

2022-11

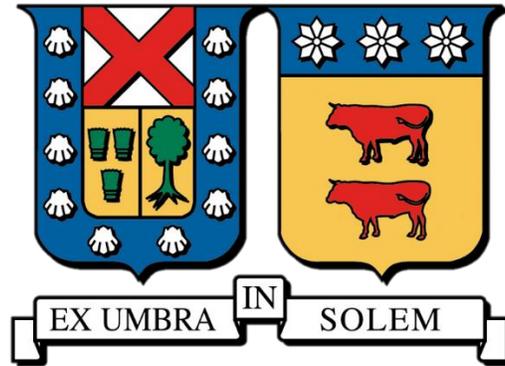
ESTUDIO DE ROTURA DE DEPÓSITOS DE RELAVES CON MIRAS AL CAMBIO CLIMÁTICO

CERVELA BALBONTÍN, JOSÉ PABLO

<https://hdl.handle.net/11673/55315>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO - CHILE**



ESTUDIO DE ROTURA DE DEPÓSITOS DE RELAVES CON MIRAS AL CAMBIO CLIMÁTICO

Memoria de Titulación presentada por
JOSÉ PABLO CERVELA BALBONTÍN

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía
Abg. **EDUARDO ZÚÑIGA**

Profesores Correferentes:
Dra. **ADELINA DELONCA**
Dr. **SERGIO PALMA**

NOVIEMBRE 2022

RESUMEN

Los depósitos de relaves son estructuras diseñadas para confinar de manera segura los relaves provenientes de las plantas de concentración de minerales. Por la composición de sus yacimientos, Chile es un país con una gran cantidad de relave, lo que ha significado un riesgo para la sociedad y el medioambiente que se encuentran ubicados aguas abajo del depósito debido a la posibilidad que sus muros sufran un evento de rotura y liberen el material almacenado en su interior.

La distancia que recorre el material de relave desde el muro hasta su punto de detención se conoce como distancia peligrosa. Si bien el mecanismo de falla preponderante de los relaves en Chile ha sido la sismicidad, los eventos de rebalse por precipitaciones intensas también han generado roturas en los muros de tranques de arena.

Esta memoria tiene como objetivo evaluar la incidencia del cambio climático en la distancia peligrosa de los relaves mediante métodos empíricos de Lucia y Rico y utilizando proyecciones climatológicas globales de temperatura e intensidad de precipitación. Para ello se utilizaron series temporales obtenidas desde la plataforma Mawün para las locaciones de los relaves y se calculó la distancia peligrosa de cada uno de los depósitos seleccionados, luego se repitió el cálculo aplicando las proyecciones climatológicas a los inputs de los modelos. A partir de esto se compararon ambos resultados y se establecieron las variaciones en la distancia peligrosa de los relaves al considerar el cambio climático.

Los resultados obtenidos mostraron preliminarmente una baja variación en las distancias peligrosas, implicando así una baja incidencia de los futuros cambios pluviométricos en la distancias de escurrimiento. Por su parte, las precipitaciones no adicionaron una cantidad significativa de volumen en los depósitos de relaves. Además, cuando se utilizaron correlaciones con el volumen de los depósitos como parámetro de entrada, el método de Rico arrojó distancias peligrosas sobredimensionadas.

Cabe mencionar que ambos modelos evidenciaron una baja sensibilidad a los cambios en el volumen de relaves producto de precipitaciones, por lo que se estimó que no son una herramienta confiable para futuros análisis de riesgo que quieran considerar la variabilidad climatológica. Por último, si se mantiene una correcta operación en la depositación de los relaves y en el sistema de drenes, el aumento proyectado en las precipitaciones no debiese tener mayor influencia en la distancia peligrosa de los depósitos.

ABSTRACT

Tailing dams are structures designed to safely retain tailings from concentration plants. Due to its mining history Chile has a considerable number of tailings, resulting in downstream society and environmental risks due the possibility of a dam break. The kilometers the tailings slurry downstream is known as run-out distance. While seismic failure is the principal failure mechanism for tailing dams in Chile, overtopping mechanism due to intense rainfall is also present in the history of failure events.

The objective of this study is to evaluate the incidence of the climate change in the run-out distance of a tailing dam using both Lucia and Rico empirical methods and climate global projections of temperature and extreme rainfall. This was done using time series obtained from Mawün platform to the locations of the tailing dams. The run-out distance was calculated whit this information and recalculated with the climate global projections. Both results were compared to highlight the influence of climate change.

The results shown a little variation between calculated run-out distances, which implies a low importance of the rainfall future changes in run-out distance. For its part, extreme rainfall did not add a considerable volume to the tailing dams. Besides, the model of Rico correlations that use the dam volume as an input parameter provided overestimated run-out distances.

Both models included a low sensibility to variations on the tailing dam volume due to rainfall. These results allow to conclude that empirical models will not be a reliable tool in future risk analysis which consider climate variability. Finally, if a correct operation in tailing deposition and drainage systems is carried out through the whole dam operation, rainfall should not be a main influence in run-out distance.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por apoyarme sin pedir nada a cambio, ser el pilar fundamental de mi vida, estar a mi lado en los peores momentos y siempre guiarme a ser una mejor persona.

A mis amigos Matías, Marcelo y Carlos, por las incansables noches de estudio, las penas y alegrías que nos dio la universidad, por conocernos de niños y vernos convertidos en hombres.

A Pablo, Nicolás, Matías y Francisco, por hacer que cada viaje a Curicó sea una experiencia gratificante y renovadora, por mantener los recuerdos de la adolescencia y generar nuevas experiencias en torno a la amistad.

A mi Sabomnim Esteban Vitagliano, por enseñarme a disfrutar la victoria y a aprender de las derrotas, a amar el deporte y los combates, por mostrarme que la perseverancia y el esfuerzo son la clave para cumplir los objetivos del corazón.

Al profesor Eduardo Zúñiga, por recibirme en el Ministerio de Minería, enseñarme cada día algo nuevo del rubro institucional, confiar en mis capacidades y darme la oportunidad de realizar esta memoria.

A la profesora Adeline Delonca, por apoyarme en este proceso, estar disponible para mis consultas y retroalimentar el trabajo de esta memoria.

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	General	9
1.2	Motivación	11
1.3	Objetivos	11
1.3.1	Objetivo General.....	11
1.3.2	Objetivos Específicos	11
1.3.3	Alcances	12
2	MARCO TEÓRICO	13
2.1	Relaves	13
2.1.1	Depósitos de relaves	13
2.1.2	Concentración de sólidos	15
2.1.3	Tipos de relaves	15
2.1.4	Tipos de depósitos de relaves	16
2.1.5	Métodos de depositación de relaves.....	17
2.1.6	Mecanismos de rotura de un depósito de relaves	19
2.1.7	Permeabilidad en depósitos de relaves.....	21
2.1.8	Tramitación ambiental.....	25
2.2	Cambio climático	27
2.2.1	Sistema climático.....	28
2.2.2	Efecto invernadero.....	28
2.2.3	Cambio climático global.....	30
2.2.4	Cambio climático en Chile	31
2.3	Distancia peligrosa	32
2.3.1	Métodos empíricos para el cálculo de distancia peligrosa.....	32
2.3.2	Métodos numéricos para el cálculo de la distancia peligrosa.....	42
3	METODOLOGÍA	45
3.1	Selección de relaves	47
3.2	Obtención de datos pluviométricos.....	47
3.3	Eventos de precipitación y permeabilidad	48
3.4	Cálculo de distancia peligrosa	50
3.4.1	Lucia et al, 1981	50
3.4.2	Rico, 2007	51
3.4.3	Comparación entre distancias peligrosas en métodos empíricos.....	51

3.5	Situación hipotética en métodos empíricos.....	51
3.6	Sensibilidad en métodos numéricos.....	52
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
4.1	Relaves de interés	53
4.2	Precipitaciones y permeabilidad de los depósitos de relaves.	55
4.3	Distancia peligrosa en métodos empíricos	60
4.3.1	Método de Lucia.....	60
4.3.2	Método de Rico	63
4.4	Situación hipotética en métodos empíricos.....	66
4.5	Sensibilidad en métodos numéricos.....	69
5	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	70
6	BIBLIOGRAFÍA.....	72
7	ANEXOS	76
7.1	Lucia et al, 1981	76
7.2	Rico, 2008	77
7.3	Permeabilidad en relaves de interés	79
7.3.1	Permeabilidad en relaves con máximas precipitaciones registradas.....	79
7.3.2	Permeabilidad en relaves con máximas precipitaciones proyectadas	81
7.4	Conversión Precipitaciones	82
7.5	Sensibilidad de variables en métodos numéricos.....	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Registro de precipitaciones diarias para el tranque Laguna Seca entre los años 1979 y 2019.....	56
Gráfico 2: Registro de precipitaciones diarias para el embalse Carén entre los años 1979 y 2019.	57
Gráfico 3: Registro de precipitaciones diarias para el Tranque Talabre entre los años 1979 y 2019.	58
Gráfico 4: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación registrados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Laguna Seca.	79
Gráfico 5: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación registrados de 24, 48 y 72 [H] para Embalse Caren.....	80
Gráfico 6: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación registrados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Talabre.....	80
Gráfico 7: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación proyectados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Laguna Seca.....	81
Gráfico 8: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación proyectados de 24, 48 y 72 [H] para Embalse Caren.	81
Gráfico 9: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación proyectados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Talabre.....	82
Gráfico 10: Comportamiento del Peso Específico en función del agua precipitada dentro del Tranque Laguna Seca.....	82
Gráfico 11: Comportamiento del Peso Específico en función del agua precipitada dentro del Embalse Caren.....	83
Gráfico 12: Comportamiento del Peso Específico en función del agua precipitada dentro del Tranque Talabre.	83
Gráfico 13: Comportamiento del Porcentaje de Sólidos en función del agua precipitada dentro del Tranque Laguna Seca.....	84
Gráfico 14: Comportamiento del Porcentaje de Sólidos en función del agua precipitada dentro del Embalse Caren.....	84
Gráfico 15: Comportamiento del Porcentaje de Sólidos en función del agua precipitada dentro del Tranque Talabre.	85
Gráfico 16: Comportamiento la Resistencia al Corte Residual en función del agua precipitada dentro del Tranque Laguna Seca.....	85
Gráfico 17: Comportamiento la Resistencia al Corte Residual en función del agua precipitada dentro del Embalse Caren.....	86
Gráfico 18: Comportamiento la Resistencia al Corte Residual en función del agua precipitada dentro del Tranque Talabre.	86

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema genérico de un depósito de relaves (Arroyo, 2018).....	14
Ilustración 2: Esquema simplificado de un tranque de relaves (Arroyo, 2018).....	17

Ilustración 3: Método de construcción aguas arriba (Ministerio de Minería, 2019).....	18
Ilustración 4: Método de construcción eje central (Ministerio de Minería, 2019).....	18
Ilustración 5: Método de construcción aguas abajo (Ministerio de Minería, 2019).....	19
Ilustración 6: Incidente de overtopping: (izq.) retención del relave por parte del muro de contención; (der.) flujo de material aguas abajo (Villavicencio et al., 2014).	21
Ilustración 7: Relaciones de masa y volumen para un material poroso (Holtz & Kovacs, 1981)..	22
Ilustración 8: Modelo conceptual de la variación de permeabilidad dentro de un depósito de relaves. Zona 1: arenas de alta permeabilidad; Zona 2: permeabilidad intermedia; Zona 3: limos de baja permeabilidad (Kealy & Busch, 1971).....	24
Ilustración 9: Etapas de tramitación ambiental en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (Elaboración propia).....	26
Ilustración 10: Cambio proyectado en la temperatura media global de la superficie con respecto al período 1986-2005 (IPCC, 2014).....	30
Ilustración 11: Sección transversal idealizada de un relave detenido post rotura (Lucia, 1981). ..	33
Ilustración 12: Ábaco de pendiente estable (Lucia, 1981).	35
Ilustración 13: Predicción de la distancia del residuo (Lucia, 1981).	37
Ilustración 14: Altura del relave versus la distancia recorrida por el residuo (Rico et al., 2008). .	38
Ilustración 15: Volumen de residuo liberado en la falla versus la distancia recorrida por el residuo (Rico et al., 2008).....	39
Ilustración 16: Factor presa versus distancia recorrida por el residuo (Rico et al., 2008).	40
Ilustración 17: Volumen de residuo liberado versus volumen almacenado dentro de la cubeta (Rico et al., 2008).....	41
Ilustración 18: Modelo de escurrimiento del relave hasta el estado de reposo (Blight, 1983).	43
Ilustración 19: Esquema de partición de relaves en bloques. Los bordes se enumeran desde $i = 1$ a n y la masa de los bloques desde $j = 1$ a $n - 1$ (Oldrich, 1995).	44
Ilustración 20: Metodología para la realización de la memoria (Elaboración propia).	46
Ilustración 21: Interfaz de extracción y descarga de series temporales.	48
Ilustración 22: Ubicación y detalle de Tranque Laguna Seca (Elaboración Propia).....	53
Ilustración 23: Ubicación y detalle de Embalse Caren (Elaboración Propia).	54
Ilustración 24: Ubicación y detalle de Tranque Talabre (Elaboración Propia).....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Porcentaje de sólidos según tipo de relave.....	15
Tabla 2: Rangos de permeabilidad típicos en relaves (Vick, 1990).....	23
Tabla 3: Trayectorias de concentración representativas (IPCC, 2014).	29
Tabla 4: Gradientes hidráulicos utilizados.	49
Tabla 5: Información relevante de relaves de interés.....	55
Tabla 6: Precipitaciones máximas registradas entre 1979 y 2019 en eventos de 24, 48 y 72 [h]. .	58
Tabla 7: Precipitaciones máximas registrados y tiempo de drenado de agua caída.....	59
Tabla 8: Precipitaciones máximas proyectadas al año 2100 y tiempos de drenado de agua caída.	60

Tabla 9: Inputs y resultados para el método de Lucia sin considerar proyecciones de Cambio Climático.	61
Tabla 10: Inputs y resultados para el método de Lucia considerando proyecciones de Cambio Climático.	62
Tabla 11: Variación de resultados al considerar las proyecciones de cambio climático.	62
Tabla 12: Inputs y resultados para el método de Rico sin considerar proyecciones de Cambio Climático.	63
Tabla 13: Inputs y resultados para el método de Rico considerando proyecciones de Cambio Climático.	64
Tabla 14: Variaciones de Distancia Peligrosa en relaves de interés para el método de Rico.	65
Tabla 15: Inputs y resultados para el método de Lucia para un aumento hipotético en el volumen del relave.	66
Tabla 16: Variación de inputs y resultados de situación hipotética para el método de Lucia.	67
Tabla 17: Inputs y resultados para el método de Rico para un aumento hipotético en el volumen del relave.	67
Tabla 18: Variación de resultados de situación hipotética para el método de Rico.	68
Tabla 19: Casos históricos de fallas en depósitos de relaves (Lucia, 1981)	76
Tabla 20: Condición post rotura de casos históricos (Lucia, 1981).	76
Tabla 21: Casos históricos de fallas en depósitos de relaves (Rico et al., 2008).	77

1 INTRODUCCIÓN

1.1 General

Una de las herencias de la minería chilena son los depósitos de relaves. Estos pasivos ambientales son estructuras encargadas de contener de manera segura y definitiva las pulpas generadas en las plantas de concentración húmeda (*Decreto Supremo N°248, 2007*). Su emplazamiento implica un riesgo para el entorno y las infraestructuras aguas abajo en caso de que ocurra una falla en el muro de contención. Este riesgo es creciente no sólo porque los depósitos de relaves aumenten en número y dimensión, sino también por el aumento en la intensidad de las precipitaciones extremas y los eventos de licuefacción o rebalse que se provoquen.

El primer factor de riesgo de los relaves es la cantidad y el tamaño de estos dentro del territorio. Las proyecciones en el corto plazo indican un aumento sobre el 70% en el tratamiento de minerales de cobre en plantas concentradoras entre 2019 y 2031, lo que significa pasar de 642 [Mton] a 1.104 [Mton] e incrementar significativamente la construcción de depósitos de relaves (Cifuentes & Cantallopis, 2020). Si estas proyecciones se extrapolan a 50 o 100 años en el futuro, se puede esperar que los depósitos de relaves sean una preocupación latente para la seguridad de las personas, el medioambiente y las infraestructuras ubicadas aguas debajo de estas infraestructuras.

El segundo factor de riesgo es la intensidad de las precipitaciones extremas que afecten a los depósitos de relaves. La cantidad de agua que pueden aportar estas precipitaciones a futuro dependerá de las condiciones climatológicas que se experimenten. Las proyecciones internacionales indican un aumento del 7% en la cantidad de agua caída por cada grado centígrado que incremente la temperatura de la atmósfera (Schroerer & Kirchengast, 2018). Esto podría agravar las consecuencias que tiene la rotura de un depósito de relaves si ocurriese inmediatamente después de una precipitación extrema o sea causada por el mismo fenómeno.

En los últimos 10 años han ocurrido eventos de fallas en muros de depósitos de relaves ubicados en Canadá y Brasil que provocaron graves consecuencias para las personas y el medio ambiente ubicado aguas debajo de estos. Se cuentan 259 fallecidos y 11 desaparecidos tras la rotura de Brumadinho, millones de afectados tras la rotura de Samarco y 25 [Mm³] de relaves derramados en Mount Polley (Borges & Maso, 2017; Byrne, 2018; Silva Rotta et al., 2020). Esto situó en el debate internacional el nivel de los estándares internacionales utilizados en el diseño, construcción,

operación y cierre de los depósitos de relaves en aquellos países con una alta generación de residuos provenientes de la industria minera.

Si bien Chile es un país sísmico y la mayor parte de los relaves de cobre en Chile han sufrido eventos de rotura debido a la sismicidad propia del país (Islam & Murakami, 2021), los eventos de licuefacción y rebalse generados por el agua dentro del relave son, también, un factor a considerar. En ese sentido y aun cuando existan procesos que reduzcan el contenido de agua de los relaves, los eventos meteorológicos asociados a lluvias extremas pueden provocar licuefacciones o rebalses en los depósitos de relaves y ocasionar una rotura del muro con la consiguiente liberación del residuo.

A lo anterior se debe agregar que Chile es considerado como un país en vías de desarrollo, con una legislación en torno a los relaves que cuenta ya con 15 años de antigüedad, pudiendo estar desactualizada en más de un aspecto con respecto al estándar internacional. Si bien el número de eventos de falla en relaves ha disminuido dentro del territorio nacional, entre los años 1915 y 2000 podemos contar 32 fallas de depósitos, mientras que entre los años 2000 y 2021 ya se han registrado 9 eventos de falla (Islam & Murakami, 2021), número que podría seguir aumentando en el transcurso de los años por los factores ya mencionados

Una forma de saber cuánto impacto tendrá la falla de un depósito de relaves es conocer la distancia que recorrerá el residuo una vez ocurrida la rotura en el muro de contención. En ese sentido el DS N°248 del Ministerio de Minería establece como Distancia Peligrosa a “la distancia, en kilómetros, que recorrería el relave en el caso de colapso del depósito”.

La legislación chilena solicita en el artículo 14, inciso q), que todo titular debe determinar la distancia peligrosa, en kilómetros, del depósito que quiera construir (*Decreto Supremo N°248, 2007*), sin embargo, no especifica el método a utilizar ni condiciona el uso de un autor en específico por tamaño de relaves. Para esto, distintos autores han desarrollado metodologías que permiten estimar cuánto del terreno aguas abajo del depósito de relaves se vería afectado por la ocurrencia de este tipo de eventos.

En función de los factores ya mencionados, nace la idea de analizar el aumento del riesgo que significa un evento de falla de un depósito de relaves producto del agua adicionada en su interior por una precipitación extrema. Este análisis considera las proyecciones de cambio climático hasta finales del siglo XXI, pues se entiende que para esa fecha los depósitos de relaves seguirán operando para almacenar los residuos provenientes de la actividad minera.

1.2 Motivación

El presente trabajo nace ante la observación de eventos de rotura de depósitos de relaves de gran envergadura ocurridos en Canadá y Brasil y de los esfuerzos llevados a cabo por la academia a la hora de desarrollar modelos de predicción de distancia peligrosa de depósitos de relaves. Sin embargo, constantemente se omite un factor que sólo se acrecienta con los años y es el cambio climático.

La manera en la que esta dilemática climatológica puede afectar en el comportamiento del material de relave liberado luego de un evento de rotura en su depósito no ha sido considerada en los estudios desarrollados. Más aun, la institucionalidad minera no restringe en sus reglamentos de diseño, operación, mantención y cierre de depósitos de relaves el uso de modelos de predicción de distancia peligrosa que se consideran obsoletos para la academia.

Así, este estudio de memoria busca ser un aporte al proceso de descarte que debe llevar a cabo la institucionalidad minera en cuanto a modelos de predicción que no sean adecuados en la actualidad para la industria, además de aquellos que no puedan integrar la variable de cambio climático en sus predicciones de distancia peligrosa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar un análisis cuantitativo de las diferencias entre los resultados de distancia peligrosa calculada a partir de las máximas precipitaciones registradas y otra que considere el cambio climático a través de las máximas precipitaciones proyectadas al año 2100.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar proyecciones climatológicas referidas a intensidad de precipitación para las macrozonas Norte y Centro de Chile que consideren el proceso de cambio climático.
- Calcular la distancia peligrosa de los relaves de interés mediante métodos empíricos sin considerar las proyecciones climáticas al 2100 y luego repetir el cálculo considerando dichas proyecciones.
- Realizar un análisis cuantitativo de las diferencias entre ambos resultados.

- Concluir sobre la significancia del cambio climático en el cálculo de la distancia peligrosa de un depósito de relaves y recomendar el uso de nuevos parámetros en caso de ser necesario.

1.3.3 Alcances

En función de los recursos disponibles, esta memoria tiene como alcances:

- Relaves de interés que dispongan de información pública y de acceso general, debido a la dificultad de obtener información de estas infraestructuras.
- El cálculo de la distancia peligrosa solicitado en el inciso q) del artículo 14 del DS N°248, de 2007, Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación, y cierre de los depósitos de relaves.
- La utilización de los métodos empíricos de Lucia, 1981 y Rico, 2007 para la determinación de la distancia peligrosa de los relaves de interés, sin realizar cálculos con métodos numéricos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Relaves

Los relaves corresponden a la suspensión de sólidos en un medio líquido que forman una pulpa. Se generan y se depositan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas de molienda fina (Decreto Supremo N°248, 2007).

Desde que comienzan a ser depositados hasta finalizada la operación, estas estructuras suponen un riesgo socioambiental para todo su entorno. Aunque una buena planificación y gestión operacional reduce el riesgo que ocurra un evento que libere su contenido al ambiente, la posibilidad de este tipo de incidentes no es nula.

Sin embargo, antes de hablar de la rotura de un relave es necesario detallar qué es un depósito de relaves y cómo se construyen. A continuación, se presentan una serie de apartados que buscan extender el conocimiento sobre estos pasivos ambientales mineros, los diferentes tipos de relaves que existen, sus métodos de construcción y cómo se comporta el agua contenida en su interior.

2.1.1 Depósitos de relaves

Los depósitos de relaves son infraestructuras que almacenan los relaves provenientes de las líneas de flotación y los depositan de tal manera que quedan separados de su entorno. La legislación chilena los define como toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies minerales (Decreto Supremo N°248, 2007). Tienen como función principal el servir, en la mayoría de los casos, como depósito definitivo de los materiales sólidos provenientes del relave transportado desde la planta, permitiendo en gran medida la recuperación del agua transportada.

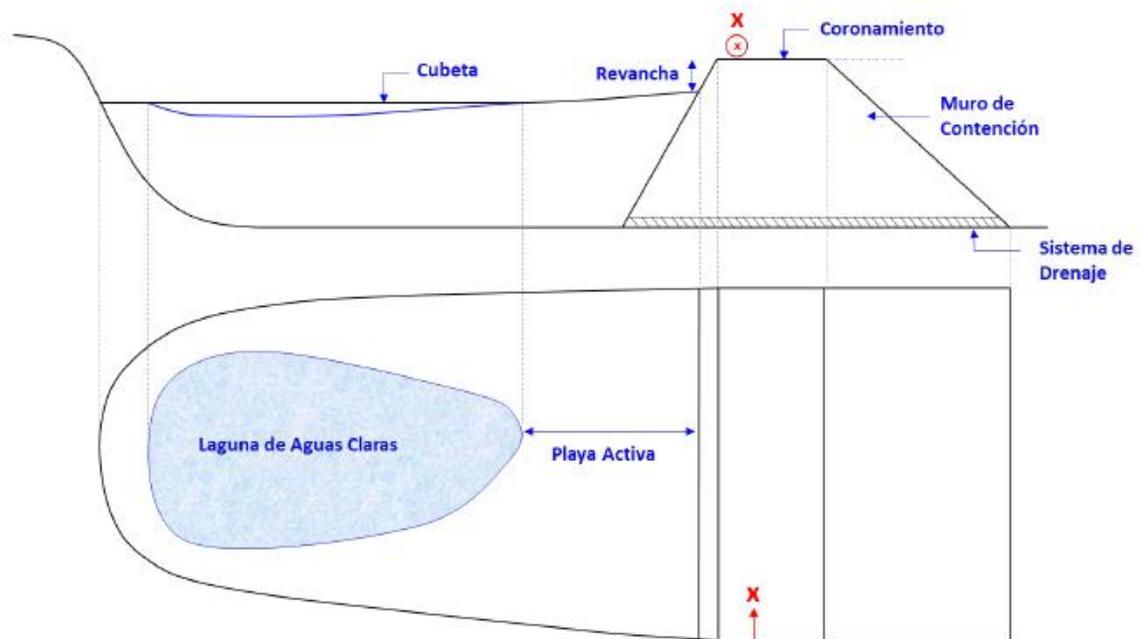


Ilustración 1: Esquema genérico de un depósito de relaves (Arroyo, 2018).

La Ilustración 1 muestra los componentes con los que, generalmente, cuenta un depósito de relaves. Por su parte, la normativa vigente los define de la siguiente manera:

- Coronamiento: Parte superior del muro de contención o prisma resistente.
- Cubeta: Zona del depósito donde se acumularán la totalidad de los sólidos del relave o aquellos de menor granulometría, dependiendo del sistema de depositación.
- Laguna de aguas claras: aguas libres, en gran medida, de partículas en suspensión que se ubican en un sector del depósito de relaves una vez que los sólidos finos decantan de manera natural desde la pulpa.
- Muro de contención: zona periférica del depósito de relaves estructurada artificialmente que complementa el perímetro natural para conformar la zona de la cubeta.
- Playa activa: parte del depósito donde se descargan los relaves en la cubeta, se encuentra situada en las cercanías de la línea de vaciado marcada con una “x” de color rojo en la Ilustración 1. Usualmente está seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas.
- Revancha: menor diferencia, en cota, entre la línea de coronamiento del muro de contención y la superficie de la playa activa.
- Dren: sistema utilizado para disminuir al máximo el nivel freático en el interior de la cubeta. Este sistema se construye generalmente en la base del muro de contención.

2.1.2 Concentración de sólidos

En aquellos relaves que han pasado por procesos de recuperación de agua al salir de la planta de flotación resulta cómodo expresar dicho contenido como humedad. Sin embargo, el término que suele utilizarse en la mayoría de los casos donde el relave se deposita con la misma cantidad de agua con la que salió de la planta concentradora se denomina porcentaje de sólidos. Este concepto corresponde a la relación entre la masa de relave seco y la masa total de la pulpa, es adimensional y se suele expresar como porcentaje:

$$C_p = \frac{\text{masa sólido}}{\text{masa total}} * 100 \quad 2-1$$

Los diferentes tipos de relave se clasifican en función de este parámetro, determinándose también la forma en la que son almacenados a partir de su contenido de agua. La razón de este criterio viene dada por el comportamiento del relave según el porcentaje de agua en su interior.

Siguiendo con lo anterior, mientras más agua contenga el material su comportamiento será similar al de una pulpa y carecerá de cohesión entre sus partículas sólidas y, por tanto, de resistencia al corte. Por el contrario, un bajo nivel de agua evita que las partículas sólidas tengan buena movilidad y facilita una mayor compactación entre ellas (Vergara et al., 2022). De esta manera, los relaves que han pasado por procesos de recuperación de agua previos a su depositación ofrecen más estabilidad física, lo que conlleva una mayor seguridad en todas las etapas de su vida operativa.

2.1.3 Tipos de relaves

Una manera de clasificar los tipos de relaves es a través del C_p del material en su interior según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1: Porcentaje de sólidos según tipo de relave

Tipo de relave	Porcentaje de sólidos
Relaves convencionales	30 – 45 %
Relaves espesados	55 – 65 %
Relaves en pasta	75 – 90 %
Relaves filtrados	80 – 90 %

La normativa vigente a la fecha (Decreto Supremo N°248, 2007) diferencia los mismos tipos de relaves y describe las características correspondientes de cada depósito, su construcción y sus características operativas según se presenta a continuación:

- Relaves convencionales: relaves que no han sido sometidos a procesos de recuperación de agua antes de su disposición en tranques o embalses. Su porcentaje de sólidos no suele superar el 50 % de la pulpa, por lo que, una vez depositados, requieren de un buen sistema de drenes para recuperar el agua en el interior de la infraestructura que los contiene.
- Relaves espesados: relaves sometidos a un proceso previo de sedimentación mediante espesadores, eliminando parte importante del agua que contienen antes de su disposición dentro de la cubeta. Este tipo de depósitos debe ser construido de forma tal que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las de su emplazamiento, además de contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente.
- Relaves en pasta: relaves correspondiente a una mezcla entre relaves sólidos y agua que contiene partículas finas, menores de 20 [μm] en una concentración en peso superior al 15 %. Su depositación se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación.
- Relaves filtrados: relaves sometidos a un proceso de filtración antes de ser depositados, utilizando equipos especiales de filtros que aseguren que la humedad sea menor al 20 %. El relave depositado no debe fluir a otras partes distintas al emplazamiento determinado para su contención.

2.1.4 Tipos de depósitos de relaves

Si previamente se definieron los tipos de material de relave que se pueden encontrar dentro de Chile, es importante conceptualizar los dos tipos de depósitos de relaves que se pueden encontrar dentro del territorio.

- Tranque de relaves: depósito de relaves donde el muro de contención es construido con la fracción más gruesa del relave.

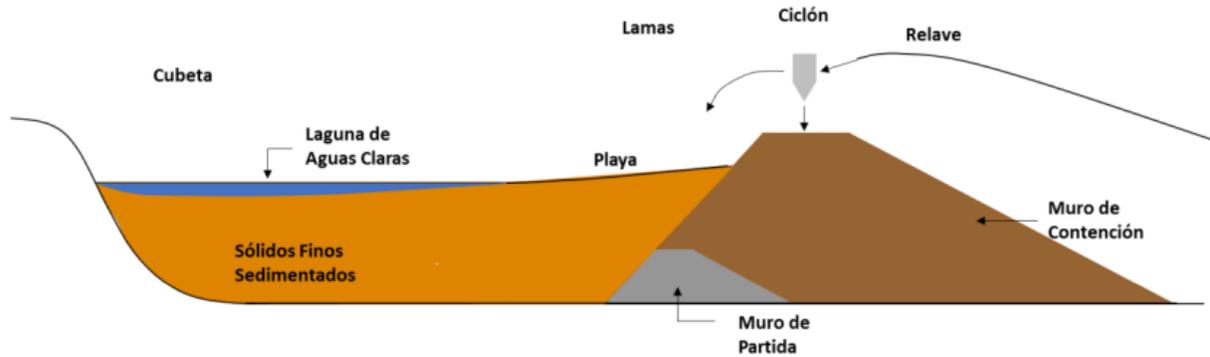


Ilustración 2: Esquema simplificado de un tranque de relaves (Arroyo, 2018).

La Ilustración 2 muestra de manera simplificada la separación de arenas y lamas dentro de un tranque de relaves. El muro de partida es construido de material de empréstito y las siguientes etapas del muro de contención se construyen con la fracción gruesa del relave. La construcción de este tipo de depósitos implica la operación constante de un hidrociclón que separa gravimétricamente los sólidos gruesos del relave, destinándolos al muro, y la fracción fina que termina dentro de la cubeta, almacenándose dentro del depósito. La consistencia del relave depositado en su interior corresponde al de una pulpa.

- Embalse de relaves: depósito de relaves donde el muro de contención está construido con material de empréstito, se encuentra impermeabilizado tanto en su coronamiento como en su talud interno. La impermeabilización puede estar realizada con un material natural de baja permeabilidad o de material sintético como geomembranas de alta densidad. Al igual que en el caso de los tranques, la consistencia del relave depositado en su interior corresponde a una pulpa.

2.1.5 Métodos de depositación de relaves

Los métodos de depositación utilizados para disponer espacialmente los relaves dependen de la decisión operacional de cada titular y determinan la dirección en la que crece el depósito de relaves con respecto al muro de partida. Aunque la normativa actual minera prohíbe la construcción mediante el método aguas arriba, este será mencionado de igual manera en este apartado.

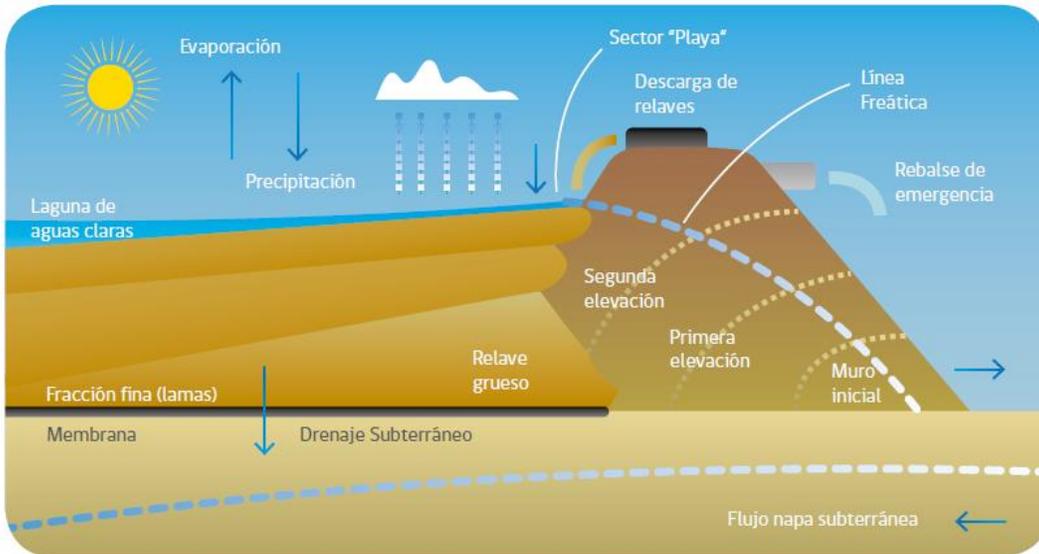


Ilustración 3: Método de construcción aguas arriba (Ministerio de Minería, 2019).

La Ilustración 3 esquematiza el método aguas arriba, el cual consiste en la depositación de las arenas de relave en dirección aguas arriba con respecto al muro de partida, por lo que cada fase de construcción del muro se cimienta sobre el borde superior de la fase anterior. Este método requiere menor volumen de material arenoso que los demás métodos de construcción, pero sus muros son menos resistentes frente a sismos y condiciones climatológicas. Es por esto que se encuentra prohibido desde 1970 tras la falla del tranque El Cobre (Ministerio de Minería, 1970), siendo Chile uno de los primeros países en el mundo en declarar esta prohibición.

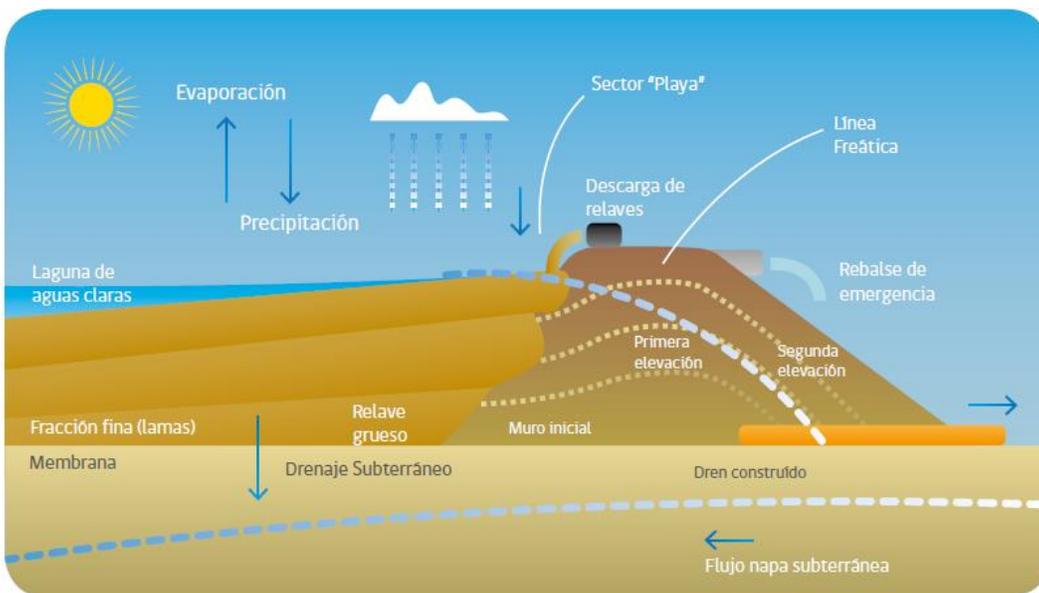


Ilustración 4: Método de construcción eje central (Ministerio de Minería, 2019).

La Ilustración 4 esquematiza el método eje central, el cual consiste en la depositación del relave siguiendo el plano vertical del muro de partida, con las arenas hacia el lado aguas abajo y los sedimentos finos hacia el lado aguas arriba. Este método requiere la utilización de un volumen de arenas intermedio entre el método aguas arriba y el método aguas abajo.

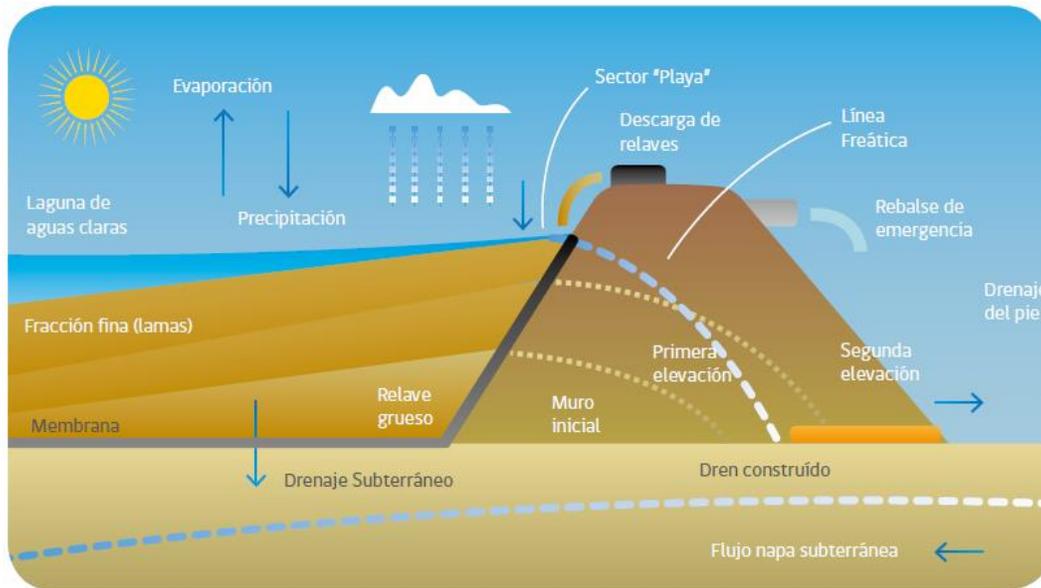


Ilustración 5: Método de construcción aguas abajo (Ministerio de Minería, 2019)

La Ilustración 5 esquematiza el método de aguas abajo, el cual consiste en la depositación de las arenas de relave en dirección aguas abajo de su muro de partida. Cada nueva fase de construcción se deposita sobre el muro de la fase anterior y no sobre la cubeta, por lo que es el método que necesita el mayor volumen de arenas. Sin embargo, resulta en muros más resistentes y sísmicamente estables. Es el método más utilizado en Chile por tener una alta seguridad frente a infiltraciones.

2.1.6 Mecanismos de rotura de un depósito de relaves

La inestabilidad en tranques de relaves viene dada a partir de factores, tales como, los métodos de depositación, una deficiencia en el proceso de compactación, un contenido de finos en las arenas dentro de la cubeta que limite la capacidad de drenaje del depósito y un grado de saturación que exceda lo que el depósito puede soportar. Los mecanismos de falla que se pueden dar debido a estos factores son la *licuefacción sísmica*, la *inestabilidad de talud* y el *overtopping o rebalse* (Villavicencio et al., 2014).

La **licuefacción sísmica** es un mecanismo de rotura en el cual el material de relave sufre una pérdida total de la resistencia al corte, por incremento de la presión de poros (*Decreto Supremo N°248, 2007*). Los tranques de relave en Chile son especialmente susceptibles a la ocurrencia de este fenómeno producto de un exceso en la presión de poros dentro del depósito durante la duración del evento sísmico. Este exceso de presión de poros produce una situación similar a la saturación de las arenas en un tiempo suficiente como para que la cohesión del material sea cercana a cero y la resistencia al corte del relave desaparezca, generando un comportamiento semejante al de un líquido. Este tipo de fallas ocurre en un lapso muy corto de tiempo y puede desplazar una gran porción de volumen del relave afectado.

La **inestabilidad de talud** ocurre en ausencia de presiones de poros en zonas suficientemente grandes del relave como para generar una licuefacción. En estos casos, los esfuerzos de corte existentes en la zona de falla superan a la resistencia al corte del material y generan superficies de desplazamiento circulares. Este tipo de falla puede ocurrir debido a un aumento no planificado del nivel freático del relave producto de lluvias extremas o de un inadecuado funcionamiento del sistema de drenaje del relave, a la presencia de finos dentro de la cubeta que generen zonas de saturación o a una inadecuada geometría del muro de contención.

De los mecanismos de falla mencionados es de especial interés para esta memoria el *overtopping*. Este corresponde al rebase del nivel de coronamiento por parte de la laguna de aguas claras y puede producirse por un mal control del flujo del agua superficial dentro de la cubeta, por una precipitación extrema que supere el diseño del relave o por ambos factores combinados. Esta situación genera que la revancha del depósito disminuya y que la laguna de aguas claras se acerque progresivamente al muro de contención. En última instancia, se produce una superficie de falla que puede ocasionar la rotura del depósito de relaves.



Ilustración 6: Incidente de overtopping: (izq.) retención del relave por parte del muro de contención; (der.) flujo de material aguas abajo (Villavicencio et al., 2014).

Como ya se mencionó, el overtopping puede asociarse a eventos de precipitación extremos para los cuales el depósito de relaves no esté diseñado. Para esto, el artículo 14, inciso m) del DS N°248 solicita al titular del depósito de relaves la determinación de parámetros de diseño geotécnicos que incluye, entre otros, la permeabilidad del relave. Sin embargo, este reglamento no solicita al titular un estudio climatológico que permita estimar cuál sería la máxima precipitación a la cual está expuesto el depósito.

Por último, entre 1915 y 2010 sólo un 18 % de los incidentes en depósitos de relaves han tenido como causa los eventos de precipitación extremos, siendo la sismicidad la causa asociada a la mayoría de los eventos de rotura (Villavicencio et al., 2014), la intensidad de la precipitación que experimente el depósito puede variar con el paso del tiempo. Esta temática será abordada en capítulos posteriores.

2.1.7 Permeabilidad en depósitos de relaves

La capacidad de un medio para transmitir un fluido por su interior se denomina permeabilidad y aquellos donde no sea posible esta transmisión se denominan impermeables. Que un material presente o no permeabilidad viene dado por la cantidad de poros en su interior, lo que puede expresarse como la relación de vacíos del material. Así, a mayor relación de vacíos mayor capacidad de transmisión, siempre y cuando los espacios vacíos se encuentren conectados entre sí (Tarbuck & Lutgens, 2011).

2.1.7.1 Relación de vacíos (e)

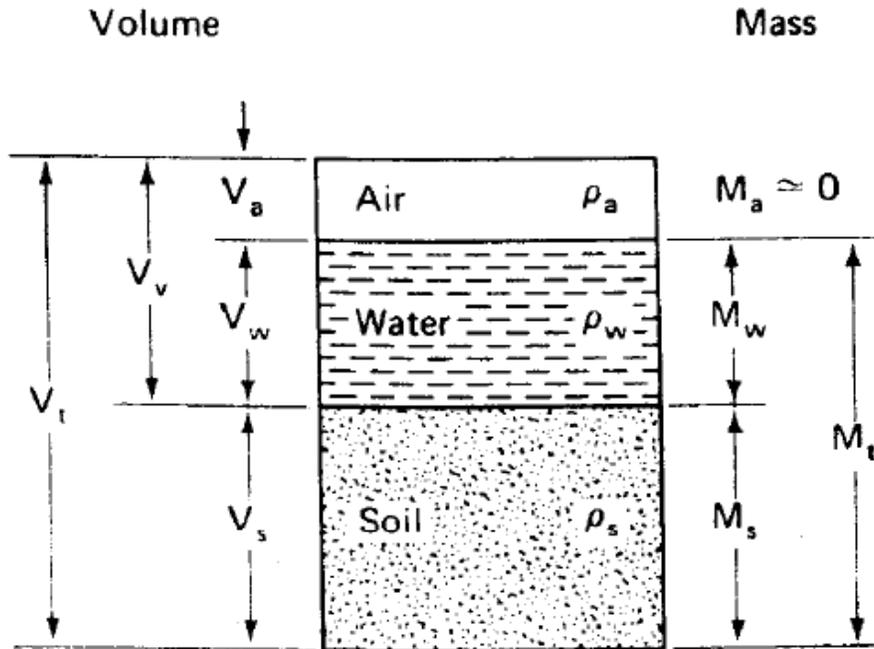


Ilustración 7: Relaciones de masa y volumen para un material poroso (Holtz & Kovacs, 1981).

La Ilustración 7 esquematiza las proporciones de aire, agua y sólido de un material poroso. La relación de vacíos del material se puede expresar en una ecuación como el volumen de agua y aire con respecto al volumen de material sólido de la siguiente manera:

$$e = \frac{V_v}{V_s} [-] \quad 2-2$$

Donde:

- e : Relación de vacíos
- V_v : Volumen de vacíos (agua y aire)
- V_s : Volumen de sólidos

2.1.7.2 Influencia de la granulometría en la permeabilidad

La relación de vacíos dependerá de la distribución granulométrica del material: un material de granos de gran tamaño permitirá la presencia de más espacios vacíos que uno de tamaño menor. Sin embargo, en un material que combine distintas granulometrías, los granos de menor tamaño

ocuparán los intersticios entre aquellos más grandes y la permeabilidad del material disminuirá (Vick, 1990). Las arcillas son un ejemplo de medios con baja permeabilidad, mientras que las arenas o las gravas poseen una mayor porosidad y, por tanto, mayor permeabilidad.

Dentro de un mismo relave, la permeabilidad puede variar en más de cinco órdenes de magnitud, pasando de valores cercanos a los 10^{-2} [cm/s] para arenas y relaves, hasta 10^{-7} [cm/s] para materiales limosos con un alto grado de compactación. Este rango de permeabilidad puede atribuirse, con una precisión aceptable, a la distribución granulométría dentro del relave y a la cantidad de finos presentes en el sector donde se mide.

Tabla 2: Rangos de permeabilidad típicos en relaves (Vick, 1990).

Tipo de material	Permeabilidad promedio k [cm/s]
Arenas gruesas con menos del 15 % de finos	$10^{-2} < k < 10^{-3}$
Arenas de descarga periférica con más del 30 % de finos	$10^{-3} < k < 5 * 10^{-4}$
Limos no plásticos o con baja plasticidad	$10^{-5} < k < 5 * 10^{-7}$
Limos de alta plasticidad	$10^{-4} < k < 10^{-8}$

La Tabla 2 muestra los rangos de permeabilidad que se pueden encontrar por granulometría dentro de un depósito de relaves, tanto dentro de la cubeta como en el muro de contención. Si bien las arenas poseen una mayor permeabilidad que los limos, la presencia de finos hace disminuir esta característica al rellenar los espacios vacíos del material. Esto hace difícil estimar la permeabilidad promedio de un depósito de relaves en función de la granulometría del material almacenado y del material del cual está hecho el muro de contención, ya que existen otros factores que controlan la permeabilidad dentro del relave (Vick, 1990).

2.1.7.3 Influencia de la anisotropía en la permeabilidad

La anisotropía genera diferencias en la permeabilidad del relave cuando se analiza en dirección horizontal y vertical. Para expresar este fenómeno existe la relación de permeabilidad k_h/k_v , la cual suele tener valores dentro del rango 2 – 10 para tranques de relaves, aunque para casos de operaciones de descarga no controladas donde no se separan correctamente las arenas de los limos, k_h/k_v puede llegar a valores sobre 100.

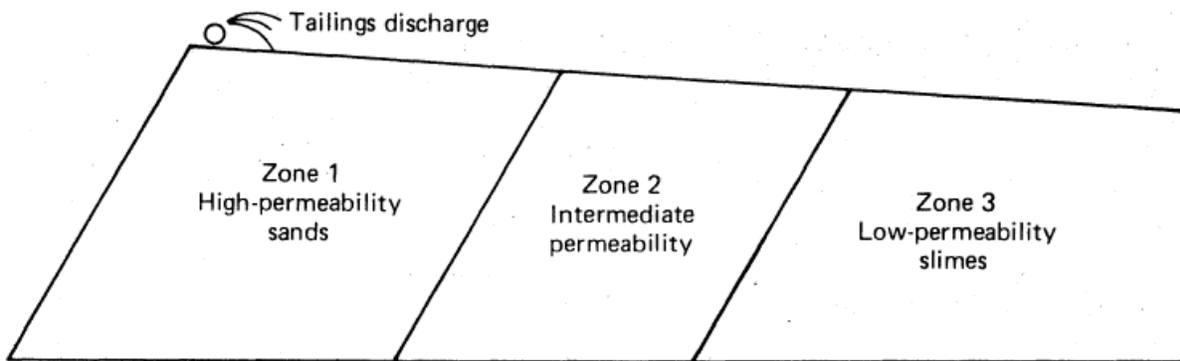


Ilustración 8: Modelo conceptual de la variación de permeabilidad dentro de un depósito de relaves. Zona 1: arenas de alta permeabilidad; Zona 2: permeabilidad intermedia; Zona 3: limos de baja permeabilidad (Kealy & Busch, 1971).

Otro factor que incide sobre la permeabilidad dentro de un relave es la distancia al punto de descarga. La Ilustración 8 esquematiza una forma simplificada de entender la variación en la permeabilidad de un depósito a partir de la distancia al punto de descarga. En ella se muestra una zona de arenas de alta permeabilidad cercana a la descarga, una zona intermedia y una zona de limos de baja permeabilidad. Sin embargo, esto suele ocurrir únicamente en relaves con un C_p entre 45 – 50 % donde la permeabilidad varía alrededor de un orden de magnitud. Por su parte, aquellos relaves con menor cantidad de agua experimentan una menor variación en su permeabilidad al alejarse del punto de descarga.

2.1.7.4 Flujo de agua en medio permeable

Cuando el depósito de relaves cuenta con un correcto sistema de depositación de arenas, el agua proveniente del sistema de transporte de pulpas llegará rápidamente al sistema de drenes, llenando todos los espacios vacíos del material a los pies del muro de contención (Valenzuela, 2016). En este caso, el pie del talud pasa a ser una zona de saturación, el agua situada en esta zona se define como agua subterránea y su límite superior se denomina nivel freático.

Por efecto de la gravedad, el agua circulará por las zonas saturadas siguiendo la pendiente del nivel freático, esto es, desde un punto de mayor elevación a un punto de menor elevación. De esta manera, mientras más inclinada es la pendiente mayor es la diferencia de presión entre ambos puntos y más rápido circulará el agua (Tarbuck & Lutgens, 2011). A esta pendiente se le conoce como gradiente hidráulico y se expresa de la siguiente manera:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{d} [-] \quad 2-3$$

Donde:

- h_1 : Elevación de un punto sobre el nivel freático
- h_2 : Elevación de un segundo punto sobre el nivel freático
- d : Distancia horizontal entre ambos puntos

Además, se puede determinar el volumen de agua que fluye a través del material en un momento determinado:

$$Q = K * A * i \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad 2-4$$

Donde:

- Q : Volumen de agua que fluye a través de un material
- K : Coeficiente de conductividad hidráulica
- A : Área transversal del material

De esta manera, la velocidad a la que fluye el agua en una sección del relave viene dada por la siguiente relación:

$$v = K * i \left[\frac{m}{s} \right] \quad 2-5$$

2.1.8 Tramitación ambiental

Antes de iniciar la construcción de un depósito de relaves, el proyecto debe pasar por una serie de etapas de evaluación para obtener distintos permisos que aseguren que su construcción, operación y cierre sean llevados a cabo de manera correcta. Uno de los procesos de evaluación que se requieren para el desarrollo de un proyecto es el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Este corresponde a un procedimiento a cargo del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) que, en base a un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental

(DIA) presentado por el Titular del proyecto, evalúa y predice los impactos ambientales que pueda generar el proyecto (LBGMA, 1994). La diferencia en la vía de ingreso del proyecto al SEIA dependerá si su realización genera o presenta a lo menos uno de los efectos, características o circunstancias establecidas en el artículo N°11 de la ley 19.300 como impactos significativos.

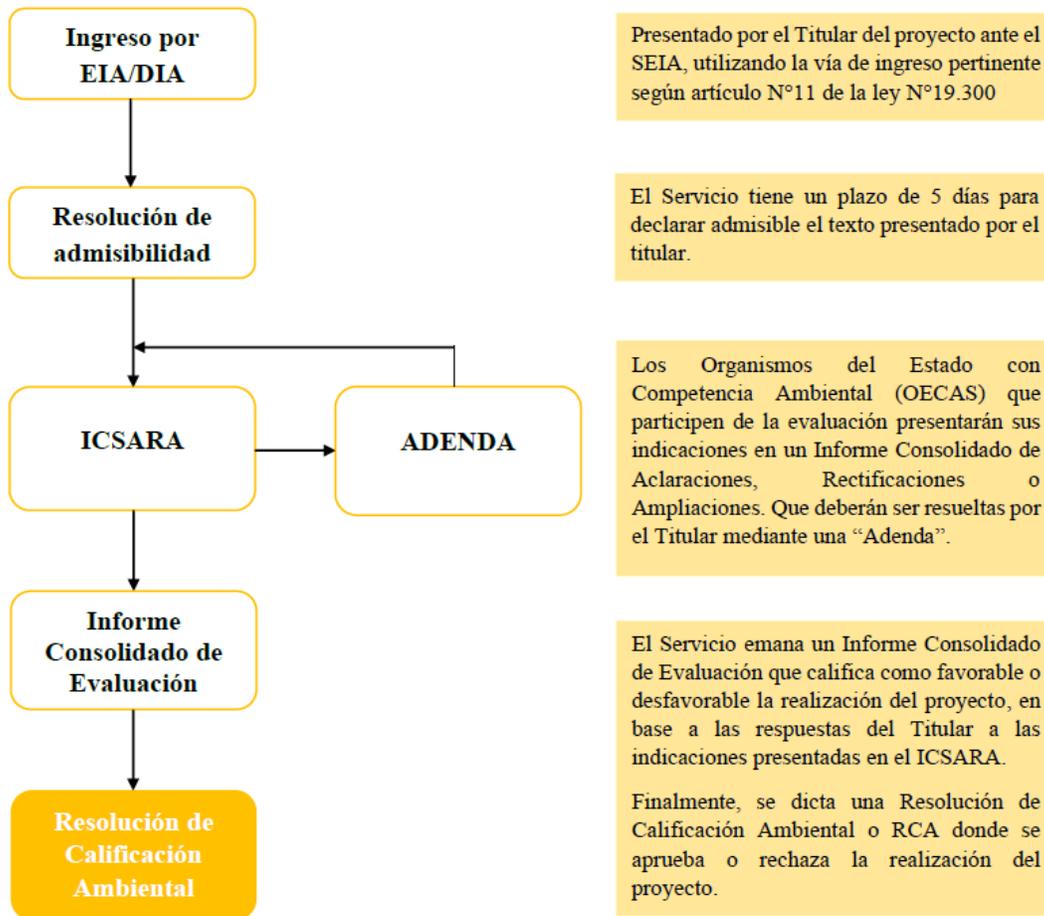


Ilustración 9: Etapas de tramitación ambiental en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (Elaboración propia).

La Ilustración 9 muestra las principales etapas de tramitación de proyectos en el SEIA. La primera corresponde a la presentación de una DIA o un EIA por parte del titular del proyecto, su admisibilidad debe ser evaluada por el SEA en un plazo de 5 días y luego ser calificada en un plazo prorrogable de 60 y 120 días respectivamente. En este tiempo, los Organismos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (OAECA) pueden realizar indicaciones sobre errores, omisiones o inexactitudes en el contenido del texto presentado por el Titular. Estas indicaciones son enviadas al Titular del proyecto en un Informe Consolidado de Aclaraciones, Rectificaciones

o Ampliaciones (ICSARA) preparado por el SEA y el Titular debe responder a las consultas planteadas por el Servicio mediante un informe respuesta o “Adenda”.

Cuando todas las indicaciones son respondidas, emana desde el SEA un Informe Consolidado de Evaluación (ICE) que hace una síntesis de la evaluación de los organismos participantes durante el proceso y recomienda la aprobación o el rechazo del proyecto. Finalmente, la Comisión de Evaluación Regional respectiva o el director ejecutivo del SEA dicta una Resolución de Calificación Ambiental (RCA) en la que aprueba o rechaza la realización del proyecto evaluado y sus características de diseño, construcción y operación.

2.2 Cambio climático

Desde finales del siglo XX y lo que va del siglo XXI se ha presentado uno de los períodos más cálidos de los últimos 130.000 años, con la temperatura media de la superficie terrestre más alta que cualquiera registrada o estimada en el mismo período. Más aun, la tasa de calentamiento promedio de los últimos 50 años es de $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década, significando el mayor ritmo de calentamiento de los últimos 100 años (IPCC, 2014). En ese sentido, este fenómeno de calentamiento global tiene como causa el cambio climático.

Por su parte, el cambio climático corresponde a cualquier cambio en el clima que ocurre en el tiempo, debido a la variabilidad natural del sistema climático o como resultado de actividades humanas, siendo su mayor causa probable las emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2014). Estas emisiones han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida, debido al crecimiento económico y demográfico de la sociedad, teniendo como consecuencia grandes concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y dióxido nitroso (N_2O). El dióxido de carbono producido por el uso de combustibles fósiles y de procesos industriales es causante del 78 % del aumento total de las emisiones de GEI entre 1970 y 2010 (Ballesteros, 2007).

Sin embargo, para comprender de mejor manera qué significan las variaciones climáticas que se han mencionado, hay que conocer el sistema donde estas variaciones ocurren y qué variables climáticas se ven afectadas.

2.2.1 Sistema climático

Primeramente, se define el sistema climático como un sistema complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera, además de las interacciones entre ellos. Tiene la característica de evolucionar en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropógenos, como el cambio de la composición de la atmósfera o el cambio de uso del suelo (IPCC, 2014).

Una manera de entender las variaciones atmosféricas que son consecuencia del cambio climático es asignarle magnitudes y definiciones a los fenómenos que ocurren dentro de la atmósfera y que afectan a los demás componentes del sistema climático. Así, se define el clima como una descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes en un período de tiempo determinado (IPCC, 2014).

La temperatura, la humedad, la cantidad de agua precipitada, la dirección y velocidad del viento, entre otras, son magnitudes que describen el clima en un determinado momento y con las cuales se pueden evaluar las variaciones que se presenten a lo largo del tiempo.

2.2.2 Efecto invernadero

El efecto invernadero corresponde a un proceso en virtud del cual la absorción de la radiación infrarroja por la atmósfera eleva la temperatura de la Tierra (Parry et al., 2007). Puede hacer referencia tanto al efecto invernadero natural causado por los GEI presentes en la atmósfera de manera natural como al efecto invernadero antropógeno, producido por las emisiones de GEI propias de las actividades humanas.

El efecto invernadero natural ocurre cuando la radiación infrarroja procedente de la Tierra calienta la atmósfera, estimulando a los gases a emitir su propia radiación. Las dos terceras partes de la radiación atmosférica se devuelven a la tierra mientras que el otro tercio se libera al espacio. Esto permite a la Tierra almacenar más energía en su superficie que la que podría almacenar si no existiese la atmósfera, aumentando su temperatura superficial (Ballesteros, 2007). El efecto invernadero antropógeno sigue las mismas lógicas de funcionamiento, pero con causa en las actividades humanas que liberan GEI al ambiente.

Los GEI son estos componentes gaseosos de la atmósfera que absorben y emiten la radiación en determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo emitido por la superficie terrestre y por la

atmósfera (Parry et al., 2007). Así, evitan que la radiación sea liberada al espacio, permaneciendo en el sistema atmosférico y contribuyendo a aumentar la temperatura de la Tierra. El vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el dióxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3) son gases de efecto invernadero.

El equilibrio térmico de la atmósfera viene dado no sólo por la capacidad de la superficie terrestre de absorber la radiación proveniente del sol, sino también por la concentración de los GEI presentes en la atmósfera (Lüthi, 2008). De todos los GEI, se ha visto que el que más correlación tiene con la temperatura de la atmósfera es el CO_2 , ya sea de origen natural o antropógeno (Stips et al., 2016).

Para la realización de esta memoria es de interés revisar los cambios que se proyectan en la temperatura atmosférica global y en las precipitaciones. Para ello, el método más utilizado ha sido el de sistemas de trayectorias de concentración representativas (RCP) que corresponden a escenarios que abarcan series temporales de emisiones y concentraciones de GEI, aerosoles y otros gases para evaluar distintos escenarios futuros del sistema climático.

Tabla 3: Trayectorias de concentración representativas (IPCC, 2014).

Trayectoria de concentración representativa	Forzamiento radiativo máximo
<i>RCP2,6</i>	3 [W/m^2]
<i>RCP4,5</i>	4,5 [W/m^2]
<i>RCP6,0</i>	2,6 [W/m^2]
<i>RCP8,5</i>	8,5 [W/m^2]

La Tabla 3 muestra las cuatro trayectorias de concentración representativas que utilizó el IPCC como base para realizar sus proyecciones climáticas. En ellas se muestra que cada escenario de emisión de GEI implica la estabilización del forzamiento radiativo en su valor respectivo. Este concepto corresponde al cambio en el flujo de energía causado por un elemento impulsor, siendo en este caso los GEI de origen antropógeno los que tienen mayor responsabilidad en la alteración del flujo de energía dentro de la atmósfera.

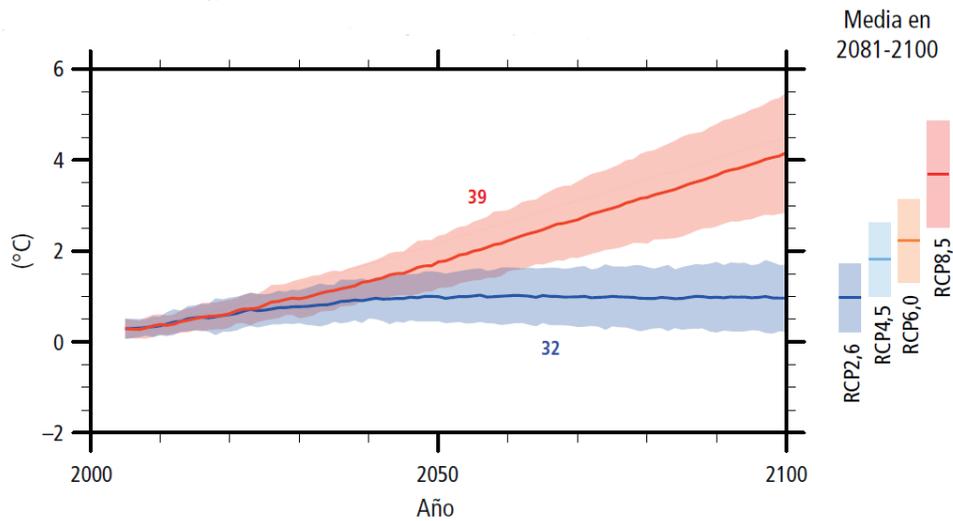


Ilustración 10: Cambio proyectado en la temperatura media global de la superficie con respecto al período 1986-2005 (IPCC, 2014).

En los escenarios más catastróficos, como el RCP8.5 presentado en la Ilustración 10, el ritmo de emisión de GEI aumenta de manera sostenida hacia finales del siglo XXI, causando un mayor calentamiento atmosférico y desencadenando cambios duraderos en el sistema climático. Esta reacción en cadena aumentaría todavía más la ocurrencia y el impacto que los eventos extremos, como las precipitaciones intensas, puedan tener para las personas y los ecosistemas.

2.2.3 Cambio climático global

Desde 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como el mayor número de precipitaciones intensas en diversas regiones del globo. Como ya se ha mencionado, estos cambios se atribuyen mayoritariamente a las emisiones de CO_2 por parte de las actividades humanas, significando una consecuencia directa para las personas y los ecosistemas alrededor del planeta.

Sin embargo, la concentración de GEI en la atmósfera, en especial de CO_2 , no afecta de manera uniforme a la superficie terrestre. Mientras sobre los océanos incrementa la estabilidad atmosférica y sofoca los procesos de evaporación y precipitación, sobre el suelo se da el efecto contrario, incrementando la magnitud de esos procesos, aumentando la cantidad de vapor de agua en la atmósfera y provocando un incremento en la intensidad de las precipitaciones (Cao et al., 2012).

Aunque no todas las zonas del planeta se vean afectadas de la misma manera por el cambio climático, las estimaciones indican que la intensidad de las precipitaciones puede incrementar entre un 6 y un 7 % por cada grado que aumenta la temperatura atmosférica (Schroeer & Kirchengast, 2018). Esto es especialmente útil ya que no es específica de una región del globo, sino que puede utilizarse en cualquier zona en la cual se quiera proyectar la intensidad de las precipitaciones. Además, permite estimar la intensidad de las precipitaciones extremas a partir de proyecciones de temperatura, las cuales poseen una menor incertidumbre que las proyecciones pluviométricas.

2.2.4 Cambio climático en Chile

A lo anterior se debe agregar que cada porción de la superficie terrestre posee una geografía distintiva que provoca aún más variabilidad a la hora de estimar las consecuencias del cambio climático en escalas menores a la global. Esto es más notorio en regiones con cadenas montañosas y líneas de costa, como es el caso de Chile (Araya-Osses et al., 2020), haciendo especialmente complicado la elaboración de proyecciones climatológicas para el país.

Si bien las proyecciones regionales sobre Sudamérica establecidas por el IPCC pueden brindar una idea más que suficiente de los cambios climáticos que sufrirán los países del continente en el mediano y largo plazo, la variabilidad climatológica de Chile obliga a realizar estudios de menor escala espacial para generar proyecciones climáticas más precisas para el territorio (Schroeer & Kirchengast, 2018; Williams, 2017).

Sin embargo, la dificultad de los estudios climatológicos en territorio chileno radica en la gran variedad de modelos climáticos a disposición y en la manera en la que estos se aplican a cada macrozona del país. Aunque un conjunto de modelos con ciertos parámetros de estudio indique un resultado específico, puede existir otro conjunto de modelos que contradigan dicho resultado, generando una alta incertidumbre al momento de intentar predecir las consecuencias del cambio climático en Chile (Williams, 2017).

Por ejemplo, se proyecta aumento del 40% en el promedio de precipitaciones en las zonas altiplánicas de las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta para el largo plazo entre 2081 y 2100 (Araya-Osses et al., 2020). Además, se proyectan disminuciones en las precipitaciones cercanas al 80% para la zona centro del país para el mismo período de tiempo. Por otro lado, se proyecta un aumento más bien leve en la intensidad de las precipitaciones en la zona altiplánica del norte del país para el mediano plazo entre 2021 y 2050 (Bozkurt, 2018).

Frente a estas discrepancias otros autores afirman que no es posible concluir sobre el aumento o la disminución de las precipitaciones en el altiplano chileno a futuro, debido a la geografía presente y a las dificultades que eso conlleva para este tipo de estudio (Sarricolea Espinoza & Romero Aravena, 2015). Aun así, mencionan que las proyecciones del quinto informe del IPCC sobre variabilidad climática en el altiplano proyectan de igual manera un incremento en la intensidad de futuras precipitaciones extremas.

2.3 Distancia peligrosa

Como ya se mencionó en el apartado 2.1.6, existen varios mecanismos por los cuales un depósito de relaves puede sufrir una rotura y liberar su contenido fuera de los límites del muro. Las consecuencias que este tipo de eventos tiene para las personas y el medio ambiente circundante se encuentran sujetas a los elementos que contenga el relave liberado y de la distancia que alcance hasta detenerse, la cual dependerá a su vez de las características físicas y reológicas del material. A esta distancia se le conoce como distancia peligrosa y se define como aquella distancia, en kilómetros, que recorrería el relave en caso de rotura del depósito (*Decreto Supremo N°248, 2007*).

La cantidad de kilómetros que el relave recorre aguas abajo dependerá de la inclinación del terreno, el volumen de material liberado y la cantidad de agua que este tenga al momento de la rotura. Este último punto puede disminuir el grado de cohesión del material sólido del relave, provocando que tenga mayor facilidad para fluir y sea más difícil que se detenga en terrenos con pendientes altas.

Para predecir la distancia peligrosa de un relave se han desarrollado distintos métodos empíricos y numéricos, obteniendo distintos resultados entre un método y otro dependiendo de los parámetros que consideren y las ecuaciones que utilicen. En los siguientes apartados se expondrán de manera detallada dos métodos empíricos y de manera más superficial tres métodos numéricos permitidos por la legislación encargada de los depósitos de relaves.

2.3.1 Métodos empíricos para el cálculo de distancia peligrosa

2.3.1.1 Lucia et al, 1981

El Dr. Patrick C. Lucia fue un profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de California, Estados Unidos. Una de sus publicaciones corresponde a “*Summary of research on case histories of Flow failures of mine tailings impoundments*”, donde se establece un método simplificado para la estimación de la distancia peligrosa de un depósito de relaves. Este método, también llamado método de Lucia, fue presentado en el Bureau of Mines

Technology Workshop en 1981 y recopila 25 casos históricos de fallas de depósitos de relaves ocurridas hasta esa fecha. Entre los casos recopilados se encuentran tranques de relaves, embalses de relaves y otras estructuras de tierra ubicados en distintos países, entre ellos Chile.

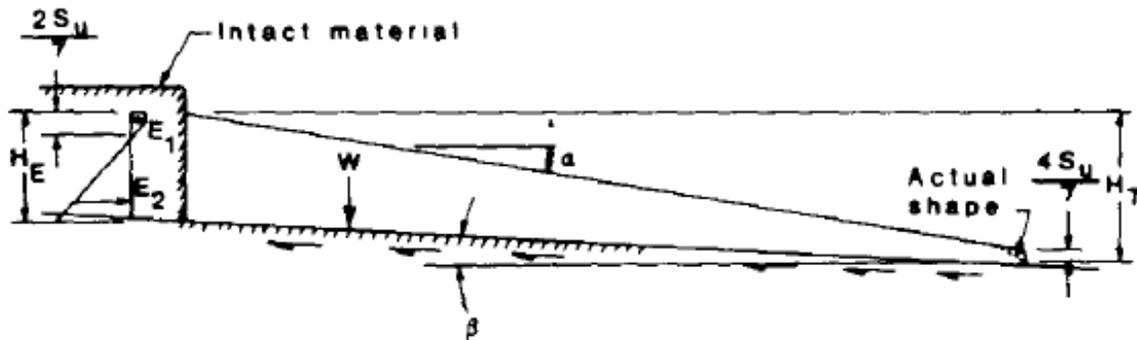


Ilustración 11: Sección transversal idealizada de un relave detenido post rotura (Lucia, 1981).

La Ilustración 11 muestra una sección transversal idealizada, donde un suelo transportado por licuefacción se autosostiene en una pendiente de terreno baja. Los informes post rotura de distintos depósitos recopilados por Lucia incluían la pendiente del residuo estable α , la pendiente del terreno β sobre la que se detuvo el relave y la distancia L recorrida aguas abajo. Los casos históricos recopilados y las condiciones post rotura se presentan en el apartado 7.1 de los anexos.

Aunque los datos de dichos informes son limitados, Lucia encuentra una consistencia en el comportamiento de los relaves: aquellos residuos con una baja resistencia al corte residual sólo pudieron detenerse en pendientes menores a 4° , mientras que los residuos con mayor resistencia al corte residual recorrían una menor distancia al detenerse en pendientes mayores a 4° .

La resistencia al corte residual se calcula aproximando un paralelismo entre la pendiente del terreno (β) y la pendiente del residuo estable (α) cuando el relave se detiene, quedando de la siguiente forma:

$$S_u = \gamma * H * \sin \beta * \cos \beta \quad 2-6$$

De la ecuación anterior, H corresponde a la altura promedio del relave al momento de su detención. Esto se puede calcular como el promedio entre H_i y H_c :

$$H = \frac{H_i + \frac{4 * S_u}{\gamma}}{2} \quad 2-7$$

Donde H_c se expresa de la siguiente manera:

$$H_c = \frac{4 * S_u}{\gamma}$$

De esta manera, la resistencia al corte residual queda expresada de la siguiente forma:

$$S_u = \frac{\gamma * H_i * \text{sen } \beta * \cos \beta}{2 - 4 * \text{sen } \beta * \cos \beta} \quad 2-8$$

Para cuantificar el comportamiento de los relaves que se liberan post rotura, se calcula una resistencia al corte que permita obtener un factor de seguridad igual a 1, es decir, la resistencia al corte residual (S_u) debe ser igual al esfuerzo de corte (τ) inducido por la pendiente del terreno. Si bien, al asumir esto se omite la presencia de fuerzas inerciales que actúan sobre el relave en movimiento, estas resultan insignificantes a bajas velocidades como las experimentadas en el instante previo a la detención del residuo.

De entre varios modos de falla, Lucia encontró que el más crítico correspondía a aquel que implicaba un esfuerzo de corte a lo largo de toda la base horizontal del relave en movimiento, Esta condición se visualiza en la Ilustración 11 y permite escribir una condición de estabilidad de manera adimensional y siguiendo el supuesto inicial del factor de seguridad igual a 1.

$$\frac{W}{\gamma * H_i^2} * \sin \beta - \frac{S_u * L}{\gamma * H_i^2 * \cos \beta} + \frac{E_2}{\gamma * H_i^2} * \cos \beta - \frac{E_1}{\gamma * H_i^2} * \cos \beta = 0 \quad 2-9$$

La ecuación anterior puede ser resuelta en función del parámetro adimensional N_0 tal que:

$$N_0 = \frac{\gamma * H_i}{S_u} \quad 2-10$$

Donde:

W : peso total del relave propagado

H_i : altura total de salida

γ : peso unitario del relave

β : pendiente del terreno

S_u : resistencia al corte residual

L : distancia recorrida por el relave

E_1 : empuje en 1

E_2 : empuje en 2

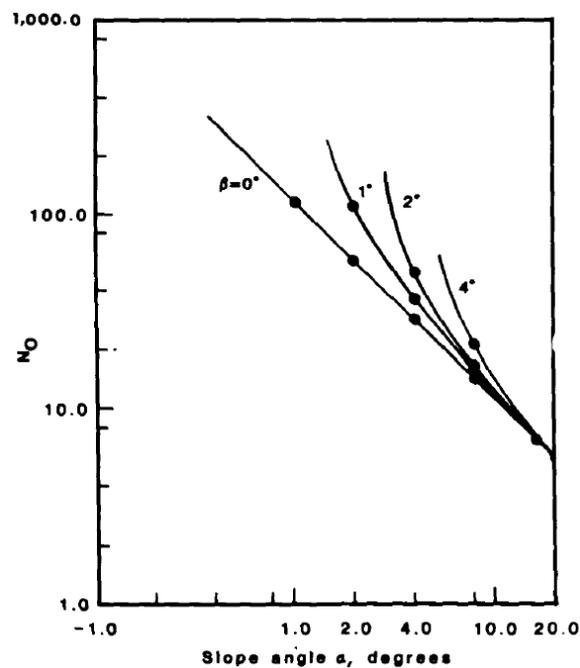


Ilustración 12: Ábaco de pendiente estable (Lucia, 1981).

La Ilustración 12 muestra el ábaco de pendiente estable, donde se relaciona la pendiente del residuo estable (α) con el número de estabilidad (N_0), dependiendo de la pendiente del terreno (β) sobre la cual se desplaza el residuo. Esta última pendiente debe ser conocida para determinar el número de estabilidad, sin embargo, muchas veces la superficie del terreno no es uniforme, por lo que se hace necesario utilizar el criterio personal para establecer un valor medio de β . Este valor debe ser

revisado para confirmar que es representativo del terreno sobre el cual fluye el residuo post rotura del depósito.

Con los parámetros S_u y β ya establecidos, se puede estimar la distancia peligrosa siguiendo el método planteado por Lucia:

- Determinar el valor de N_0 para una cantidad dada de valores de α . Luego, por cada N_0 calcular la altura del relave liberado ($H_{T,R}$) en función de la resistencia al corte residual utilizando la ecuación presentada a continuación:

$$H_{T,R} = \frac{N_0 * S_u}{\gamma} \quad 2-11$$

- Graficar los $H_{T,R}$ calculados en función de α y obtener una “curva de resistencia” decreciente.
- Estimar el volumen de relaves que pudiera verse envuelto en la rotura del depósito (V_f). Para determinar el peor caso de distancia peligrosa es apropiado asumir que todo el relave dentro del depósito fluiría aguas abajo.
- Calcular altura del relave liberado ($H_{T,V}$) en función volumen de relave liberado en la rotura según muestran las ecuaciones presentadas a continuación:

$$H_{T,V} = \sqrt{(A_1^2 * H_c^2 + A_2 * V_f)} - A_3 * H_c \quad 2-12$$

$$A_1 = \left(\frac{\tan \alpha}{\tan \alpha - \tan \beta} \right)^2$$

$$A_2 = \frac{2 * \tan^2 \alpha}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

$$A_3 = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

$$H_c = \frac{4 * S_u}{\gamma}$$

- Graficar los $H_{T,V}$ calculados en función de α y obtener una “curva de volumen” creciente.
- La intersección de ambas curvas indica que se satisfacen las condiciones de estabilidad y geometría de manera simultánea para un factor de seguridad igual a 1. Los valores de H_T y

α correspondientes a dicha intersección corresponden a las condiciones de estabilidad límite. El valor del flujo de residuos se calcula entonces de la siguiente manera:

$$L = \frac{H_T - H_c}{\tan \alpha} \quad 2-13$$

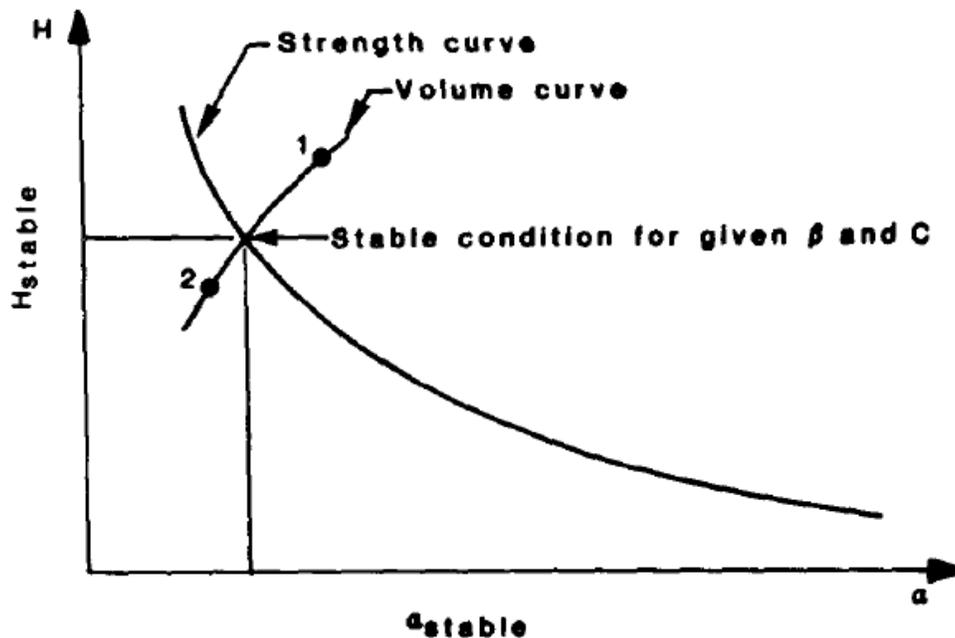


Ilustración 13: Predicción de la distancia del residuo (Lucia, 1981).

El método planteado por Lucia es una herramienta simple para determinar con cierta precisión la distancia que recorrerá un relave luego de la rotura del muro de contención, cuando la pendiente del terreno sea menor a 4° . Un análisis más detallado para predecir la distancia recorrida por un flujo de relaves debe incorporar mediciones de parámetros reológicos del material y un estudio del terreno aguas abajo del depósito.

2.3.1.2 Rico, 2008

La Dra. Mayte Rico obtuvo su Licenciatura en Geología y Ciencias de la Tierra y, posteriormente, un doctorado en Ciencias Geológicas en la Universidad de Zaragoza, España. Entre los años 2004

y 2013 se desempeñó como investigadora en el Instituto Pirenaico de Ecología y realizó una serie de publicaciones de investigación relacionados a los depósitos de relaves y a los riesgos asociados a su rotura.

Una de estas publicaciones corresponde a la recopilación de casos históricos de roturas de depósitos de relaves. En ella establece una serie de correlaciones entre parámetros geométricos como altura y volumen del depósito, con las características hidráulicas de los residuos liberados luego de la rotura de los muros de contención. Las bases de datos disponibles a la fecha contaban con cerca de 250 casos de rotura ocurridos alrededor del mundo y Rico seleccionó 28 de estos eventos en función de la cantidad de información disponible en los reportes. Así, su estudio se centró en aquellos casos que informan del volumen de residuo liberado y de la distancia recorrida hasta su detención. El detalle de los casos recopilados se presenta en el apartado 7.2 de los anexos.

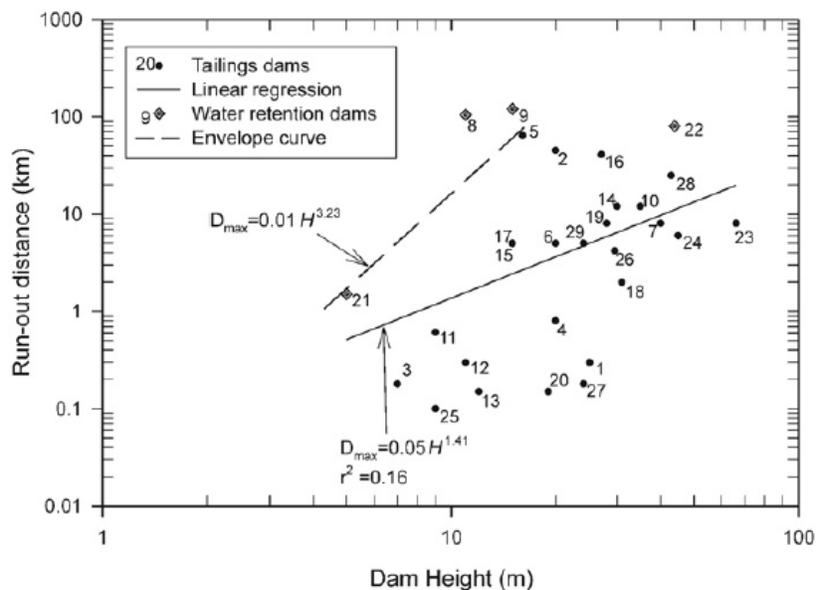


Ilustración 14: Altura del relave versus la distancia recorrida por el residuo (Rico et al., 2008).

La Ilustración 14 muestra la primera de las correlaciones establecidas por Rico. En ella grafica la distancia recorrida por el residuo luego de la rotura del muro, en kilómetros, y la altura del depósito antes del evento de falla, en metros. Para esta correlación, Rico aproxima la altura del relave con la altura del muro del depósito, aduciendo que la revancha del depósito puede menospreciarse comparada a estos dos parámetros.

$$D_{max} = 0,05 * H^{1,41} \quad , \quad r^2 = 0,16 \quad 2-14$$

La curva envolvente de la distancia recorrida por el residuo para todos los depósitos estudiados se presenta a continuación:

$$D_{max} = 0,01 * H^{3,23} \quad 2-15$$

El bajo coeficiente de correlación indica que la distancia que recorre el residuo depende de otros factores no considerados en la ecuación, como pueden ser el volumen liberado al momento de la rotura o las condiciones del terreno por el cual el residuo fluye aguas abajo.

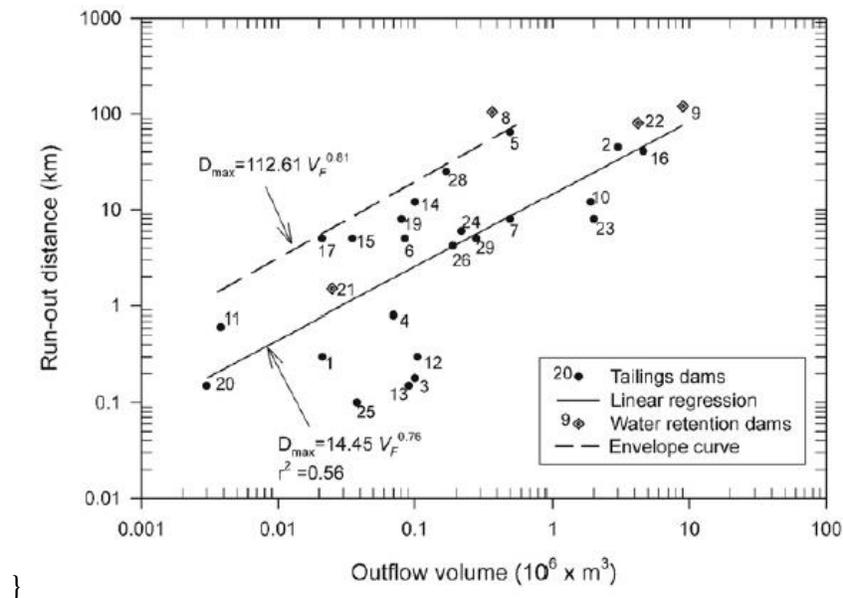


Ilustración 15: Volumen de residuo liberado en la falla versus la distancia recorrida por el residuo (Rico et al., 2008).

La Ilustración 15 muestra la segunda correlación establecida por Rico. En ella se grafica la distancia recorrida por el residuo luego de la rotura del muro, en kilómetros, y el volumen liberado luego del evento de falla, en millones de metros cúbicos.

$$D_{max} = 14,45 * V_f^{0,76} \quad , \quad r^2 = 0,56 \quad 2-16$$

La curva envolvente de la distancia recorrida por el residuo para los depósitos estudiados se presenta a continuación:

$$D_{max} = 112,61 * V_f^{0,81} \quad 2-17$$

La dispersión de los datos se le atribuye a la variedad en el contenido de agua de los casos estudiados, al nivel de decantación del relave al momento de la falla, al porcentaje de sólidos y al gradiente hidráulico del residuo al momento de la rotura del depósito.

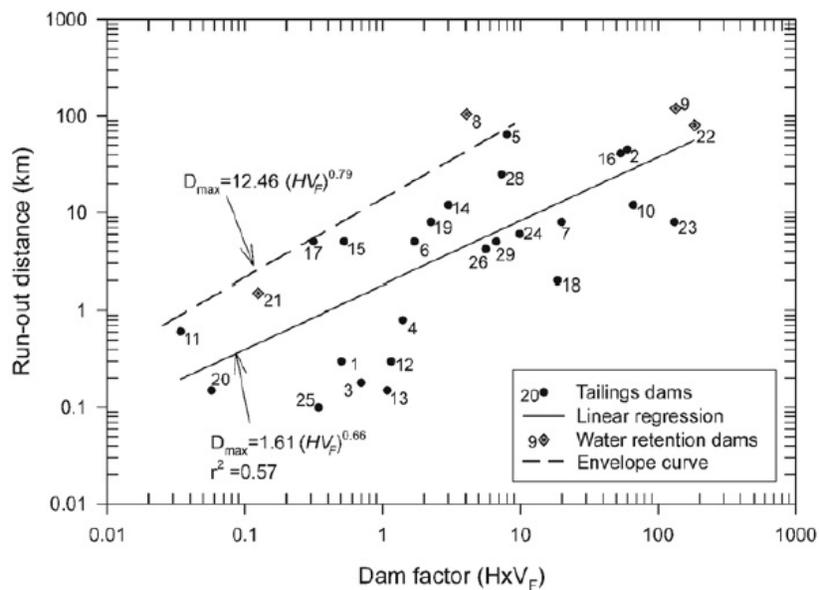


Ilustración 16: Factor presa versus distancia recorrida por el residuo (Rico et al., 2008).

La Ilustración 16 muestra la tercera correlación planteada por Rico. En ella se grafican el producto entre la altura del depósito de relaves y el volumen de residuo liberado en la falla, también llamado factor presa ($H * V_f$), versus la distancia recorrida por el residuo luego de la rotura del muro, en kilómetros.

El factor presa fue presentado en el año 1983 dentro del desarrollo de un criterio para estimar el *peak* de descarga de material en la rotura de un relave. Este factor corresponde a un indicador en bruto de la energía “liberada” por el depósito al momento en que ocurre la rotura del muro, pues inicialmente consideraba el volumen de residuo almacenado dentro de la cubeta del depósito. Sin

embargo, Rico encontró una mejor correlación con el volumen de residuo liberado en la falla del depósito. La línea de regresión de esta correlación se presenta a continuación:

$$D_{max} = 1,61 * (H * V_f)^{0,66} , \quad r^2 = 0,57 \quad 2-18$$

En este caso, la altura del relave se encuentra en metros, el volumen de residuo liberado en la falla se mide en millones de metros cúbicos y la distancia recorrida por el residuo se obtiene en kilómetros.

La curva envolvente de todos los casos estudiados por Rico se presenta a continuación:

$$D_{max} = 12,46 * (H * V_f)^{0,79} \quad 2-19$$

La mayor limitante a la hora de utilizar esta ecuación en el análisis de riesgos de depósitos de relaves intactos es la incertidumbre del volumen de residuo liberado por el depósito luego de la falla del muro. Para reducir dicha incertidumbre, Rico desarrolla una cuarta correlación, la cual se presenta a continuación:

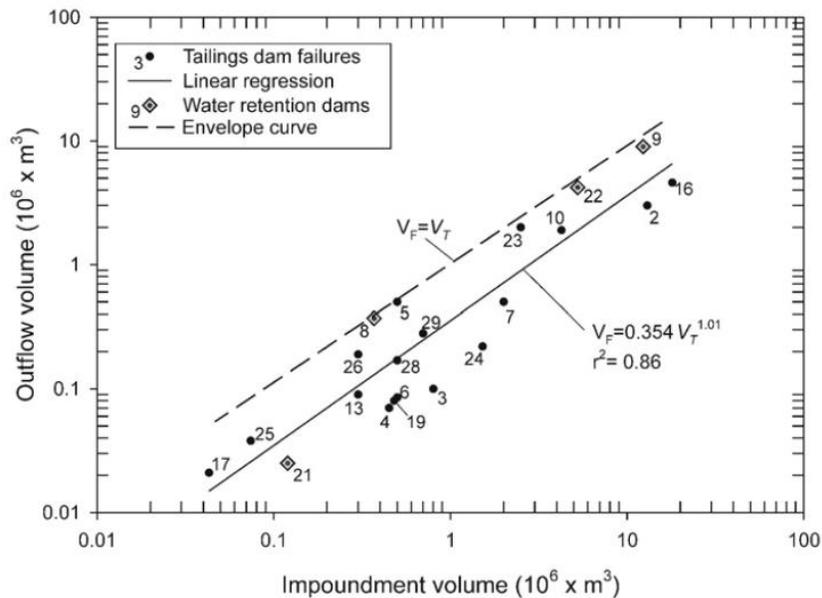


Ilustración 17: Volumen de residuo liberado versus volumen almacenado dentro de la cubeta (Rico et al., 2008).

La Ilustración 17 presenta la cuarta correlación planteada por Rico. En ella se grafica el volumen de residuo liberado en la falla, en millones de metros cúbicos, versus el volumen de residuo almacenado dentro del depósito en el instante previo a la falla del muro. La línea de regresión de esta correlación se presenta a continuación:

$$V_f = 0,354 * V_T^{1,01} \quad , \quad r^2 = 0,86 \quad 2-20$$

Esta correlación muestra que, aproximadamente, un tercio de los relaves dentro del depósito son liberados al momento de la falla del muro. En este caso, la curva envolvente representa que todo el volumen dentro del depósito se libera luego del evento de rotura, es decir, representa el peor caso. Sin embargo, esta situación se dio en embalses de agua y en depósitos de relaves industriales diluidos, es decir, residuos con bajo o nulo porcentaje de sólidos.

Si bien Rico plantea otras dos correlaciones relacionadas al *peak* de volumen de residuo liberado por unidad de tiempo durante el evento de rotura, estas no son de interés para esta memoria, por lo que no serán consideradas en el marco teórico.

El análisis realizado por Rico corresponde a una primera estimación del volumen de relave que escurre en caso de rotura del muro de contención, así como de la distancia que recorrerá dicho volumen de material. Los resultados que arrojen las correlaciones deben ser tratados con precaución debido a la incertidumbre de la evidencia bibliográfica y a la diversidad de depósitos de relaves. Sin embargo, pueden ser utilizadas como una primera aproximación para la evaluación de riesgos de depósitos de relaves de los que se tenga poca información o en los que se lleven a cabo estudios posteriores con un mayor detalle.

2.3.2 Métodos numéricos para el cálculo de la distancia peligrosa

2.3.2.1 Jeyapalan, 1982

Este autor llevó a cabo experimentos de laboratorio con el fin de analizar el comportamiento de flujos de relaves licuados, para luego compararlos con modelamientos realizados con el software TFLOW y con observaciones en terreno. A partir de sus resultados concluyó que los relaves pueden ser modelados como fluidos plásticos ideales, o plásticos de Bingham, de alta viscosidad en régimen laminar. Además, determinó que el flujo de relaves tiende a estabilizarse hasta llegar a su

detención, proceso que depende de las propiedades físicas del relave y de las condiciones del terreno por el cual escure.

El número de Reynolds y la pendiente de fricción son dos parámetros utilizados por este método que incluyen al peso unitario (γ) como un dato de entrada. El número de Reynolds (Re) sirvió como parámetro para calcular el factor de fricción entre el relave y la superficie sobre la cual se desplaza, mientras que la pendiente de fricción es considerada en la ecuación de conservación de momentum para la determinación de la velocidad del relave a lo largo del tiempo. (Jeyapalan, 1983)

2.3.2.2 Blight, 1983

Blight estudió la extensión del flujo de relaves basándose en el modelo de equilibrio de fuerzas de Lucia. Su análisis parte de la suposición que el relave tiene la capacidad de fluir aguas abajo y que la pendiente del terreno se aplanan en el transcurso del escurrimiento. En ese momento se llega a un equilibrio entre la presión ejercida por el relave retenido en la falla y la resistencia al corte a lo largo de la base de la cuña de deslizamiento.

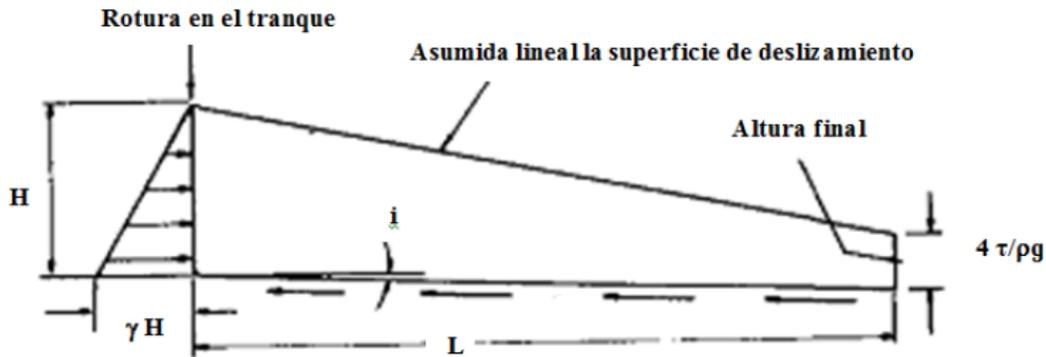


Ilustración 18: Modelo de escurrimiento del relave hasta el estado de reposo (Blight, 1983).

La Ilustración 18 muestra una representación simplificada del relave en movimiento, muy similar en el concepto a lo planteado por Lucia en el apartado 2.3.1.1 El método de Blight establece una relación entre la distancia recorrida por un relave en caso de rotura del muro de contención del depósito y la profundidad del volumen de dicho relave para un peso unitario (γ) dado, su resistencia al corte (τ) y la pendiente del terreno donde ocurre el escurrimiento (i).

$$\frac{L}{H} = \frac{1}{\frac{2 * \tau * \left(1 - \frac{2}{\sin i}\right)}{\rho * g * H} - \sin i}$$

Sus predicciones de distancia peligrosa consideran que el relave posee un bajo porcentaje de agua, no siendo adecuado de utilizar para predecir distancias peligrosas en relaves convencionales que no hayan pasado por procesos de recuperación de agua (Blight, 1983).

2.3.2.3 Oldrich Hungr, 1995

El modelo de Oldrich se basa en una solución de ecuaciones de movimiento, permite la selección de una amplia variedad de reologías de relaves y plantea que pueden sufrir variaciones a lo largo del escurrimiento o dentro de una misma masa en movimiento. El método no considera que todo el relave se encuentra licuado, sino más bien está compuesto de escombros que deslizan sobre una capa de material licuado.

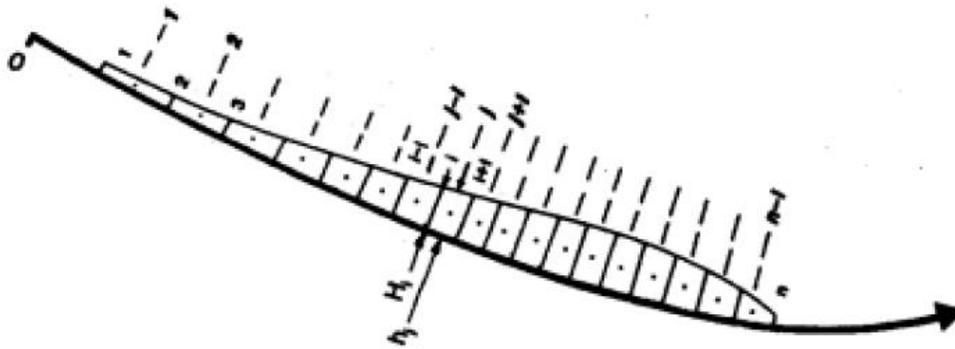


Ilustración 19: Esquema de partición de relaves en bloques. Los bordes se enumeran desde $i = 1$ a n y la masa de los bloques desde $j = 1$ a $n - 1$ (Oldrich, 1995).

La Ilustración 19 representa el relave liberado como una masa deslizante compuesta por un número de bloques que se encuentran en contacto durante todo el escurrimiento, no se deforman, y siempre contienen el mismo volumen de relave en la trayectoria del recorrido.

Luego, simuló características de los deslizamientos de distintos relaves para predecir su distancia peligrosa. Este modelo plantea una serie de ecuaciones que describen al volumen de relave como la suma continua de columnas de material que interactúan de manera independiente con las fuerzas que experimenta el flujo de relaves fuera del muro de contención. En estas ecuaciones utiliza como parámetro inicial el peso unitario del relave (γ), la altura de cada columna con respecto al terreno sobre el que se desplaza y el ancho seleccionado para su análisis (Oldrich, 1995).

3 METODOLOGÍA

Con la revisión bibliográfica realizada, se define una metodología para la evaluación de la incidencia de las precipitaciones extremas en la distancia que recorre un relave luego de una hipotética rotura del depósito. Para ello se abarca desde el criterio inicial de selección de relaves de interés hasta la evaluación de sensibilidad de inputs de métodos numéricos frente a variaciones del volumen de los depósitos de relaves producidas por precipitaciones extremas.

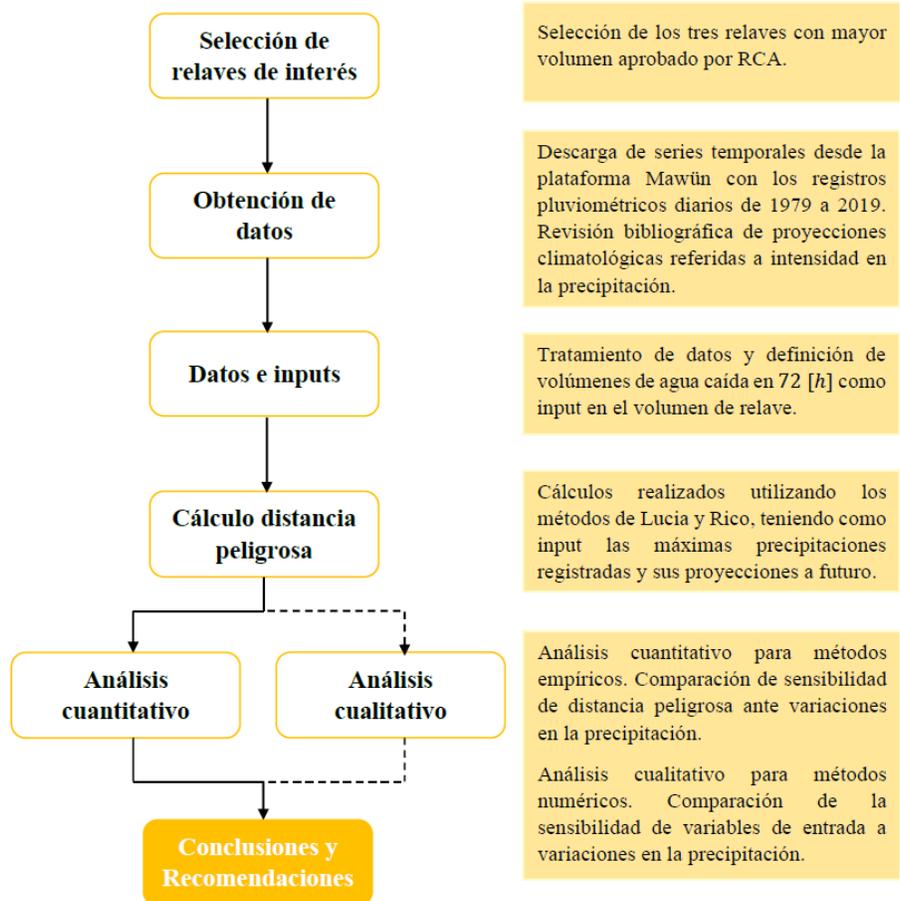
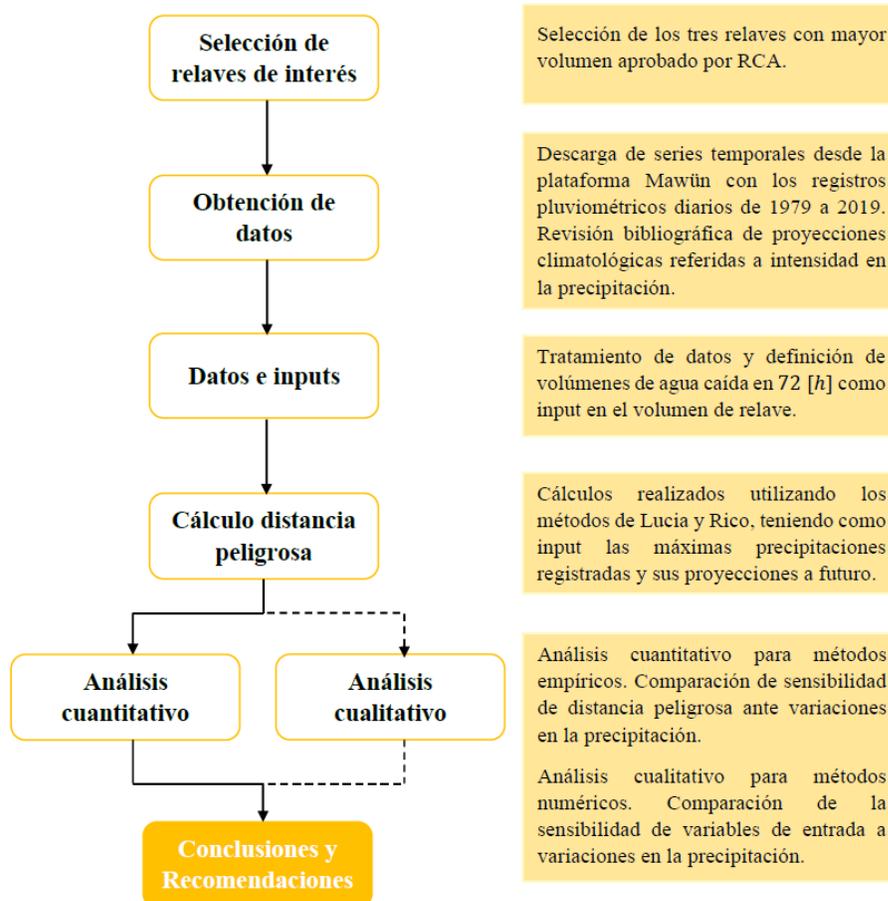


Ilustración 20: Metodología para la realización de la memoria (Elaboración propia).



La

ilustración 20 muestra, a grandes rasgos, los pasos realizados para llevar a cabo este estudio. El detalle de cada uno de ellos se presenta en los siguientes apartados.

3.1 Selección de relaves

Los métodos empíricos estudiados en el apartado 2.3.1 muestran la utilización del volumen de relave como input para el cálculo de la distancia peligrosa. En base a esto, se seleccionan los tres relaves de mayor volumen aprobado por RCA desde el *Catastro de Relaves de Sernageomin*. La identificación de los relaves va acompañada de sus parámetros geométricos (altura, área superficial y volumen aprobado), la empresa titular del relave y su localización dentro del territorio nacional.

3.2 Obtención de datos pluviométricos

Los datos pluviométricos se obtienen a partir de la *Plataforma Mawün*, una herramienta desarrollada por el Observatorio de Recursos Hídricos de la Universidad de la Frontera con el apoyo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR²) para la visualización y análisis preliminar de los distintos productos disponibles.



Ilustración 21: Interfaz de extracción y descarga de series temporales.

La Ilustración 21 muestra la interfaz que posee la plataforma *Mawün* para la descarga de series temporales de pluviometría. La ventana de la izquierda permite seleccionar la longitud y latitud del punto sobre el cual se desea trabajar, mientras que la ventana de la derecha permite seleccionar el producto de precipitación y la escala temporal de la serie objetivo.

En este caso de estudio se selecciona el producto CR2MET v2 que utiliza modelos estadísticos alimentados con datos topográficos locales y calibrados con una red nacional actualizada de estaciones pluviométricas. Es especialmente indicado para este estudio por aliviar las incertidumbres en las condiciones climáticas que se presentan en la mayoría de las cuencas hidrográficas al considerar la influencia que tiene la Cordillera de los Andes en la variabilidad climática altiplánica, que es donde se encuentran la mayor parte de los relaves en Chile (Zambrano-Bigiarini & Rivas, 2020).

Por su parte, la escala temporal permite la obtención de registros diarios de pluviometría, lo que implica la posibilidad de identificar eventos de 24 [h] y así aumentar la densidad de datos en la serie temporal. En este caso, se selecciona la escala temporal de 24 [h] para luego considerar eventos de precipitación intensa de 72 [h] como los casos de interés. Lo anterior se realiza con el fin de abarcar eventos de más de un día de duración y eliminar la posibilidad que la máxima precipitación registrada sea consecutiva al segundo evento más intenso en la ubicación del relave de interés.

3.3 Eventos de precipitación y permeabilidad

Con el objetivo de ratificar la consideración de eventos de precipitación extrema como una precipitación de 72 [h], se debe evaluar si el depósito de relaves es capaz de drenar el volumen de

agua que precipite en dicho período. Para ello, se toman las dimensiones de volumen y altura de los muros autorizados para cada relave seleccionado y se estima el tiempo que demoraría en drenar el agua precipitada en su interior. Esto se lleva a cabo considerando que toda la superficie del depósito de relaves tendrá la capacidad de permear el agua proveniente de las precipitaciones extremas, utilizando las ecuaciones presentadas en el apartado 2.1.7 y realizando los pasos planteados a continuación:

- Se utiliza un rango de coeficiente de permeabilidad entre $k = 10^{-6}$ y $k = 10^{-4}$ correspondiente a limos y arenas respectivamente, buscando abarcar el mayor rango de permeabilidades posible. Esta consideración nace del supuesto que la compactación del relave dentro del depósito no es uniforme, lo que provoca que la permeabilidad varíe según la profundidad a la que se mida.

Para el rango de permeabilidad seleccionado, se calculó la velocidad de descarga v del depósito según las ecuaciones estudiadas en el apartado 2.1.7.4, iterando entre los cinco valores de gradiente hidráulico. Estos se plantean a partir de lo obtenido por (Palacios, 2015) en su estudio hidrogeológico de Sierra Gorda y los valores planteados por (Albornoz, 2022) en su estudio de sistema de drenajes en depósitos de relaves. Los valores de gradiente hidráulico son mostrados a continuación:

Tabla 4: Gradientes hidráulicos utilizados.

Gradiente	Valor
i_1	$4,0 * 10^{-2}$
i_2	$3,75 * 10^{-2}$
i_3	$3,5 * 10^{-2}$
i_4	$3,25 * 10^{-2}$
i_5	$3,0 * 10^{-2}$

Con las áreas determinadas en el apartado 3.1, se calcula el caudal que es capaz de drenar cada relave en el lapso de una hora.

- Luego, se calcula el cociente entre el volumen de agua precipitada y el caudal que el relave es capaz de drenar, lo que resulta en el tiempo de drenado de cada relave para la máxima precipitación registrada a la fecha.

- El procedimiento se repite para las proyecciones de precipitación en el año 2100 que consideran el cambio climático, estudiadas en el apartado 2.2.3.

3.4 Cálculo de distancia peligrosa

Los métodos empíricos estudiados en el apartado 2.3.1 utilizan parámetros geométricos del relave como inputs para calcular la distancia peligrosa, además de parámetros del residuo estable y parámetros del terreno como es el caso del método de Lucia.

La distancia peligrosa del relave se calcula utilizando el input volumen (V_T) como la suma del volumen de material dentro del depósito y la máxima precipitación registrada para la localización del relave. Luego se repite el cálculo, pero esta vez con el volumen del relave (V_T) como la suma del volumen de material dentro del depósito y la máxima precipitación proyectada para el año 2100. El procedimiento se repite en ambos métodos empíricos, agregándose las consideraciones y cálculos previos para cada caso.

A continuación, se presentan las consideraciones y pasos utilizados para ambos métodos:

3.4.1 Lucia et al, 1981

El método de Lucia fue presentado en el apartado 2.3.1.1, Para calcular la distancia peligrosa este método requiere: la altura del relave (H_T), el peso unitario del relave (γ), la pendiente del terreno (β), la resistencia al corte residual (S_u) y el volumen de flujo (V_f). Los que son definidos a continuación:

- La altura de cada relave se obtiene a partir de la base de datos del sitio web del *Consejo Minero*.
- Para el peso unitario se utiliza un valor referencial igual a $1,5 [ton/m^3]$ por ser representativo de los relaves en Chile. Esto pues, dicho valor corresponde al peso unitario de las lamas, cuales están presentes en gran cantidad en la mayor parte de los relaves a nivel nacional (Sernageomin, 2020).
- El volumen de cada relave se obtiene a partir del catastro de relaves de Sernageomin (Sernageomin, 2020). Para el volumen de flujo V_f se considera el volumen total de material almacenado en el depósito por significar el peor escenario en una eventual falla del depósito de relaves.

3.4.2 Rico, 2007

El método de Rico fue presentado en el apartado 2.3.1.2. La primera correlación asocia la distancia peligrosa ($D_{m\acute{a}x,1}$) con la altura del depósito (H_T), la segunda asocia la distancia peligrosa ($D_{m\acute{a}x,2}$) con el volumen liberado de relaves (V_f) y la tercera asocia ($D_{m\acute{a}x,3}$) con el factor presa (HxV_f). Para la altura de cada relave se utiliza la máxima altura del muro de contención publicada en *Consejo Minero*, mientras que los volúmenes de los relaves a seleccionar se encuentran en el *Catastro de Relaves de Sernageomin* (Sernageomin, 2020).

3.4.3 Comparación entre distancias peligrosas en métodos empíricos

La comparación de distancias peligrosas resultantes en el relave consta de las siguientes etapas:

- Análisis cuantitativo de la distancia peligrosa para un mismo método con diferentes volúmenes de relave.
- Análisis cuantitativo de la variación de distancia peligrosa entre métodos.

Esta comparación busca evaluar la influencia que supone el aumento de la intensidad de las precipitaciones extremas sobre la distancia peligrosa de los depósitos estudiados. Además, permite visualizar qué método es más sensible al aumento en el volumen del relave al comparar las variaciones resultantes en la distancia peligrosa para ambos métodos.

3.5 Situación hipotética en métodos empíricos

Para evaluar la sensibilidad de los métodos de Lucia y Rico frente a variaciones en el volumen de un relave a partir de precipitaciones extremas, se plantean variaciones para los inputs de ambos métodos. Luego, se evalúan los cambios registrados en la distancia peligrosa resultante de la situación hipotética y la distancia peligrosa resultante de la metodología descrita en los apartados 3.4.1 y 3.4.2. Así, se plantean dos situaciones hipotéticas:

- Para Lucia, se considera un aumento del 50 % en el volumen total del relave $V_T [m^3]$, pero manteniendo constantes la altura del depósito $H_T [m]$ y su peso específico $\gamma \left[\frac{ton}{m^3} \right]$. De esta manera, la metodología de Lucia se mantiene intacta y el resultado esperado es un aumento en la distancia peligrosa resultante.
- Para Rico, se considera un aumento del 10 % de la distancia peligrosa calculada a partir de los máximos registrados en las series temporales y luego se calcula el volumen de relave

necesario para provocar dicho aumento en las correlaciones que sea pertinente realizar cálculo.

Con los resultados obtenidos para ambas situaciones, se procede a estimar el tiempo requerido para que el aumento de las precipitaciones produzca las variaciones del volumen en cuestión. En este sentido, se consideró que el peor escenario de emisión de CO_2 se mantiene en el futuro y que la temperatura atmosférica aumenta a la misma velocidad que las proyecciones al 2100, es decir, $4,5\text{ }^\circ C$ cada 80 años.

3.6 Sensibilidad en métodos numéricos

Por último, se plantea la evaluación de la sensibilidad que poseen los métodos numéricos revisados en el apartado 2.3.2 para una variación en el volumen de los relaves de interés producida por la máxima precipitación proyectada al año 2100. Para ello, se evalúan los siguientes inputs:

- Peso específico (γ)
$$\frac{m_{T,r} * g + m_{pp} * g}{V_{T,r} + m_{pp}}$$
- Porcentaje de sólidos (C_p)
$$\frac{m_{s,r}}{m_{T,r} + m_{pp}}$$
- Resistencia al corte residual (S_u)
$$\frac{\left(\frac{m_{T,r} * g + m_{pp} * g}{V_{T,r} + m_{pp}}\right) * \text{sen}\beta * \text{cos}\beta}{2 - 4 * \text{sen}\beta * \text{cos}\beta}$$

Las definiciones algebraicas presentadas se encuentran en función de la masa de precipitación (m_{pp}), es decir, se plantean como función del volumen de agua aportado por los eventos de precipitación intensa. Así, se grafica su comportamiento entre el volumen original del relave y la suma de dicho volumen de material con el agua caída en una precipitación extrema proyectada al 2100. Finalmente, se debe realizar una comparación entre el comportamiento esperado de estos inputs y los resultados obtenidos.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Antes del cálculo de distancias peligrosas, se seleccionaron los relaves de interés según se indicó en el apartado 3.1 para luego recopilar la información pluviométrica histórica correspondiente a sus localizaciones. Hecho esto, el manejo de los datos pluviométricos permitirá obtener los inputs requeridos por los métodos empíricos estudiados en el apartado 2.3.1. Por lo tanto, se comienza con la identificación y localización de los relaves de interés:

4.1 Relaves de interés

Utilizando el software QGIS se obtienen los polígonos para los tres relaves estudiados, a la vez que se calculan las áreas de dichos polígonos. Estas serán utilizadas posteriormente como input para el cálculo de distancias peligrosas:

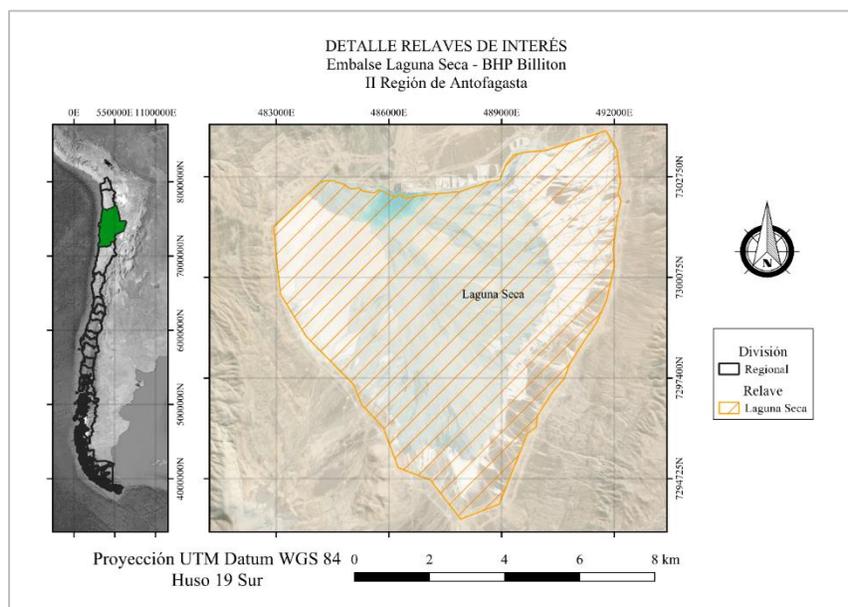


Ilustración 22: Ubicación y detalle de Tranque Laguna Seca (Elaboración Propia).

La Ilustración 22 muestra la localización regional del embalse Laguna Seca y sus coordenadas en proyección UTM huso 19 Sur. En amarillo se observa la delimitación del área del relave y en negro las divisiones regionales del territorio de Chile continental. La geometría del relave es medianamente regular por cuanto no hay una dimensión apreciablemente mayor que otra.

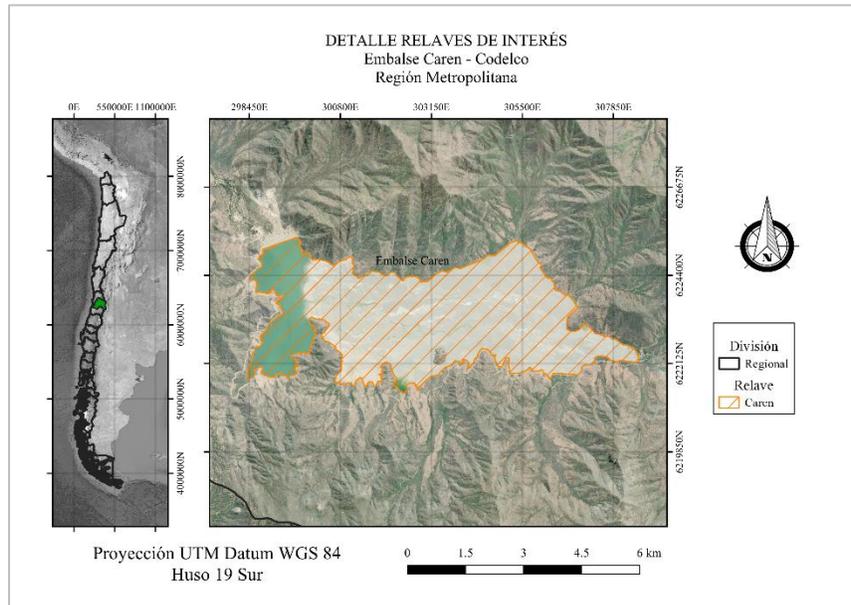


Ilustración 23: Ubicación y detalle de Embalse Caren (Elaboración Propia).

La Ilustración 23 muestra la localización regional del embalse Caren y sus coordenadas en proyección UTM huso 19 Sur. En amarillo se observa la delimitación del área del relave y en negro las divisiones regionales del territorio de Chile continental. La geometría del relave muestra una dimensión cercana a los 10 [km] en la dirección E-W y menor a 4 [km] en la dirección N-S.

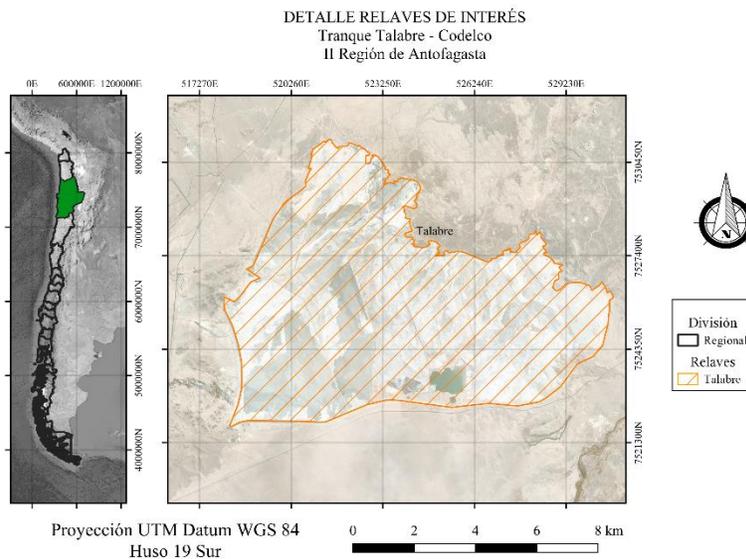


Ilustración 24: Ubicación y detalle de Tranque Talabre (Elaboración Propia).

La Ilustración 24 muestra la localización regional del tranque Talabre y sus coordenadas en proyección UTM huso 19 Sur. En amarillo se observa la delimitación del área del relave y en negro las divisiones regionales del territorio de Chile continental. La geometría del relave es más bien irregular, siendo su mayor dimensión aquella dispuesta en dirección E-W con cerca de 12 [km].

Tabla 5: Información relevante de relaves de interés.

Depósito	Altura Muro [m]	Área [m ²]	Volumen [m ³]
Laguna Seca	107	5,7 * 10 ⁷	3,0 * 10 ⁹
Caren	93	2,3 * 10 ⁷	2,2 * 10 ⁹
Talabre	51	7,1 * 10 ⁷	1,5 * 10 ⁹

En la Tabla 5 se presentan las principales características geométricas de los relaves estudiados. El embalse Laguna Seca posee el muro más alto de los tres relaves, seguido por el embalse Caren y, por último, el tranque Talabre como el depósito de menor altura. Además, el área superficial de la cubeta de Laguna Seca es más del doble del área de Caren. Sin embargo, Talabre es el depósito con mayor área superficial de los tres. En otras palabras, el embalse Caren posee la geometría más perfilada del grupo, Talabre la geometría más achatada y Laguna Seca corresponde a un término medio entre los otros dos relaves.

4.2 Precipitaciones y permeabilidad de los depósitos de relaves.

Ya definidos los relaves de interés y con la información pluviométrica histórica recopilada desde *Plataforma Mawiün*, se procede al manejo de los datos pluviométricos para obtener los inputs requeridos por los métodos empíricos estudiados. Para ello, se calcula el volumen de agua caída en cada depósito de relaves durante eventos de precipitación de 72 [h], según las consideraciones realizadas en 3.3 a partir de los registros históricos de precipitación.

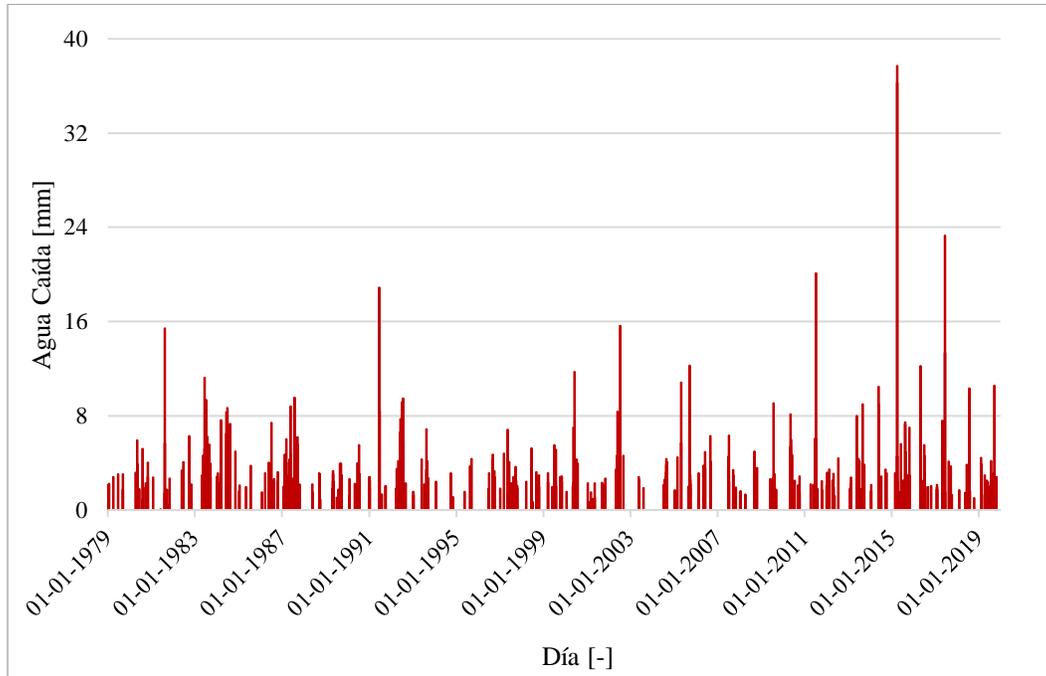


Gráfico 1: Registro de precipitaciones diarias para el tranque Laguna Seca entre los años 1979 y 2019.

El Gráfico 1 muestra las precipitaciones diarias registradas para la localización del tranque Laguna Seca, mediante el producto CR2-METV2, entre los años 1979 y 2019. En total hubo 385 días de lluvia en cuarenta años de registro, es decir, ocurrieron eventos de precipitación en el 2,6% del total de la serie temporal. Se puede apreciar un aumento de los valores máximos de precipitación al final de la serie, así como la frecuencia con la que ocurren dichos eventos. Esto coincide con lo estipulado por (Araya-Osses et al., 2020) donde se indica un aumento en la intensidad de las precipitaciones en la zona Norte del altiplano chileno.

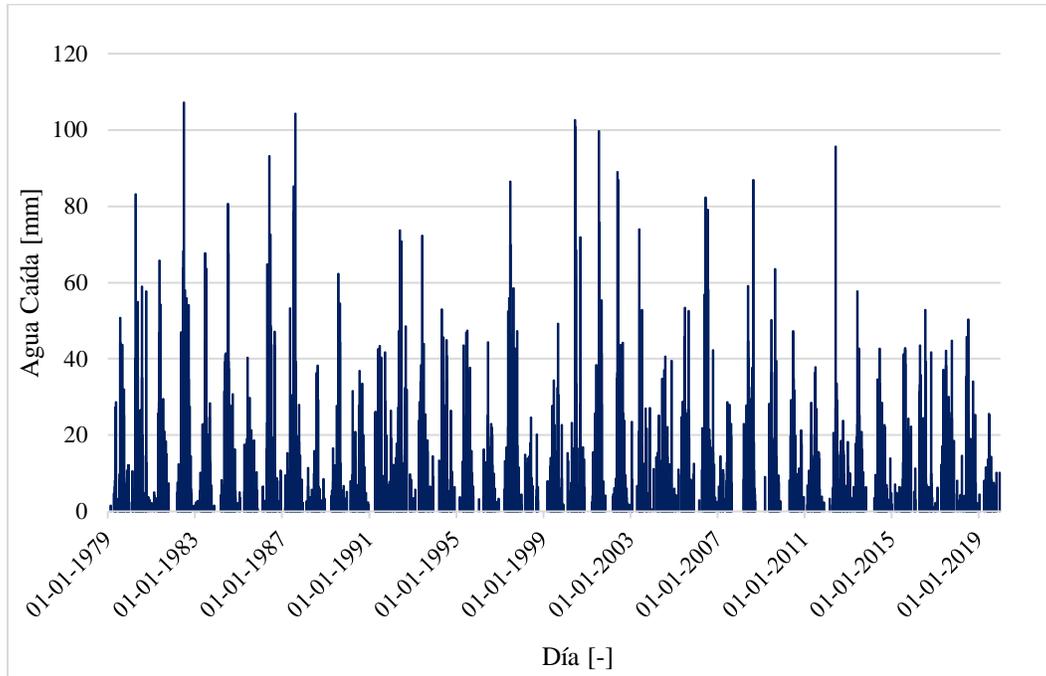


Gráfico 2: Registro de precipitaciones diarias para el embalse Carén entre los años 1979 y 2019.

El Gráfico 2 muestra las precipitaciones diarias registradas para la localización del embalse Caren, mediante el producto CR2-METV2, entre los años 1979 y 2019. En total hubo 1907 días de lluvia en cuarenta años de registro, es decir, ocurrieron eventos de precipitación en el 12,7 % del total de la serie temporal. Se observa que la máxima precipitación registrada se encuentra al inicio de la serie, así como la presencia de más eventos de intensidad similar en el resto del registro, pero de menor magnitud. Nuevamente, la situación coincide con las proyecciones realizadas por (Araya-Osses et al., 2020) sobre la disminución de la precipitación media en la zona Centro-Sur del país.

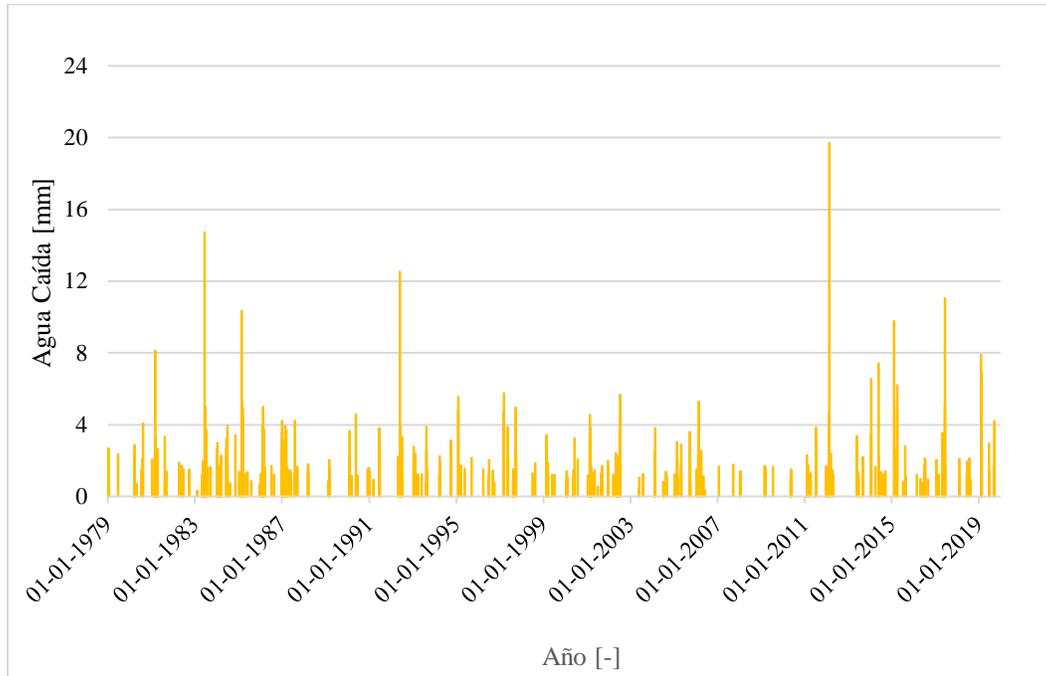


Gráfico 3: Registro de precipitaciones diarias para el Tranque Talabre entre los años 1979 y 2019.

El Gráfico 3 muestra las precipitaciones diarias registradas para la localización del embalse Caren, mediante el producto CR2-METV2, entre los años 1979 y 2019. En total hubo 467 días de lluvia en cuarenta años de registro, es decir, ocurrieron eventos de precipitación en el 3,1 % del total de la serie temporal. Al igual que en Laguna Seca, la máxima precipitación registrada se encuentra al final de la serie, aunque esta vez las mayores frecuencias de precipitaciones extremas se dividen entre el inicio y el final de la serie de datos. En este caso, la proyección presentada por (Araya-Osses et al., 2020) coincide con las precipitaciones registradas en la segunda mitad de la serie temporal, marcándose un aumento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones a medida que se avanza en el registro. Sin embargo, la primera mitad del registro de precipitaciones no coincide con el comportamiento climático local estipulado por la autora.

Tabla 6: Precipitaciones máximas registradas entre 1979 y 2019 en eventos de 24, 48 y 72 [h].

Depósito	24 [h]		48 [h]		72 [h]	
	[mm]	[m ³]	[mm]	[m ³]	[mm]	[m ³]
Laguna Seca	38	2,2 * 10 ⁶	74	4,2 * 10 ⁶	79	4,5 * 10 ⁶
Caren	107	2,4 * 10 ⁶	204	4,6 * 10 ⁶	227	5,1 * 10 ⁶
Talabre	20	1,4 * 10 ⁶	24	1,7 * 10 ⁶	26	1,8 * 10 ⁶

La Tabla 6 presenta los eventos de precipitación de 24 [h], 48 [h] y 72 [h]; los últimos dos corresponden a la acumulación de eventos de 24 [h] ininterrumpidos a lo largo 2 y 3 días, respectivamente. Estos valores se muestran en [mm] de agua y su equivalente en [m³] según la conversión presentada en el punto 7.4 de los anexos debido a que los métodos empíricos utilizan el volumen de los relaves en [m³] como input, por lo que presentar el volumen de precipitación en dicha unidad resulta conveniente para los cálculos posteriores.

Tabla 7: Precipitaciones máximas registrados y tiempo de drenado de agua caída.

Depósito de Relaves	Máxima Precipitación Registrada [m³]	Tiempo de Drenado de Máxima Precipitación [día]
Laguna Seca	4,5 * 10 ⁶	246
Caren	5,1 * 10 ⁶	281
Talabre	1,8 * 10 ⁶	101

La Tabla 7 muestra la precipitación considerada como el máximo evento registrado en la serie de datos correspondiente al agua precipitada en un período de 72 [h]. La columna de la derecha muestra el tiempo máximo en días que cada relave demoraría en drenar las precipitaciones de estos eventos para el mayor gradiente hidráulico presentado en la Tabla 4.

El mayor tiempo de drenado de los tres depósitos de relaves corresponde a Carén, mientras que Talabre es el depósito que demora menos tiempo en llevar el agua precipitada desde la superficie de la cubeta hasta los sistemas de drenes ubicados en la base del depósito de relaves. Estos valores están subestimados por la consideración realizada en el apartado 3.3 ya que, en caso de que el depósito de relaves solo infiltrara agua en la zona cercana al muro de contención, los tiempos de drenado de la laguna de aguas claras serían aún más grandes. Incluso así, para el tranque Talabre existe un período de tres meses en los cuales el agua de la precipitación se mantendría en la superficie del depósito, pudiendo afectar de manera negativa la estabilidad del muro de contención debido a un aumento del nivel freático. Además, existe la posibilidad que ocurra un segundo evento de precipitación de intensidad similar al máximo histórico, lo cual generaría más problemas de seguridad para este depósito. La situación para Laguna Seca y Carén es más delicada por el hecho de mantener el agua proveniente de las precipitaciones en su interior por períodos por un período de ocho y nueve meses respectivamente.

Tabla 8: Precipitaciones máximas proyectadas al año 2100 y tiempos de drenado de agua caída.

Depósito de Relaves	Máxima Precipitación Proyectada [m^3]	Tiempo de Drenado de Máxima Precipitación [día]
Laguna Seca	$5,9 * 10^6$	323
Caren	$6,7 * 10^6$	369
Talabre	$2,4 * 10^6$	130

La Tabla 8 presenta los eventos de máxima precipitación proyectada para el año 2100 según la proyección correspondiente al escenario *RCP8,5* para los relaves estudiados. La columna de máxima precipitación proyectada muestra la cantidad de agua que debiese caer en una precipitación intensa en el año 2100 según las proyecciones estudiadas en la sección 2.2.3. La columna de la derecha muestra el tiempo máximo, en días, que cada relave demoraría en drenar el agua caída en los eventos de precipitación extrema con un gradiente hidráulico $i = 3,0 * 10^{-2}$. Nuevamente, tanto en Laguna Seca como en Caren se aprecian los mayores tiempos de drenado proyectados para finales de siglo, mientras que Talabre posee el menor tiempo de drenado de los tres relaves.

Por último, cabe mencionar que los tiempos de drenado para precipitaciones registradas y proyectadas corresponden al resultado del peor caso planteado en el apartado 3.3. Los gráficos que muestran los tiempos de drenado resultantes con el resto de los valores de gradiente hidráulico utilizados se muestran en el punto 7.3 de los anexos.

4.3 Distancia peligrosa en métodos empíricos

Con el volumen de cada relave definido y el volumen de agua caída adicionado al relave se realizaron los cálculos de distancia peligrosa, primero sin considerar las proyecciones de cambio climático en primera instancia y luego considerando dichas proyecciones en los cálculos. Para esto se utilizaron los métodos empíricos de Lucia y Rico estudiados en el apartado 2.3.1.

4.3.1 Método de Lucia

Para el cálculo de la distancia peligrosa mediante el método de Lucia, se consideraron las máximas precipitaciones registradas en las ubicaciones de los relaves de interés y luego se adicionó el volumen de agua caída al volumen autorizado de cada relave.

Tabla 9: Inputs y resultados para el método de Lucia sin considerar proyecciones de Cambio Climático.

		Laguna Seca	Caren	Talabre
Inputs	γ [T/m^3]	1,5	1,5	1,5
	H_T [m]	107	93	51
	S_u [T/m^3]	6,5	5,6	3,1
	β °	4	4	4
	V_f [m^3]	$3,0 * 10^9$	$2,2 * 10^9$	$1,5 * 10^9$
Resultados	H_F [m]	352,5	306,1	168,5
	α °	4,52	4,53	4,52
	L [m]	$4,2 * 10^3$	$3,7 * 10^3$	$2,0 * 10^3$

La Tabla 9 muestra los inputs utilizados y los resultados obtenidos con el método de Lucia sin considerar las proyecciones de cambio climático. De los inputs se aprecia que el peso específico y la pendiente de terreno son iguales para todos los relaves estudiados, mientras que la resistencia al corte residual es variable en cada infraestructura. Por su parte, el volumen de relave no varía respecto del presentado en la Tabla 5, pues la cantidad de agua caída presentada en la Tabla 7 es menor al volumen de relave en tres órdenes de magnitud.

Con respecto a los resultados, se presentan las distancias peligrosas obtenidas para cada relave, además de la altura y la pendiente del residuo estable. La mayor distancia peligrosa fue reportada por el embalse Laguna Seca, mientras que la menor distancia peligrosa corresponde a la reportada por el tranque Talabre. Esto concuerda con que Laguna Seca es el relave con mayor volumen de residuo y altura entre los tres depósitos, mientras que Talabre es el que posee los menores parámetros geométricos, a excepción de su área. Sin embargo, este último parámetro no es considerado para los cálculos de Lucia.

Luego, se consideraron las proyecciones en la intensidad de precipitación y se adicionó el volumen de agua que se espera que precipite para el 2100 al volumen autorizado de cada relave. A continuación, se presentan los inputs utilizados y los resultados obtenidos de la utilización de este método:

Tabla 10: Inputs y resultados para el método de Lucia considerando proyecciones de Cambio Climático.

		Laguna Seca	Carén	Talabre
Inputs	$\gamma [T/m^3]$	1,5	1,5	1,5
	$H_T [m]$	107	93	51
	$S_u [T/m^3]$	6,5	5,6	3,1
	β°	4	4	4
	$V_f [m^3]$	$3,0 * 10^9$	$2,2 * 10^9$	$1,5 * 10^9$
Resultados	$H_F [m]$	352,6	306,3	168,5
	α°	4,52	4,53	4,51
	$L [km]$	$4,2 * 10^3$	$3,7 * 10^3$	$2,0 * 10^3$

La Tabla 10 muestra los inputs utilizados y los resultados obtenidos con el método de Lucia al considerar las proyecciones de cambio climático. De los inputs se aprecia que el peso específico y la pendiente de terreno son iguales para todos los relaves estudiados, mientras que la resistencia al corte residual es, nuevamente, variable en cada infraestructura. Por su parte, el volumen de relave no varía respecto del presentado en la Tabla 5, pues la cantidad de agua caída que sugieren las proyecciones climatológicas en la Tabla 8 es menor al volumen de relave en tres órdenes de magnitud.

Con respecto a los resultados, se presentan las distancias peligrosas obtenidas para cada relave, además de la altura y la pendiente del residuo estable. La mayor distancia peligrosa fue reportada por el embalse Laguna Seca, mientras que la menor distancia peligrosa corresponde a la reportada por el tranque Talabre. Nuevamente, estos concuerdan con que Laguna Seca es el relave con mayor volumen de residuo y altura entre los tres depósitos analizados, mientras que Talabre es el que posee los menores parámetros geométricos, a excepción de su área. Sin embargo, este último parámetro no es considerado para los cálculos de Lucia.

Tabla 11: Variación de resultados al considerar las proyecciones de cambio climático.

	Laguna Seca	Caren	Talabre
$\Delta L [m]$	4,5	2,5	1,3

ΔL %	0,2	0,007	0,03
--------------	-----	-------	------

La Tabla 11 presenta las variaciones entre las distancias peligrosas calculadas mediante el método de Lucia. En ella se observa que el relave que presenta el mayor incremento en su distancia peligrosa a partir de las precipitaciones proyectadas al 2100 sería Laguna Seca, mientras que Caren es el que presenta la menor variación de su distancia peligrosa. En cualquier caso, los tres relaves presentan variaciones menores al 1 % en la distancia peligrosa original en una eventual rotura del depósito.

La baja variación presentada por las distancias peligrosas utilizando a Lucia puede deberse a la diferencia en los órdenes de magnitud entre la cantidad de agua precipitada y los volúmenes de relaves. Esto hace que la proyección en las precipitaciones sea poco significativa para el cálculo de la distancia peligrosa, sobre todo por el uso de ábacos en los que, si los parámetros de entrada no varían de manera considerable, la interpretación del observador no sufrirá cambios y la distancia peligrosa resultante tampoco lo hará.

4.3.2 Método de Rico

Para el cálculo de la distancia peligrosa mediante el método de Rico, se consideraron las máximas precipitaciones registradas en las ubicaciones de los relaves de interés y luego se adicionó la cantidad de agua caída al volumen autorizado de los depósitos correspondientes.

Tabla 12: Inputs y resultados para el método de Rico sin considerar proyecciones de Cambio Climático.

		Laguna Seca	Caren	Talabre
Inputs	H [m]	107	93	51
	V_T [m ³]	$3,0 * 10^9$	$2,2 * 10^9$	$1,5 * 10^9$
	V_f [m ³]	$1,2 * 10^9$	$8,4 * 10^8$	$5,5 * 10^8$
	$H * V_f$ [m ⁴]	$1,2 * 10^{12}$	$7,8 * 10^{11}$	$2,8 * 10^{11}$
Resultados	$D_{m\acute{a}x,1}$ [km]	36	30	13
	$D_{m\acute{a}x,2}$ [km]	$3,1 * 10^3$	$2,4 * 10^3$	$1,8 * 10^3$
	$D_{m\acute{a}x,3}$ [km]	$3,7 * 10^3$	$2,7 * 10^3$	$1,4 * 10^3$

La Tabla 12 muestra los inputs utilizados y los resultados obtenidos con el método de Rico sin considerar las proyecciones de cambio climático. Para los inputs sólo se consideran los parámetros geométricos de altura H y el volumen total V_T de los relaves como información inicial según se revisó en el apartado 2.3.1.2. Por su parte, el factor presa $H * V_f$ y el volumen de salida V_f se obtienen previamente utilizando la tercera y cuarta correlación del método, respectivamente.

En cuanto a los resultados, la correlación $D_{m\acute{a}x,1}$ muestra que, de las distancias peligrosas, la mayor pertenece a Laguna Seca y la menor a Talabre. Esta correlación utiliza como input solamente la altura del relave, por lo que tiene sentido que el relave con mayor altura de muro obtenga la mayor distancia peligrosa y el relave con el muro más bajo resulte en una menor distancia peligrosa. Lo anterior se repite en las correlaciones $D_{m\acute{a}x,2}$ y $D_{m\acute{a}x,3}$, sin embargo, los resultados llegan a valores cercanos a la longitud de Chile continental, quedando por sobre las distancias peligrosas de $D_{m\acute{a}x,1}$ en tres órdenes de magnitud, por lo que se consideran resultados sobreestimados.

Nuevamente se consideraron las proyecciones de cambio climático y su variación en el volumen del relave, se ajustaron los datos de entrada correspondientes y se repitió la metodología, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 13: Inputs y resultados para el método de Rico considerando proyecciones de Cambio Climático.

		Laguna Seca	Caren	Talabre
Inputs	H [m]	107	93	51
	V_T [m ³]	$3,0 * 10^9$	$2,2 * 10^9$	$1,5 * 10^9$
	V_f [m ³]	$1,2 * 10^9$	$8,4 * 10^8$	$5,5 * 10^8$
	$H * V_f$ [m ⁴]	$1,2 * 10^{12}$	$7,8 * 10^{11}$	$2,8 * 10^{11}$
Resultados	$D_{m\acute{a}x,1}$ [km]	36	30	13
	$D_{m\acute{a}x,2}$ [km]	$3,1 * 10^3$	$2,4 * 10^3$	$1,8 * 10^3$
	$D_{m\acute{a}x,3}$ [km]	$3,7 * 10^3$	$2,7 * 10^3$	$1,4 * 10^3$

La Tabla 13 muestra los inputs utilizados y los resultados obtenidos con el método de Rico considerando las proyecciones de cambio climático. Para los inputs sólo se consideran los parámetros geométricos de altura H y el volumen total V_T de los relaves como información inicial

según se revisó en el apartado 2.3.1.2. Por su parte, el factor presa $H * V_f$ el volumen de salida V_f se obtienen previamente utilizando la tercera y cuarta correlación del método, respectivamente.

En cuanto a los resultados, la correlación $D_{m\acute{a}x,1}$ no muestra diferencia con respecto a los resultados que no consideran las proyecciones de cambio climático pues, como ya se ha mencionado, esta correlación sólo cuenta con la altura de los relaves como input. De esta manera, el input se mantiene constante y el resultado es constante también. Por su parte, las correlaciones $D_{m\acute{a}x,2}$ y $D_{m\acute{a}x,3}$ sí presentan variaciones con respecto a la situación anterior, aunque no sean apreciables de manera directa. Esto pues, ambas correlaciones tienen el volumen del relave como dato de entrada y su variación al considerar el cambio climático no es significativa producto de las diferencias en el orden de magnitud entre precipitaciones y relaves.

Los problemas de sobreestimación presentados en las correlaciones $D_{m\acute{a}x,2}$ y $D_{m\acute{a}x,3}$ ocurren debido a la diferencia en el orden de magnitud entre los volúmenes de los relaves estudiados y los utilizados por Rico para la confección de su método. Mientras que los relaves analizados llegarán a almacenar volúmenes del orden de $10^9 [m^3]$ al final de su vida operativa, aquellos utilizados por Rico almacenaban volúmenes cercanos a los $10^6 [m^3]$ al momento de su rotura. Esto significa que los relaves estudiados se alejan del alcance del modelo de Rico y se obtengan resultados que sobreestiman las distancias peligrosas en los depósitos.

Tabla 14: Variaciones de Distancia Peligrosa en relaves de interés para el método de Rico.

		Laguna Seca	Caren	Talabre
	$D_{m\acute{a}x,1}$	0	0	0
$\Delta D_{m\acute{a}x} [km]$	$D_{m\acute{a}x,2}$	0,56	1,4	1,1
	$D_{m\acute{a}x,3}$	0,38	1,3	1,2
	$D_{m\acute{a}x,1}$	0	0	0
$\Delta D_{m\acute{a}x} \%$	$D_{m\acute{a}x,2}$	0,032	0,056	0,036
	$D_{m\acute{a}x,3}$	0,028	0,049	0,031

La Tabla 14 muestra las variaciones en las distancias peligrosas para el método de Rico entre la no consideración de las proyecciones de cambio climático y su consideración en la variación de la intensidad de las precipitaciones, en dimensiones físicas y en términos porcentuales. La correlación

$D_{m\acute{a}x,1}$ no muestra variaciones entre ambas situaciones, pues su input es la altura de los relaves y no su volumen, en cambio, las correlaciones $D_{m\acute{a}x,2}$ y $D_{m\acute{a}x,3}$ presentan variaciones, aunque en ningún caso alcanzan el 1 % de la distancia peligrosa inicial. Esto se debe nuevamente a que el orden de magnitud de las precipitaciones que consideran el cambio climático no es significativo frente al volumen de los relaves ni a su factor presa.

4.4 Situación hipotética en métodos empíricos

En este apartado se analizan los resultados obtenidos al realizar la metodología planteada en el apartado 3.5, con el fin de evaluar la sensibilidad de la distancia peligrosa a las variaciones en el volumen de los relaves.

Tabla 15: Inputs y resultados para el método de Lucia para un aumento hipotético en el volumen del relave.

		Laguna Seca	Carén	Talabre
Inputs	$\gamma [T/m^3]$	1,5	1,5	1,5
	$H_T [m]$	107	93	51
	$S_u [T/m^3]$	6,5	5,6	3,1
	$\beta ^\circ$	4	4	4
	$V_f [m^3]$	$4,5 * 10^9$	$3,3 * 10^9$	$2,2 * 10^9$
Resultados	$H_F [m]$	353	306,9	169,1
	$\alpha ^\circ$	4,52	4,52	4,51
	$L [km]$	$4.2 * 10^3$	$3,7 * 10^3$	$2,0 * 10^3$

La Tabla 15 muestra los inputs y resultados del método de Lucia en la situación hipotética planteada. Con respecto a los inputs presentados en el apartado 4.3.1, todos los parámetros de entrada del modelo se mantienen constantes a excepción del volumen del depósito. Por su parte, no se aprecia una variación en los resultados con respecto a los obtenidos en el apartado mencionado, al menos en las cifras significativas utilizadas, sin embargo, los parámetros de H_F y α sí presentan cambios apreciables al ser contrastados con los cálculos anteriores.

Tabla 16: Variación de inputs y resultados de situación hipotética para el método de Lucia.

		Laguna Seca	Caren	Talabre
Inputs	$\Delta V_T [m^3]$	$1,5 * 10^9$	$1,1 * 10^9$	$7,3 * 10^8$
	$\Delta t [años]$	$6,5 * 10^4$	$4,1 * 10^4$	$7,6 * 10^4$
Resultados	$\Delta L [m]$	12	18	6,3
	$\Delta L \%$	0,59	0,50	0,15

La Tabla 16 muestra las variaciones de inputs y resultados del método de Lucia para la situación hipotética planteada en la metodología. En los inputs se observa que la variación necesaria del volumen de cada relave ronda los $10^9 [m^3]$. Además, basándose únicamente en las proyecciones climatológicas consideradas, debiesen transcurrir alrededor de 76.000 años para que las precipitaciones extremas alcancen dicha intensidad en la localización de Talabre. Este período de tiempo se encuentra, por lejos, fuera de lo que se pueda considerar como vida operativa de cualquier relave.

Por su parte, los resultados muestran una variación de apenas 6,3 [m] en la distancia peligrosa de Talabre, lo que implica un aumento del 0,15 % con respecto a la distancia peligrosa calculada sin considerar las proyecciones de cambio climático expuesta en la Tabla 9. Esto se debe a una baja sensibilidad del método de Lucia al volumen del relave como input del modelo: un aumento del 50 % en el volumen del relave apenas provoca un aumento del 0,15 % en la distancia recorrida por el residuo en caso de rotura del depósito.

Tabla 17: Inputs y resultados para el método de Rico para un aumento hipotético en el volumen del relave.

		Laguna Seca	Caren	Talabre
Inputs	$H [m]$	107	93	51
	$D_{m\acute{a}x,1} [km]$	$3,6 * 10$	$3,0 * 10$	$1,3 * 10$
	$D_{m\acute{a}x,2} [km]$	$3,4 * 10^3$	$2,7 * 10^3$	$1,9 * 10^3$
	$D_{m\acute{a}x,3} [km]$	$4,1 * 10^3$	$3,0 * 10^3$	$1,5 * 10^3$
	$V_f [m^3]$	$1,3 * 10^9$	$9,5 * 10^8$	$6,3 * 10^8$
	$H * V_f [m^4]$	$1,4 * 10^{11}$	$9,0 * 10^{10}$	$3,3 * 10^{10}$

Resultados	$V_{T,2} [m^3]$	$3,4 * 10^9$	$2,5 * 10^9$	$1,6 * 10^9$
	$V_{T,3} [m^3]$	$3,5 * 10^9$	$2,5 * 10^9$	$1,7 * 10^9$

La Tabla 17 muestra los inputs y resultados de utilizar el método de Rico para un aumento del 10 % de la distancia peligrosa obtenida en la Tabla 12 sin considerar el cambio climático. Con respecto a los inputs, la altura de los tres relaves se mantuvo constante al igual que la distancia $D_{máx,1}$, por ser parámetros de la primera correlación estipulada por el método de Rico. Por su parte, los resultados muestran una variación cercana al orden de los $10^8 [m^3]$ con respecto a los volúmenes iniciales de los relaves. Esto indica una mayor sensibilidad del método a variaciones en el volumen de los relaves que lo observado en el método de Lucia.

Tabla 18: Variación de resultados de situación hipotética para el método de Rico.

	Laguna Seca	Caren	Talabre
$\Delta V_{T,2} [m^3]$	$4,0 * 10^8$	$2,9 * 10^8$	$1,9 * 10^8$
$\Delta V_{T,2} \%$	13	13	13
$\Delta t [años]$	$1,6 * 10^4$	$1,1 * 10^4$	$2,0 * 10^4$
$\Delta V_{T,3} [m^3]$	$4,6 * 10^8$	$3,4 * 10^8$	$2,2 * 10^8$
$\Delta V_{T,3} \%$	15	15	15
$\Delta t [años]$	$2,0 * 10^4$	$1,2 * 10^4$	$2,3 * 10^4$

La Tabla 18 muestra la variación necesaria en el volumen de los relaves para aumentar su distancia peligrosa en un 10 % con respecto a los resultados que no consideraron las proyecciones de cambio climático. En este caso, la segunda correlación muestra menores variaciones en los volúmenes de los tres relaves que la tercera correlación, lo que sugiere una mayor sensibilidad al volumen del relave como input del modelo. Sin embargo, en el caso de Caren ambos resultados suponen el transcurso de a lo menos 10.000 años para que una precipitación intensa deposite esos volúmenes de agua basándose únicamente en las proyecciones climatológicas actuales. Para Laguna Seca y Talabre el tiempo necesario es aún mayor lo que significa, igual que para el método de Lucia, un

período de tiempo que excede significativamente lo que se pueda considerar como vida operativa de cualquier relave.

Los resultados de este apartado permiten visualizar la diferencia de sensibilidad entre ambos métodos empíricos al volumen de relave como dato de entrada. Primeramente, la distancia peligrosa calculada mediante el método de Lucía varía como máximo un 0,59 % al aumentar en 50 % el volumen inicial del relave. Por su parte, la segunda y la tercera correlación de Rico varían un 13 y 15 % respectivamente el volumen de los relaves para una variación del 10 % de la distancia peligrosa obtenida en los cálculos que no consideraron el cambio climático. En este sentido, Rico presenta una mayor sensibilidad a las precipitaciones que Lucía, sin embargo, las correlaciones que presentan esta sensibilidad no resultaron ser las más adecuadas para ser aplicadas en relaves con dimensiones similares a los casos estudiadas.

4.5 Sensibilidad en métodos numéricos

Por último, en el apartado 3.5 se planteó el análisis de la sensibilidad de los métodos numéricos revisados en el apartado 3.6, a la variación del volumen de una precipitación intensa. Para ello, se analizaron las variables de los métodos numéricos que tenían como input el volumen del relave, y sólo se abarcó el rango de precipitación máxima proyectada para 2100. La realización de este análisis arrojó los resultados expuestos en el capítulo 7.1 de los anexos.

Todos los gráficos de este apartado exhiben un comportamiento lineal, mientras que lo esperado era un comportamiento similar a una función exponencial inversa. Esto ocurre debido a la poca variación que tiene cada variable con respecto al volumen de agua caída. Además, en apartados anteriores se mencionó que el volumen precipitaciones con respecto al volumen de cada depósito de relave es menor por varios órdenes de magnitud, lo que también hace suponer que las variables reológicas del material no debiesen variar por la adición de agua en las cantidades que suponen las precipitaciones intensas.

Por último, los gráficos resultantes indican una baja sensibilidad del contenido de sólidos, el peso específico y la resistencia al corte residual las variaciones de la cantidad de agua que puede aportar una precipitación extrema al 2100. Más aun, ninguna de las variables presentó una variación significativa entre el caso de una precipitación extrema y el caso de no precipitación.

5 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En la presente memoria se calculó la distancia peligrosa de los tres depósitos de relaves con mayor volumen aprobado en Chile, según el catastro de relaves de Sernageomin, mediante los métodos empíricos de Lucia y Rico. Para este cálculo se consideró como mecanismo de rotura del depósito el overtopping o rebalse del muro, teniendo como factor desencadenante una precipitación extrema en la localización del depósito de relaves. El input analizado fue el volumen del relave, el cual corresponde a la suma del máximo volumen aprobado para el depósito de relaves y la máxima precipitación registrada en su localización. El cálculo se repitió considerando las proyecciones climatológicas del IPCC sobre intensidad de precipitaciones, afectando el volumen del relave al incrementar la cantidad de agua lluvia que cae dentro del depósito.

Si bien las proyecciones globales son más bien genéricas para todo el planeta y no consideran la variabilidad climática asociada a factores geográficos como lo son, en el caso de Chile, las cadenas montañosas, funcionan como una base sólida para analizar riesgos futuros relacionados a factores climáticos. En cambio, las proyecciones nacionales son más bien escasas y sólo se utilizaron para analizar el comportamiento de las series temporales de precipitación. Es esperable que futuros estudios puedan engrosar la cantidad de proyecciones climáticas para el territorio nacional, permitiendo su utilización en análisis de riesgos de manera más confiable y certera.

Los resultados para el método de Lucia arrojaron una baja sensibilidad de la distancia peligrosa a las variaciones en el volumen de los depósitos de relaves producto de precipitaciones extremas registradas y proyectadas para el 2100. Lo anterior indica que este método empírico podría no ser una herramienta adecuada a la hora de evaluar el riesgo existente aguas debajo de un depósito ubicado en una zona donde las proyecciones climatológicas indiquen un aumento en las precipitaciones extremas.

Por su parte, los resultados para el método de Rico arrojaron una mayor sensibilidad de la distancia peligrosa a las variaciones en el volumen de los depósitos de relaves que el método de Lucia. Sin embargo, se encontró un sobredimensionamiento en las distancias peligrosas obtenidas, lo que es atribuible a la diferencia de tamaño entre los depósitos utilizados por Rico en la elaboración de su método y los depósitos analizados en este estudio. De lo anterior se concluye que, si bien el método presenta correlaciones sensibles a variaciones en el volumen del depósito, su aplicación se debe restringir a depósitos de relaves de envergaduras similares a los casos estudiados por el autor.

Lo expuesto anteriormente no implica que ambos métodos empíricos sean obsoletos para futuros análisis de riesgos de fallas en depósitos de relaves, pero sí se debe considerar su utilización en infraestructuras ubicadas en zonas donde se proyecte un aumento en la intensidad de las precipitaciones máximas. No tener esto en cuenta podría implicar una predicción errónea de la distancia peligrosa, significando un riesgo para el medioambiente, las personas y las infraestructuras que sean alcanzadas por el flujo de relaves en una eventual falla del depósito. Tampoco se deben interpretar estos resultados como un menosprecio a las consecuencias que el cambio climático pueda generar en la minería, sino como una instancia de reflexión sobre las herramientas utilizadas actualmente en la industria y su capacidad de interacción con este fenómeno.

En cuanto a los resultados de las situaciones hipotéticas planteadas, estos indican que para observar variaciones significativas en la distancia peligrosa de un depósito de relaves se debe sostener un escenario de emisiones *RCP8,5* durante milenios. Este transcurso de tiempo se escapa de lo que se considera como vida operativa de un depósito de relaves, lo que puede significar una dificultad a la hora de analizar el comportamiento de la distancia peligrosa con los métodos empíricos de Lucia y Rico. Por su parte, al analizar el comportamiento de los inputs utilizados en los métodos numéricos con los volúmenes de precipitación proyectados para el año 2100, se obtuvo una variación más bien pequeña en cada uno de ellos. Esto puede tomarse como un indicativo de la baja sensibilidad de estos métodos a las futuras variaciones en las precipitaciones extremas.

Por último, la cantidad de agua precipitada no representó una adición significativa al volumen de relaves dentro de los depósitos estudiados. Más aun, se encontró una diferencia de tres órdenes de magnitud entre los volúmenes de material almacenado en el relave y de agua lluvia, incluso al considerar las proyecciones climáticas sobre intensidad de precipitación al 2100. Esto supone que, utilizando métodos empíricos, la distancia recorrida por el relave en una eventual rotura en el muro de contención no tendría mayor variación si el evento ocurriese o no durante una precipitación extrema. Otros métodos de cálculo de distancia peligrosa pueden considerar parámetros que presenten mayor sensibilidad al incremento en el contenido de agua dentro del relave: parámetros reológicos del relave, altura del nivel freático, construcción y operación de drenes, entre otros.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, S. (2022). Avances en la estimación de la probabilidad de falla de sistemas de drenaje de presas de relaves. Universidad de Chile.
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
- Arroyo, M. I. C. (2018). Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad física de depósitos de relaves. 132.
- Ballesteros, H. O. B. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. 103.
- Blight, G. E. (1983). The behaviour of mine tailings during hydraulic deposition. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 14.
- Borges, C., & Maso, T. F. (2017). El caso de la ruptura de la represa en el río doce. 18.
- Byrne, P. (2018). Water quality impacts and river system recovery following the 2014 Mount Polley mine tailings dam spill, British Columbia, Canada. *Applied Geochemistry*, 91, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.01.012>
- Cao, L., Bala, G., & Caldeira, K. (2012). Climate response to changes in atmospheric carbon dioxide and solar irradiance on the time scale of days to weeks. *Environmental Research Letters*, 7(3), 034015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034015>
- Cifuentes, C., & Cantallopts, J. (2020). Proyección de la producción de cobre en Chile 2020—2031 (p. 44). Comisión Chilena del Cobre.

<https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Proyeccion%20de%20la%20produccion%20esperada%20de%20cobre%202020%20-%20202031.pdf>

Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático* (p. 157). IPCC.

Islam, K., & Murakami, S. (2021). Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*, 70, 102361.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>

Jeyapalan, J. K. (1983). *Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams*. 22.

Kealy, C. D., & Busch, R. (1971). *Determining Seepage Characteristics of Mill-Tailings Dams by the Finite-Element Method*. U.S. Department of the Interior.

Lucia, P. (1981). Summary of research on case histories of flow failures of mine tailings impoundments. in *Waste Disposal Technology, Information Circular(8857)*, 46–53.

Lüthi, D. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>

Ministerio de Minería. (1970). *Aprueba “Reglamento de construcción y operación de tranques de relaves”*. 9.

Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, 159 (2007) (testimony of Ministerio de Minería).

[https://www.sernageomin.cl/wp-](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf)

[content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf)

Ministerio de Minería. (2019). *Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible 2021*.

- Oldrich, H. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. 14.
- Palacios, A. (2015). Actualización de modelo hidrogeológico Sierra Gorda (p. 150).
- Parry, M., Intergovernmental Panel on Climate Change, & Working Group I. (2007). El cambio climático. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico 2007, 2007,. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.
- Rico, M., Benito, G., & Díez-Herrero, A. (2008). Floods from tailings dam failures. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.110>
- Sarricolea Espinoza, P., & Romero Aravena, H. (2015). Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 62, 169–183. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000300010>
- Schroerer, K., & Kirchengast, G. (2018). Sensitivity of extreme precipitation to temperature: The variability of scaling factors from a regional to local perspective. *Climate Dynamics*, 50(11–12), 3981–3994. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3857-9>
- Ley sobre las bases generales del medio ambiente, 19300, L N°19300, 1994 (1994).
- Sernageomin. (2020). Catastro de Depósitos de Relaves en Chile. Sernageomin.
- Silva Rotta, L. H., Alcântara, E., Park, E., Negri, R. G., Lin, Y. N., Bernardo, N., Mendes, T. S. G., & Souza Filho, C. R. (2020). The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 90, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>
- Stips, A., Macias, D., Coughlan, C., Garcia-Gorriz, E., & Liang, X. S. (2016). On the causal structure between CO₂ and global temperature. *Scientific Reports*, 6(1), 21691. <https://doi.org/10.1038/srep21691>

- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2011). *Geología práctica: Introducción al reconocimiento de materiales y análisis de mapas*. (M. Pozo Rodríguez & J. M. González Casado, Eds.). Pearson-Prentice-Hall.
- Valenzuela, L. (2016). Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile. *Obras y Proyectos*, 19, 6–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132016000100001>
- Vergara, Á., Palma, S., Álvarez, A., & Zandarín, M. T. (2022). Hazards in mining: A novel model for the prediction of run-out distances in tailings dams using CFD. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 153, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105049>
- Vick, S. G. (1990). Planning, design, and analysis of tailings dams.
- Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela, P. (2014). Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 449–464. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0142>
- Williams, C. J. (2017). Climate Change in Chile: An Analysis of State-of-the-Art Observations, Satellite-Derived Estimates and Climate Model Simulations. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 08(05). <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000400>
- Zambrano-Bigiarini, M., & Rivas, R. M. (2020). Extracción y descarga de series temporales para un punto específico. 3.

7 ANEXOS

7.1 Lucia et al, 1981

Tabla 19: Casos históricos de fallas en depósitos de relaves (Lucia, 1981)

Depósito de Relaves	Ubicación	Causa probable de falla	Altura [m]	Residuo almacenado [ton]	Residuo involucrado en falla [ton]	Distancia de viaje [km]
Barahona	Chile	Sismicidad	65	NA	NA	NA
El Cobre Viejo	Chile	Sismicidad	35	$7,6 * 10^6$	$1,9 * 10^3$	12
El Cobre Nuevo	Chile	Sismicidad	15	$5,0 * 10^5$	$5,0 * 10^5$	12
Hieno Viejo	Chile	Sismicidad	5	NA	$1,2 * 10^3$	1
Los Maquis	Chile	Sismicidad	15	$6,0 * 10^4$	$3,0 * 10^4$	5
La Patagua	Chile	Sismicidad	15	NA	$5,0 * 10^4$	5
Cerro Negro	Chile	Sismicidad	20	$7,9 * 10^5$	$1,2 * 10^5$	5
Bellavista	Chile	Sismicidad	20	$7,0 * 10^5$	$1,0 * 10^5$	25
Ramayana	Chile	Sismicidad	5	NA	$2,0 * 10^2$	NA
Tailings Dam	U.S.	Filtración	44	NA	$2,0 * 10^2$	24
Bafokeng	Sudáfrica	Filtración	20	$2,2 * 10^7$	$5,2 * 10^6$	45
Gypsum	Texas	Filtración	11	$7,0 * 10^6$	$2,0 * 10^5$	3
Mochikoshi	Japón	Sismicidad	32	$8,2 * 10^3$	$1,4 * 10^3$	30
Phosphate	Florida	Filtración	4	NA	$8,0 * 10^6$	120
Tip N° 7	Aberfan	Estática	37	$4,3 * 10^5$	$1,9 * 10^5$	6
Tip N° 4	Aberfan	Estática	46	$1,7 * 10^7$	NA	7
Abercynon	Abercynon	Estática	37	NA	$1,8 * 10^5$	6
Blackpool	Inglaterra	Estática	40	NA	$1,5 * 10^4$	1
Cholwich	Inglaterra	Estática	46	NA	$2,5 * 10^4$	2
Lousville	Kentucky	Filtración	31	$1,0 * 10^6$	$1,0 * 10^6$	1
Jupille	Bélgica	Estática	46	$6,0 * 10^5$	$1,5 * 10^5$	6
Fort Peck	U.S.	Estática	69	NA	$5,0 * 10^6$	4
East Chicago	U.S.	Estática	2	NA	NA	2
Koda Numa	Japón	Sismicidad	3	NA	NA	2
Uetsu	Japón	Sismicidad	10	NA	NA	11

Tabla 20: Condición post rotura de casos históricos (Lucia, 1981).

Depósito de Relaves	Ubicación	Tipo de Mineral	Pendiente del terreno aguas abajo [°] (β)	Pendiente del residuo estable [°] (α)	Resistencia al corte residual [psi] (S_u)
---------------------	-----------	-----------------	---	--	---

Barahona	Chile	Cobre	9	NA	NA
Tailings Dam	U.S.	Cobre	0	15	50
Bafokeng	Sudáfrica	Platino	1	13	15
Gypsum	Texas	Yeso	0	1	20
Mochikoshi	Japón	Oro	0	4 ó 5	210
Phosphate	Florida	Fosfato	NA	NA	NA
Tip N° 7	Aberfan	Carbón	12	12	375
Tip N° 4	Aberfan	Carbón	12	12	330
Abercynon	Abercynon	Carbón	12	12	450
Blackpool	Inglaterra	Caolín	7	7	140
Cholwich	Inglaterra	Caolín	6	7	340
Lousville	Kentucky	Carburo de cal	0	15	53
Jupille	Bélgica	Cenizas volátiles	> 18	NA	NA
Fort Peck	U.S.	Arcilla a arena fina	0	25	250
East Chicago	U.S.	Arena fina	0	4	20
Koda Numa	Japón	Arena fina	0	4	25
Uetsu	Japón	Arena fina	0	4	35

7.2 Rico, 2008

Tabla 21: Casos históricos de fallas en depósitos de relaves (Rico et al., 2008).

Depósito	Año de falla	Tipo de relave	Altura del relave [m]	Volumen del depósito [$10^6 m^3$]	Dist. Recorrida [km]	Factor Presa (HxV_f)	Volumen liberado [$10^6 m^3$]
Arcturus (Zimbawe)	1978	RING	25	1,7 – 2,0	0,35	0,5	0,0211
Bafokeng (Sudáfrica)	1974	RING	20	13	45	60	3
Baia Mare (Rumania)	2000	UPS	7	0,8	0,18	0,7	0,1
Bellavista (Chile)	1965	RING	20	0,45	0,8	1,4	0,07
Buffalo Creek (USA)	1972	UPS	14 – 18	0,5	64,4	7 – 9	0,5
Cerro Negro N°. 3 (Chile)	1965	UPS	20	0,5	5	1,7	0,085

Cerro Negro N°. 4 (Chile)	1985	MXSQ	40	2	8	20	0,5
Churchrock (USA)	1979	WR	11	0,37	96,5 – 112,6	4,07	0,37
Cities Service (USA)	1971	WR	15	12,34	120	135	9
El Cobre Old Dam (Chile)	1965	UPS	35	4,25	12	66,5	1,9
Galena Mine (USA)	1974	UPS	9	–	0,61	0,034	0,0038
Gypsum Tailings Dam (USA)	1966	UPS	11	7	0,3	0,88 – 1,43	2 * 10 ⁵
Hokkaido (Japón)	1968	UPS	12	0,3	0,15	1,08	0,09
Itabirito (Brasil)	1986	Gravedad	30	–	12	3	0,1
La Patagua New Dam (Chile)	1965	RING	15	–	5	0,525	0,035
Los Frailes (España)	1998	RING	27	15 – 20	41	53,51	4,6
Los Maquis (Chile)	1965	UPS	15	0,043	5	0,315	0,021
Merriespruit (Sudáfrica)	1994	RING	31	7,04	2	18,6	2,5
Mochikoshi N°1 (Japón)	1978	UPS	28	0,48	8	2,24	0,08
Mochikoshi N°2 (Japón)	1978	UPS	19	–	0,15	0,057	0,003
Ollinghouse (USA)	1985	WR	5	0,12	1,5	0,125	0,025
Omai (Guyana)	1995	WR	44	5,25	80	184,8	4,2
Phelps-Dodge (USA)	1980	UPS	66	2,5	8	132	2
Sgurigrad (Bulgaria)	1966	UPS	45	1,52	6	9,9	0,22
Stancil (USA)	1989	UPS	9	0,074	0,1	0,342	0,038

Stava (Italia)	1985	RING	29,5	0,3	4,2	5,605	0,19
Tapo Canyon (USA)	1994	UPS	24	–	0,18	–	–
S.I. (USA)	1973	UPS	43	0,5	25	7,31	0,17
Veta del Agua N°1 (Chile)	1985	MXSQ	24	0,7	5	6,72	0,28

7.3 Permeabilidad en relaves de interés

7.3.1 Permeabilidad en relaves con máximas precipitaciones registradas

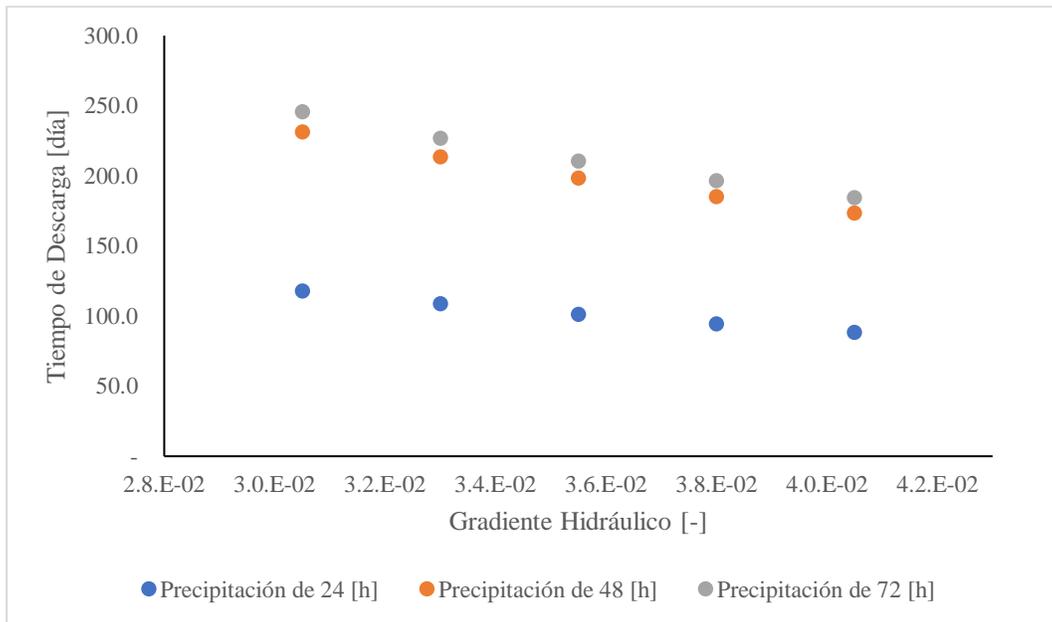


Gráfico 4: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación registrados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Laguna Seca.

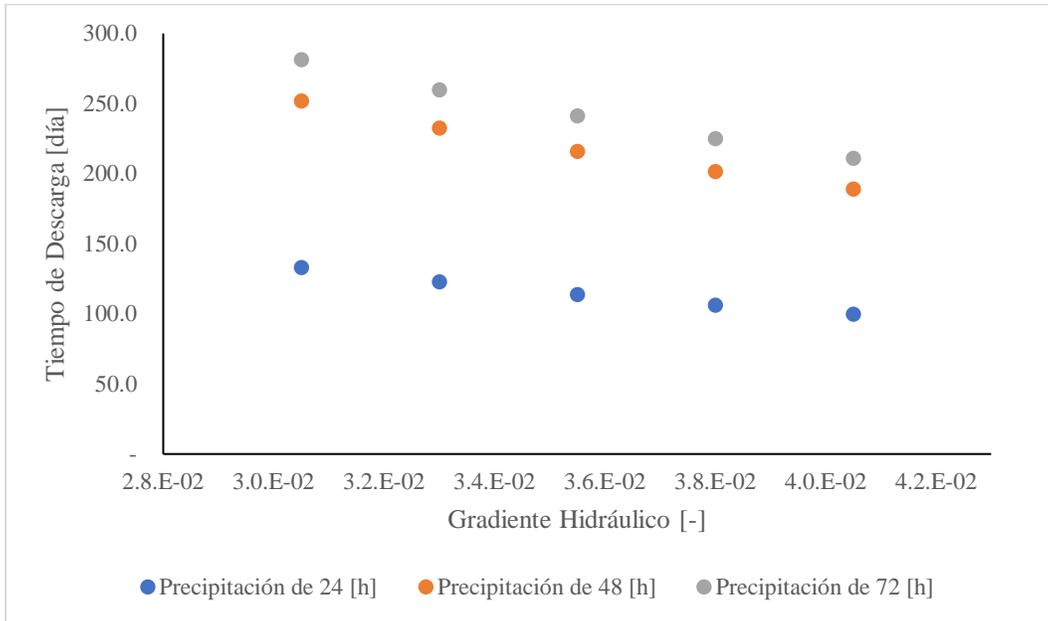


Gráfico 5: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación registrados de 24, 48 y 72 [H] para Embalse Caren.

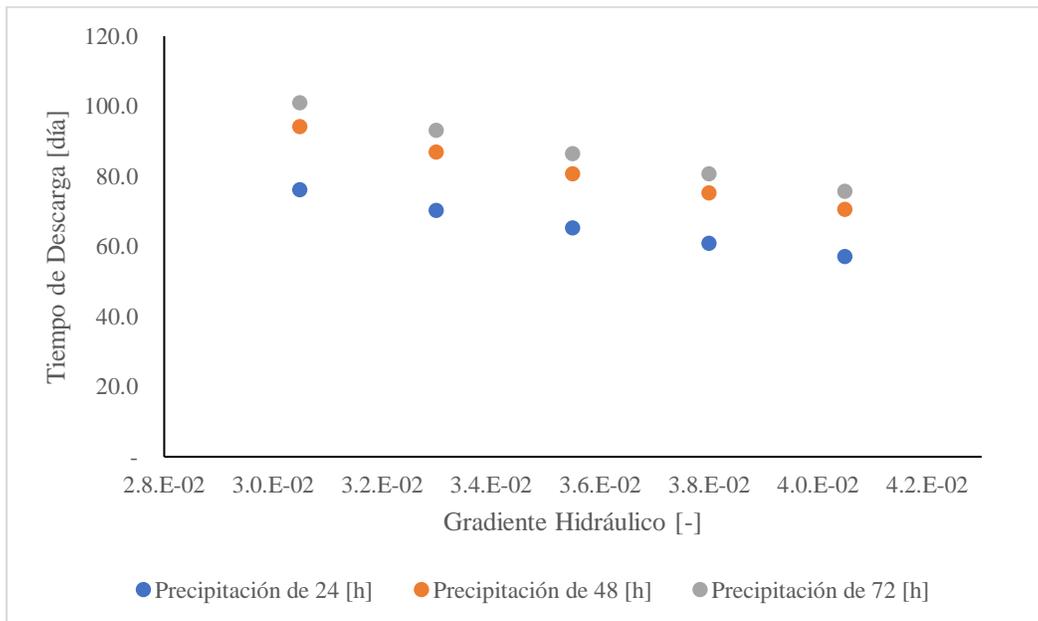


Gráfico 6: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación registrados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Talabre.

7.3.2 Permeabilidad en relaves con máximas precipitaciones proyectadas

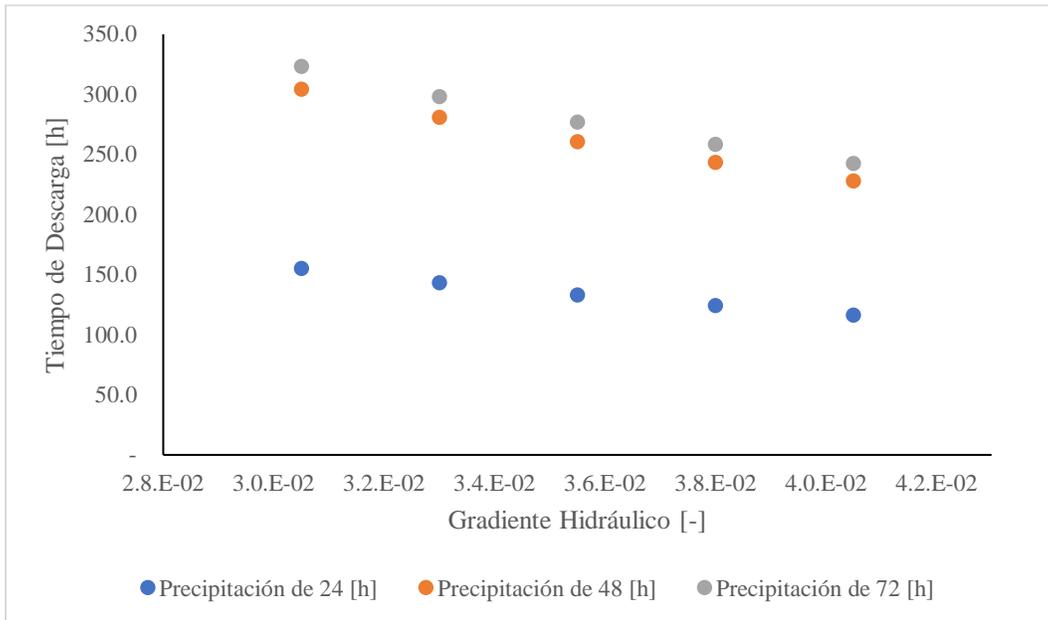


Gráfico 7: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación proyectados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Laguna Seca.

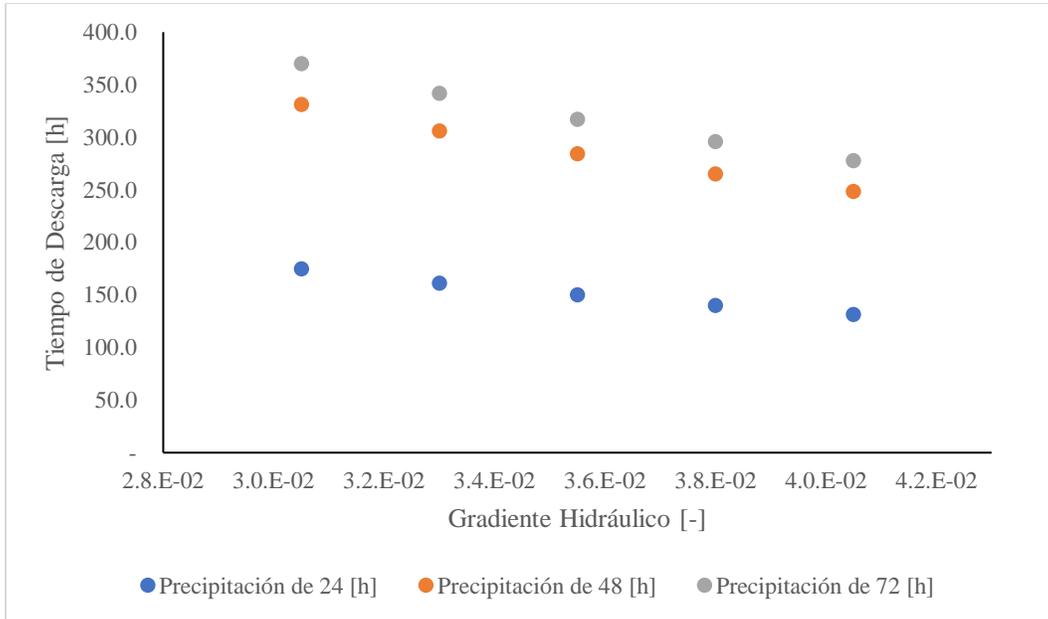


Gráfico 8: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación proyectados de 24, 48 y 72 [H] para Embalse Caren.

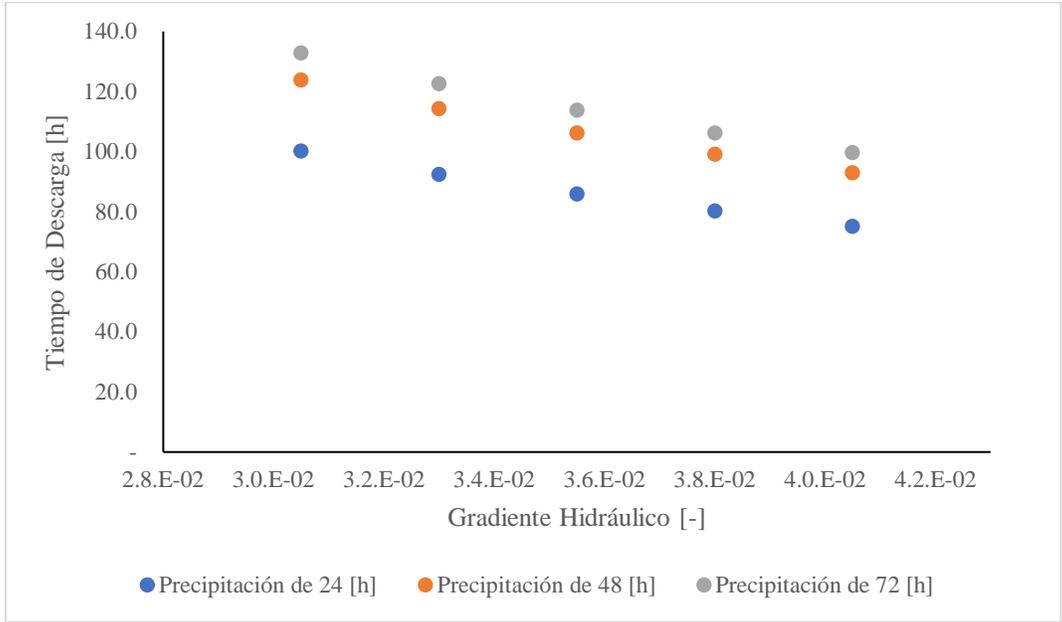


Gráfico 9: Tiempo de drenado para eventos de máxima precipitación proyectados de 24, 48 y 72 [H] para Tranque Talabre.

7.4 Conversión Precipitaciones

$$1 \text{ [mm] de precipitación} = 0,001 \left[\frac{m^3_{\text{agua caída}}}{m^2_{\text{cubeta}}} \right]$$

7.5 Sensibilidad de variables en métodos numéricos

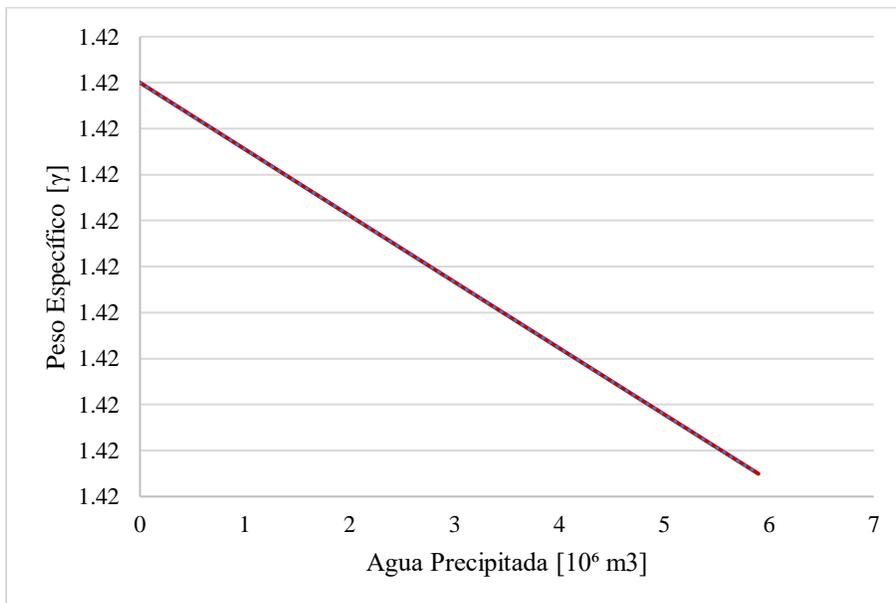


Gráfico 10: Comportamiento del Peso Específico en función del agua precipitada dentro del Tranque Laguna Seca.

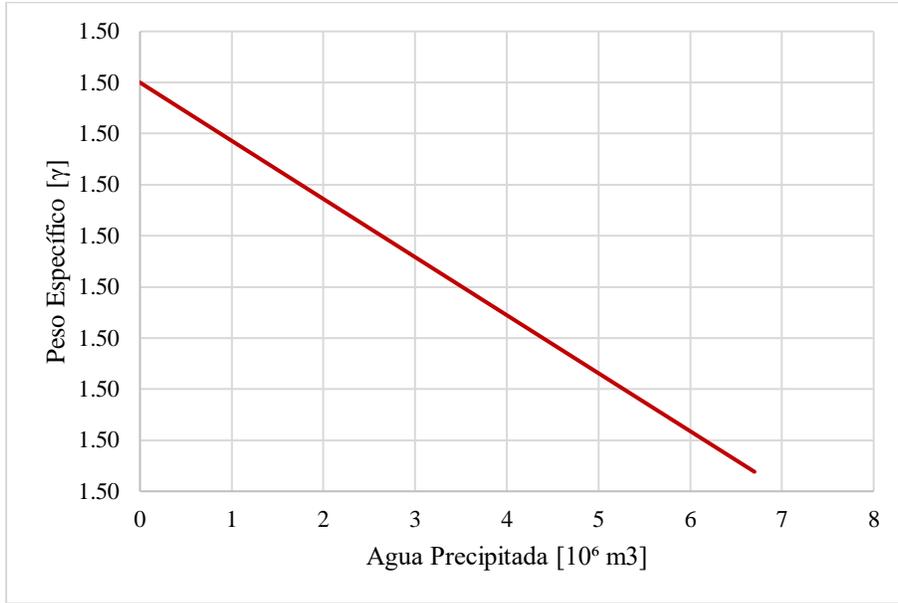


Gráfico 11: Comportamiento del Peso Específico en función del agua precipitada dentro del Embalse Caren.

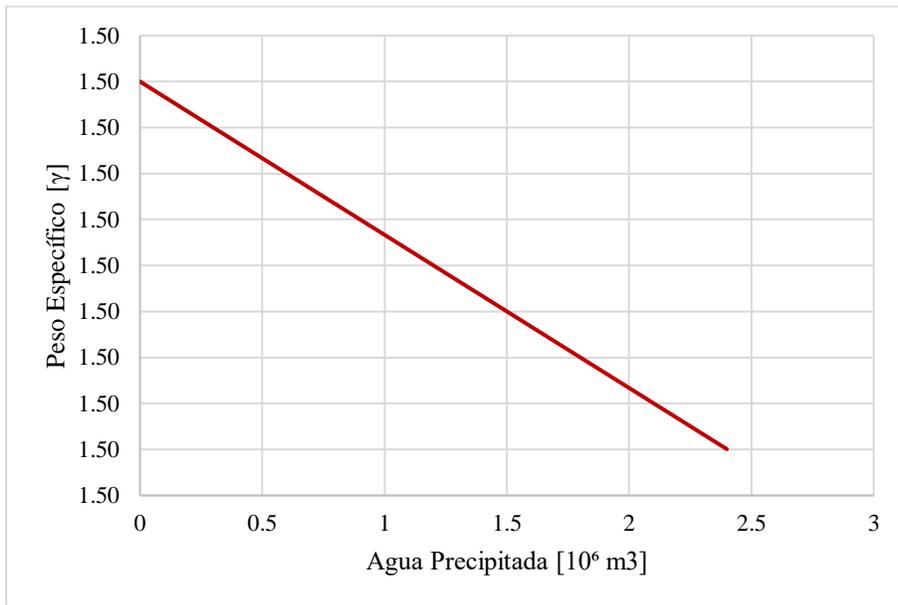


Gráfico 12: Comportamiento del Peso Específico en función del agua precipitada dentro del Tranque Talabre.

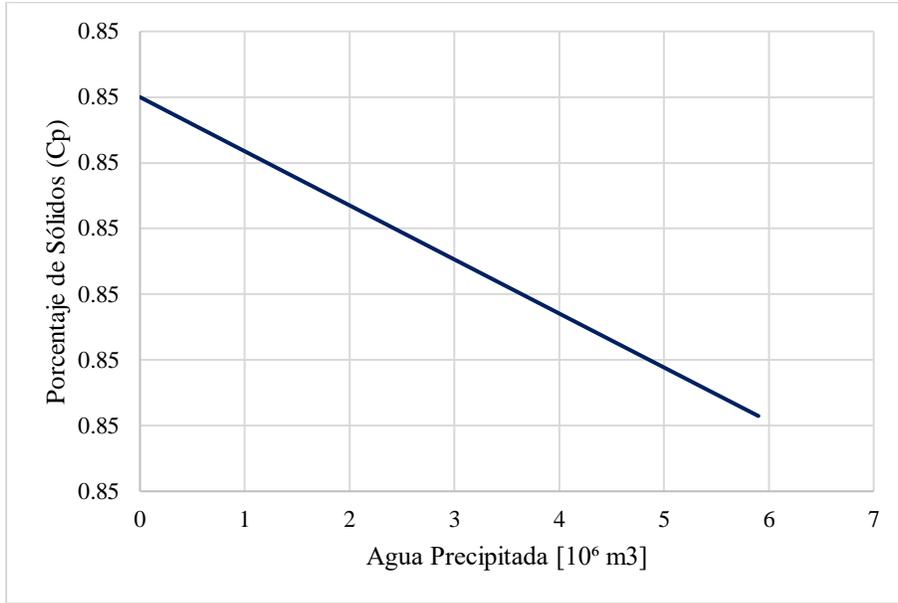


Gráfico 13: Comportamiento del Porcentaje de Sólidos en función del agua precipitada dentro del Tranque Laguna Seca.

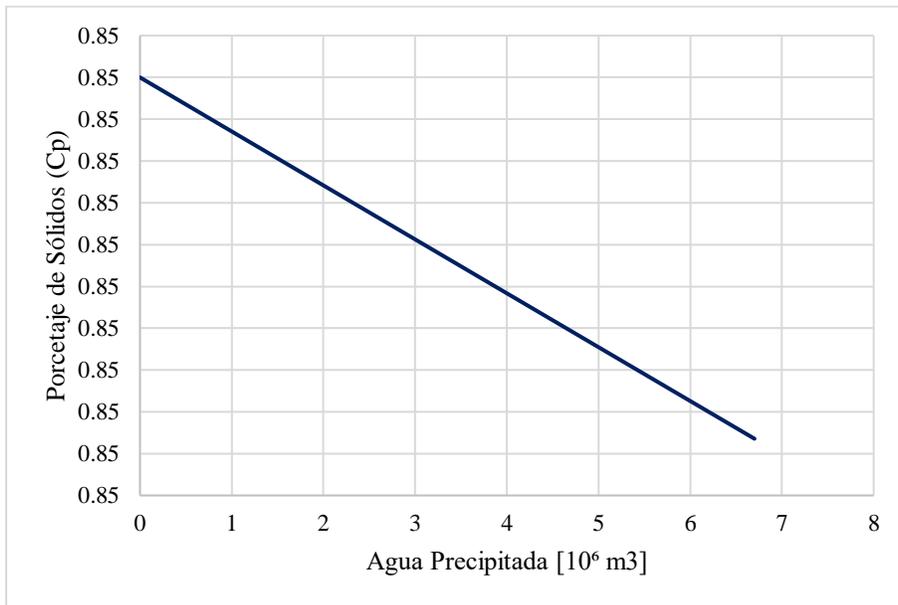


Gráfico 14: Comportamiento del Porcentaje de Sólidos en función del agua precipitada dentro del Embalse Caren.

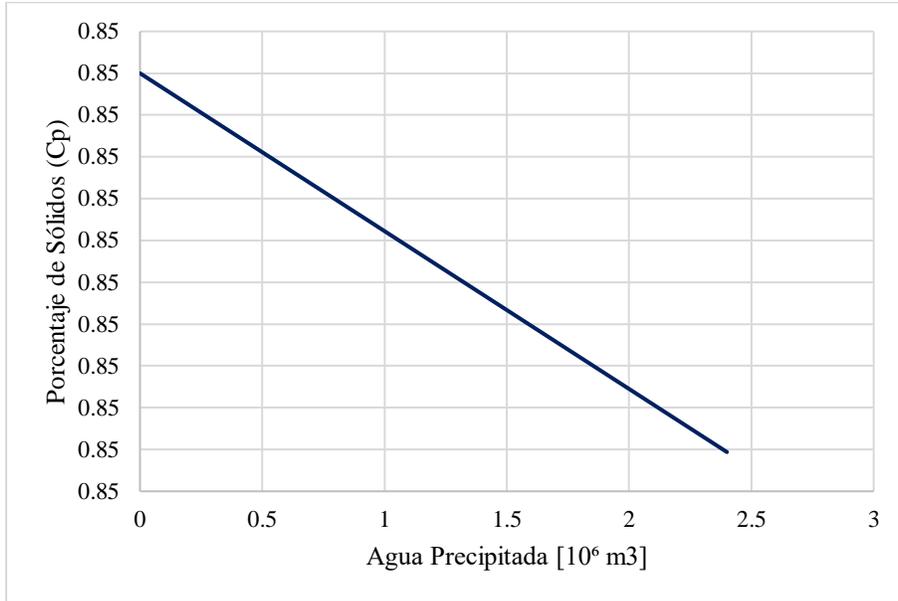


Gráfico 15: Comportamiento del Porcentaje de Sólidos en función del agua precipitada dentro del Tranque Talabre.

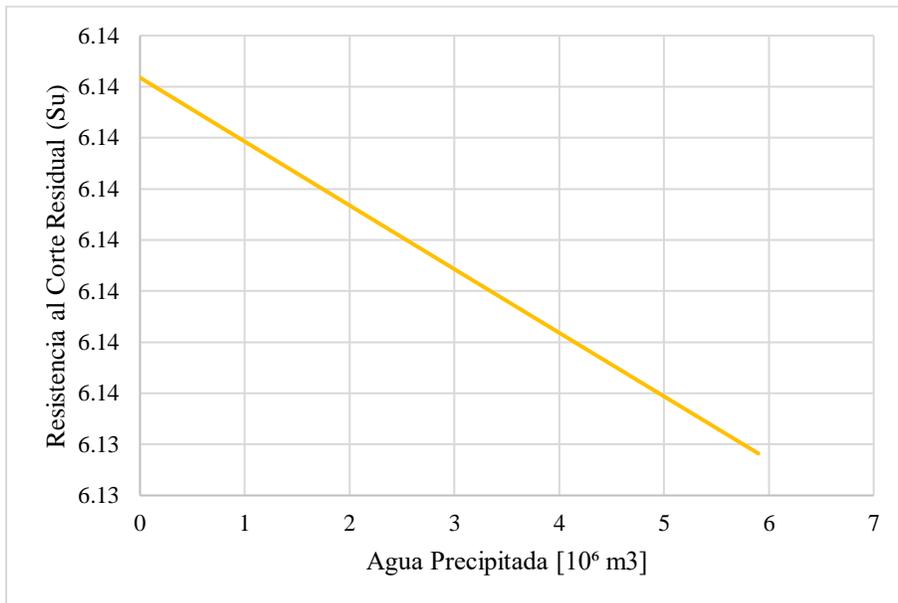


Gráfico 16: Comportamiento la Resistencia al Corte Residual en función del agua precipitada dentro del Tranque Laguna Seca.

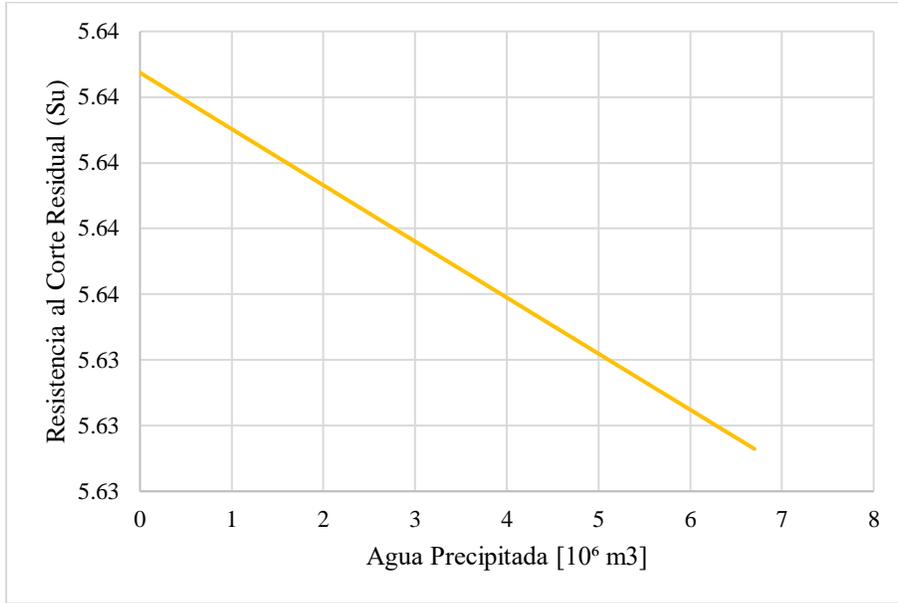


Gráfico 17: Comportamiento la Resistencia al Corte Residual en función del agua precipitada dentro del Embalse Caren.

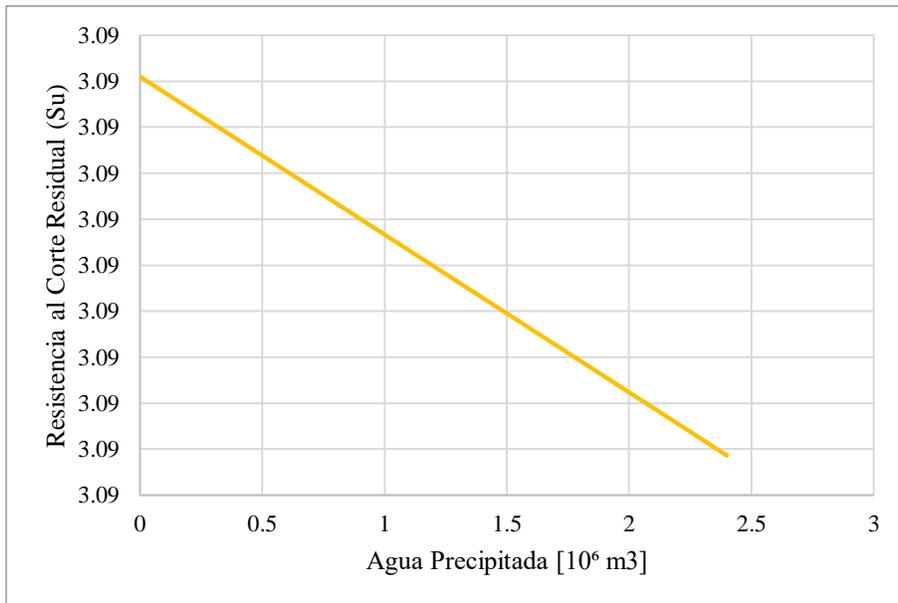


Gráfico 18: Comportamiento la Resistencia al Corte Residual en función del agua precipitada dentro del Tranque Talabre.