla. Esta asignación siguió los siguientes criterios:

- Se estableció que los valores seleccionados para los intervalos de susceptibilidad alta, media y baja tuvieran una distribución homogénea y similar dentro de los diferentes parámetros dentro de una misma matriz. Por ejemplo, en el caso de la Matriz de Susceptibilidad de rebalse, la diferencia entre cada uno de los puntajes es de 5 puntos.
- Para los intervalos que aseguraran una mayor susceptibilidad, se distribuyó puntajes tales que la suma de todos ellos fuera de 100 puntos en cada matriz.
- Para los intervalos correspondientes a una susceptibilidad media, la distribución de puntajes fue tal que su suma fuera de 70 puntos en cada matriz.
- Para los intervalos de susceptibilidad baja, la distribución de puntajes fue tal que su suma fuera de 30 puntos en cada matriz.
- No existe $IS < 30$, dada la configuración de las matrices.

Es importante destacar que fueron considerados valores mayores para los parámetros con mayor influencia en la generación del fenómeno relacionado con la matriz correspondiente. La importancia de estos se basó en lo expuesto en el Subcapítulo 5.5.

El proceso de calibración para asegurar un buen reflejo de la realidad se llevó a cabo primero aplicando estas matrices a los depósitos de relaves de la comuna de Copiapó que hubieran sufrido algún evento de inestabilidad de los abordados en este estudio, y se analizó la susceptibilidad obtenida (alta, media o baja); el objetivo de esto fue obtener susceptibilidades altas, o muy cercanas a ellas (valores cercanos o superiores a 70 puntos) para estos depósitos, considerando el antecedente existente. Los valores de cada parámetro dentro de la Matriz de Susceptibilidad correspondiente fueron ajustados en caso de no obtenerse lo anterior, hasta que se pudo conseguir. En particular, fue posible realizar el procedimiento anterior para los eventos de erosión por agua y viento. Para los otros mecanismos, se buscó casos históricos en donde estos hubieran sido los causantes de la desestabilización, y se aplicaron las matrices. Sin embargo, solo fue de manera parcial este cálculo, debido a la ausencia de datos previos completos. La Tabla 5.5 muestra los casos considerados para la calibración de cada una de las matrices.

Tabla 5.5. Incidentes en depósitos de relaves, para cada uno de los mecanismos estudiados en este trabajo.

Mecanismo	Depósito	Ubicación	Fecha
Deslizamiento	Veta del Agua Tranque N°5	Nogales	27/02/2010
Licuación	Las Palmas	Pencahue	27/02/2010
Rebalse	Cerro Negro N°2	Cabildo	03/10/2003
Erosión por agua	Ojancos	Copiapó	25/03/2015
Erosión eólica	Planta Matta	Copiapó	Durante 2003

A continuación, se detallan las matrices de susceptibilidad desarrolladas para cada uno de los 5 mecanismos generadores de inestabilidad y erosión.

Matriz de susceptibilidad por deslizamiento en muro

Para este mecanismo de inestabilidad, se consideraron los parámetros indicados en la Figura 5.8. La matriz resultante, con los rangos utilizados y puntajes asociados para el cálculo del IS, están disponibles en la Tabla 5.6.

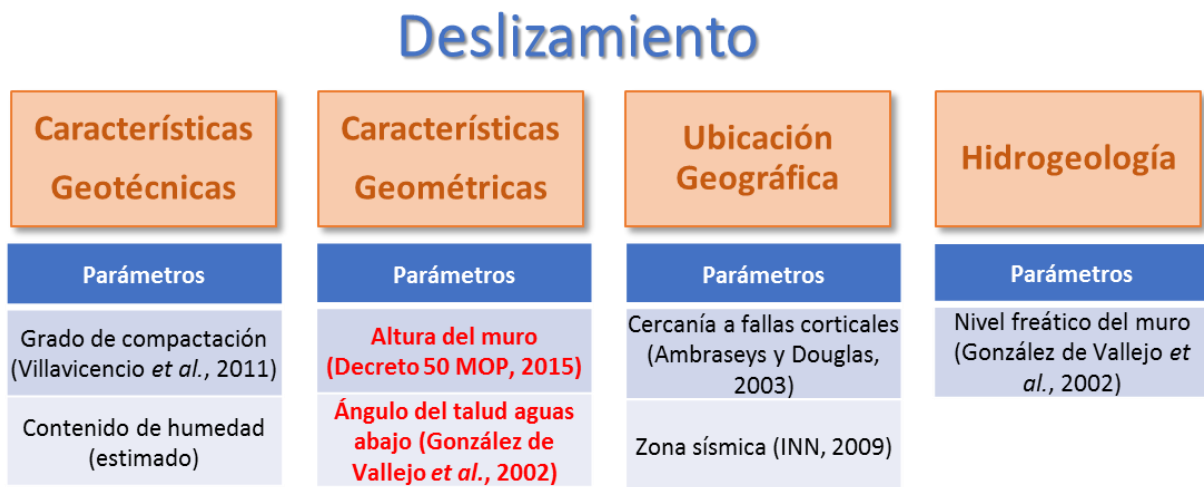


Figura 5.8. Parámetros utilizados para el deslizamiento. Se destacan en rojo los parámetros con mayor relevancia y además la referencia considerada para definir los rangos.

Tabla 5.6. Matriz de Susceptibilidad por Deslizamiento del muro.

Factores condicionantes		Rango	Valor
Características geotécnicas de la presa (activo o inactivo) o del depósito abandonado	Grado de compactación (%)	Suelto: El material del muro posee <90% del Proctor Estándar Óptimo (OPN)	12
		Firme: El material del muro está entre 90 y 95% OPN	8
		Denso: El material del muro posee más de un 95% OPN	4
	Contenido de humedad (%)	Seco: El material del muro posee menos de un 5% de agua entre sus poros	4
		Parcialmente húmedo: El material del muro posee de un 5% a un 15% de agua entre sus poros	8
		Húmedo: El material del muro posee más de un 15% de agua entre sus poros	12
Características geométricas de la presa (activo o inactivo) o del depósito abandonado	Ángulo del talud aguas abajo (°)	Bajo: Si se tiene material <u>suelto</u> , cuenta con un ángulo del talud aguas abajo menor a 26°; si es <u>firme</u> , inferior a 30°, y si es <u>denso</u> , menor a 32°	10
		Medio: Si se tiene material <u>suelto</u> , cuenta con un ángulo del talud aguas abajo entre 26° y 30°; si es <u>firme</u> , 30°-34°, y si es <u>denso</u> , 32°-36°	15
		Alto: Si se tiene material <u>suelto</u> , cuenta con un ángulo del talud aguas abajo mayor a 30°; si es <u>firme</u> , superior a 34°, y si es <u>denso</u> , mayor a 36°	20
	Altura del muro (m)	Categoría A: Depósito pequeño con un muro menor a 15 m de altura	10
		Categoría B: Depósito mediano con un muro de 15 a 30 m de altura	15
		Categoría C: Depósito grande con un muro mayor a 30 m de altura	20
Ubicación muro y/o material	Cercanía a fallas corticales (km)	Próximo: El depósito se encuentra a menos de 7 km de una falla cortical	12
		Cercano: El depósito se encuentra de 7 a 15 km de una falla cortical	8
		Lejano: El depósito se encuentra a más de 15 km de una falla cortical	4
	Zona Sísmica	Baja: El depósito se encuentra en la Zona 1 de la Norma	4
		Intermedia: El depósito se encuentra en la Zona 2 de la Norma	8
		Alta: El depósito se encuentra en la Zona 3 de la Norma	12

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 5.6. Matriz de Susceptibilidad por Deslizamiento del muro (continuación).

Factores condicionantes		Rango	Valor
Hidrogeología	Nivel freático del muro (m)	Somero: El nivel freático se encuentra a menos de 3 m de profundidad	12
		Mediano: El nivel freático se encuentra de 3 a 5 m de profundidad	8
		Profundo: El nivel freático se encuentra a más de 5 m de profundidad	4

Matriz de susceptibilidad por rebalse

Para este mecanismo de inestabilidad, se consideraron los parámetros indicados en la Figura 5.9. La matriz resultante, con los rangos utilizados y puntajes asociados para el cálculo del IS, están disponibles en la Tabla 5.7.

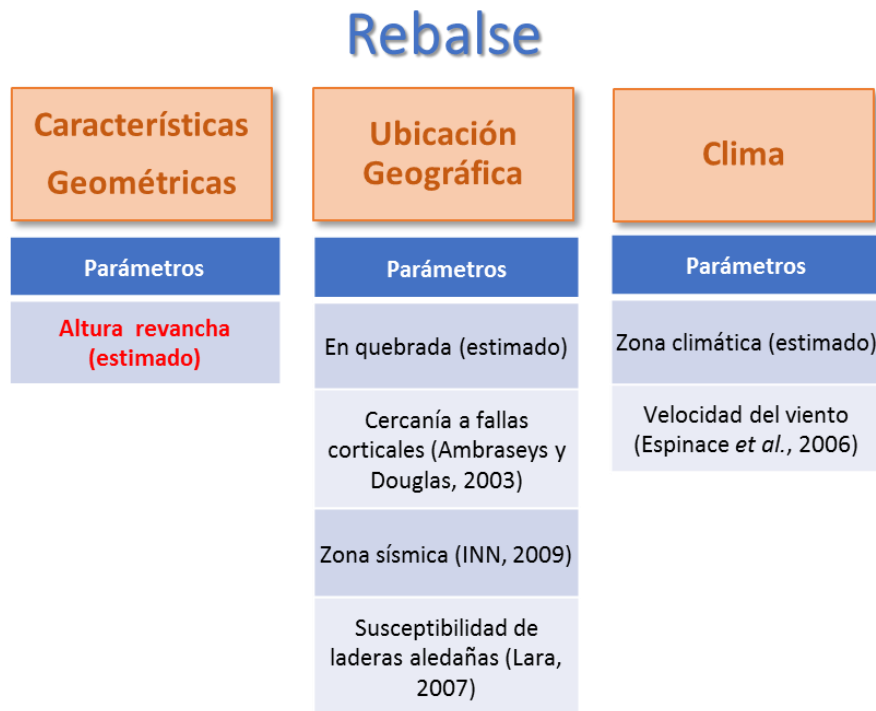


Figura 5.9. Parámetros utilizados para el rebalse. Se destacan en rojo los parámetros con mayor relevancia y además la referencia considerada para definir los rangos.

Tabla 5.7. Matriz de Susceptibilidad por Rebalse.

Factores condicionantes		Rango	Valor
Características geométricas de la presa	Altura de la revancha del muro (m)	Baja: La revancha del muro es inferior a 2 m	20
		Media: La revancha del muro va de 2 a 5 m	15
		Alta: La revancha del muro es mayor a 5 m	10
Ubicación muro	En quebrada	Próximo: El depósito se encuentra en una quebrada o a pocos metros	15
		Lejano: El depósito se encuentra fuera de una quebrada	0
	Cercanía a fallas corticales (km)	Próximo: El depósito se encuentra a menos de 7 km de una falla cortical	10
		Cercano: El depósito se encuentra de 7 a 15 km de una falla cortical	5
		Lejano: El depósito se encuentra a más de 15 km de una falla cortical	0
	Susceptibilidad de laderas aledañas	No Susceptible: La ladera tiene baja susceptibilidad a remociones	5
		Medianamente susceptible: La ladera tiene mediana susceptibilidad a remociones	10
		Susceptible: La ladera tiene alta susceptibilidad a remociones	15
	Zona Sísmica	Baja: El depósito se encuentra en la Zona 1 de la Norma	0
		Intermedia: El depósito se encuentra en la Zona 2 de la Norma	5
		Alta: El depósito se encuentra en la Zona 3 de la Norma	10
	Clima	Zona climática	Árida
Templada			10
Lluviosa			15
Velocidad del viento (m/s)		Baja: Viento favorable para generar olas, y con velocidad menor a 1 m/s	5
		Media: Viento favorable para generar olas, y con velocidad entre 1-6 m/s	10
		Alta: Viento favorable para generar olas, y con velocidad mayor a 6 m/s	15

Matriz de susceptibilidad por licuación

Para este mecanismo de inestabilidad, se consideraron los parámetros indicados en la Figura 5.10. La matriz resultante, con los rangos utilizados y puntajes asociados para el cálculo del IS, están disponibles en la Tabla 5.8.

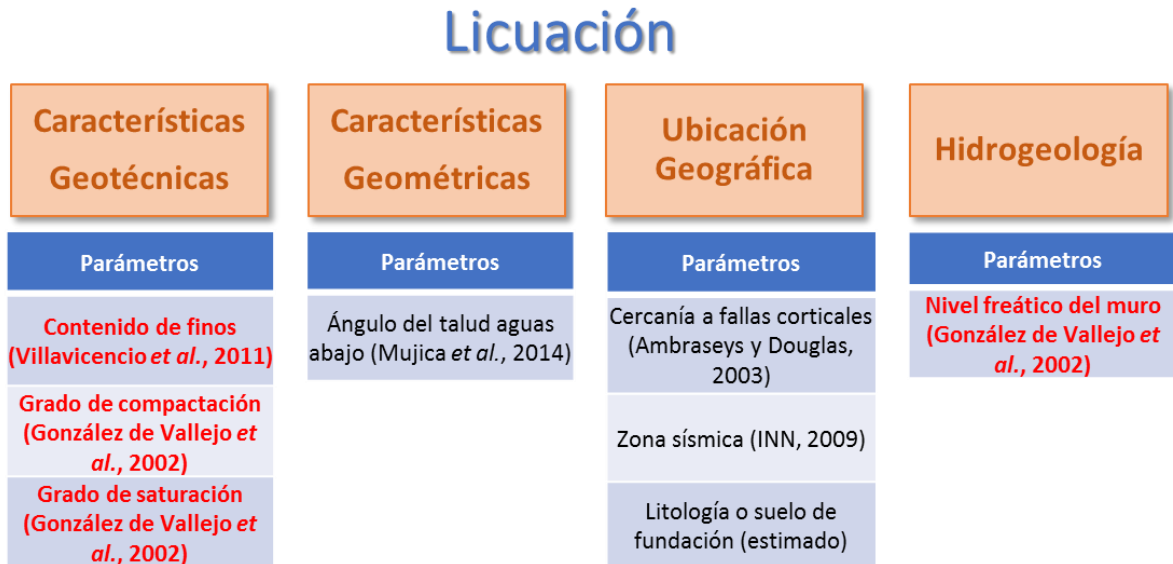


Figura 5.10. Parámetros utilizados para la licuación. Se destacan en rojo los parámetros con mayor relevancia y además la referencia considerada para definir los rangos.

Tabla 5.8. Matriz de Susceptibilidad por Licuación.

Factores condicionantes		Rango	Valor
Características geotécnicas de la presa (activo o inactivo) o del depósito abandonado	Distribución granulométrica (% finos)	Bajo: El porcentaje de finos (tamaño < a malla 200) presente en el muro es inferior al 10%	17
		Intermedio: El porcentaje de finos presente en el muro va del 10-20%	11
		Alto: El porcentaje de finos presente en el muro es superior al 20%	5
	Compactación (densidad) (% OPN)	Suelto: El material del muro posee <90% del Óptimo Proctor Estándar (OPN)	16
		Firme: El material del muro está entre 90 y 95% OPN	11
		Denso: El material del muro posee más de un 95% OPN	5
	Grado de saturación (%)	Seco: El material del muro posee <20% de agua entre sus poros	5
		Parcialmente saturado: El material del muro posee entre 20% y 85% de agua entre sus poros	12
		Saturado: El material del muro posee más de 85% de agua entre sus poros	17
Características geométricas de la presa o del depósito abandonado	Ángulo del talud aguas abajo (°)	Bajo: El ángulo de talud aguas abajo es menor a 30°	1
		Alto: El ángulo de talud aguas abajo es igual o mayor a 30°	5
Ubicación muro y/o material	Cercanía a fallas corticales (km)	Próximo: El depósito se ubica a menos de 7 km de una falla cortical	10
		Cercano: El depósito se ubica de 7 a 15 km de una falla cortical	5
		Lejano: El depósito se ubica a más de 15 km de una falla cortical	1
	Zona Sísmica	Baja: El depósito se encuentra en la Zona 1 de la Norma	1
		Intermedia: El depósito se encuentra en la Zona 2 de la Norma	5
		Alta: El depósito se encuentra en la Zona 3 de la Norma	10

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 5.8. Matriz de Susceptibilidad por Licuación (continuación).

Factores condicionantes		Rango	Valor
Ubicación muro y/o material	Estabilidad de litología y suelo de fundación	Desfavorable: La litología en la cual se fundó el depósito amplifica la aceleración efectiva (suelo)	10
		Favorable: La litología en la cual se fundó no amplifica la aceleración efectiva (roca competente)	2
Hidrogeología	Nivel freático del muro (m)	Somero: El nivel freático se encuentra a menos de 3 m de profundidad	15
		Mediano: El nivel freático se encuentra de 3 a 5 m de profundidad	11
		Profundo: El nivel freático se encuentra a más de 5 m de profundidad	5

Matriz de susceptibilidad por erosión por agua

Para este mecanismo de inestabilidad, se consideraron los parámetros indicados en la Figura 5.11. La matriz resultante, con los rangos utilizados y puntajes asociados para el cálculo del IS, están disponibles en la Tabla 5.9.

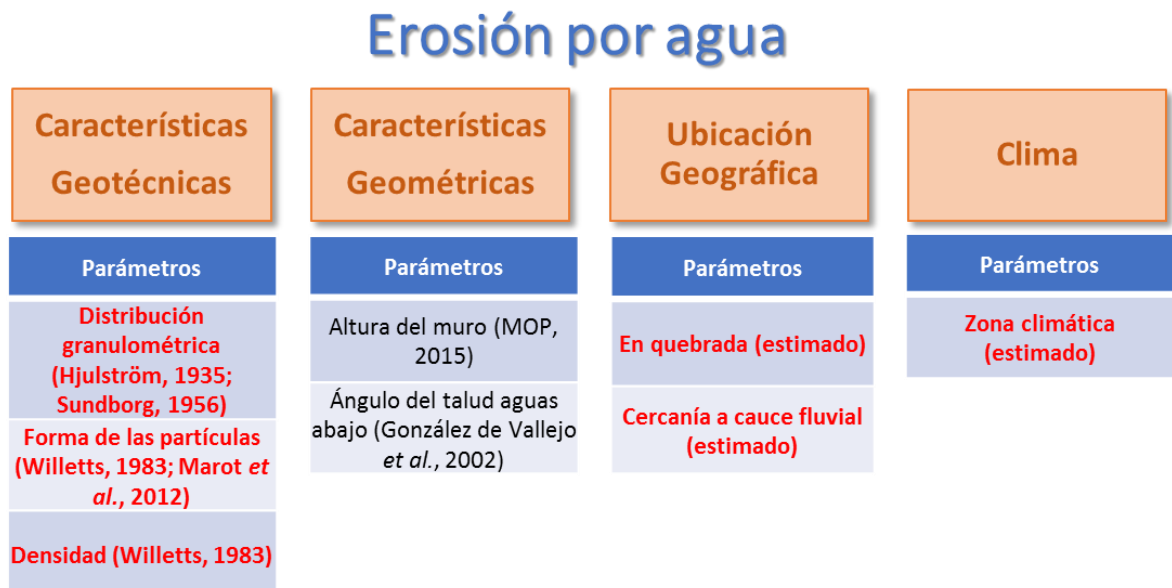


Figura 5.11. Parámetros utilizados para la erosión por agua. Se destacan en rojo los parámetros con mayor relevancia y además la referencia considerada para definir los rangos

Tabla 5.9. Matriz de Susceptibilidad por Erosión por agua.

Factores condicionantes		Rangos	Valor
Características geotécnicas de la presa (activo o inactivo) o del depósito abandonado	Distribución granulométrica	Arena: Predominio de granulometría tamaño arena	20
		Limo/Arcilla: Predominio de granulometría tamaño limo/arcilla	15
		Grava: Predominio de granulometría tamaño grava	10
	Forma de las partículas	Baja: Partículas poco esféricas y mayormente angulosas	15
		Media: Partículas no tan esféricas y de subangulosas a subredondeadas	10
		Alta: Partículas mayormente esféricas y con alto redondeamiento	5
	Densidad de las partículas (g/cm ³)	Baja: Densidad promedio de las partículas inferior a 2.5 g/cm ³	15
		Media: Densidad promedio de las partículas de 2.5-2.8 g/cm ³	10
		Alta: Densidad promedio de las partículas superior a 2.8 g/cm ³	5
Características geométricas de la presa (activo o inactivo) o del depósito abandonado	Altura del muro (m)	Categoría A: Depósito pequeño con un muro menor a 15 m de altura	2
		Categoría B: Depósito mediano con un muro de 15 a 30 m de altura	5
		Categoría C: Depósito grande con un muro mayor a 30 m de altura	10
	Ángulo del talud aguas abajo (°)	Bajo: Si se tiene material <u>suelto</u> , cuenta con un ángulo del talud aguas abajo menor a 26°; si es <u>firme</u> , inferior a 30°, y si es <u>denso</u> , menor a 32°	2
		Medio: Si se tiene material <u>suelto</u> , cuenta con un ángulo del talud aguas abajo entre 26° y 30°; si es <u>firme</u> , 30°-34°, y si es <u>denso</u> , 32°-36°	5
		Alto: Si se tiene material <u>suelto</u> , cuenta con un ángulo del talud aguas abajo mayor a 30°; si es <u>firme</u> , superior a 34°, y si es <u>denso</u> , mayor a 36°	10

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 5.9. Matriz de Susceptibilidad por Erosión por agua (continuación).

Factores condicionantes		Rangos	Valor
Ubicación muro y/o material	En quebrada o cauce fluvial	Próximo: El depósito se encuentra en una quebrada o cauce fluvial, o a pocos metros	15
		Lejano: El depósito se encuentra fuera de una quebrada o cauce fluvial	5
Clima	Zona climática	Árida	5
		Templada	10
		Lluviosa	15

Matriz de susceptibilidad por erosión eólica

Para este mecanismo de inestabilidad, se consideraron los parámetros indicados en la Figura 5.12. La matriz resultante, con los rangos utilizados y puntajes asociados para el cálculo del IS, están disponibles en la Tabla 5.10.

Erosión eólica

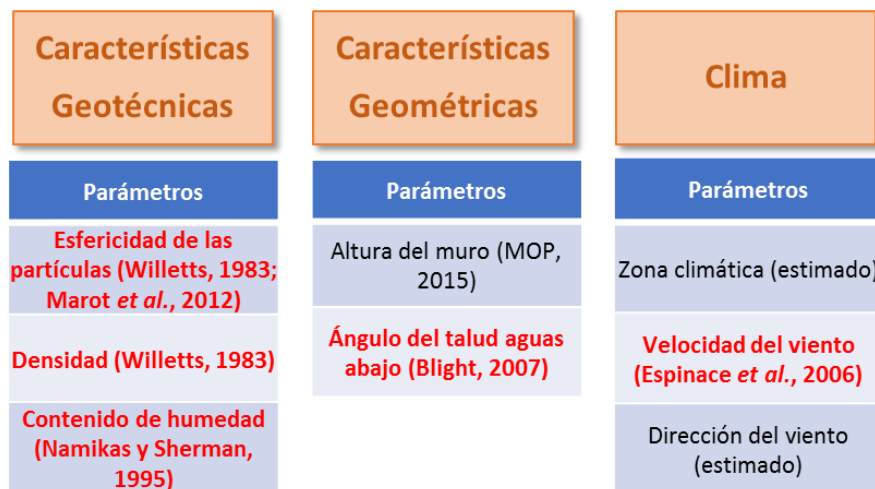


Figura 5.12. Parámetros utilizados para la erosión eólica. Se destacan en rojo los parámetros con mayor relevancia y además la referencia considerada para definir los rangos.

Tabla 5.10. Matriz de Susceptibilidad de estabilidad del muro por Erosión eólica

Factores condicionantes		Rangos	Valor
Características geotécnicas de la presa	Forma de las partículas	Baja: Partículas poco esféricas y mayormente angulosas	5
		Media: Partículas no tan esféricas y de subangulosas a subredondeadas	11
		Alta: Partículas mayormente esféricas y con alto redondeamiento	15
	Densidad de las partículas (g/cm ³)	Baja: Densidad promedio de las partículas inferior a 2.5 g/cm ³	15
		Media: Densidad promedio de las partículas de 2.5-2.8 g/cm ³	11
		Alta: Densidad promedio de las partículas superior a 2.8 g/cm ³	5
	Contenido de humedad (%)	Bajo: La humedad es menor al 1%	15
		Medio: La humedad va del 1 al 6%	11
		Alto: La humedad es mayor al 6%	5
Características geométricas de la presa	Ángulo del talud aguas abajo (°)	Erosión baja: El ángulo del muro aguas abajo es inferior a 30°	5
		Erosión media: El ángulo del muro aguas abajo es superior a 35°	11
		Erosión alta: El ángulo del muro aguas abajo se encuentra entre 30°-35°	15
	Altura del muro (m)	Categoría A: Depósito pequeño con un muro menor a 15 m de altura	3
		Categoría B: Depósito mediano con un muro de 15 a 30 m de altura	5
		Categoría C: Depósito grande con un muro mayor a 30 m de altura	10

(Continúa en la página siguiente)

Tabla 5.10. Matriz de Susceptibilidad de estabilidad del muro por Erosión eólica (continuación).

Factores condicionantes		Rangos	Valor
Clima	Velocidad del viento (m/s)	Baja: Viento favorable para generar erosión, y con velocidad menor a 1 m/s	5
		Media: Viento favorable para generar erosión, y con velocidad entre 1-6 m/s	11
		Alta: Viento favorable para generar erosión, y con velocidad mayor a 6 m/s	15
	Dirección del viento	Favorable: Permite erosionar el muro, al incidir en el frente del muro con un ángulo inferior a 45°	5
		Desfavorable: No permite erosionar, al no incidir directamente o con ángulos mayores a 45°.	0
	Zona climática	Árida	10
		Templada	5
Lluviosa		3	

5.6.3. Índice de Susceptibilidad

Se define el Índice de Susceptibilidad (abreviado IS en este trabajo), como la sumatoria de los valores para cada uno de los parámetros de los 5 Factores Condicionantes (FC) mencionados en el Subcapítulo 5.2 obtenidos al evaluar un depósito de relaves mediante una Matriz de Susceptibilidad. Así, para cada depósito se obtendrán cinco IS diferentes, al aplicar cada una de las matrices de susceptibilidad. El cálculo general viene dado por la Fórmula (4)

$$IS_{evento} = \sum FC1 + \sum FC2 + \sum FC3 + \sum FC4 + \sum FC5 \quad (4)$$

Finalmente, la susceptibilidad se clasificará dependiendo del rango en el cual se encuentre el valor del IS, según la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Rangos de valores de IS para cada grado de susceptibilidad.

Susceptibilidad	Rango IS
Baja	25-49
Media	50-69
Alta	70-100

Una susceptibilidad alta obtenida mediante alguna de las matrices de susceptibilidad significará que el depósito de relaves evaluado tiene mayor posibilidad de presentar el mecanismo de inestabilidad correspondiente. Por el contrario, una susceptibilidad baja significa que la posibilidad es menor.

6. Resultados

6.1. Evaluación de la susceptibilidad en la comuna de Copiapó

Para la evaluación de la susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas de muros de depósitos de relaves en la comuna de Copiapó, se procedió a recolectar los valores asociados a cada uno de los parámetros considerados en las matrices de susceptibilidad expuestas en el Subcapítulo 5.6.2. Para ello, se utilizaron los recursos en línea facilitados por el SERNAGEOMIN, mediante su catastro de Depósitos de Relaves actualizado en abril de 2019, disponible en su sitio web, además de bibliografía disponible de los estudios de impacto ambiental de la III Región (PUC, 2003). Para los datos no disponibles, fue necesario tomar consideraciones a partir de estudios de casos similares a nivel mundial. Adicionalmente, para datos geométricos, como alturas de muros y ángulos de los taludes aguas abajo, se procedió a trabajar con imágenes satelitales de acceso gratuito tipo ASTER con resolución de 30 metros, provistas por la NASA, para la generación de Modelos de Elevación Digital (DEM) y su posterior trabajo midiendo los anteriores parámetros. Finalmente, para cada depósito de relaves estudiado, se obtuvieron 5 valores de IS correspondientes a la aplicación de las matrices de susceptibilidad frente a cada uno de los fenómenos estudiados.

El Índice de Susceptibilidad (IS) para cada uno de los cinco mecanismos de inestabilidad y erosión se encuentra resumido a continuación (Tabla 6.1). Es importante indicar que solo se incluyen los depósitos de relaves a los cuales se pudo determinar los valores de cada parámetro necesarios para la estimación del IS, específicamente la altura del muro de contención y su ángulo de descanso, analizándose solo 46 depósitos de relaves de los 84 de la comuna de Copiapó, con distintos estados de actividad. Los valores estimados y supuestos para cada uno de los Factores Condicionantes se encuentran disponibles en el Anexo 2. Adicionalmente, se entregan mapas (Figuras 6.1 a 6.5), con la distribución de los depósitos de relaves dentro de la comuna de Copiapó, con su IS calculado para cada uno de los mecanismos generadores de inestabilidad y erosión.

Tabla 6.1. Índice de Susceptibilidad (IS) de los 5 tipos de falla estudiados, calculado para cada depósito de relaves con que se contaba con información suficiente de los parámetros. (Leyenda del IS: Verde: Baja; Anaranjado: Media; Rojo: Alta; Blanco: Sin información suficiente)

Faena	Depósito	Tipo de Depósito	Estado actividades	Índice de Susceptibilidad (IS)				
				Deslizamiento	Licuación	Rebalse	Erosión agua	Erosión viento
AURICOP	TRANQUE	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	54	n/a
LUZ ELENA	FLORENCIA 2	EMBALSE	NO ACTIVO	53	55	n/a	54	n/a
LUZ ELENA	FLORENCIA 1	EMBALSE	NO ACTIVO	58	55	n/a	57	n/a
PLANTA PORVENIR	PORVENIR	TRANQUE	NO ACTIVO	58	55	n/a	67	n/a
PLANTA PURIFICACION	EMBALSE DE RELAVES	TRANQUE	NO ACTIVO	58	55	n/a	57	n/a
PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 1	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	62	n/a
PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 2	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	62	n/a
PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 3	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	62	n/a
PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 2B	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	72	n/a
PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 1	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	62	n/a
PLANTA SANTA ESTEBAN	SANTA LAURA 2	TRANQUE	NO ACTIVO	70	55	n/a	65	n/a
PLANTA SANTA ESTEBAN	SANTA LAURA 1	TRANQUE	NO ACTIVO	65	55	n/a	62	n/a
PLANTA SANTA ESTEBAN	SANTA LAURA 3	TRANQUE	NO ACTIVO	60	55	n/a	57	n/a
BODEGA ALTO	DEPOSITO DE RELAVE 4	TRANQUE	NO ACTIVO	58	55	n/a	67	n/a
BODEGA ALTO	BODEGA ALTO	TRANQUE	NO ACTIVO	58	55	n/a	67	n/a
OJANCOS	OJANCOS 2	TRANQUE	NO ACTIVO	65	55	n/a	62	n/a
OJANCOS	OJANCOS 1	TRANQUE	NO ACTIVO	70	55	n/a	65	n/a
PLANTA ARCADIO	PLANTA ANDREA	EMBALSE	NO ACTIVO	63	59	n/a	72	n/a
PLANTA TANIA	TANIA	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	64	n/a
PLANTA GUGGIANA	GUGGIANA	TRANQUE	ABANDONADO	58	55	n/a	67	n/a
PLANTA SANTA TERESA	SANTA TERESA 2	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	54	n/a
PLANTA MATTA	TRANQUE 3	TRANQUE	ACTIVO	75	71	65	67	67
PLANTA MATTA	TRANQUE 2	TRANQUE	NO ACTIVO	70	60	n/a	60	n/a
PLANTA LA CHIMBA	TRANQUES	TRANQUE	ABANDONADO	53	55	n/a	64	n/a

Tabla 6.1. (CONTINUACIÓN) Índice de susceptibilidad (IS) de los 5 tipos de falla estudiados, calculado para cada depósito de relaves con que se contaba con información suficiente de los parámetros. (Leyenda del IS: Verde: Baja; Anaranjado: Media; Rojo: Alta; Blanco: Sin información suficiente)

Faena	Depósito	Tipo de Depósito	Estado actividades	Índice de Susceptibilidad (IS)				
				Deslizamiento	Licuación	Rebalse	Erosión agua	Erosión viento
SANTA ROSA	SANTA ROSA 2	EMBALSE	NO ACTIVO	53	55	n/a	64	n/a
SANTA ROSA	SANTA ROSA 1	EMBALSE	NO ACTIVO	53	55	n/a	64	n/a
PLANTA IRMITA	EMBALSE DE RELAVES	EMBALSE	ACTIVO	63	66	70	64	60
PLANTA SAN CRISTOBAL	EPV	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	72	n/a
PLANTA SAN CRISTOBAL	EPV	TRANQUE	NO ACTIVO	58	55	n/a	67	n/a
EPV	EPV	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	54	n/a
PLANTA CUESTA CARDONES	CUESTA CARDONES 1	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	54	n/a
PLANTA DAY	DAY 2	TRANQUE	ACTIVO	63	66	70	64	60
PLANTA DAY	DAY	TRANQUE	NO ACTIVO	63	59	n/a	72	n/a
PLANTA SANTA LAURA	TRANQUE	TRANQUE	ACTIVO	63	66	55	54	65
PLANTA LLAUCAVEN	LLAUCAVEN 1	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	64	n/a
PLANTA LLAUCAVEN	LLAUCAVEN 2	TRANQUE	NO ACTIVO	70	59	n/a	75	n/a
PLANTA OP (EX FARAH)	FARAH 1-2-3-4-5-6-7	TRANQUE	NO ACTIVO	58	55	n/a	57	n/a
PLANTA RAPELINA	RAPELINA	EMBALSE	ACTIVO	68	70	55	57	70
PLANTA MONSERRAT	MONSERRAT	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	64	n/a
KOZAN	EL GATO	TRANQUE	ACTIVO	70	74	75	67	62
PLANTA ANDREA	TRANQUE	EMBALSE	NO ACTIVO	58	55	n/a	67	n/a
PLANTA ALEMANA	ARCADIO	EMBALSE	ACTIVO	68	70	70	67	66
PLANTA CORONA	CORONA	TRANQUE	NO ACTIVO	53	55	n/a	54	n/a
PLANTA PUERTO RICO	PUERTO RICO 0-1-2	TRANQUE	NO ACTIVO	70	59	n/a	65	n/a
PLANTA PUERTO RICO	EMBALSE 4	EMBALSE	ACTIVO	63	66	55	54	60
PLANTA LA UNION	UNION	TRANQUE	ABANDONADO	63	59	n/a	62	n/a

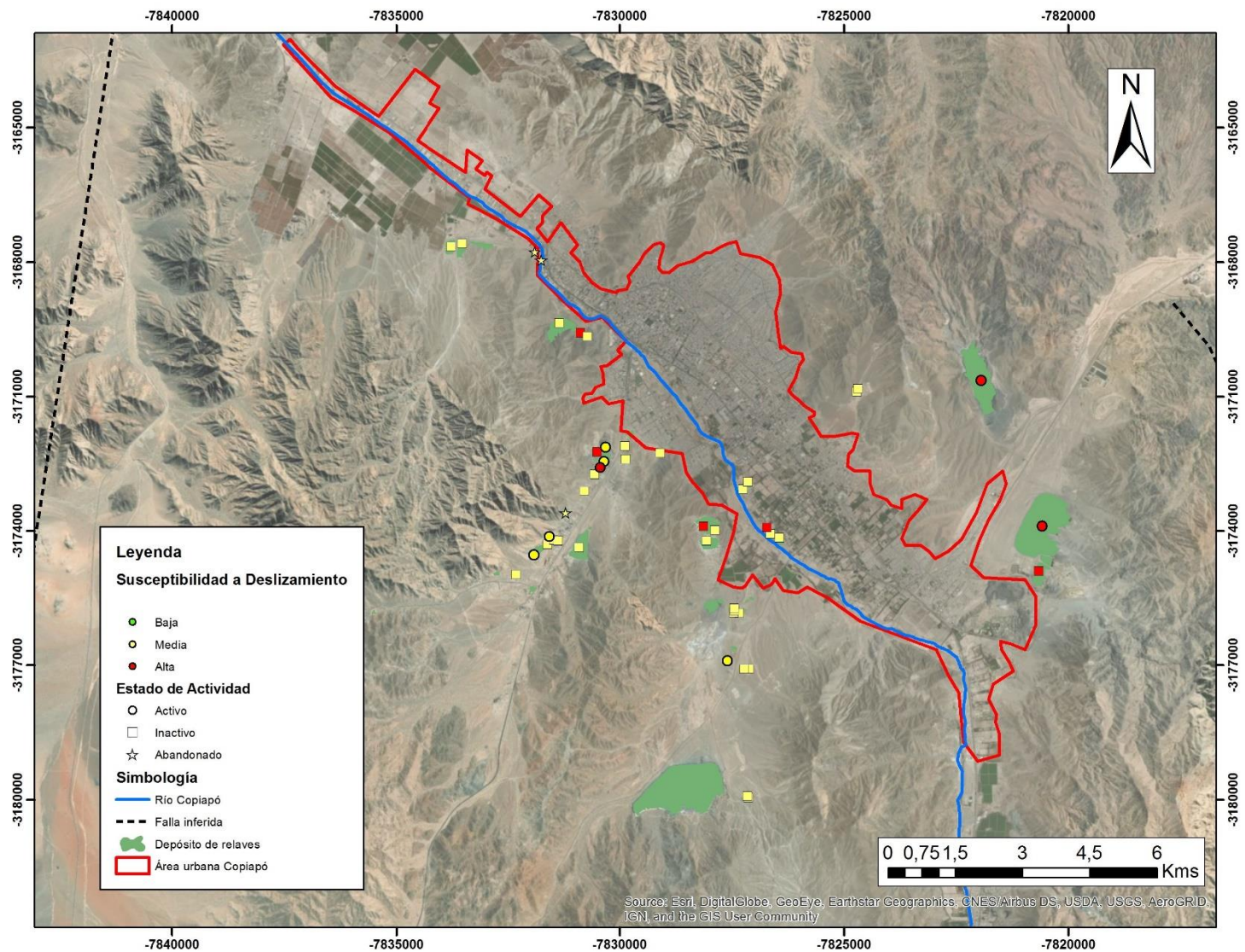


Figura 6.1. Mapa de susceptibilidad por deslizamiento en la comuna de Copiapó. El área urbana está encerrada por el polígono de color rojo y las áreas de los depósitos de relaves por áreas de color verde. Se representan los depósitos de relaves según su estado de actividad, por circunferencias (activos), cuadrados (inactivos) y estrellas (abandonados). El código de color es amarillo para los depósitos con susceptibilidad media y en color rojo los con susceptibilidad alta. Creación propia.

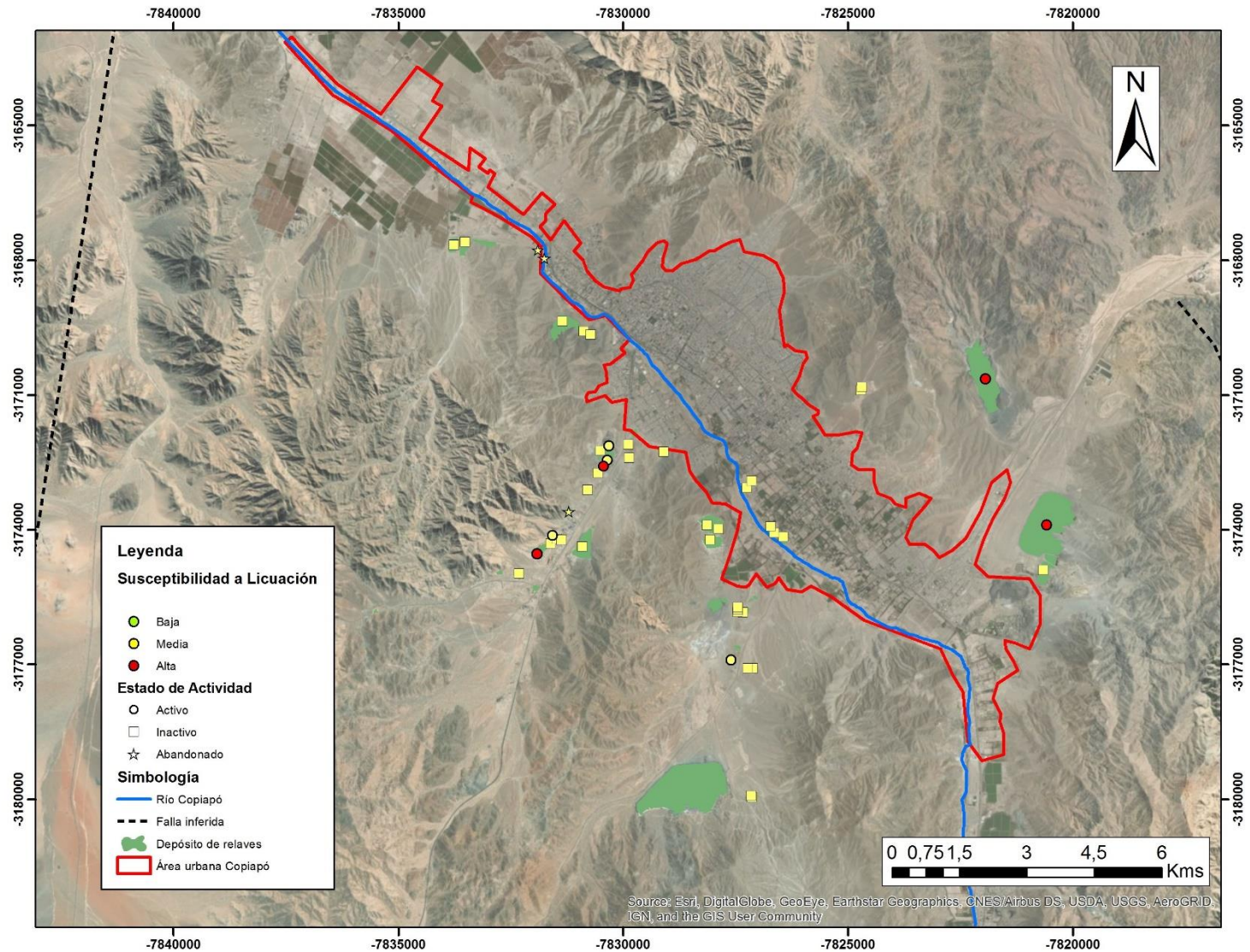


Figura 6.2. Mapa de susceptibilidad por licuación en la comuna de Copiapó. El área urbana está encerrada por el polígono de color rojo y las áreas de los depósitos de relaves por áreas de color verde. Se representan los depósitos de relaves según su estado de actividad, por circunferencias (activos), cuadrados (inactivos) y estrellas (abandonados). El código de color es amarillo para los depósitos con susceptibilidad media y en color rojo los con susceptibilidad alta. Creación propia.

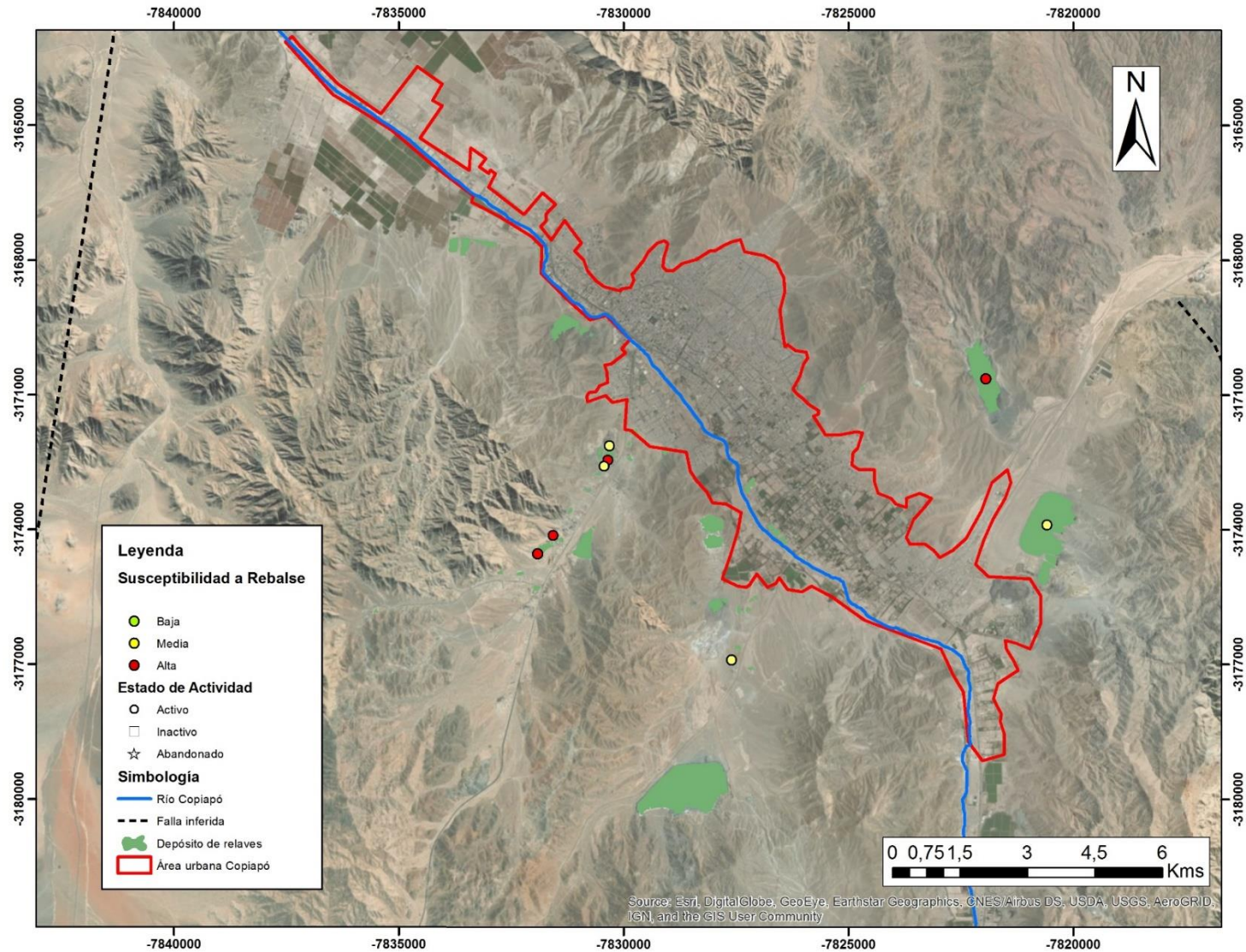


Figura 6.3. Mapa de susceptibilidad por rebalse en la comuna de Copiapó. El área urbana está encerrada por el polígono de color rojo y las áreas de los depósitos de relaves por áreas de color verde. Se representan los depósitos de relaves según su estado de actividad, por circunferencias (activos), cuadrados (inactivos) y estrellas (abandonados). El código de color es amarillo para los depósitos con susceptibilidad media y en color rojo los con susceptibilidad alta. Creación propia.

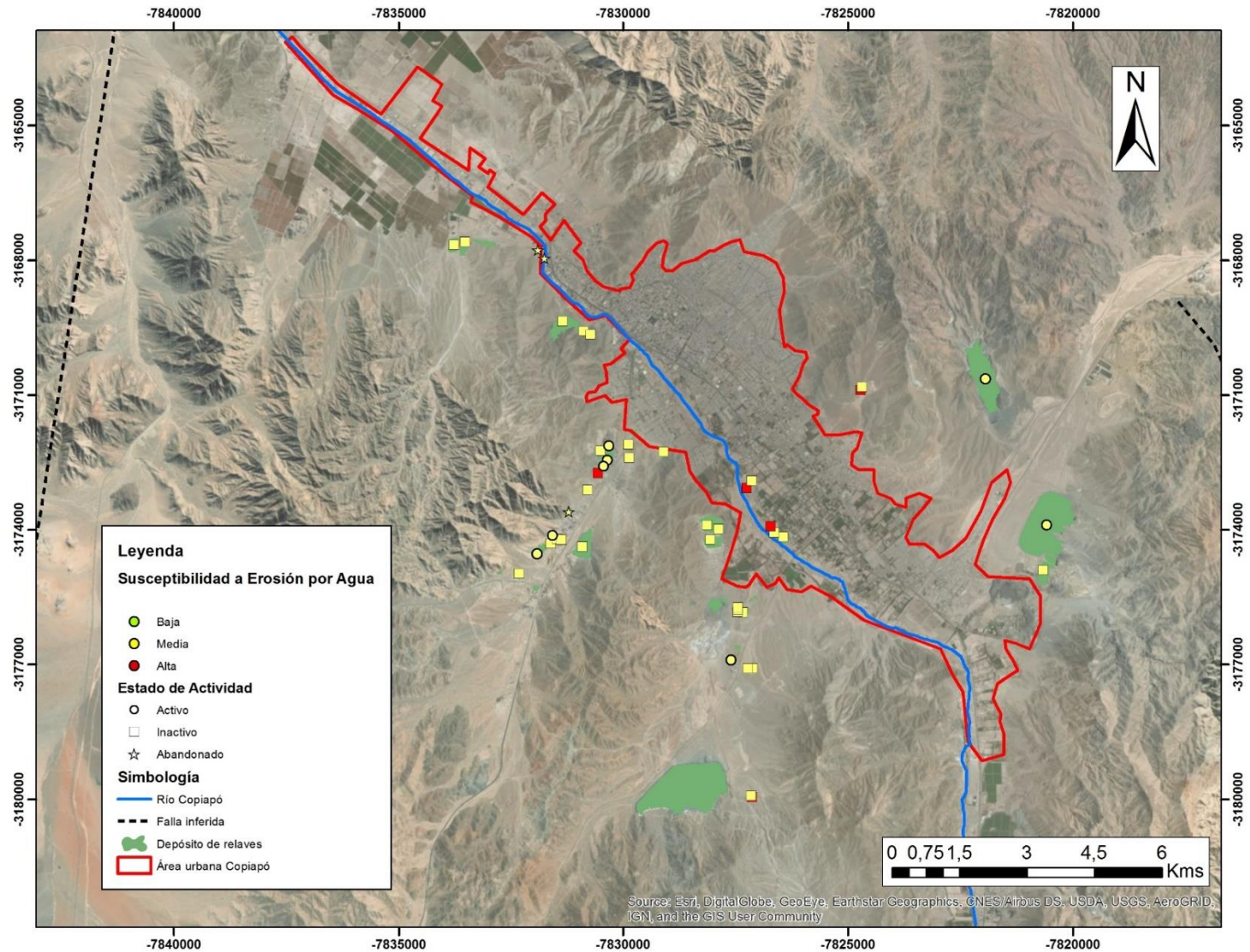


Figura 6.4. Mapa de susceptibilidad a erosión por agua en la comuna de Copiapó. El área urbana está encerrada por el polígono de color rojo y las áreas de los depósitos de relaves por áreas de color verde. Se representan los depósitos de relaves según su estado de actividad, por circunferencias (activos), cuadrados (inactivos) y estrellas (abandonados). El código de color es amarillo para los depósitos con susceptibilidad media y en color rojo los con susceptibilidad alta. Creación propia.

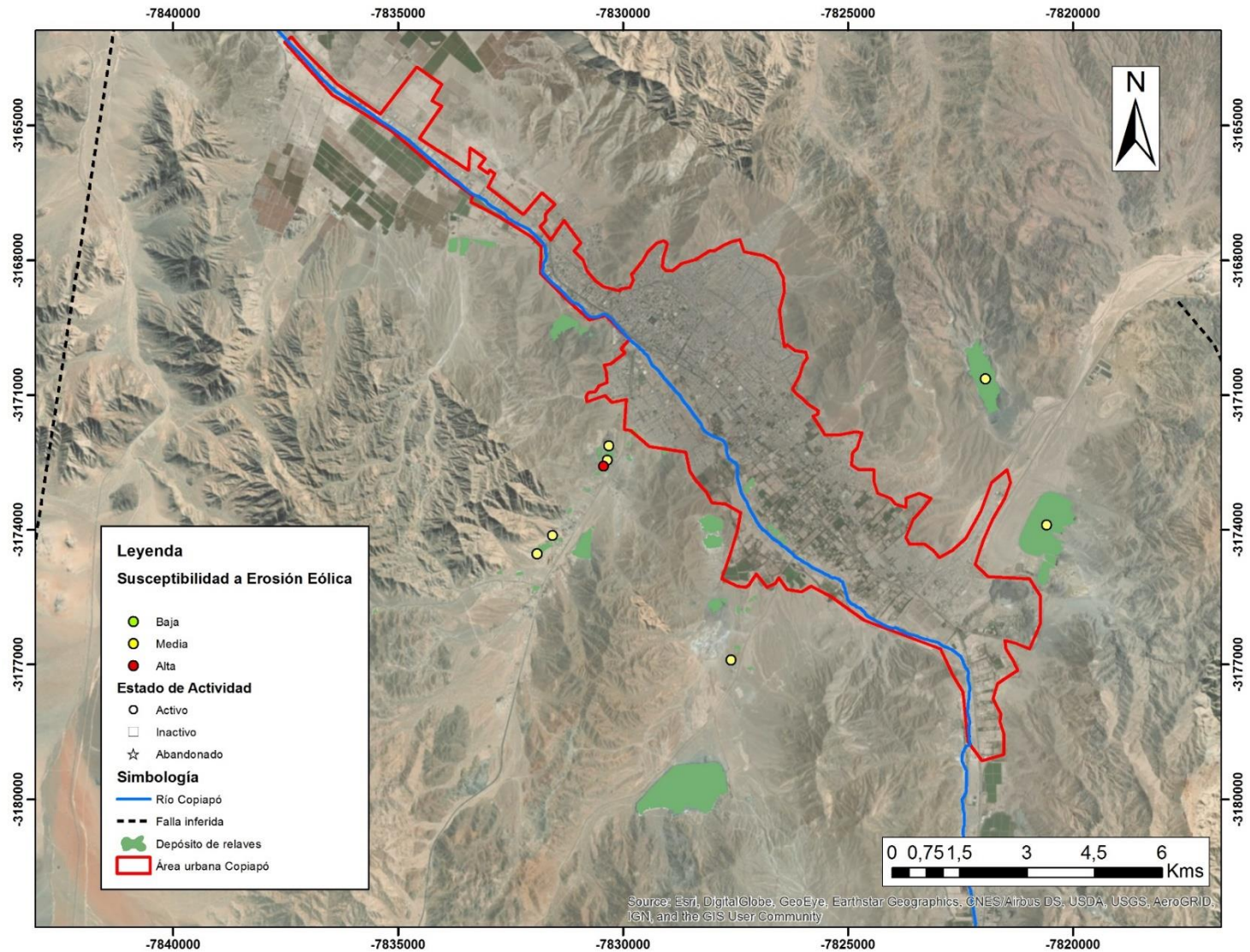


Figura 6.5. Mapa de susceptibilidad a erosión eólica en la comuna de Copiapó. El área urbana está encerrada por el polígono de color rojo y las áreas de los depósitos de relaves por áreas de color verde. Se representan los depósitos de relaves según su estado de actividad, por circunferencias (activos), cuadrados (inactivos) y estrellas (abandonados). El código de color es amarillo para los depósitos con susceptibilidad media y en color rojo los con susceptibilidad alta. Creación propia.

6.2. Análisis de resultados

En total fueron evaluados 46 depósitos de relaves de los 84 existentes en Copiapó: 8 activos, 35 inactivos y 3 abandonados (SERNAGEOMIN, 2019); a los 38 restantes no se les pudo determinar la totalidad de los parámetros necesarios para aplicar esta metodología, como ya fue mencionado en la Subsección 6.1.

En general, se tiene que los depósitos de relaves presentan desde susceptibilidad media a alta; los Índices de Susceptibilidad (IS) obtenidos para cada uno de los mecanismos de inestabilidad y erosión mediante cada Matriz de Susceptibilidad fluctuaron entre 50 y 75. El detalle se encuentra en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resumen de rangos de IS calculados en 46 depósitos de relaves de la comuna de Copiapó, para cada uno de los mecanismos de falla e inestabilidad presentados en este estudio.

Evento	Estado de actividad	Cantidad de depósitos de relaves		
		IS Bajo	IS Medio	IS Alto
Deslizamiento	Activo	0	6	2
	Inactivo	0	30	5
	Abandonado	0	3	0
Licuación	Activo	0	4	4
	Inactivo	0	35	0
	Abandonado	0	3	0
Rebalse	Activo	0	4	4
	Inactivo	n/a	n/a	n/a
	Abandonado	n/a	n/a	n/a
Erosión por agua	Activo	0	8	0
	Inactivo	0	30	5
	Abandonado	0	3	0
Erosión eólica	Activo	0	7	1
	Inactivo	n/a	n/a	n/a
	Abandonado	n/a	n/a	n/a

Como se puede notar en la Tabla 6.2, cada uno de los mecanismos estudiados posee principalmente valores de IS intermedios, y algunos altos.

Tabla 6.3. Detalle de depósitos de relaves de la comuna de Copiapó que presentaron IS alto al aplicarle alguna de las matrices de susceptibilidad.

Estado de actividad	Depósito	Mecanismo(s) donde presenta IS alto
Activo	Planta Matta	Deslizamiento (IS=75); Licuación (IS=71)
	Planta Irmita	Rebalse (IS=70)
	Planta Day 2	Rebalse (IS=70)
	Planta Alemana	Licuación (IS=70); Rebalse (IS=70)
	El Gato	Deslizamiento (IS=70); Licuación (IS=74); Rebalse (IS=75)
	Planta Rapelina	Licuación (IS=70); Erosión eólica (IS=70)
Inactivo	Santa Laura 2	Deslizamiento (IS=70)
	Ojancos 1	Deslizamiento (IS=70)
	Planta Matta	Deslizamiento (IS=70)
	Planta Puerto Rico	Deslizamiento (IS=70)
	Llaucavén 2	Deslizamiento (IS=70), Erosión por agua (IS=75)
	Planta San Sebastián	Erosión por agua (IS=72)
	Planta Arcadio	Erosión por agua (IS=72)
	Planta San Cristóbal	Erosión por agua (IS=72)
Planta Day	Erosión por agua (IS=72)	

La Tabla 6.3 detalla los depósitos de relaves que presentaron IS altos al menos con una de las Matrices de Susceptibilidad aplicadas. Se desprende de esto lo siguiente:

- En el caso de los depósitos activos, se tiene que 2 presentan un valor de $IS > 69$ por deslizamiento, 4 por licuación, 1 por erosión eólica y 4 por rebalse, lo que corresponde a susceptibilidad **alta**, según la Tabla 5.11. En particular, el depósito El Gato presenta susceptibilidad **alta** para tres mecanismos: deslizamiento (70), licuación (74) y rebalse (75).
- Para los depósitos inactivos, existen 5 que poseen **alta** susceptibilidad (IS sobre 69) frente al mecanismo de deslizamiento, y 5 por erosión por agua. Particularmente, Llaucavén 2 posee en ambos casos susceptibilidad alta.
- Finalmente, para los depósitos abandonados solo se tienen susceptibilidad **media** (valores de IS entre 50 y 69).

Considerando los depósitos de relaves de la comuna de Copiapó mencionados en el Subcapítulo 4.3 que presentaron algún evento dentro de los mecanismos abordados en este trabajo, se tiene que:

- Ojancos, el cual sufrió erosión por agua debido al aluvión del año 2015, obtuvo para este mecanismo un IS de 65 (susceptibilidad media).
- Planta Matta, afectada por erosión eólica en el año 2003, presentó para este mecanismo un IS de 67 (susceptibilidad media).

7. Discusión

La metodología expuesta en el Capítulo 6 permite la evaluación de la susceptibilidad de depósitos de relaves en diferentes estados de actividad (activo, inactivo y abandonado) frente a diversos mecanismos de falla y eventos erosivos, con una mínima implicancia económica y de fácil y rápida implementación. Aunque inicialmente fue ideado para depósitos ubicados en zonas principalmente áridas (considerando baja cantidad de precipitaciones anuales y alta radiación solar), es fácilmente aplicable en depósitos emplazados en lugares con condiciones climáticas diferentes.

Teniendo en consideración que en la actualidad no existe una metodología similar para conseguir esta estimación de susceptibilidad, la aquí expuesta puede ser una buena aproximación inicial, teniendo siempre en consideración que es un resultado provisional y serán necesarios estudios más detallados para conseguir una mejor caracterización de la susceptibilidad a inestabilidades y erosión de los depósitos de relaves que pueden encontrarse dentro de áreas urbanas, como es el caso de la comuna de Copiapó, donde el impacto ambiental y económico que podría haber al ocurrir un colapso o arrastre de material desde un depósito sería mayor que en zonas no pobladas.

Esta metodología considera dentro de los factores condicionantes los parámetros que son mencionados con mayor frecuencia dentro de la literatura, siendo identificados por diversos autores como causantes o contribuyentes para los distintos mecanismos de falla analizados dentro de este estudio, frente a los diferentes factores desencadenantes mencionados en la Subsección 5.4. Los rangos de valores considerados para determinar una mayor o menor susceptibilidad también fueron recopilados de casos reales ocurridos en diferentes situaciones donde existió liberación o arrastre de material de relaves desde el depósito y que fueron analizados en detalle por diversos autores (Dobry y Álvarez, 1967; Castro y Troncoso, 1989; Troncoso, 2002; Villavicencio *et al.*, 2014), como puede verse con mayor detalle dentro del Subcapítulo 5.2 relacionado con los factores condicionantes. Es importante destacar en este punto, que adicionalmente a lo que puede encontrarse en la literatura referente a casos internacionales documentados, la situación chilena fue analizada considerando además la opinión de diversos expertos en el tema, para asegurar una correcta contextualización del problema a escala nacional, y particularmente a nivel comunal en Copiapó.

El intervalo considerado para los diferentes rangos de IS inicialmente fue con la misma longitud: 30-49, 50-74 y 75-100, para la susceptibilidad baja, media y alta, respectivamente. Sin embargo, se adoptaron los rangos finalmente propuestos (30-49 para susceptibilidad baja, 50-69 para media, y 70-100 para alta), considerando que no existían depósitos de relaves que exhibieran susceptibilidad alta al aplicarle las Matrices de Susceptibilidad propuestas, siendo que en el pasado habían evidenciado alguno de los eventos estudiados en este trabajo, como por ejemplo Planta Matta frente a la erosión eólica o Planta Ojancos frente a erosión por agua. Un valor de 70 como límite inferior para el rango que define la susceptibilidad alta refleja mejor el comportamiento que se busca caracterizar, por lo cual fue seleccionado.

El proceso de calibración de las matrices de susceptibilidad se realizó mediante la evaluación de depósitos de relaves que fueron afectados por alguno de los mecanismos de falla considerados en este estudio, para la asignación de los diferentes puntajes asociados a cada uno de los parámetros

analizados. Es así como se consideró para ello las condiciones iniciales de dichos depósitos, y se les calculó el Índice de Susceptibilidad IS, buscando conseguir un valor superior a 70 al aplicar las matrices de susceptibilidad. Si este resultado no se conseguía, se ajustaban los puntajes asociados a los parámetros más importantes que influían en la evaluación que se estaba realizando. Sin embargo, no siempre fue posible recabar todos los datos para su correcta calibración, debido a la ausencia de información en la literatura, ya sea por la antigüedad del evento, o al plausible hermetismo que existe dentro del mundo de la minería con respecto a la divulgación de eventos catastróficos de este tipo. Por esto, se trabajó con datos obtenibles directamente de imágenes satelitales, o con consideraciones relacionadas con la edificación inicial de estos depósitos, basados en la norma de construcción que se encontraba vigente en el momento de su fundación.

Lo anterior llevó a que, en algunas de las matrices de susceptibilidad desarrolladas, particularmente las relacionadas con fallas causadas por deslizamiento, licuación y rebalse, la calibración se haya efectuado de manera teórica, con la consecuente necesidad de reajuste en el futuro. Lamentablemente, la manera óptima de conseguir esto sería evaluando con anterioridad y posterioridad a la ocurrencia de algún evento de este tipo en un determinado depósito de relaves. Frente a esta situación, se tomó en consideración estudios al respecto enfocados específicamente a cada uno de estos eventos ocurridos, en los cuales se identificó uno o más de los factores que fueron relevantes (Igwe y Fukuoka, 2014; Sun *et al.*, 2012; Blight, 2007; Bray y Sancio, 2006; entre otros). A dichos factores se les dio una mayor importancia y puntaje dentro de las matrices de susceptibilidad para el cálculo del Índice de Susceptibilidad.

Mediante la base de datos desarrollada por el SERNAGEOMIN, actualizada el 24 de abril de 2019, es posible contar con valores certeros de la mayoría de los parámetros considerados en el análisis de susceptibilidad planteado en este estudio para la comuna de Copiapó, y solo sería necesario recolectar en terreno los datos más específicos, como puede ser el contenido de finos o el grado de saturación del material, para construir así una base de datos más robusta, y estimar de manera más certera la susceptibilidad de cada depósito frente alguno de los eventos estudiados. Cabe mencionar que, debido a la no completitud de los datos públicos disponibles, se procuró ser lo más riguroso al momento de asignar puntajes dentro de cada matriz de susceptibilidad. Por lo anterior, con respecto a los resultados obtenidos al evaluar la susceptibilidad en la comuna de Copiapó, se tiene que, de los 84 depósitos de relaves, solo pudo ser evaluada la susceptibilidad en 46 de ellos, obteniéndose siempre valores de IS medios a altos, al aplicar cada una de las cinco matrices de susceptibilidad expuestas en este estudio.

Para conseguir una buena caracterización y evaluación de diferentes depósitos de relaves, es necesario que se determine con mayor precisión parámetros relacionados principalmente con la geometría del muro del depósito y las características geotécnicas del material con el cual es construido este, al ser parámetros críticos que condicionan la estabilidad del muro; resulta ser poco preciso el valor medido mediante modelos de elevación digital, tal como debió ser caracterizado en este estudio. Además, también se debe conocer las características asociadas a la velocidad y dirección del viento, y al nivel freático local. Los factores ambientales/geográficos pueden caracterizarse de manera más global y sencilla conociendo el contexto regional, y basarse en imágenes satelitales para determinar la proximidad a quebradas, cauces fluviales y fallas, así como también conocer la zona de aceleración efectiva, determinada según la Norma Chilena 433 (INN, 2009). En caso de contar con un mapa de peligro geológico de la zona donde esté analizándose la

susceptibilidad de los depósitos de relaves, se deberá evaluar caso a caso, dependiendo de la metodología empleada para la determinación del peligro. Sin embargo, independiente del caso, se debe considerar que los depósitos ubicados en las zonas con mayor peligro obtendrán siempre los mayores valores de susceptibilidad asociados a este parámetro.

En el año 2018, la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), en conjunto con el SERNAGEOMIN publicaron durante el desarrollo de este trabajo un documento titulado “Guía Metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes”, el cual permite realizar la evaluación de la estabilidad de depósitos de relaves que se encuentren activos o en proceso de cierre y en postcierre. Este sistema de clasificación hace uso de algunos parámetros comunes a los empleados en este estudio, y considera otros de mayor dificultad de obtención y con mayor impacto económico, generalmente monitoreables durante el funcionamiento del depósito de relaves, los cuales son controlados periódicamente para evitar fallas debido al funcionamiento. El resumen de dichos parámetros puede encontrarse en la Figura 7.1.

Grupo	Denominación	Factores
1	Tipo de Depósito	<ul style="list-style-type: none"> - Tranque de arenas de relave - Embalses de relave - Depósitos de relave filtrados - Depósitos de relave en pasta - Depósitos de relave espesados
2	Configuración Geométrica	<ul style="list-style-type: none"> - Altura de revancha - Ancho de coronamiento - Pendiente global del talud
3	Calidad del relave y niveles de compactación alcanzados en el depósito	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría y plasticidad de la fracción fina - Nivel de compactación
4	Suelo de fundación	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización del suelo de fundación para el proyecto de diseño
5	Antecedentes analizados de instrumentación y monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> - Posición de niveles freáticos - Funcionamiento sistema de drenaje - Aceleraciones sísmicas - Movimientos de muros y/o depósitos - Otros
6	Comportamiento mecánico durante la fase operacional (historia de la instalación)	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidad física evaluada durante la fase operacional - Incidentes con impacto a las operaciones - Cierres temporales por incidentes - Otros
7	Entorno regional para la condición de cierre	<ul style="list-style-type: none"> - Sismicidad - Crecidas - Régimen de vientos
8	Grado de implementación de medidas para asegurar la estabilidad física en la etapa de cierre	<ul style="list-style-type: none"> - Verificación de obras y acciones implementadas, según lo indicado en el plan de cierre aprobado

Figura 7.1. Grupos y factores asociados a mecanismos de fallas en un depósito de relave. Modificado de “Guía Metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes” (PUCV, 2018).

Si bien, esta metodología puede resultar más completa, como previamente se mencionó, solamente se aplica para depósitos que se encuentren activos, o en proceso de cierre, y para asegurar la estabilidad física del mismo en el futuro. Sin embargo, no considera depósitos de relaves que se hayan cerrado con anterioridad a la publicación del estudio o que actualmente se encuentren

abandonados y construidos bajo las normas actuales, o depósitos de relaves que se hayan construido en el pasado bajo antiguas normas de edificación. Precisamente aquí es donde radica lo interesante y novedoso del presente estudio, al considerarlos en su análisis y proporcionar una primera herramienta para su evaluación frente a la susceptibilidad de inestabilidades y erosión.

Como ya fue mencionado, actualmente no existe una metodología capaz de realizar una estimación de la susceptibilidad de erosión y potenciales inestabilidades en depósitos de relaves abandonados, debido a variados factores, tales como (a) ausencia de responsables posterior al cierre; (b) inexistencia de recursos para su caracterización; (c) falta de datos geotécnicos iniciales relacionados con su fundación y método de construcción; (d) construcción anterior a alguna norma existente, lo cual no lo deja sujeto a legislaciones vigentes; entre otros. Por lo anterior, es importante enfatizar que no se debería desestimar la supervisión de estos, debido al potencial peligro que este tipo de depósitos representa, sobre todo cuando comienzan a expandirse las áreas urbanas y estos quedan contenidos dentro del paisaje de la ciudad, como ocurre en la comuna de Copiapó. Muchas veces, simplemente se desconocen las verdaderas implicancias para la seguridad y salud por parte de las mismas personas que habitan en sectores aledaños, ya sea por la desestimación de importancia, o porque simplemente los registros que indican la verdadera naturaleza del depósito de relaves se desconocen. Se puede citar un caso reciente de esta década para mostrar la importancia de la caracterización de estos depósitos: debido al terremoto ocurrido el 27 de febrero del año 2010, en el sector de Pencahue un depósito de relaves abandonado de la minera Las Palmas, sufrió el proceso de licuación, el cual generó un deslizamiento del material ladera abajo, que terminó sepultando alrededor de 10 hectáreas de campo y acabando con la vida de 4 personas que vivían a los pies del depósito. Existía desconocimiento de los habitantes del sector, con respecto a la naturaleza y amenaza que presentaba para ellos el depósito en cuestión.

Cabe destacar que la metodología expuesta en este trabajo debe ser tratada solo como secundaria y referencial cuando se trate de evaluar la susceptibilidad de depósitos de relaves que actualmente se encuentren activos y hayan sido construidos bajo las normas chilenas actuales, especialmente en el caso de depósitos producto de actividades relacionadas con mediana y gran minería, puesto que existen métodos mucho más exactos y minuciosos para realizar la evaluación, según las normas chilenas vigentes, como el anteriormente mencionado de la PUCV con el SERNAGEOMIN. En estos casos el análisis involucra la implementación de modelos numéricos entre sus técnicas. Resultaría, sin embargo, interesante de aplicar esta metodología para el caso de depósitos de relaves asociados a actividades de pequeña minería, debido a que en la mayoría de los casos estos proyectos cuentan con un presupuesto muchísimo más acotado y puede resultar difícil el implementar y controlar todas las variables consideradas por estas otras metodologías.

8. Conclusiones

La metodología expuesta en este trabajo permite la evaluación de susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas en depósitos de relaves con diferentes estados de actividad.

El análisis de susceptibilidad planteado en este estudio permite una nueva visión para futuros análisis de peligro, considerando parámetros a escala regional que pueden ser influyentes y que actualmente no se encuentran considerados en los análisis de estabilidad que se realizan en los depósitos de relaves, principalmente activos.

Este trabajo aborda desde una perspectiva integradora la influencia de la mayor cantidad de factores que podrían afectar la estabilidad física de los depósitos de relaves. Dichos factores son relativamente fáciles y rápidos de estimar, o al menos poseen bajo costo económico para su estudio.

Dentro de las ventajas de la metodología propuesta en este estudio, una de las principales es la facilidad de su implementación para la evaluación de la susceptibilidad, debido a la relativa sencillez de obtener la gran mayoría de los parámetros que considera. De manera análoga, esta metodología garantiza un bajo costo económico para obtener la evaluación de la susceptibilidad, al ser parámetros mayormente medibles, algunos de manera directa en terreno, y otros por imágenes satelitales. Adicionalmente, aporta información para realizar una comparación entre diferentes depósitos en una misma zona, generando un criterio inicial para contrastar y determinar los depósitos de mayor cuidado. Y debido al ser una metodología generalizada, incluye en su análisis a todo tipo de depósito de relaves, independiente de su estado de actividad. Considerando este último punto, la presente metodología sienta las bases para un análisis con mayor detalle de los depósitos de relaves abandonados, los cuales actualmente en Chile han sido muy difícil de categorizar y estimar su verdadera implicancia en temas de seguridad de la población e impacto medioambiental. Mediante este trabajo, podrán establecerse las primeras líneas para la evaluación futura del peligro geológico que podrían presentar. Adicionalmente, al ser de bajo costo, es posible realizar una primera caracterización de los depósitos conocidos, identificados en el Catastro de Depósitos de Relaves (SERNAGEOMIN, 2019).

En la comuna de Copiapó se caracterizó la susceptibilidad a la erosión y a potenciales inestabilidades físicas de 46 depósitos de relaves en diferentes estados de actividad, de un total de 84, debido a la insuficiencia de datos de los 38 restantes. Dentro de los resultados obtenidos, se tiene que:

- Independiente del estado de actividad que poseyeran los depósitos de relaves analizados, para todos se obtuvo un Índice de Susceptibilidad (IS) de medio a alto, al aplicar las 5 matrices de susceptibilidad planteadas en este estudio.
- En el caso de los depósitos de relaves que se encontraban activos, los IS altos corresponden al mecanismo de deslizamiento en 2 de ellos, 4 en el caso de licuación, 4 en rebalse y 1 en

erosión eólica. En particular, el Depósito El Gato es el que presenta susceptibilidad alta frente a 3 mecanismos: deslizamiento (70), licuación (74) y rebalse (75).

- Para los depósitos de relaves inactivos, se obtuvieron valores de IS alto tanto para los mecanismos de deslizamiento como erosión por agua (5 en cada caso). El depósito Llaucavén 2 es el único que presenta para ambos mecanismos IS altos: 70 y 75, respectivamente.
- En depósitos de relaves abandonados, solo se estimaron IS medios (50-69) para cada mecanismo analizado (deslizamiento, licuación y erosión por agua).

9. Bibliografía

- Agromet. Red Agroclimática Nacional. 2016. Estaciones de monitoreo climático. Recuperado de <http://www.agromet.inia.cl/estaciones.php>.
- Ambraseys, N.N & Douglas, J. 2003. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 23. 1-18. 10.1016/S0267-7261(02)00153-7.
- Apicultura.cl. Visitado en enero de 2016. Datos de documento en sitio relacionados con Clima chileno. Recuperado de http://apicultura.cl/biblioteca_principal.html
- Arévalo, C. 2005. Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. No. 91, 53 p. 1. Mapa escala 1:100.000.
- Azam, S.; Li, Q. 2010. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years, *Geotechnical News*, p. 50-53.
- Bialostocki, J.; Salinas, R., 2003. Metodología para incorporar la erosión eólica en taludes de tranques de arenas de relaves. Tesis de título para optar al grado de Ingeniero Constructor, PUCV, Chile.
- Blight, G. E. 2007. Wind Erosion of tailings dams and mitigation of the dust nuisance. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, volumen 107, 99-108.
- Blight, G. E.; Troncoso, J.; Fourie, A.B.; and Wolski, W. 2000. Issues in the geotechnics of mining wastes and tailings. In *Proceedings of Geo Eng 2000, an International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, November 2000. pp. 1253–1285.
- Bray, J.; Sancio, R. 2006. Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 132, No. 9, September 1, 2006.
- Cartaya, S.; Méndez, W.; Pacheco, H. 2006. Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, vol. 31, no 9.
- Carvajal, M. 2018. Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. Memoria de título Universidad de Chile
- Castro C.; Marquardt C.; Zúñiga A. 2010. Peligros naturales en geositos de interés patrimonial en la costa sur de Atacama. *Revista del Norte Grande*.
- Castro, G.; Troncoso, J. 1989. Seismic behavior of three tailings dams during the March 3, 1985 Earthquake. 5th Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Santiago, Chile.

- Davies, E. 1966. Report of Tribunal Appointed to Inquire into Disaster at Aberfan, H.L. (316) H.C. 553/ 1966-67, Her Majesty's Stationery Office, London.
- Dirección General de Aguas. 2015a. Información Hídrica de las Cuencas Priorizadas, Fichas Temáticas: Cuenca Copiapó.
- Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. 2015b. Informe precipitaciones anuales en mm, Hoya Río Copiapó. Santiago, Chile
- Dirección Meteorológica de Chile. 2015. Boletín Climatológico Mensual. Vol. 31 N°3-2015, p. 7. Santiago, Chile.
- Dobry, R.; Alvarez, L. 1967. Seismic failures of chilean tailings dams. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division v.93 (n.SM6): pp.237-260
- Earle, S. 2019. Physical Geology – 2nd Edition. Victoria, B.C.: BCcampus. Recuperado de <https://opentextbc.ca/physicalgeology2ed/>.
- Ellis, J.; Sherman, D. 2013. Fundamentals of Aeolian Sediment Transport: Wind-Blown Sand. Treatise on Geomorphology. 11. 85-108. 10.1016/B978-0-12-374739-6.00299-2.
- Espinace, R., Palma, J., Valenzuela, P., Jaramillo, I., Miranda, A. 2006. Evaluación del efecto eólico en tranques de relave. CAMSIG, Argentina.
- González de Vallejo, L.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. 2002. Ingeniería Geológica. Pearson Educación, S.A. Madrid, España.
- Goodarzi, E.; Shui, L.; Ziaei, M.; Haghizadeh, A. 2010. Estimating probability of failure due to internal erosion with event tree analysis. EJGE Vol. 15, Bund. J
- Griem, W. 2015. Atacama: Cronología de eventos climáticos. Recuperado de Museo Virtual Atacama: <http://www.geovirtual2.cl/Clima/Histclima01.htm>
- Griem, W. 2016. Morfología de la región de Atacama, Chile. Unidades morfológicas de la región de Atacama. Recuperado de Museo Virtual Atacama: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap09b.htm>
- Hauser, A. 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: un análisis crítico a 5 años del desastre. SERNAGEOMIN Boletín No. 49, 47 p. Santiago.
- Hjulstrom, F. 1935. Studies of Morphological Activity of Rivers as Illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala, 25, 221-527.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). 2001. Tailings Dams, Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences. Bulletin 121.
- Instituto Geográfico Militar. 1986. Levantamiento Aerofotogramétrico en base a carta regular 1:50.000. Hojas Caldera y Copiapó, escala 1:250.000.

- Igwe, O.; Fukuoka, H. 2015. Arab J Geosci 8: 3223-3233. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1398-7>
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Consultado el 20 de diciembre de 2015. Consulta de estaciones meteorológicas en línea. Recuperado de <http://www.agromet.inia.cl/estaciones.php>.
- Instituto Geográfico Militar. 1986. Levantamiento Aerofotogramétrico en base a carta regular 1:50.000. Hojas Caldera y Copiapó, escala 1:250.000.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). 2009. Norma Chilena Oficial NCh433. Of 1996. Santiago, Chile.
- Joyner, W.; Boore, D. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California earthquake, BSSA, 71, 2011-2038.
- Kanamori, H. 1983. Magnitude scale and quantification of earthquakes, Tectonophysics, Volume 93, Issues 3-4, 10 April 1983, Pages 185-199, ISSN 0040-1951, [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90273-1](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(83)90273-1).
- La Tercera. 2017. Chañaral revive pesadilla de aluvión y emergencia suma 2.000 damnificados. Recuperado de <https://www.latercera.com/noticia/chanaral-revive-pesadilla-aluvion-emergencia-suma-2-000-damnificados/>
- Lara, M. 2007. Metodología para la Evaluación y Zonificación de Peligro de Remociones en Masa con Aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al Título de Geólogo y al grado de Magíster en Ciencias. Departamento de Geología, U. de Chile.
- Leyton, F.; Ruiz, S.; Sepúlveda, S. 2010. Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile Central. *Andean Geology* 37 (2): 455-472. Julio, 2010.
- Liu, C.; Shen, Z.; Gan, L.; Xu, L.; Zhang, K; Jin, T. 2018. The Seepage and Stability Performance Assessment of a New Drainage System to Increase the Height of a Tailings Dam. *Applied Sciences* 2018, 8, 1840; doi:10.3390/app8101840
- Lottermoser, B. 2007. *Mine Wastes Characterization, Treatment, Environmental Impacts* (Second Ed). Springer.
- Marot, D.; Bendahmane, F.; Nguyen, H. 2012. Influence of angularity of coarse fraction grains on internal erosion process. International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Aug 2012, Paris, France. Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion. <hal-01716703>
- Medvinsky-Roa, G.; Caroca, V.; Vallejo, J. 2016. Informe sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al consejo Económico Social de la Naciones Unidas. Fundación Relaves Chile y Fundación Terram.

- Ministerio de Minería. 2007. Decreto Supremo 248. Aprueba reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción operación y cierre de los depósitos de relaves. Santiago, Chile.
- Ministerio de Minería. [s.a]. Glosario Minero. Recuperado de <http://www.minmineria.gob.cl/glosario-minero-r/relave/>
- Ministerio de Obras Públicas. 2015. Decreto 50: Aprueba reglamento a que se refiere el Artículo 295 inciso 2º, del Código de Aguas, estableciendo las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el Artículo 294 del referido texto legal. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.
- Monroy, O. 2017. Aluviones e inundaciones en la historia de la provincia de Chañaral. Siglos XIX, XX y XXI. Gráfica Pamela Díaz Castro, Santiago, en prensa.
- Mujica, D.; Rojas, F.; Jamett, E. 2014. Análisis de licuación en Tranques de Relave, teniendo como base los efectos de los sismos del 28 de marzo de 1965, 03 de marzo de 1985 y 27 de febrero de 2010. Informe inédito.
- Namikas, S.; Sherman, D. 1995. A Review of the Effects of Surface Moisture Content on Aeolian Sand Transport. A Review Of The Effects Of Surface Moisture Content On Aeolian Sand Transport. 10.1007/978-94-009-0067-7_13.
- National Park Service (NPS). 2015. Series: Alaska Park Science - Volume 13 Issue 2: Mineral and Energy Development. Recuperado de <https://www.nps.gov/articles/aps-v13-i2-c8.htm>
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). [199-]. Aluviones en Chile en la Década del 90. Recuperado de <http://repositoriodigitalonemi.cl/web/handle/2012/89>
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior. Visitado el 20 de diciembre de 2015. Monitoreo por evento hidrometeorológico, Sistema de Alertas. Recuperado de <http://www.onemi.cl/alerta/monitoreo-por-evento-hidrometeorologico/>.
- Palma, J. 2016. Operación y control de tranques de relaves. Seminario “Minería chilena y sus desafíos: una visión integral”. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Peña, H. 1985. Análisis del aluvión de mayo de 1985 del río Manflas: cuenca del río Copiapó. Dirección General de Aguas.
- Pontificia Universidad Católica de Chile – Servicio Nacional de Geología y Minería. 2018. Guía Metodológica para la Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes. Santiago, Chile.
- Pontificia Universidad Católica de Chile – SEREX Territorio, Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo. 2003. Declaración de impacto ambiental. Plan regional de desarrollo urbano. Atacama, Chile.

- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Díez-Herrero, A., Pereira, H. G. 2008. Reported tailings dam failures. A review of the european incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152, pp. 846-852.
- R & Q Ingeniería Ltda. 1993. Caudales Ecológicos en Regiones IV, V y Metropolitana. Informe Final. Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, Ministerio de Obras Públicas, Tomo 4.
- Santibáñez, I.; Cembrano, J.; García-Pérez, T.; Costa, C.; Yáñez, G.; Marquardt, C.; Arancibia, G.; González, G. 2019. Crustal faults in the Chilean Andes: geological constraints and seismic potencial. *Andean Geology* 46 (1): 32-65. January, 2019. Doi: 10.5027/andgeoV46n1-3067
- Secretaría Regional Ministerial de Salud. 2010. Diagnóstico de salud regional de Atacama con enfoques de determinantes sociales de salud. Departamento de Salud Pública. Tercera Región de Atacama.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. 2019. Catastro Depósitos de Relaves en Chile. Santiago. Recuperado de <http://www.sernageomin.cl/mineria-relaves.php>
- Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. 2015a. Registro de los principales desastres de origen geológico en Chile y efectos sobre la población y bienes públicos y privados entre 1980 y 2015. Unidad de Peligros Geológicos. Santiago, Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. 2015b. Delimitación de áreas de inundación de aluviones, marzo 2015. Inédito.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. 2007a. Guía Técnica de operación y control de depósitos de relaves. Santiago, Chile.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. 2007b. Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves. Santiago, Chile.
- Smith, E.; Connell, D. 1982. The role of water in the failure of tailings dams, *Journal of International Mine Water Association*.
- Sun, E.J.; Zhang, X.K.; Li, Z.X.; Wang, Y.H. 2012. Tailings dam flood overtopping failure evolution pattern. *Procedia Eng.* 2012, 28, 356–362.
- The Mining Association of Canada. 2017. *A Guide to the Management of Tailings Facilities*, Third Edition.
- Troncoso, J. 2002. Dynamic properties and seismic behavior of thickened tailings deposits. *International Symposium on Paste and Thickened Tailings Disposal*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Troncoso, J. 1997. Geotechnics of tailings dams and sediments, *SOA. Environmental Geotechnics*, 2: 1405–1423.

- United States Department of Agriculture (USDA). [s.a.]. Wind Erosion. NRCS Field Office Technical Guide. Recuperado de https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/TX/Wind_Erosion.pdf
- Verdugo, R. 2011. Seismic performance of slopes and earth and tailings dams (2010 Maule Earthquake). In Proceedings of the Fifth International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering (5-ICEGE), Santiago de Chile, 10–13 January 2011.
- Verdugo, R. 2005. Main factors that control liquefaction of tailings sands. In Proceedings of the Satellite Conference on Geotechnical Earthquake Engineering, Osaka, Japón.
- Vick, S.G. 1990. Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. Bi-Tech Publishers Limited, Canada.
- Villavicencio, G.; Espinace, R.; Palma, J.; Fourie, A.; Valenzuela, P. 2014. Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(4): 449-464, <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0142>
- Villavicencio, G.; Breul, P.; Espinace, R.; Valenzuela, P. 2011. Control de compactación con penetrómetro ligero en tranques de relaves, considerando su variabilidad material y estructural. *Revista de la construcción* Vol. 11 N° 1. P 119-133.
- Walker, M. 2012. Hot deserts: Engineering, Geology and Geomorphology engineering group working party report. *Engineering Geology Special Publication* 25: 424 pp.
- Willetts, B. 1983. Transport by wind of granular materials of different grain shapes and densities. *Sedimentology* 30. 669-679.
- Zangeneh, N., Eberhardt, E., Bustin, R.M., and Bustin, A. 2013. A numerical investigation of fault slip triggered by hydraulic fracturing. In *Effective and sustainable hydraulic fracturing*. Edited by Bungler et al. InTech Publishers. pp. 477–488.

10. Anexos

ANEXO 1

Tabla A: Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. S/I: Sin Información, N_A: No aplica. Modificado del catastro de relaves del SERNAGEOMIN (2019)

Nombre Empresa	Nombre Faena	Nombre Instalación	Tipo	Recurso	ESTADO	Método Construcción	Volumen Actual	Tonelaje Actual
ANA MARIA MUNIZAGA	PLANTA ALEMANA	EMBALSE DE RELAVE	EMBALSE	Au-Cu	INACTIVO	EMBALSE	267	400
MINERA SAN MARINO	AURICOP	TRANQUE	TRANQUE	Au-Cu	INACTIVO	N_A	0	0
SOC. PUNTA DEL Cu S.A.	PLANTA SAN JOSE	LAS CRUCES 2	FILTRADO	Cu	EN CONSTRUCCION	S/I	0	0
OP MINING CHILE SpA	PLANTA OP (EX FARAH)	EMBALSE OP	EMBALSE	Cu-Au	INACTIVO	EMBALSE	18	27
CARLOS SOTO FUENTEALBA	PLANTA PORVENIR	PORVENIR SUR	TRANQUE	Cu	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
MIGUEL DAY	PLANTA DAY	DESCONOCIDO	TRANQUE	Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	S/I	S/I
CIA. MINERA SAN PATRICIO	SAN PATRICIO	TRANQUE	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	S/I	S/I
NATIMAN FLORES DIAZ	PLANTA OJOS DE AGUA	OJOS DE AGUA	EMBALSE	Au	ACTIVO	EMBALSE	1866	2800
SOTRATEC-MINART LTDA.	PLANTA EL CATEADOR	EMBALSE DE RELAVE	EMBALSE	Cu	ACTIVO	EMBALSE	1200	1812
CIA. MINERA SAN ESTEBAN PRIMERA	PLANTA SANTA ESTEBAN (EX SANTA LAURA)	SANTA LAURA 1	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
CIA. MINERA SAN ESTEBAN PRIMERA	PLANTA SANTA ESTEBAN (EX SANTA LAURA)	SANTA LAURA 3	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0

Tabla A (CONTINUACIÓN): Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. S/I: Sin Información, N_A: No aplica. Modificado del catastro de relaves del SERNAGEOMIN (2019)

Nombre Empresa	Nombre Faena	Nombre Instalación	Tipo	Recurso	Estado	Método Construcción	Volumen Actual	Tonelaje Actual
MIGUEL DAY	PLANTA DAY	DAY 2	TRANQUE	Au	ACTIVO	AGUAS ABAJO	66853	100280
NELSON ZUÑIGA CARVAJAL	PLANTA SANTA LAURA	TRANQUE	TRANQUE	Cu	ACTIVO	S/I	24137	36206
PEDRO JESUS CASTILLO VEGA	PLANTA RAPELINA	RAPELINA	EMBALSE	Au	ACTIVO	EMBALSE	12333	18500
ENAMI	PLANTA MATTA	TRANQUE 3	TRANQUE	Cu	ACTIVO	EJE CENTRAL	17095343	25643014
SOC. CONTRACTUAL MINERA ALIANZA	PLANTA VIÑITA AZUL	TRANQUE 3	TRANQUE	Cu	ACTIVO	EJE CENTRAL	88312	132468
OP MINING CHILE SpA	PLANTA OP (EX FARAH)	FARAH 1-2-3-4-5-6-7	TRANQUE	Cu-Au-Fe	INACTIVO	S/I	0	0
SOC. GUERRERO HERMANOS Y CIA. LTDA.	PLANTA ARCADIO	ARCADIO	EMBALSE	Cu-Au	ACTIVO	EMBALSE	43553	65330
MAYA ENTERPRISES LTDA.	PLANTA ANDACOLLO	EMBALSE MAYA	EMBALSE	Cu	INACTIVO	EMBALSE	0	0
SCM SAN SEBASTIAN	PLANTA ANDREA	TRANQUE	EMBALSE	Au-Cu	INACTIVO	EMBALSE	0	0
ELIAS RESK CONTRERAS (SOC. MINERA SANTA TERESA)	PLANTA SANTA TERESA	SANTA TERESA 1	TRANQUE	Au	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
OSCAR GOMEZ ESCOBAR	PLANTA MONSERRAT	MONSERRAT	TRANQUE	Au	INACTIVO	AGUAS ABAJO	0	0
SOC. CONTRACTUAL MINERA ALIANZA	PLANTA VIÑITA AZUL	TRANQUE 2	TRANQUE	Cu	INACTIVO	EJE CENTRAL	227264	340897
SCM ATACAMA KOZAN	KOZAN	EL GATO	TRANQUE	Cu	ACTIVO	AGUAS ABAJO	13847568	20771352

Tabla A (CONTINUACIÓN): Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. S/I: Sin Información, N_A: No aplica. Modificado del catastro de relaves del SERNAGEOMIN (2019)

Nombre Empresa	Nombre Faena	Nombre Instalación	Tipo	Recurso	Estado	Método Construcción	Volumen Actual	Tonelaje Actual
SOTRATEC-MINART LTDA.	PLANTA EL CATEADOR	TRANQUE	TRANQUE	Cu	INACTIVO	AGUAS ABAJO	S/I	S/I
SLM ESCONDIDA UNA DE LAS SIERRAS RAJO DE Au	PLANTA CANDELARIA	CANDELARIA 1	EMBALSE	Cu	INACTIVO	EMBALSE	0	0
COMERCIAL LEDESMA REPRESENTACIONES	PLANTA ANDREA	ANDREA	EMBALSE	Au-Cu	INACTIVO	EMBALSE	0	0
CIA. MINERA MANTOS DE Au	LA COIPA	RAHCO	FILTRADO	Au-Ag	INACTIVO	N_A	806008049	120912074
SOC. MINERA CANDELARIA	PLANTA CAuNA	CAuNA	TRANQUE	Cu	ACTIVO	EJE CENTRAL	20122	30184
SOC. MINERA FORTUNA LTDA.	PLANTA PUERTO RICO	PUERTO RICO 0-1-2	TRANQUE	Cu	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
CIA. MINERA MANTOS DE Au	LA COIPA	RAKITO	TRANQUE	Au-Ag	INACTIVO	S/I	0	0
MINEX S.A.	PLANTA SAN EDUARDO	DEPOSITO 1	EMBALSE	Cu	INACTIVO	EMBALSE	2084	3126
CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	BODEGA ALTO	DEPOSITO DE RELAVE 3	TRANQUE	Cu-Au	INACTIVO	N_A	0	0
DESCONOCIDO	DESCONOCIDO	TRANQUE	TRANQUE	Au	INACTIVO	S/I	0	0
DESCONOCIDO	DESCONOCIDO	TRANQUE	TRANQUE	Au	INACTIVO	S/I	0	0
DESCONOCIDO	DESCONOCIDO	TRANQUE	TRANQUE	Au	INACTIVO	S/I	0	0
CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	OJANCOS	OJANCOS 1	TRANQUE	Cu	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	BODEGA ALTO	DEPOSITO DE RELAVE 4	TRANQUE	Cu-Au	INACTIVO	N_A	0	0
CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	OJANCOS	TRANQUE	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
COMPAÑIA MINERA FORTUNA	PLANTA PUERTO RICO	EMBALSE 4	EMBALSE	Cu	ACTIVO	EMBALSE	17762	26643

Tabla A (CONTINUACIÓN): Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. S/I: Sin Información, N_A: No aplica. Modificado del catastro de relaves del SERNAGEOMIN (2019)

Nombre Empresa	Nombre Faena	Nombre Instalación	Tipo	Recurso	ESTADO	Método Construcción	Volumen Actual	Tonelaje Actual
INVERSIONES RAY LTDA.	PLANTA SAN CRISTOBAL	DESCONOCIDO	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
INVERSIONES RAY LTDA.	PLANTA SAN CRISTOBAL	DESCONOCIDO	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
CIA. MINERA SAN ESTEBAN PRIMERA	PLANTA SANTA ESTEBAN (EX SANTA LAURA)	SANTA LAURA 2	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
EXEQUIEL BUGUEÑO	SANTA ROSA	SANTA ROSA 2	EMBALSE	Au	INACTIVO	EMBALSE	0	0
SOC. MINERA UNION	PLANTA LA UNION (EX SAN LORENZO)	UNION	TRANQUE	Cu	ABANDONADO	AGUAS ARRIBA	0	0
S. PIZARRO (EX RUBELINDO ALQUINTA)	PLANTA ANDACOLLO	ANDACOLLO 2	TRANQUE	Au	ABANDONADO	S/I	0	0
CARLOS SOTO FUENTEALBA	PLANTA PORVENIR	PORVENIR	TRANQUE	Cu	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
MANUEL ACHU PEREZ	PLANTA CUESTA CARDONES	CUESTA CARDONES 1	TRANQUE	Cu-Au	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
LUIS MORALES	DESCONOCIDO	DESCONOCIDO	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 1	TRANQUE	Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
NUÑEZ HNOS	PLANTA LLAUCAVEN	LLAUCAVEN 1	TRANQUE	Au-Cu	INACTIVO	S/I	0	0
NUÑEZ HNOS	PLANTA LLAUCAVEN	LLAUCAVEN 2	TRANQUE	Au-Cu	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
DELIA NIETO ROBLE	PLANTA TANIA	TANIA	TRANQUE	Cu-Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
DOMINGO GUGGIANA	PLANTA GUGGIANA	GUGGIANA	TRANQUE	Au-Cu	ABANDONADO	EJE CENTRAL	0	0
ACIBOL SpA	PLANTA IRMITA	EMBALSE DE RELAVES	EMBALSE	Cu	ACTIVO	EMBALSE	132237	198356

Tabla A (CONTINUACIÓN): Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. S/I: Sin Información, N_A: No aplica. Modificado del catastro de relaves del SERNAGEOMIN (2019)

Nombre Empresa	Nombre Faena	Nombre Instalación	Tipo	Recurso	ESTADO	Método Construcción	Volumen Actual	Tonelaje Actual
CIA. MINERA Au VERDE	AMANDA	AMANDA (EX CHARITO)	TRANQUE	Au	INACTIVO	S/I	S/I	S/I
NATIMAN FLORES DIAZ	PLANTA OJOS DE AGUA	OJOS DE AGUA	EMBALSE	Au	INACTIVO	EMBALSE	S/I	S/I
CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	OJANCOS	OJANCOS 2	TRANQUE	Cu	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
CIA. MINERA DEL PACIFICO	CERRO NEGRO NORTE	CERRO NEGRO NORTE	EN PASTA	Fe	ACTIVO	S/I	8660852	12991279
SOC. PUNTA DEL Cu S.A.	PLANTA SAN JOSE	LAS CRUCES	TRANQUE	Cu	ACTIVO	EJE CENTRAL	33836449	50754674
CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	EMBALSE DE RELAVES	EMBALSE	Au	INACTIVO	EMBALSE	0	0
ENAMI	PLANTA MATTÁ	TRANQUE 1	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
ENAMI	PLANTA MATTÁ	TRANQUE 2	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	BODEGA ALTO	BODEGA ALTO	TRANQUE	Cu-Au	INACTIVO	N_A	0	0
HECTOR CASTELLON	PLANTA CASTELLON	CASTELLON	TRANQUE	Au	INACTIVO		0	0
CARLOS IRIBARREN	LUZ ELENA	FLORENCIA 2	EMBALSE	Cu-Au	INACTIVO	EMBALSE	0	0
CIA. MINERA SAN ESTEBAN	PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 2B	TRANQUE	Cu	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
SOC. CONTRACTUAL MINERA ALIANZA	PLANTA VIÑITA AZUL	TRANQUE 1	TRANQUE	Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
LUIS PADILLA	PLANTA CASERON	TRANQUE	TRANQUE	Cu	ABANDONADO	S/I	0	0
DESCONOCIDO	PLANTA LA CHIMBA	TRANQUE	TRANQUE	Cu	ABANDONADO	S/I	0	0

Tabla A (CONTINUACIÓN): Características generales de los depósitos de relaves en la comuna de Copiapó. S/I: Sin Información, N_A: No aplica. Modificado del catastro de relaves del SERNAGEOMIN (2019)

Nombre Empresa	Nombre Faena	Nombre Instalación	Tipo	Recurso	ESTADO	Método Construcción	Volumen Actual	Tonelaje Actual
CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 2	TRANQUE	Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 3	TRANQUE	Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
SLM ESCONDIDA UNA DE LAS SIERRAS RAJO DE Au	PLANTA CANDELARIA	CANDELARIA 2	EMBALSE	Cu	INACTIVO	EMBALSE	0	0
SLM ESCONDIDA UNA DE LAS SIERRAS RAJO DE Au	PLANTA CANDELARIA	CANDELARIA 3	EMBALSE	Cu	INACTIVO	EMBALSE	0	0
EXEQUIEL BUGUEÑO	SANTA ROSA	SANTA ROSA 1	EMBALSE	Au	ACTIVO	EMBALSE	0	0
CARLOS IRIBARREN	LUZ ELENA	FLORENCIA 1	EMBALSE	Cu-Au	INACTIVO	EMBALSE	0	0
S. PIZARRO (EX RUBELINDO ALQUINTA)	PLANTA ANDACOLLO	ANDACOLLO 1	TRANQUE	Au	ABANDONADO	AGUAS ARRIBA	0	0
ELIAS RESK CONTRERAS (SOC. MINERA SANTA TERESA)	PLANTA SANTA TERESA	SANTA TERESA 3	TRANQUE	Au	INACTIVO	S/I	0	0
ELIAS RESK CONTRERAS (SOC. MINERA SANTA TERESA)	PLANTA SANTA TERESA	SANTA TERESA 4	TRANQUE	Au	INACTIVO	S/I	0	0
CIA. MINERA SAN ESTEBAN	PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 1	TRANQUE	Cu	INACTIVO	S/I	0	0
CIA. MINERA SAN ESTEBAN	PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 2A	TRANQUE	Cu	INACTIVO	EJE CENTRAL	0	0
MIGUEL DAY	PLANTA DAY	DAY	TRANQUE	Cu-Au	INACTIVO	AGUAS ARRIBA	0	0
MINEX S.A.	PLANTA SAN EDUARDO	DEPOSITO 2	EMBALSE	Cu	ACTIVO	EMBALSE	2133	3200

ANEXO 2: Valores considerados para el cálculo del Índice de Susceptibilidad IS. Se desestimaron los depósitos de relaves que no fue posible obtener la totalidad de los datos para esta evaluación.

Tabla B. Datos administrativos y de construcción de los depósitos de relaves. Se asigna un identificador para cada uno, para hacer referencia en las Tablas C y D.

ID	Empresa	Faena	Depósito	Tipo de Depósito	Mineral	Método de construcción	Estado actividades
1	MINERA SAN MARINO	AURICOP	TRANQUE	TRANQUE	ORO-COBRE	N_A	NO ACTIVO
2	CARLOS IRIBARREN	LUZ ELENA	FLORENCIA 2	EMBALSE	COBRE-ORO	N_A	NO ACTIVO
3	CARLOS IRIBARREN	LUZ ELENA	FLORENCIA 1	EMBALSE	COBRE-ORO	N_A	NO ACTIVO
4	CESAR MIRANDA LARA	PLANTA PORVENIR	PORVENIR	TRANQUE	COBRE	EJE CENTRAL	NO ACTIVO
5	CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	EMBALSE DE RELAVES	TRANQUE	ORO	S/I	NO ACTIVO
6	CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 1	TRANQUE	ORO	AGUAS ARRIBA	NO ACTIVO
7	CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 2	TRANQUE	ORO	AGUAS ARRIBA	NO ACTIVO
8	CIA. MINERA PURIFICACION	PLANTA PURIFICACION	PURIFICACION 3	TRANQUE	ORO	AGUAS ARRIBA	NO ACTIVO
9	CIA. MINERA SAN ESTEBAN	PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 2B	TRANQUE	COBRE	EJE CENTRAL	NO ACTIVO
10	CIA. MINERA SAN ESTEBAN	PLANTA SAN ESTEBAN	SAN ESTEBAN 1	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO
11	CIA. MINERA SAN ESTEBAN PRIMERA	PLANTA SANTA ESTEBAN (EX SANTA LAURA)	SANTA LAURA 2	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO
12	CIA. MINERA SAN ESTEBAN PRIMERA	PLANTA SANTA ESTEBAN (EX SANTA LAURA)	SANTA LAURA 1	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO

Tabla B (CONTINUACIÓN): Datos administrativos y de construcción de los depósitos de relaves. Se asigna un identificador para cada uno, para hacer referencia en las Tablas C y D.

ID	Empresa	Faena	Depósito	Tipo de Depósito	Mineral	Método de construcción	Estado actividades
13	CIA. MINERA SAN ESTEBAN PRIMERA	PLANTA SANTA ESTEBAN (EX SANTA LAURA)	SANTA LAURA 3	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO
14	CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	BODEGA ALTO	DEPOSITO DE RELAVE 4	TRANQUE	COBRE-ORO	N_A	NO ACTIVO
15	CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	BODEGA ALTO	BODEGA ALTO	TRANQUE	COBRE-ORO	N_A	NO ACTIVO
16	CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	OJANCOS	OJANCOS 2	TRANQUE	COBRE	AGUAS ARRIBA ?	NO ACTIVO
17	CMC SALI HOCHSCHILD S.A.	OJANCOS	OJANCOS 1	TRANQUE	COBRE	AGUAS ARRIBA ?	NO ACTIVO
18	COMERCIAL LEDESMA REPRESENTACIONES	PLANTA ARCADIO	PLANTA ANDREA	EMBALSE	ORO-COBRE	N_A	NO ACTIVO
19	DELIA NIETO ROBLE	PLANTA TANIA	TANIA	TRANQUE	COBRE-ORO	AGUAS ARRIBA ?	NO ACTIVO
20	DOMINGO GUGGIANA	PLANTA GUGGIANA	GUGGIANA	TRANQUE	ORO-COBRE	EJE CENTRAL	ABANDONADO
21	ELIAS RESK CONTRERAS (SOC. MINERA SANTA TERESA)	PLANTA SANTA TERESA	SANTA TERESA 2	TRANQUE	ORO	S/I	NO ACTIVO
22	ENAMI	PLANTA MATTA	TRANQUE 3	TRANQUE	COBRE	S/I	ACTIVO
23	ENAMI	PLANTA MATTA	TRANQUE 2	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO
24	EPV	PLANTA LA CHIMBA	TRANQUES	TRANQUE	COBRE	S/I	ABANDONADO
25	EXEQUIEL BUGUEÑO	SANTA ROSA	SANTA ROSA 2	EMBALSE	ORO	N_A	NO ACTIVO
26	EXEQUIEL BUGUEÑO	SANTA ROSA	SANTA ROSA 1	EMBALSE	ORO	N_A	NO ACTIVO
27	GILBERTO ACIAR	PLANTA IRMITA	EMBALSE DE RELAVES	EMBALSE	COBRE	N_A	ACTIVO
28	INVERSIONES RAY LTDA.	PLANTA SAN CRISTOBAL	EPV	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO

Tabla B (CONTINUACIÓN): Datos administrativos y de construcción de los depósitos de relaves. Se asigna un identificador para cada uno, para hacer referencia en las Tablas C y D.

ID	Empresa	Faena	Depósito	Tipo de Depósito	Mineral	Método de construcción	Estado actividades
29	INVERSIONES RAY LTDA.	PLANTA SAN CRISTOBAL	EPV	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO
30	LUIS MORALES	EPV	EPV	TRANQUE	COBRE	S/I	NO ACTIVO
31	MANUEL ACHU PEREZ	PLANTA CUESTA CARDONES	CUESTA CARDONES 1	TRANQUE	COBRE-ORO	EJE CENTRAL	NO ACTIVO
32	MIGUEL DAY	PLANTA DAY	DAY 2	TRANQUE	ORO	S/I	ACTIVO
33	MIGUEL DAY	PLANTA DAY	DAY	TRANQUE	COBRE-ORO	AGUAS ARRIBA ?	NO ACTIVO
34	NELSON ZUÑIGA CARVAJAL	PLANTA SANTA LAURA	TRANQUE	TRANQUE	COBRE	S/I	ACTIVO
35	NUÑEZ HNOS	PLANTA LLAUCAVEN	LLAUCAVEN 1	TRANQUE	ORO-COBRE	S/I	NO ACTIVO
36	NUÑEZ HNOS	PLANTA LLAUCAVEN	LLAUCAVEN 2	TRANQUE	ORO-COBRE	AGUAS ARRIBA	NO ACTIVO
37	OP MINING CHILE SpA	PLANTA OP (EX FARAH)	FARAH 1-2-3-4-5-6-7	TRANQUE	COBRE-ORO-HIERRO	S/I	NO ACTIVO
38	PEDRO JESUS CASTILLO VEGA	PLANTA RAPELINA	RAPELINA	EMBALSE	ORO	N_A	ACTIVO
39	PLANTA MONSERRAT	PLANTA MONSERRAT	MONSERRAT	TRANQUE	ORO	AGUAS ABAJO	NO ACTIVO
40	SCM ATACAMA KOZAN	KOZAN	EL GATO	TRANQUE	COBRE	AGUAS ABAJO	ACTIVO
41	SCM SAN SEBASTIAN	PLANTA ANDREA	TRANQUE	EMBALSE	ORO-COBRE	S/I	NO ACTIVO
42	SOC. GUERRERO HERMANOS Y CIA. LTDA.	PLANTA ALEMANA	ARCADIO	EMBALSE	COBRE-ORO	N_A	ACTIVO
43	SOC. MINERA CANDELARIA	PLANTA CORONA	CORONA	TRANQUE	COBRE	EJE CENTRAL	NO ACTIVO
44	SOC. MINERA FORTUNA LTDA.	PLANTA PUERTO RICO	PUERTO RICO 0-1-2	TRANQUE	COBRE	EJE CENTRAL	NO ACTIVO
45	SOC. MINERA FORTUNA LTDA.	PLANTA PUERTO RICO	EMBALSE 4	EMBALSE	COBRE	N_A	ACTIVO
46	SOC. MINERA UNION	PLANTA LA UNION (EX SAN LORENZO)	UNION	TRANQUE	COBRE	AGUAS ARRIBA	ABANDONADO

Tabla C. Factores condicionantes geotécnicos y geométricos de los depósitos de relaves analizados. La columna ID vincula con los datos de la Tabla B del Anexo 2.

ID	Factores Geotécnicos						Factores Geométricos		
	Distribución Granulometría	% Finos	Forma partículas	Densidad partículas	Densidad (compactación)	% humedad	Altura muro (m)	Altura revancha (m)	Ángulo talud (°)
1	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	15
2	arena	10	media	2,79	suelto	0	2	1	22
3	arena	10	media	2,79	suelto	0	5	1	27
4	arena	10	media	2,79	suelto	0	10	1	28
5	arena	10	media	2,79	suelto	0	2	1	27
6	arena	10	media	2,79	suelto	0	8	1	58
7	arena	10	media	2,79	suelto	0	8	1	58
8	arena	10	media	2,79	suelto	0	8	1	58
9	arena	10	media	2,79	suelto	0	10	1	34
10	arena	10	media	2,79	suelto	0	10	1	48
11	arena	10	media	2,79	suelto	0	64	1	30
12	arena	10	media	2,79	suelto	0	56	1	24
13	arena	10	media	2,79	suelto	0	26	1	17
14	arena	10	media	2,79	suelto	0	7	1	28
15	arena	10	media	2,79	suelto	0	5	1	29
16	arena	10	media	2,79	suelto	0	44	1	20
17	arena	10	media	2,79	suelto	0	58	1	27
18	arena	10	media	2,79	suelto	0	7	1	30
19	arena	10	media	2,79	suelto	0	3	1	23
20	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	30
21	arena	10	media	2,79	suelto	0	2	1	14
22	arena	10	media	2,79	denso	100	25	1	13
23	arena	10	media	2,79	suelto	0	25	1	27

Tabla C (CONTINUACIÓN): Factores condicionantes geotécnicos y geométricos de los depósitos de relaves analizados. La columna ID vincula con los datos de la Tabla B del Anexo 2.

ID	Factores Geotécnicos						Factores Geométricos		
	Distribución Granulométrica	% Finos	Forma partículas	Densidad partículas	Densidad (compactación)	% humedad	Altura muro (m)	Altura revancha (m)	Ángulo talud (°)
24	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	14
25	arena	10	media	2,79	suelto	0	2	1	11
26	arena	10	media	2,79	suelto	0	2	1	11
27	arena	10	media	2,79	denso	100	2	1	9
28	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	53
29	arena	10	media	2,79	suelto	0	5	1	27
30	arena	10	media	2,79	suelto	0	10	1	10
31	arena	10	media	2,79	suelto	0	2	1	18
32	arena	10	media	2,79	denso	100	10	1	27
33	arena	10	media	2,79	suelto	0	9	1	39
34	arena	10	media	2,79	denso	100	2	1	4
35	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	17
36	arena	10	media	2,79	suelto	0	23	1	32
37	arena	10	media	2,79	suelto	0	11	1	28
38	arena	10	media	2,79	denso	100	5	1	32
39	arena	10	media	2,79	suelto	0	8	1	17
40	arena	10	media	2,79	denso	100	24	1	5
41	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	27
42	arena	10	media	2,79	denso	100	12	1	35
43	arena	10	media	2,79	suelto	0	4	1	22
44	arena	10	media	2,79	suelto	0	21	1	36
45	arena	10	media	2,79	denso	100	4	1	24
46	arena	10	media	2,79	suelto	0	7	1	35

Tabla D. Factores condicionantes geográficos, climáticos e hidrogeológicos de los depósitos de relaves analizados. La columna ID vincula con los datos de la Tabla B del Anexo 2.

ID	Factores Geográficos						Factores climáticos			F. Hidrogeológicos
	Cercanía quebrada	Cercanía a cauce	Cercanía a fallas	Zona NCh433	Medio de fundación	Estabilidad laderas	Zona climática	V viento (m/s)	Dirección Viento	Nivel Freático (m)
1	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	favorable	6
2	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
3	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
4	próximo	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
5	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
6	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
7	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
8	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
9	lejano	próximo	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
10	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
11	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
12	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
13	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
14	próximo	lejano	cercano	3	favorable	inestable	árida	15	n/a	6
15	próximo	lejano	cercano	3	favorable	inestable	árida	15	n/a	6
16	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
17	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
18	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
19	lejano	próximo	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
20	lejano	próximo	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
21	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
22	lejano	próximo	próximo	3	favorable	semiestable	árida	15	favorable	0
23	lejano	lejano	próximo	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6

Tabla D (CONTINUACIÓN): Factores condicionantes geográficos, climáticos e hidrogeológicos de los depósitos de relaves analizados. La columna ID vincula con los datos de la Tabla B del Anexo 2.

ID	Factores Geográficos						Factores climáticos			F. Hidrogeológicos
	Cercanía quebrada	Cercanía a cauce	Cercanía a fallas	Zona NCh433	Medio de fundación	Estabilidad laderas	Zona climática	V viento (m/s)	Dirección Viento	Nivel Freático (m)
24	lejano	próximo	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
25	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
26	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
27	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	desfavorable	0
28	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
29	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
30	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
31	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
32	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	desfavorable	0
33	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
34	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	favorable	0
35	lejano	próximo	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
36	lejano	próximo	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
37	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
38	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	desfavorable	0
39	próximo	lejano	cercano	3	favorable	inestable	árida	15	n/a	6
40	próximo	lejano	cercano	3	desfavorable	semiestable	árida	15	desfavorable	0
41	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
42	próximo	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	desfavorable	0
43	lejano	lejano	cercano	3	favorable	semiestable	árida	15	n/a	6
44	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6
45	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	desfavorable	0
46	lejano	lejano	cercano	3	favorable	estable	árida	15	n/a	6