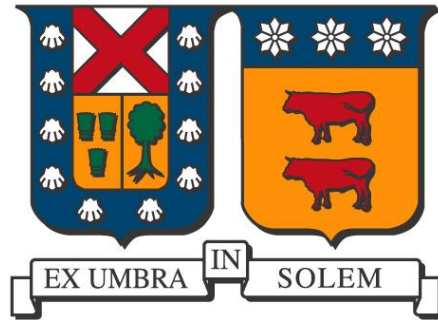


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO DE CHILE



CÁLCULO DE PROBABILIDAD DE FALLAS EN LOS TRANQUES DE RELAVE MEDIANTE REDES BAYESIANAS

NICOLÁS ALEJANDRO BÓRQUEZ ANDRADES

Memoria para optar al título profesional de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía:

Dra. Alejandra Álvarez V.

Profesor Co-Guía:

Dr. Sergio Palma M.

DICIEMBRE 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a toda mi familia por haber estado durante todo el proceso que llevé a cabo para realizar este trabajo, así como también por su apoyo y cariño incondicional que me han brindado durante toda mi vida. A mi mamá, por estar ahí en los mejores y peores momentos que he tenido, por confiar en mí y porque aun cuando este año no pudimos estar tan conectados, siempre te diste el tiempo para escucharme.

A mi hermana, que siempre nos hemos mantenido unidos y estoy seguro de que eso seguirá siendo así en el futuro. A mi tía, por siempre preocuparse de que no me faltara nada. A mi abuela, que, aunque la distancia nos mantiene lejos, se preocupaba de saber cómo estaba. Por último, pero no menos importante, a mi sobrino, con quien podía relajarme y que más de una vez logró sacarme una sonrisa aun cuando no fueran los mejores momentos por los que estaba pasando. Gracias a todos por estar ahí para mí.

Agradecer a la Dra. Alejandra Álvarez, por confiar en mí y en que lograría sacar algo provechoso a raíz de este trabajo. Gracias por la ayuda cuando estaba confundido y por la oportunidad de hacer mi memoria de título.

Agradecer al Dr. Sergio Palma, por brindarme la oportunidad de realizar mi memoria en conjunto con una empresa externa a la universidad, lo cual, me brindó una visión distinta del trabajo. Gracias también por todo lo enseñado a lo largo de los años dentro de la U.

Agradecer al Reus, con quien pude compartir muchas veces en la U, donde siempre que hacíamos trabajos juntos había tiempo de laburo y tiempo de risas, agradezco la suerte de haber tenido un tema de trabajo de título tan similar, de modo que podíamos hablar del tema para salir adelante.

Gracias Ñaño y Esteban, por estar ahí durante mi paso por la U, donde estaban en las buenas y en las malas. Junto con el Reus, fueron los mejores amigos que conocí en estos 5 años.

Gracias Clau, porque cuando las cosas estaban complejas siempre me escuchabas atenta y por tu compañía. Gracias Coni, porque desde un principio te tome un gran cariño y por confiar en mí.

Cata, Vania y Carlos, porque desde el colegio han estado conmigo y aunque estudiamos cosas diferentes y casi son pocas las veces que nos vemos, cada una de esas veces valen la pena. Gracias a ustedes tres por creer en mí.

Quiero agradecer a todos los amigos y compañeros con los que conviví dentro de la universidad. Creo que a cada uno de alguna u otra forma les he demostrado lo mucho que estoy agradecido de que fueran parte de mi crecimiento dentro de la Universidad.

Resumen

La industria minera busca la obtención de un beneficio económico a raíz de la extracción de un mineral de valor. En paralelo, se produce una generación masiva de desechos como los relaves. Este material es un desecho del proceso de flotación en donde se libera la mena (mineral valioso) de la ganga (desecho).

Los relaves son almacenados en depósitos de relave como los “Tranques”, los cuales, consideran muros de contención y una zona interna donde se almacena el desecho. El tranque está construido con el material grueso del descarte de la flotación. En general, los depósitos activos operan correctamente. En la mayoría de los casos, los problemas aparecen cuando el depósito no opera o es abandonado, aumentando el riesgo de colapso.

En esta memoria de título, se realiza un análisis estadístico que revisa las causas del colapso de tranques debido a “Desbordamiento”, “Fundación”, “Talud”, “Filtración” y “Flujo”, con este último como el más frecuente en los casos documentados en Chile.

Cada mecanismo de falla es evaluado por separado y se revisan las causas que las generan. Se consideran en el análisis causas que van desde problemas de diseño del depósito, pasando por el monitoreo deficiente y por causas ambientales no controlado.

Toda la información es recopilada en diagramas de árbol. Posteriormente, se aplican redes bayesianas para obtener la probabilidad que cada causa devenga en el colapso.

En el trabajo realizado, se obtiene que, a escala mundial el desbordamiento es la falla más frecuente con un 30,8 [%], seguido de un inconveniente en el talud de 23,2 [%], luego una filtración con 16,8 [%], le sigue la fundación con un 9,6 [%] y la falla de flujo con un 9,5 [%]. El 10,1 [%] de las fallas corresponden a mecanismos no identificados.

Con el objetivo de validar el modelo, se aplica como caso de estudio el colapso del Tranque Las Palmas en 2010 (Chile), de modo que se pueden extraer variables conocidas y ver cómo afecta esto en cada red bayesiana propuesta. El resultado arrojado es que, considerando ciertas causales conocidas es la falla de flujo la que tiene la mayor probabilidad de ocurrencia con cerca de un 47 [%].

Este resultado va acorde con lo que ocurrió en ese colapso, de modo que el planteamiento de las redes bayesianas se llevó a cabo de una manera donde es posible reconocer los parámetros que desencadenan cada tipo de falla. Este modelo se presenta como una herramienta promisorio para identificar de forma sencilla los riesgos, así como gestionarlos y lograr una mitigación oportuna.

Abstract

The mining industry seeks economic benefit through the extraction of valuable minerals, leading to the generation of massive waste, known as tailings. These tailings result from the flotation process, separating valuable minerals from waste material (gangue).

Tailings are stored in tailings dams, which include containment walls and an internal area for waste storage. The dams are constructed using the coarse material discarded from the flotation process. While active deposits generally operate correctly, issues often arise when a deposit is non-operational or abandoned, increasing the risk of collapse.

This thesis conducts a statistical analysis examining the causes of dam collapses due to "Overflow," "Foundation," "Slope," "Filtration," and "Flow," with the latter being the most frequent in documented cases in Chile.

Each failure mechanism is evaluated separately, considering causes ranging from design problems to inadequate monitoring and uncontrolled environmental factors.

All information is compiled in tree diagrams. Subsequently, Bayesian networks are applied to obtain the probability that each cause leads to collapse.

On a global scale, overflow is identified as the most frequent failure at 30.8%, followed by slope issues at 23.2%, filtration at 16.8%, foundation problems at 9.6%, and flow failure at 9.5%. Approximately 10.1% of failures correspond to unidentified mechanisms.

To validate the model, the collapse of the Las Palmas Dam in 2010 (Chile) is studied, extracting known variables to assess their impact on each proposed Bayesian network. The result indicates that, considering certain known factors, flow failure has the highest probability of occurrence at around 47%.

This result aligns with the actual events of that collapse, showcasing that the Bayesian networks were developed in a way that allows for the identification of parameters triggering each type of failure. This model emerges as a promising tool to identify, manage, and timely mitigate risks associated with tailings dams.

ABREVIATURAS

CDA: Asociación de Represas de Canadá.

CODELCO: Corporación Nacional del Cobre de Chile.

DGA: Dirección General de Aguas.

DS248: Decreto Supremo 248 del Ministerio de Minería

ICOLD: Comisión Internacional de Grandes Represas.

PAS: Permiso Ambiental Sectorial.

RMR: Rock Mass Rating.

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería.

SONAMI: Sociedad Nacional de Minería.

UCAR: University Corporation for Atmospheric Research.

WISE: World Information Service on Energy.

GLOSARIO

Aguas abajo: Zona por donde circulará el contenido del depósito en caso de rotura del muro.

Aguas arriba: Zona desde donde se carga material adicional de manera natural o artificial.

Aguas claras: Las aguas claras son parte de la laguna en los depósitos de relave, los cuales, tienen un bajo contenido de sólidos. Se suelen extraer de los depósitos para recircularlos en el proceso minero, aunque también pueden ser tratadas para otros usos.

Altura del depósito: Altura desde el suelo hasta el coronamiento del muro.

Ancho del depósito: Es el espesor de la presa, siendo menor en la cresta y mayor en la base.

Cabecera: Nivel de agua que colinda con el muro de retención. Este caso solo es considerado cuando la laguna del depósito está en contacto con el muro.

Conglomerados: Roca sedimentaria que suele presentar fragmentos de roca y minerales redondos. Se forma a partir de la acumulación de sedimentos luego de un proceso de transporte y erosión de rocas.

Coronamiento: Zona superior del muro. Sobre este límite se puede recubrir con escolleras o pastizal, según sea el caso. El pastizal es más utilizado en embalses de agua. El coronamiento debe tener un ancho mínimo de 5 metros.

Empréstito: Son materiales como tierra, arenas o rocas aledañas que pueden ser usadas en un tipo de construcción para reducir costes y reutilizar material existente.

Escollera: Muro formado a partir de material de formas y tamaños irregulares para evitar filtración y asegurar una mejor estabilidad en los muros. En la Mina Omai, se ocupó saprolita (Roca meteorizada que constituye una masa de arcilla) para la construcción del muro [1].

Espesador: Equipo con el que se separan los líquidos y sólidos contenidos para aumentar la densidad de la pulpa de descarga final y para recuperar la mayor cantidad de agua.

Extensómetro: Mide la tensión y deformación y como alteran la longitud del muro.

Laguna: Contenido de agua en el interior de un depósito minero, ubicado sobre el relave almacenado. Puede ubicarse cerca del muro, pero idealmente debe estar separado para evitar el aumento de humedad en el muro.

Licuefacción: La licuefacción de un suelo se da cuando este pasa de un estado sólido a líquido, generando una inestabilidad en la infraestructura que es soportada.

Nivel freático: Nivel del agua subterránea en el área de estudio que depende de las precipitaciones, de la topografía y permeabilidad del suelo.

Piscina olímpica: Es empleada en este documento para dar una comparativa de capacidad de almacenaje de agua. Una alberca regular mide 50 [m] largo, 25 [m] ancho y 2.7 [m] de profundidad, dando un almacenaje de 3.375 [m³].

Relave licuado: Es el residuo fino resultante de procesos mineros que adquiere propiedades similares a un líquido por el contenido de agua en su interior. Este tipo de relave actúa como un fluido no newtoniano.

Relave líquido: Este residuo se encuentra en contacto con la laguna del depósito, de modo que adquiere una consistencia similar a la de un líquido. Este tipo de relave está saturado de agua y se comporta como un fluido newtoniano.

Revancha: Altura entre el nivel de las aguas de la laguna y del coronamiento del muro.

RMR: Índice que mide la competencia del macizo rocoso.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos	2
3. ALCANCES	2
4. ESTADO DEL ARTE.....	3
4.1 Represas de contención	3
4.2 Importancia del estudio de las fallas	5
4.3 Depósitos de relaves	6
4.3.1 Tipos de depósitos	6
4.3.2 Métodos de construcción de muros	7
4.4 Tipos de fallas asociadas a rotura de muros	9
4.4.1 Falla por Desbordamiento	10
4.4.2 Inestabilidad de taludes.....	12
4.4.3 Falla por Filtración	17
4.4.4 Falla de flujo	18
4.5 Estimación de distancia peligrosa.....	20
5. MARCO TEÓRICO.....	22
5.1 Redes Bayesianas	22
5.1.1 Etapa de edición	23
5.1.2 Etapa de inferencia	25
6. METODOLOGÍA	26
6.1 Matlab	26

6.2	Elvira	26
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	28
7.1	Representación de las fallas mediante diagramas de árbol	28
7.1.1	Falla de flujo	29
7.1.2	Falla de filtración	30
7.1.3	Falla de talud	30
7.1.4	Falla de fundación.....	30
7.1.5	Falla por desbordamiento	30
7.2	Desarrollo de las redes bayesianas.....	31
7.2.1	Formación de las redes bayesianas	31
7.2.2	Caso de estudio: Tranque Las Palmas.....	41
7.2.3	Resultado de la etapa de inferencia	42
8.	CONCLUSIONES	45
9.	RECOMENDACIONES	46
10.	REFERENCIAS	47
11.	ANEXO A: GRÁFICOS Y TABLAS DE INFORMACIÓN	51
12.	ANEXO B: CÁLCULO DE PROBABILIDADES.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4-1: Partes de una represa, desde una vista lateral [8].	3
Figura 4-2: Tipos de represas de concreto [9].	4
Figura 4-3: La presa de terraplén (o relleno) se sostiene por efecto de la gravedad y por la presión que aplica el material contenido [9].	4
Figura 4-4: Representación de brecha trapezoidal desde una vista lateral. El ancho y profundidad se pueden estimar según el tipo de falla analizada [13].	5
Figura 4-5: Método de aguas arriba. Mientras más material contenido tenga, mayor es la probabilidad de una licuefacción de los suelos bajo el muro [20].	8
Figura 4-6: Método aguas abajo. Con este modo de construcción se pueden lograr muros con una mayor resistencia sísmica debido a la instalación de drenes [20].	8
Figura 4-7: Método eje central. En este método se asegura que el peso sobrepuesto en el muro base corresponde al mismo tipo de material [20].	9
Figura 4-8: Comparativa entre una falla de desbordamiento por aumento de nivel de laguna y por alza de oleaje, respectivamente [23].	10
Figura 4-9: El ángulo (3° en este caso) sigue la dirección de la brecha hasta el punto donde se encuentra con la laguna [13].	11
Figura 4-10: Efecto del derrame minero en el Río Sonora. Luego de 5 años, el río siguió contaminado por la alta concentración de relave liberado [26].	12
Figura 4-11: Vista planta de la forma en que se libera el relave. El ángulo de 30° corresponde a la apertura que tiene la brecha [13].	14
Figura 4-12: La falla de la presa Mount Polley se dio por un terreno inapropiado para su construcción y por el alza de almacenamiento de relave [25].	15
Figura 4-13: Falla de Merriespruit en vista planta. Se liberación 600.000 [m ³] de relave, similar a 176 piscinas olímpicas [35].	16
Figura 4-14: Se liberaron cerca de 6000 [m ³] de relave, casi 2 piscinas olímpicas [4].	18
Figura 4-15: Las terrazas escalonadas originadas por el avance de la licuefacción que terminan debilitando la resistencia al corte de los muros [22].	19
Figura 4-16: El tranque perdió un 80% del volumen contenido, correspondiente a unos 231.600 [m ³], o sea, unas 68 piscinas olímpicas [40].	19
Figura 5-1: Formas de representar una red bayesiana. Los nodos son conectados mediante arcos que van constituyendo la red [43].	22
Figura 6-1: Representación propia del uso de Elvira. Las barras verdes son las probabilidades a priori, mientras que al conocer el estado de la variable “C”, eso genera un impacto en cada nodo presente en la red (barra roja).	27
Figura 7-1: Guía de cómo se ordenan los parámetros – Elaboración propia.	29
Figura 7-2: Falla de flujo es de las fallas menos comunes. Si bien las probabilidades de ocurrencia de la licuefacción sísmica y post sismo son inferiores a 20 [%], la situación cambia	

al considerar que existe una pérdida de resistencia al corte del suelo – Elaboración propia.	34
Figura 7-3: La falla de filtración tiene una gran cantidad de parámetros con altas probabilidades de ocurrencia. En este tipo de falla influye el grado de saturación debido a la presencia de agua en el depósito – Elaboración propia.	35
Figura 7-4: Según el estudio, es la segunda falla más común. Se caracteriza por tener una gran variedad de factores que de forma independiente pueden causar una falla de talud – Elaboración propia.	36
Figura 7-5: El mayor impacto que se puede generar para este mecanismo viene dado por un problema en la etapa de planificación y de construcción, donde no se considera la presencia de fallas subterráneas – Elaboración propia.	37
Figura 7-6: La falla por desbordamiento es la falla más común y se debe a los rebalses por aumento de laguna. En esta falla, mayor impacto viene dado por el mal monitoreo de los eventos naturales y por una construcción deficiente – Elaboración propia.	38
Figura 7-7: Probabilidad de ocurrencia de cada mecanismo de falla obtenido mediante redes bayesianas. En una proyección a 50 años, se espera que la falla más común sea el desbordamiento – Elaboración propia.	39
Figura 7-8: Probabilidades de ocurrencia de fallas en tranques de relave ubicados en todo el mundo [6].	40
Figura 7-9: Probabilidades de ocurrencia de los principales mecanismos de falla en Chile [22].	40
Figura 7-10: Tranque Las Palmas en 1997. Corresponde a la 4ª etapa de expansión que buscó resguardar el depósito [48].	41
Figura 7-11: La presencia de ebulliciones de arena en el suelo reafirman la posibilidad de una falla de flujo [22].	42
Figura 7-12: Red bayesiana del mecanismo de falla más probable en base a información del Tranque Las Palmas. Los arcos de color rojo indican la influencia de los parámetros conocidos hasta el mecanismo de falla – Elaboración propia.	43
Figura 11-1: Representación del material de construcción de los muros de contención. De un total de 58.713, el 65% corresponden a presas de tierra [7].	51
Figura 11-2: Usos que tienen las grandes represas. La baja participación en desechos tiene relación con la gran demanda de material contenido que debe tener el depósito [7].	51
Figura 11-3: Diagrama de árbol de la falla de flujo – Elaboración propia.	57
Figura 11-4: Diagrama de árbol de la falla por filtración – Elaboración propia.	57
Figura 11-5: Diagrama de árbol de la falla de talud – Elaboración propia.	58
Figura 11-6: Diagrama de árbol de la falla de fundación – Elaboración propia.	58
Figura 11-7: Diagrama de árbol de la falla por desbordamiento – Elaboración propia.	59
Figura 12-1: Caso de ejemplo, donde los nodos A, B y F corresponden a variables independientes – Elaboración propia.	60
Figura 12-2: Red bayesiana de un caso de ejemplo mediante el uso de Matlab – Elaboración propia.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 11-1: Registro de presas de relave con el que se obtuvo la profundidad de brecha de la falla por talud [13].	52
Tabla 11-2: Parámetros involucrados en los mecanismos de falla – Elaboración propia.....	52
Tabla 11-3: Probabilidad de falla según caso de estudio – Elaboración propia	59

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas la industria minera ha sido el pilar que sostiene al país, impulsando el producto interno bruto y logrando destacarse a nivel mundial debido a la producción de Cobre. Sin embargo, una gran producción trae consigo un alza en la generación de desechos mineros, existiendo actualmente 764 depósitos de relave a lo largo del país [2]. Considerando que cerca del 85 [%] de los depósitos se encuentran en estado “Abandonado” e “Inactivo”, aumentan las preocupaciones sobre su inestabilidad.

Un ejemplo de esto es el tranque “Las Tórtolas”, ubicado en Colina - Región Metropolitana. Con una dimensión volumétrica que se equipara al cerro San Cristóbal, en caso de un colapso el relave afectaría a localidades como Lampa, Peñaflor y Melipilla, para luego continuar por el caudal del Río Maipo y terminar afectando tanto a San Antonio, como al mismo océano Pacífico [3]. Así como existe este caso, hay otros a nivel mundial, tal como la catástrofe ocurrida en Septiembre de 2022 en Jagersfontein, Sudáfrica [4].

Actualmente existen estudios que buscan estimar las consecuencias debidas a si los muros de los tranques llegan a fallar. Uno de ellos es el cálculo de la distancia peligrosa tras una ruptura de un tranque de relave, bajo el modelo propuesto por Rico et al. [5].

El actual trabajo de título busca estudiar los mecanismos de falla que afectan a los tranques de relave ubicados en Chile y sus posibles causales desde un enfoque inicial como las etapas de diseño, hasta un estudio que considera la posible opción de un monitoreo deficiente de ciertos parámetros.

Esta memoria estudia las posibles causales y las relaciona con un cálculo probabilístico de la ocurrencia de defectos que de alguna manera afectan al depósito hasta su falla y colapso. Para ello, se considera la implementación de las redes bayesianas, las cuales, pueden organizar grandes cantidades de información de una forma simplificada y permitiendo realizar un primer acercamiento hacia un trabajo enfocado en “*machine learning*”.

Hay que considerar que si bien el estudio está enfocado en las implicancias que pueden afectar tranques de Chile, las bases de este trabajo pueden ser utilizadas en otras zonas del mundo, como lo puede ser Brasil, Sudáfrica, entre otros. La diferencia radica en conocer cuáles son los principales mecanismos que actúan en la zona, así como también tener un caso donde se conozca la mayor cantidad de detalles, para validar un presunto modelo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proponer una hipótesis sobre los principales factores que desencadenan una inestabilidad física en los muros de tranques de relave mediante el uso de redes bayesianas.

2.2 Objetivos específicos

1. Realizar una recopilación de información cualitativa y cuantitativa sobre mecanismos de falla asociados a tranques de relave.
2. Evaluar la caracterización mediante datos geotécnicos, operacionales y reológicos de casos de ruptura de los muros.
3. Aplicar el modelo en un caso de estudio basado en el colapso del Tranque Las Palmas en 2010.

3. ALCANCES

La investigación de la presente memoria se lleva a cabo en conjunto con la empresa JRI Ingeniería para estudiar y analizar el rompimiento de muros de relave. El estudio se enfoca en proponer una hipótesis sobre los mecanismos de falla que afectan tranques de relave en estado de abandono e inactividad a lo largo de Chile.

Para el estudio de los mecanismos de falla se tomó en consideración la opinión de diversos autores, donde se llevó un análisis de la formación del muro, la importancia de este tipo de estudio y como se reconocen las fallas que afectan a los depósitos mineros.

Habiendo caracterizado los parámetros formadores de falla y las relaciones entre ellos, se procede a evaluar mediante un diagrama de árboles la probabilidad de ocurrencia de las fallas por medio de redes bayesianas. Las probabilidades a priori necesarias para llevar a cabo el estudio se determinan en base a datos extraídos de WISE [6] e ICOLD [7].

Para este trabajo, las redes bayesianas estarán enfocadas en un análisis con proyección a 50 años. La forma en que se caracterizan los parámetros considera el diseño del depósito, su construcción básica y el monitoreo de este, vale decir, no se plantean situaciones de crecimiento del muro.

4. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se evaluará que son las represas, sus características y el material de construcción. Esta base servirá para comprender la importancia del estudio de las fallas asociadas a los muros de contención de depósitos mineros. Para ello, se considerará la postura de diversos autores sobre las fallas y el cálculo de la distancia peligrosa del relave.

4.1 Represas de contención

Las represas existen desde el inicio de la civilización humana y su objetivo es contener un material por medio de muros o cerros. En ese sentido, las represas pueden formarse por procesos naturales, como los deslizamientos de tierra o por procesos artificiales.

En general, las presas consideran una gran cantidad de parámetros en sus etapas de diseño y construcción, independientes del material de construcción (**Figura 4-1**). Sin embargo, los puntos más destacables se enumeran a continuación (definidos en GLOSARIO):

- Aguas abajo y Aguas arriba al muro (Upstream & Downstream).
- Altura del depósito y Ancho del depósito del depósito (Height & width).
- Cabecera y Revancha (Freeboard).
- Coronamiento y Escollera (Top width).

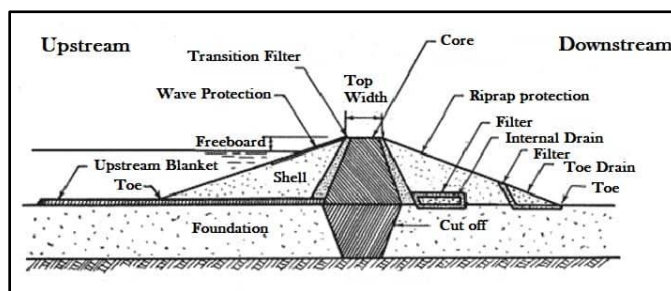


Figura 4-1: Partes de una presa, desde una vista lateral [8].

ICOLD recopiló datos entre el 1900 a 1973 para poder crear el Registro Mundial de Represas (WRD) entre los países asociados. Una presa “grande” debe tener una altura sobre los 15 metros o encontrarse entre los 5 a 15 [m] y poder almacenar sobre los 3 [Mm]³.

Según el Registro, cerca del 65 [%] de las grandes represas están formadas por tierra (Anexo A: **Figura 11-1**). Mientras que menos del 1 [%] es utilizado en relaves (Anexo A: **Figura 11-2**). Respecto al material de construcción, los más relevantes son el concreto y la tierra.

Un muro de concreto es más moldeable y puede soportar el peso mediante formas de arco, contrafuerte y por acción de la gravedad, lo cual, lo hace ideal para su uso en centrales hidroeléctricas (**Figura 4-2**). Este material presenta una menor ocurrencia de fallas, las cuales, suelen ocurrir antes del fin de su vida útil [9].

Por otro lado, los muros de tierra son empleados en depósitos mineros por ser más económicos, sin embargo, son más propensos a fallar. Esto se debe a que se basa en el actuar de la gravedad (**Figura 4-3**) y de las propiedades del material para mantenerse estable.

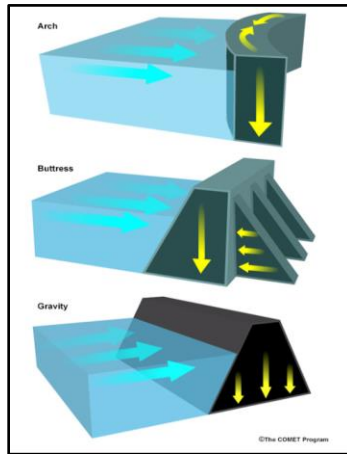


Figura 4-2: Tipos de represas de concreto [9].

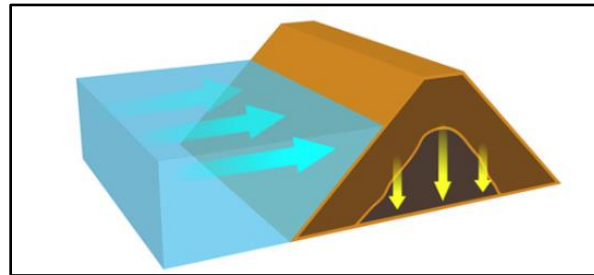


Figura 4-3: La presa de terraplén (o relleno) se sostiene por efecto de la gravedad y por la presión que aplica el material contenido [9].

Al comparar la frecuencia de falla de los muros, el concreto, tiene una razón de 1:10000, mientras que en el terraplén es de 1:1000 [10]. Las industrias que trabajan con muros de tierra deben considerar los siguientes factores:

- Construcción que perdure en la vida útil predeterminada.
- Estructura de gobierno y administración responsable.
- Diseño acorde a requisitos legales con sus respectivas recomendaciones técnicas.
- Monitoreo constante de posibles fallas.
- Plan de cierre adecuado para procesos posterior a la finalización de las operaciones.
- Procedimientos de gestión de riesgos y organización de información.

Independiente del material de construcción, los muros pueden presentar fallas o fracturas que llevan a la liberación de un material contenido. Para los siguientes capítulos solo se considerará la acción de estos agentes en muros de tierra de los “Tranques de relave”.

4.2 Importancia del estudio de las fallas

Los muros pueden ser alterados por agentes internos o externos, generando accidentes o fallas. Las fallas pueden ser roturas que afectan al depósito, liberando el material contenido, mientras que los accidentes son situaciones donde se provocan grietas que no liberan el material [11].

El estudio de prevención de brechas en los muros se da a nivel mundial debido a su relación con la inestabilidad física – química en los muros, la cual, depende de propiedades mecánicas del material depositado. La inestabilidad química se relaciona con el grado de acidez y la concentración de desechos tóxicos. Un ejemplo es la corrosión de tuberías.

A raíz de estas amenazas y la consecuente rotura de muro, surgen consecuencias no deseables como las presentadas a continuación:

- Contaminación de ríos y otras fuentes de agua, Aguas abajo al depósito.
- Costo de indemnización y de reparación.
- Daño a hogares, localidades aledañas y medio ambiental.
- Desempleos e interrupción de la producción.
- Posibilidad de formar una inestabilidad en un depósito Aguas abajo.
- Posible pérdidas humanas.
- Pérdida de prestigio e incremento de dificultad para la aprobación de proyectos [10].

Para simplificar los estudios, se suelen tratar las fallas como secciones trapezoidales en los muros (**Figura 4-4**), esto basándose principalmente en estudios de las características en las brechas y por casos históricos [12].

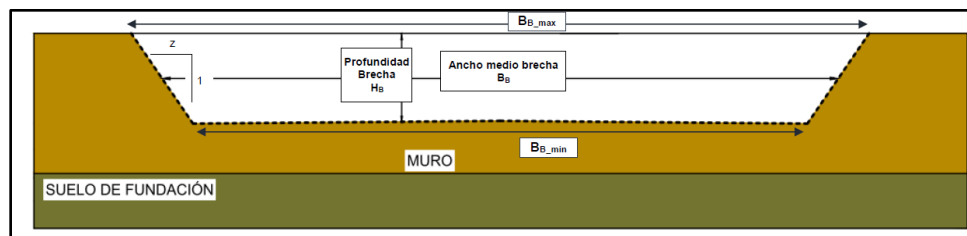


Figura 4-4: Representación de brecha trapezoidal desde una vista lateral. El ancho y profundidad se pueden estimar según el tipo de falla analizada [13].

Luego de que el muro se rompe, existen ciertos parámetros que deben ser de vital importancia a la hora de analizar cuál fue la causal de la falla:

- Características de la cuenca por donde escurrió el efluente.
- Dimensiones de la brecha (**Figura 4-4**).
- Distancia recorrida y volumen del material liberado.
- Duración y fecha del suceso, en donde se evidencia el día, mes, año y la hora.
- Parámetros reológicos y geotécnicos.

4.3 Depósitos de relaves

La minería sirve como sustento de un país, a la vez que puede ser un complemento de otras actividades industriales. Chile es un país que depende económicamente de esta actividad, con lo que hay que considerar que se obtienen ganancias por el mineral extraído, así como una gran generación de desechos como ripios, relave, entre otros. Para este estudio solo se evaluarán los relaves y los depósitos que se disponen para resguardarlo.

Estos depósitos poseen muros con fallas similares a las presas de terraplén, de modo que puedes ser influidos por una secuencia de fallas, por la edad y su vida útil. El relave es la suspensión de sólidos en líquidos derivada de la planta de concentración húmeda [14], la cual, en su composición puede contener elementos tóxicos, como Plomo, Cianuro o Zinc.

Para controlar los depósitos, en 2014 SERNAGEOMIN funda el Departamento de Depósito de Relaves, para poder llevar un catastro de los depósitos existentes y sus características como el nombre, ubicación, tipo de depósito, geoquímica, método de construcción, su estado actual, entre otros. A la fecha hay 764 depósitos en el país, donde más de la mitad se encuentran en estado “Abandonado” e “Inactivo” [2].

Actualmente, para que un depósito sea aprobado, debe cumplir con lo dictado por el DS248 [15] y por el Decreto Supremo 50 de la Dirección General de Aguas.

Existen 5 tipos de depósitos de relave, los cuales se construyen para almacenar y resguardar el desecho minero. Cada tipo de depósito busca almacenar el mismo desecho, sin embargo, la variación se da en el contenido de agua existente. Los muros de contención se pueden formar de tres modos distintos que se verán en la sección 4.3.2.

4.3.1 Tipos de depósitos

De los 5 tipos de depósitos, los tranques y embalses son los más preocupantes, ya que cumplen con ciertas características que los diferencia. Una de ellas es que los muros tienen una altura sobre los 5 metros para soportar el material, mientras que el resto son inferiores.

Además, tienen altas concentraciones de agua por lo que se debe realizar un estudio de rotura de muros considerando esa posible escorrentía [16]. A continuación, se mencionará cuáles son los tipos de depósitos y como se constituyen.

4.3.1.1 Tranques de relave

Son depósitos con un muro que se construye con el material grueso (arenas) del relave compactado. Sobre esta base se puede recubrir con material impermeable para reducir la filtración de residuos. El material fino (lomas), se va depositando en el interior del depósito.

4.3.1.2 Embalses de relave

Se forma un muro a partir de Empréstito recubierto con membranas impermeables. En este depósito la Laguna suele estar en contacto con el muro. La construcción del muro dependerá de la topografía del terreno, de modo que, puede no ser necesario implementarlo.

4.3.1.3 Relave en pasta

Una combinación de agua y sólidos con una alta presencia de partículas finas y un bajo contenido de agua. El resultado es una mezcla densa similar a una pulpa concentrada.

4.3.1.4 Relave espesado

Este depósito se caracteriza por someter el relave a un Espesador para reducir el nivel de agua contenida. Se debe construir de modo que no haya desplazamientos hacia áreas no autorizadas, con lo que se emplean piscinas que recuperar el agua residual que se filtra.

4.3.1.5 Relave filtrado

El proceso de filtrado utilizado en el depósito de relave filtrado es similar al del espesado. En este tipo de depósito, el material contiene aún menos agua debido a este proceso de filtración, con el objetivo de garantizar una humedad inferior al 20%.

4.3.2 Métodos de construcción de muros

Los muros de contención deben cumplir con ciertos requisitos básicos para su construcción, lo cual, es independiente del método seleccionado:

- Geometría del depósito debe ser aprobada y cumplir con las normativas del DS248. Entre los parámetros se encuentran la altura, inclinación y ancho del muro.
- Material de construcción ideal: diabasa o andesita. Sin embargo, se puede usar material estéril, con una densidad bajo $2,2 \text{ [t/m}^3\text{]}$ y con una humedad entre el 10 al 15 [%] para evitar inestabilidades [17].
- El muro inicial debe ser de Empréstito y medir $1/10$ de la altura final del muro proyectado, con un máximo de 2 metros [15]. Este muro debe estar compactado y en lo posible, puede estar recubierto con una membrana impermeable.
- No hay una reglamentación para la pendiente del muro Aguas abajo, pero lo ideal según SONAMI es que la razón (H:V) sea de 3:1, o sea, una inclinación entre 14 a 18.1 grados [18]. Aguas arriba del muro, debe ser una razón de 2:1 máximo.
- Posicionamiento territorial del depósito debe ser tal que sea mínima la zona donde debe construirse un muro, vale decir, una zona rodeada de cerros.
- Protección en tuberías y en drenes para evitar un almacenamiento excesivo.

Los muros de relave tienen tres formas de ser contruidos, siendo estos los métodos “Aguas arriba”, “Aguas abajo” y “Eje central”. A continuación, se presentará cada uno.

4.3.2.1 Método aguas arriba

Se construye un muro inicial que crece hacia la cuenca del depósito. El crecimiento se hace con la fracción gruesa del relave, mientras que la fracción fina va formando la “playa”, que es una zona de material seco que separa la Laguna y el muro de contención (**Figura 4-5**).

El material adicional se superpone a la fracción fina, formando una zona inestable que es más probable a una Licuefacción del suelo. En 1970, se prohibió el método por la vinculación de la Licuefacción y la sismicidad, lo cual provocó la falla del Tranque El Cobre [19].

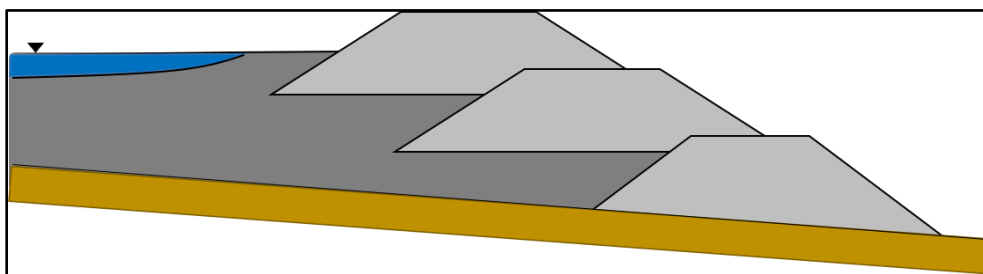


Figura 4-5: Método de aguas arriba. Mientras más material contenido tenga, mayor es la probabilidad de una licuefacción de los suelos bajo el muro [20].

4.3.2.2 Método aguas abajo

En este método, el muro crece aguas abajo del muro. En este caso, la fracción gruesa se irá depositando en forma de capas de forma que se asegure una buena compactación, mientras que la fracción fina se deposita aguas arriba del talud, formando la playa (**Figura 4-6**).

Al lograr la altura deseada, se puede recubrir para evitar la erosión del material y para dar formar una capa impermeable. Hay que considerar que también se puede emplear el uso de drenes que aseguran una disminución de la probabilidad de Licuefacción.

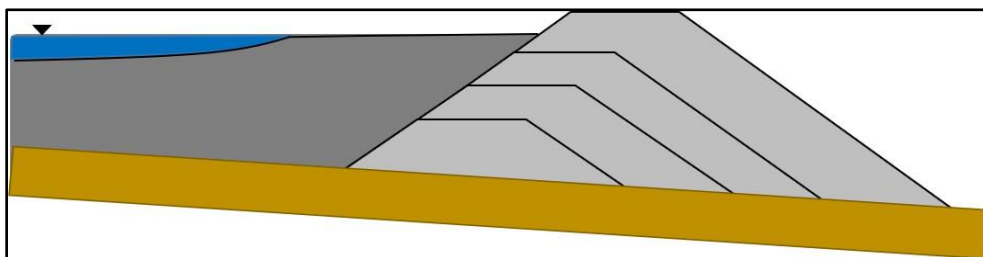


Figura 4-6: Método aguas abajo. Con este modo de construcción se pueden lograr muros con una mayor resistencia sísmica debido a la instalación de drenes [20].

4.3.2.3 Método eje central

Inicialmente se construye un muro base con material de Empréstito compactado. En este caso se va depositando la fracción de arena aguas abajo y la lamas hacia la cuenca aguas arriba, de igual modo que el método aguas abajo.

Luego de finalizar el primer muro, el material se va adicionando de forma vertical sobre el muro base, de modo que la berma coincide el Coronamiento inicial (**Figura 4-7**). De igual modo, este muro puede ser recubierto con una capa impermeable. En resumen, el método de eje central es un término medio entre los dos casos ya mencionados.

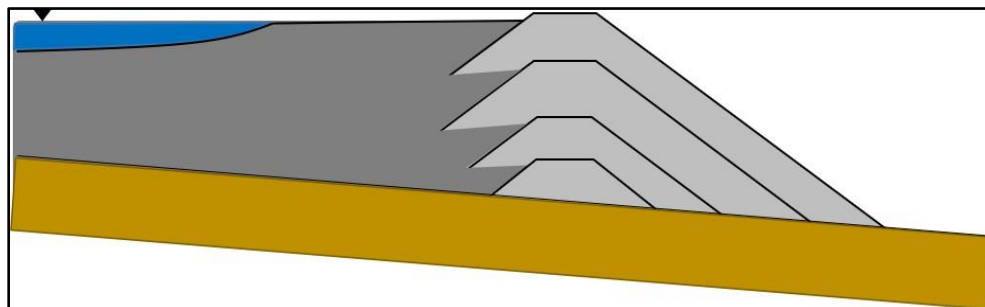


Figura 4-7: Método eje central. En este método se asegura que el peso sobrepuesto en el muro base corresponde al mismo tipo de material [20].

4.4 Tipos de fallas asociadas a rotura de muros

Existen diversos autores que buscan determinar las fallas que están asociadas a las represas, sin embargo, para este estudio se consideran tres tipos de fuentes. Entre ellas, se evalúan las fallas en muros de represas, relacionado con la minería y las fallas que ocurren en Chile.

A nivel general, se dispone de un estudio realizado por la UCAR que relaciona las fallas que sufren las represas del Registro de ICOLD. Las fallas más comunes en muros de contención son “Falla de cimentación”, “Falla por filtración” y “*Overtopping*” [9]. La formación de estas fallas se debe por escorrentía Aguas arriba, sucesos naturales y por errores humanos.

En un enfoque centrado en depósitos mineros, se tomará en cuenta la guía de seguridad de represas de la CDA, donde las principales fallas se deben a condiciones hidrológicas [21]. A raíz de esta información, existen empresas como CODELCO que reconocen las brechas como una “Falla en operación” y “Falla por evento hidrológico extraordinario”.

Las fallas en operación se pueden presentar como: “Erosión interna”, “Falla de cimentación”, “Falla por talud” y “*Overtopping*”. Por otro lado, la falla por evento hidrológico extraordinario es un evento externo que alimenta en sobre medida al depósito.

Por último, en el contexto nacional, se tiene que aproximadamente el 70% de las presas de residuos en Chile, se construyen a partir de relave de arena, mientras que el resto son a partir de Escollera, pasta filtrada o relave espesado [22].

Chile es un país sísmico, con lo que existen 4 factores clave que pueden formar fallas, siendo estos el método de construcción, el contenido de finos y nivel de compactación en el muro y el grado de saturación de los suelos. A raíz de esto, se pudo determinar que las principales fallas en Chile son la “Inestabilidad de taludes”, “Falla de flujo” y “*Overtopping*”.

Teniendo en cuenta el enfoque presentado, en este trabajo se evaluará el efecto de las fallas asociadas a Chile como lo son “Erosión interna”, “Falla de flujo”, “Inestabilidad de taludes” y “*Overtopping*”. A continuación, se describirá cada mecanismo por separado.

4.4.1 Falla por Desbordamiento

El desbordamiento es muy frecuente en las represas y se origina cuando el relave sobrepasa la altura del muro [9]. Puede ocurrir por un aumento de la Laguna, por un alza en el oleaje o por una reducción del Coronamiento del muro. Estas causales comparten que:

- Alza de precipitaciones y deshielos Aguas arriba: Generan un alza del nivel del agua.
- Posición del depósito y de la Laguna.
- Exceso de material contenido por error operacional o falla estructural en la presa.
- Falla en sistema de recuperación de Aguas claras.
- Revancha deficiente: En Chile, el DS248 dicta que no puede ser inferior a 1 metro.

La diferencia en el aumento del nivel de la Laguna se da por las características del depósito, ya que, si se encuentra en operación, la posición de la Laguna es un factor clave, mientras que, si se trata de un evento extraordinario, este factor pierde relevancia.

Cuando se trata de la reducción del Coronamiento, se considera un proceso de erosión y/o deformación de la parte más alta del muro, que debilita al muro hasta que es susceptible a la falla. En una falla por oleaje, se considera la posición de la Laguna y el efecto del viento.

4.4.1.1 Desbordamiento por alza del oleaje

Esta causal provoca una falla con un menor grado de catástrofe debido a que, solo una porción de la Laguna será liberada, debido al actuar del viento, a eventos sísmicos y a la posición de la Laguna [23]. En este tipo de falla, la Revancha no es un factor determinante, ya que el problema radica en la altura de las olas y la cercanía al muro (**Figura 4-8**).

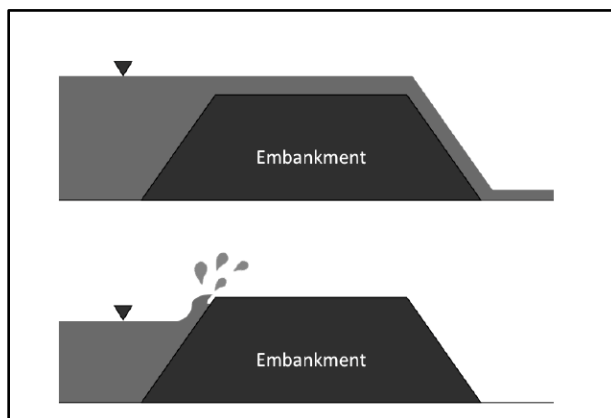


Figura 4-8: Comparativa entre una falla de desbordamiento por aumento de nivel de laguna y por alza de oleaje, respectivamente [23].

4.4.1.2 Desbordamiento en operación

La falla en operación puede ocurrir por un problema de diseño, error de mantenimiento o eventos comunes de sobre acumulación de la Laguna. De ese modo, la posición de la Laguna es fundamental, ya que, en caso de estar alejado del muro, se disminuye el riesgo. Respecto al relave, solo se libera una porción que está en contacto con la Laguna (Relave líquido).

La porción de relave liberada se encuentra sobre un ángulo formado entre la brecha y el extremo opuesto, donde hay contacto entre relave y Laguna (**Figura 4-9**). El ángulo se relaciona con la pendiente residual del Relave líquido, posterior al vaciado de la Laguna.

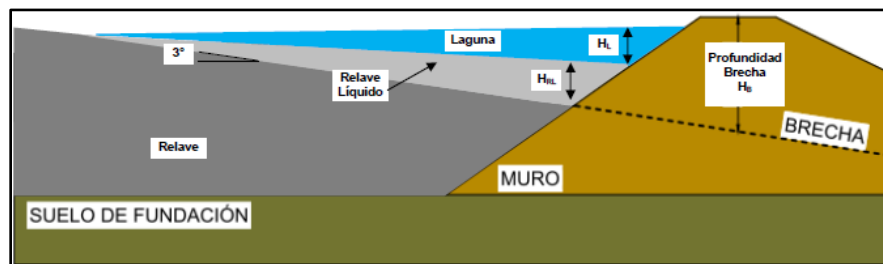


Figura 4-9: El ángulo (3° en este caso) sigue la dirección de la brecha hasta el punto donde se encuentra con la laguna [13].

4.4.1.3 Desbordamiento por evento hidrológico extraordinario

Un evento extraordinario hace alusión a precipitaciones intensas y/o prolongadas, las cuales, aumentan el nivel de Laguna, independiente de su posición, aumentando las probabilidades de rebalse. En estos casos, la Laguna se vacía completamente, incluyendo, el material sobre acumulado. El Relave licuado no es drenado [13].

4.4.1.4 Desbordamiento por reducción de coronamiento

La reducción de Coronamiento se origina por eventos imprevistos que disminuyen la Revancha hasta que no es posible contener el relave. Entre los factores que forman esta falla se encuentra el agrietamiento del muro, ya sea por efecto de la erosión que genera el viento o el desgaste del material de construcción.

También, se da el caso en que el muro sea deformado debido a problemas en la etapa de diseño, así como las temperaturas locales y las aceleraciones sísmicas.

4.4.1.5 Característica de la brecha cuando se presenta el desbordamiento

Si se considera que la falla se presenta como una brecha en el muro, el ancho de esta se podría describir con la fórmula de Froehlich (Ec: 4-1). La fórmula es aproximativa, ya que omite varios factores como la viscosidad [24]. La profundidad de la falla tiene una fórmula con un autor anónimo. Esta fórmula ha llegado a ser utilizada por CODELCO (Ec: 4-2).

$$B_b = 0,27 \times k_0 \times V_w^{0,33} \quad (4-1)$$

$$H_B = f_H \times (H_L + H_{RL}) \quad (4-2)$$

Donde:

- B_b = Ancho de brecha [m].
- K_o = Constante adimensional igual a 1,3.
- V_w = Volumen de agua y Relave líquido contenido [m³].
- H_B = Profundidad en la brecha [m].
- H_L = Altura de la Laguna [m]
- H_{RL} = Espesor de Relave líquido [m].
- f_H = Factor de corrección adimensional.

4.4.1.6 Caso de falla por Desbordamiento

En 2014 se desbordó una presa en Cananea, México por el alza en precipitaciones y el incumplimiento de normativas ambientales [25]. En total se liberaron unos 40.000 [m³] de relave, lo cual, es similar a 12 Piscina olímpica [26]. Esta rotura es de los peores desastres mineros que han ocurrido en México, ya que llegó al Río Sonora (**Figura 4-10**), afectando unos 270 [km] del río [27].



Figura 4-10: Efecto del derrame minero en el Río Sonora. Luego de 5 años, el río siguió contaminado por la alta concentración de relave liberado [26].

4.4.2 Inestabilidad de taludes

La inestabilidad de taludes se puede subdividir en falla de fundación y falla de talud debido a la forma en que generan la inestabilidad. La falla de fundación afecta al suelo y la falla de talud se relaciona con el muro. En ambos casos, el parámetro característico es el ángulo de reposo (la máxima inclinación que tiene un material para mantenerse estable) [28].

Los sismos pueden afectar el asentamiento del depósito (distancia al epicentro y la magnitud del mismo) [29]. Los deslizamientos de tierra pueden estar ligados a sismos, presencia de vegetación o la inclinación del terreno.

Respecto al muro, el monitoreo de estos debe evaluar la granulometría y presencia de deformaciones. En Chile, la granulometría está regulada por el DS248, de modo que no puede emplearse más del 20% de material bajo la malla #200. Las deformaciones no deben exceder el máximo límite determinado en la etapa de diseño [30].

Por último, se tiene la posición de la Laguna y el Nivel freático del depósito. En un tranque de gran magnitud, se considera que si la Laguna está a menos de 200 metros, es probable que exista una inestabilidad del talud [30]. Por otro lado, el Nivel freático es controlado por un piezómetro y si marca un valor elevado, puede inducir filtraciones en el suelo.

A continuación, se estudiará la falla de fundación y luego la falla de talud. En este estudio se evaluarán las condiciones que las diferencian, las características en la brecha y un caso de ejemplo que represente el efecto de su falla.

4.4.2.1 Falla de Fundación

La falla de fundación ocurre cuando el material base del muro no puede soportar el peso ubicado sobre sí o cuando hay filtraciones de agua hacia las napas subterráneas. En esta falla, se considera la influencia por parte de la segregación del material que ingresa al sistema y de lo que ocurre en la cimentación debajo del muro.

El material que ingresa al depósito puede segregarse según la cinemática de sus partículas, formando zonas con distintos ángulos de reposo y permeabilidad del suelo [17]. Por otro lado, la cimentación puede ser de origen artificial o natural. El suelo natural se emplea si es apto, mientras que la cimentación natural suele ser impermeable y de mayor resistencia.

El uso de una roca blanda en la cimentación significa una mayor probabilidad de generar inestabilidad ya que, el esfuerzo aplicado puede sobrepasar la resistencia al corte del material [11]. Un material artificial que permite contrarrestar este problema es el concreto y para la cimentación natural, se tiene la roca sólida o arcilla por su alta densidad y cohesión.

En resumen, una cimentación es aceptable si el material de construcción del suelo está bien compactado, posee un RMR superior a 60 y se encuentra presencia de Conglomerados. Sin embargo, si no se cumplen estos parámetros, es necesario estudiar el movimiento sísmico, la presencia de sales en el terreno, la saturación y el Nivel freático del muro.

Respecto al Nivel freático del muro, este debe ser tal que el nivel del agua se ubique 10 metros bajo la cimentación [30]. Ahora bien, la cimentación puede fallar debido a una influencia sísmica o por problemas estáticos. A continuación, se presenta cada caso.

4.4.2.1.1 Influencia sísmica

Los sismos forman ondas de energía que generan una amplitud de movimiento en el suelo, de modo que la interacción entre la superficie y el muro se hace inestable. Para reducir la probabilidad de falla, se estudia Licuefacción y deformaciones en los suelos [30].

El resultado del evento sísmico es un desplazamiento de la tierra o aceleración del suelo que desencadena en asentamientos diferenciales. Los factores clave que pueden producir el aumento de movimiento son la densidad y rigidez del suelo, la velocidad de la onda y el contenido de agua [31]. Una cimentación desfavorable es la arcilla por su baja rigidez.

4.4.2.1.2 Estado estático

La estabilidad del muro es alterada por el efecto de la temperatura, presencia de sales en el terreno, la sobrecarga estática y las deformaciones formadas.

Al norte de Chile, el suelo presenta una salinidad superior al 3 [%], la cual, aumenta la rigidez e índice de cohesión en las rocas. Sin embargo, los depósitos de relave pueden disolver las sales, debilitando aún más los suelos [28]. Cuando la salinidad supera el 10 [%] en la cimentación natural, el suelo debe ser removido pues es más propenso a formar fallas.

La sobrecarga estática se debe a una deformación excesiva en el muro que afecta tanto al suelo como al muro inicial. La sobrecarga se genera de forma gradual a medida que aumenta el contenido del depósito, por lo que en la etapa de diseño debe fijarse el límite.

En Chile, para regular la estabilidad del muro, se debe tener un factor de seguridad sobre 1,2. Este factor considera el grado de inclinación, la geometría y densidad del muro [15].

4.4.2.1.3 Característica de falla de Fundación

La profundidad de brecha puede ser representada como la altura del muro y el ancho es 5 veces la altura [13]. La posición de la Laguna es un factor fundamental, ya que, si está en contacto adicionalmente se libera Relave líquido (**Figura 4-9**).

CODELCO propone que el Relave licuado liberado se calcula como un cono truncado invertido con diámetro menor igual al ancho inferior a la brecha. Al finalizar la escorrentía, el Relave licuado restante del depósito tiene una inclinación de 3° [13] (**Figura 4-11**).

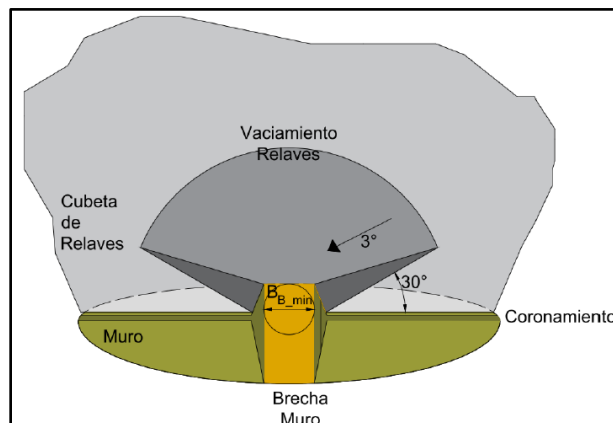


Figura 4-11: Vista planta de la forma en que se libera el relave. El ángulo de 30° corresponde a la apertura que tiene la brecha [13].

4.4.2.1.4 Caso de falla de Fundación

El 2014, la presa Mount Polley, Canadá se derrumbó por una mala cimentación debido a la presencia de una capa glaciolacustrina [32]. Se derramó aproximadamente 8 [Mm³] de relave, similar a 2.000 Piscina olímpica [33], en el lago Quesnel y Polley (**Figura 4-12**).



Figura 4-12: La falla de la presa Mount Polley se dio por un terreno inapropiado para su construcción y por el alza de almacenamiento de relave [25].

4.4.2.2 Falla de Talud

Esta falla puede ser formada por una Licuefacción del muro, aunque no es necesario que sea de gran magnitud, además, suele presentar una forma rotacional que se relaciona con la geometría del muro y su inclinación. Para controlar esos parámetros, se debe considerar:

- Análisis del ángulo en pendiente de talud y del ancho de Coronamiento.
- Comparación del nivel de compactación del muro según construcción y diseño.
- Estudio del contenido de partículas finas de relave en los taludes y el dique.
- Evaluación del sistema de drenaje y el material de construcción según el diseño.
- Investigación geotécnica del material del muro.
- Supervisión de las presiones intersticiales, la construcción y monitoreo geotécnico.

Generalmente, las superficies de falla en taludes son de tipo semicircular o de cuña, siendo este último, característico en muros de relave contruidos a partir del método de Aguas Arriba y del Línea Central. Los factores que alteran las fuerzas deslizantes en los taludes son la compactación del muro, la actividad sísmica, efecto climático y la pendiente del terreno.

El grado de compactación de los muros está normado desde la etapa de diseño hasta la construcción, de modo que los muros sean contruidos por capas de material con un grosor entre 30 a 50 cm. Para asegurar la estabilidad, se debe hacer énfasis en el muro inicial [34].

La topografía, la etapa de diseño y construcción son factores claves, ya que una pendiente empinada del terreno aumenta la probabilidad de colapso del muro. El ángulo natural límite son los 30 [°], sobre ello, el talud puede estar en estado inestable. El diseño influye en la resistencia del muro, por lo que, un diseño irregular provoca deformaciones indeseadas.

Cuando ocurre un evento sísmico, los movimientos pueden alterar la carga estática, aumentando las probabilidades de deformar del muro. Las deformaciones pueden ser provocadas por un alza en la presión de poros o por la posición de la Laguna [19]. Los deslizamientos de tierra pueden ser originados por sismos o por errores de diseño.

Como fenómeno natural, se tienen las precipitaciones que pueden alterar la concentración en peso almacenada, así como la formación de Licuefacción del muro o un aumento en la humedad del muro. Para controlar el estado estático del muro, se considera un factor de seguridad normado sobre el valor 1,2 y el cumplimiento del grado de compactación.

Por último, las fluctuaciones abruptas de temperatura generan formaciones de grietas en el muro por medio de la expansión y contracción del material de construcción. A raíz de esas grietas, es posible que se produzcan deformaciones que finalmente generan la falla de talud.

4.4.2.2.1 Característica de falla de Talud

La profundidad de una brecha por talud se estima considerando una recopilación histórica (Anexo A: **Tabla 11-1**), en donde se determina que la profundidad es 0.82 veces la altura del muro [13]. Por otro lado, el ancho se estima como 5 veces el alto del muro.

El Relave licuado actúa igual que en una falla de fundación (**Figura 4-11**), mientras que el Relave líquido y la Laguna dependerán de la posición de este último. Si está en contacto, el relave actúa como un rebalse (**Figura 4-9**) y la Laguna se vacía completamente, mientras que, si no está en contacto, no escurre relave y solo escurre parte de las Aguas claras.

4.4.2.2.2 Caso de falla de Talud

En 1994, la presa Merriespruit en Virginia, Sudáfrica se derrumbó por un alza de precipitaciones que formó una Licuefacción del muro, provocando una falla de talud [35]. Desde 1993 presentaba filtraciones que no se tomaron en cuenta (**Figura 4-13**).



Figura 4-13: Falla de Merriespruit en vista planta. Se liberación 600.000 [m³] de relave, similar a 176 piscinas olímpicas [35].

4.4.3 Falla por Filtración

La falla por filtración puede ser producida en tres zonas del depósito, siendo estos el suelo, muro o tuberías. En el primer caso es considerado como filtración y el resto erosión interna.

Las erosiones internas pueden generar pueden formar un canal por donde puede escurrir el relave [11]. Esta problemática se puede dar a escala local o global dentro del depósito.

Para evitar la erosión se debe utilizar un material de construcción del muro inferior a 600 [mm] de diámetro, siendo favorable mientras más bajo sea [1]. En Chile, no se puede emplear más del 20% de material bajo la malla 200, o sea, 74 micrones [34].

Una erosión interna puede ser reconocida al evaluar el Coronamiento del muro, como en la mina Omai, en donde, la zona que estaba inundada presentaba indicios de adelgazamiento superficial por el ingreso de agua que fue debilitando al muro [1].

Las fallas por filtraciones tienen como común un error en la etapa de diseño y construcción del depósito. Para la selección del material de construcción y la base del depósito, se deben considerar ciertos aspectos clave detallados a continuación.

El tipo de material debe contemplar una capa impermeable que evite las filtraciones, además de considerar no exceder un límite propuesto en el respectivo diseño relacionado al contenido de material grueso.

Es importante construir y mantener un sistema de drenaje para evitar el bloque o corrosión de las tuberías y la turbiedad de las Aguas claras. Adicionalmente, se pueden construir barreras hidráulicas Aguas arriba para evitar el ingreso de material no deseado.

Por último, el grado de compactación debe ser acorde al diseño y la granulometría presente, con el fin de evitar filtraciones. Tomando como base la falla de Merriespruit (**Figura 4-13**), se deben llevar a cabo mitigaciones sí que el depósito da indicios de una posible falla.

Otras consideraciones que son fundamentales para prevenir la formación de esta falla son:

- Documentación de acciones preventivas relacionadas a la erosión interna.
- Emplear equipos mineros ligeros para evitar roturas de tuberías.
- Estudio de precipitaciones y el viento para evitar erosión.
- Monitoreo del suelo, desagüe, caudal, presencia de humedad y del Nivel freático.
- Supervisión que detecte anomalías en los taludes y la saturación del suelo.

Es importante conocer el material Aguas abajo del depósito (en su distancia peligrosa) y su capacidad de filtración. El relleno es un material ideal que reduce el flujo de relave [36].

4.4.3.1 Característica de falla por Filtración

En este caso, la profundidad de la brecha es igual a la altura del muro, mientras que para el ancho se emplea la ecuación (4-1), con la constante adimensional igual a 1,0.

La Laguna se vaciará completamente, independiente de su posición, mientras que el Relave líquido solo se liberará si la Laguna está en contacto con el muro (**Figura 4-9**). En el caso del Relave licuado, este se comporta de igual forma que en una falla de fundación (**Figura 4-11**).

4.4.3.2 Caso de falla por Filtración

El 11 de Septiembre de 2022, la presa de Jagersfontein, Sudáfrica se derrumbó afectando al Río Riet (**Figura 4-14**). Según Ingenieros Civiles de la Universidad de Witwatersrand, el derrumbe se debió a una erosión externa que desestabilizó el sur de la presa [37].



Figura 4-14: Se liberaron cerca de 6000 [m³] de relave, casi 2 piscinas olímpicas [4].

4.4.4 Falla de flujo

Se origina por una Licuefacción sísmica del suelo producto de una pérdida de resistencia al corte en los suelos [38]. Las licuefacciones sísmicas consideran una Licuefacción del suelo o relave y un evento sísmico.

El suelo puede estar en estado licuado previo al evento sísmico o puede ser producido luego de ello. Para evitar la Licuefacción, se puede mantener constante la recuperación de Aguas claras, de modo que el relave mantenga una densidad constante [15].

En relación con los métodos de construcción de depósitos mineros, el método aguas arriba tiene mayores inconvenientes por la forma en que se construye. Esta zona no presenta un buen sistema de drenaje por la baja permeabilidad de la arena fina donde se trabaja [22].

Al realizar una evaluación geotécnica, se puede determinar la probabilidad de Licuefacción del suelo y su índice de gravedad. De este modo se puede prever la formación de esta falla, por medio de pruebas laboratorio y de campo. Si la evaluación arroja un resultado inesperado, lo recomendable es cambiar el suelo a uno con mejor compactación y con mayor grado de impermeabilidad como lo es la grava [39].

Entre los factores indicadores de esta falla en depósitos mineros de Chile, se tiene la presencia de limo y materiales saturados. Este tipo de material en conjunto con un sismo de gran magnitud genera una reducción de la resistencia al corte y el desplazamiento del muro.

Otros indicadores tienen relación con la densidad, el índice de plasticidad y humedad del material de construcción del muro [22]. Hay que considerar que, al menos en Chile, los datos de presas que tuvieron brecha se encontraban en operación y que había una relación entre la presencia de agua subterránea y un sismo.

En Chile se tiene que las fallas de flujo originadas por un sismo de gran magnitud tienen:

- Filtración de material fino por grietas del muro.
- Formación de terrazas escalonadas (**Figura 4-15**).
- Los Relave licuado tienen un movimiento oscilatorio luego del sismo que debilita el talud del muro, hasta que colapsa por la formación de fisuras paralelas al suelo.
- Presencia de cuñas deslizantes Aguas abajo del muro por el movimiento del relave.



Figura 4-15: Las terrazas escalonadas originadas por el avance de la licuefacción que terminan debilitando la resistencia al corte de los muros [22].

4.4.4.1 Caso de falla de flujo

En 2010 se derrumbó el Tranque Las Palmas ubicado en Talca, Chile (**Figura 4-16**). El factor principal que desencadenó el derrumbe fue el terremoto del 27 de febrero de 2010, con una magnitud (M_w) de 8,8 grados. Este sismo generó una secuencia de fallas importantes en 5 presas entre la región de Valparaíso y la del Maule [22].



Figura 4-16: El tranque perdió un 80% del volumen contenido, correspondiente a unos 231.600 $[m^3]$, o sea, unas 68 piscinas olímpicas [40].

4.5 Estimación de distancia peligrosa

Los muros de contención son propensos a la formación de fallas que desencadenan en la liberación del material contenido, poniendo la vida humana, el medioambiente y las infraestructuras que estén en su ruta. Por este motivo, es necesario el estudio y análisis de la dirección que tomará el flujo y delimitar la zona de peligro en caso de que esto ocurriese.

Para lograrlo se debe llevar un catastro actualizado que considere las modificaciones del diseño y operación del depósito. Cada muro de relave dentro de un mismo depósito debe estudiarse y, en caso de que confluyan a la misma cuenca, se evalúa el más grande y cercano a la Laguna [13].

Actualmente, en Chile se calcula la distancia peligrosa mediante métodos semi-empíricos como el modelo de Rico et al. (2007). En dicho modelo (Ec.: 4-3), el volumen liberado es cerca del 37 [%] del volumen almacenado en el depósito [5].

Con el volumen liberado se puede estimar la distancia máxima que recorre el fluido hasta el instante en que se deposita y estanca (Ec.: 4-4).

$$V_{out} = 0,354 \times V_t^{1,01} \quad (4-3)$$

$$D_r = 14,45 \times V_{out}^{0,76} \quad (4-4)$$

Donde:

- D_r = Distancia peligrosa [km].
- V_t = Volumen almacenado en millones de metros cúbicos.
- V_{out} = Volumen liberado en millones de metros cúbicos.

Si bien la fórmula da una aproximación, al solo considerar el volumen está limitado para casos muy específicos. Por este motivo se debe realizar una actualización para un estudio más detallado y que relacione otros factores con el depósito [5].

A partir del modelo de Rico et al. surge el modelo de Concha [41] que buscó reajustar los datos (Ec.: 4-5). Este reajuste reduce el grado de incertidumbre de la fórmula, considerando un análisis de la energía potencial del volumen liberado a raíz de una relación entre la altura del muro volumen total almacenado (Ec.: 4-6).

$$V_{out} = 0,332 \times V_t^{0,95} \quad (4-5)$$

$$D_r = 3,04 \times \left(\frac{H \times V_{out}^2}{V_t} \right)^{0,545} \quad (4-6)$$

Donde:

- D_r = Distancia peligrosa [km].
- H = Altura del muro [m].

- V_t = Volumen almacenado en millones de metros cúbicos.
- V_{out} = Volumen liberado en millones de metros cúbicos.

Los métodos semi-empíricos consideran un estudio basado en datos históricos, donde los resultados del modelo se adaptan correctamente para casos dentro del estudio, pero eso no asegura una buena predicción para casos futuros.

Por otro lado, existen los modelos numéricos, que tienen un enfoque más físico donde se evalúa la influencia del fluido contenido al interior del depósito. Un ejemplo de ello es el modelo de Vergara et al. (Ec.: 4-7) en donde se propone un análisis adimensional sobre parámetros que influyen en la distancia peligrosa.

Entre estos parámetros se tiene la influencia del coeficiente de fluencia, la fórmula del número de Reynolds y la pendiente que hay en el terreno evaluado [20].

$$\frac{D_{m\acute{a}x}}{H_0} = f\left(\frac{\tau_0}{\rho V^2}, \frac{\rho H_0 V}{\mu}, \theta\right) \quad (4-7)$$

Donde:

- $D_{m\acute{a}x}$ = Distancia peligrosa [m].
- H_0 = Altura del relave [m].
- τ_0 = Tensión de fluencia [Pa].
- ρ = Densidad del fluido [kg/m^3].
- μ = Viscosidad [kg/ms].
- V = Velocidad característica [m/s].

El modelo considera factores físicos y reológicos relacionados con el fluido depositado, sin embargo, se omite el efecto que genera el coeficiente de fluencia dado que presenta una baja influencia, vale decir, no aporta ni desacredita a la estimación de la distancia (Ec.: 4-8).

$$D_{m\acute{a}x} = 0,4 \times H_0 \times \tau_0^{-0,05} \times Re_2^{0,5} \times (1 - \theta)^{0,25} \quad (4-8)$$

Donde:

- Re_2 = Número de Reynolds [-].
- θ = Pendiente del terreno [rad].

Cabe destacar que existen más modelos, los cuales, incluso podrían entregar un resultado más preciso en función a una mayor cantidad de parámetros y condiciones de estudio. Sin embargo, estas suponen un mayor costo computacional, así como un manejo más especializado en herramientas computacionales como CFD (fluidodinámica computacional).

5. MARCO TEÓRICO

Dentro del marco teórico se describirán las redes bayesianas, desde una introducción básica a lo que representan, como se utilizan, las partes que lo componen, fórmulas implicadas, entre otros datos de relevancia.

Actualmente, este tipo de redes son empleadas en casos médicos donde se busca reducir las posibles enfermedades que posee una persona en base a los síntomas detectados. Por ello, se debe considerar que el objetivo a lo largo de este tema de memoria será poder implementar su uso dentro del área minera.

5.1 Redes Bayesianas

Una red bayesiana es una representación gráfica de la interacción entre variables aleatorias, de modo que se puede crear un modelo probabilístico básico. Este modelo considera estimaciones matemáticas y opiniones de expertos sobre el tema que abarca la red [42].

Para construir una red bayesiana se debe conocer las relaciones de los parámetros, tanto los dependientes como los independientes. La representación debe ser simple pero capaz de entregar resultados esperables, de modo que no haya una sobrecarga de información.

Cada variable corresponde a un nodo en particular, el cual tendrá su respectiva probabilidad de ocurrencia e influencia sobre otros parámetros. De ese modo, cada nodo puede ser formador de un efecto y puede tener una causal ligada.

Las relaciones entre los nodos pueden ser representadas de tres formas básicas. Una dependencia lineal, un efecto dependiente de más de una causal y una causa que genera más de un efecto (**Figura 5-1**).

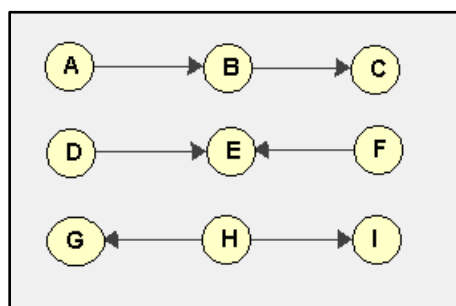


Figura 5-1: Formas de representar una red bayesiana. Los nodos son conectados mediante arcos que van constituyendo la red [43].

Existen tres restricciones clave en la relación de nodos. No puede existir más de un arco que conecte directamente un nodo causa y efecto. La red debe ser acíclica, vale decir, un nodo causal no puede ser producido de ninguna forma a partir de su nodo efecto. Por último, el grafo debe ser dirigido por medio de arcos que son representados como una flecha que conecta dos nodos. Así, la red bayesiana es considerada como un grafo acíclico dirigido.

La construcción de una red bayesiana tiene un alto costo computacional y de tiempo para el operador. Para aligerar la carga se trabaja considerando una independencia condicional, de modo que solo existe una influencia entre los nodos que están ligados directamente [44].

Tanto el diseño como el cálculo de las probabilidades de ocurrencia se realizan en la “etapa de edición”. En esta etapa se emplea el uso de probabilidades “a priori”, “condicional” y “a posteriori”, siendo estas últimas las que deben ser calculadas, mientras que las otras se extraen mediante casos históricos [45].

Habiendo calculado la probabilidad de ocurrencia, se pasa a la “etapa de inferencia” en donde se prueba un caso conocido para evaluar la veracidad del modelo. Conociendo el resultado, el objetivo es corroborar que se cumpla lo establecido en el modelo.

A continuación, se profundizará en la etapa de edición, en el cálculo de las probabilidades de ocurrencia considerando cada posible relación entre nodos (**Figura 5-1**).

5.1.1 Etapa de edición

El primer paso en esta etapa es extraer los parámetros a analizar, vincularlos entre sí, mediante conocimientos previos y diseñar un grafo acíclico dirigido. Luego se debe replantear el diseño de modo que se cumplan las restricciones de las relaciones entre nodos.

Una forma de constituir la red es reclasificar los nodos como nodos independientes y dependientes, siendo estos últimos divididos en dos clases, los que producen otro efecto y los que no. De esta forma, se puede estimar cuáles son los nodos que contienen una probabilidad “a priori” y los que no.

Un nodo independiente es aquel que en el modelo se considera que no proviene de ningún otro nodo. Cada nodo independiente posee sus propios estados, siendo esto las posibles formas en que actúa en el modelo. A mayor número de estados, más complejo se vuelve el modelo. A modo de ejemplo, si se tiene el nodo “Lluvias”, este puede tener 2 estados “Ocurre lluvia” o “No ocurre lluvia”.

Por otro lado, un nodo dependiente proviene de un nodo, siendo así, más complejo de analizar. La complejidad aumenta si se considera que cada nodo causa y nodo efecto tienen sus respectivos estados. Por lo tanto, un nodo dependiente podrá aumentar su dificultad exponencialmente según las dependencias y estados que posea.

Un ejemplo sería considerar que la “saturación del suelo” es un nodo efecto provocado por lluvias y el tonelaje almacenado, esto significa que se deben conocer las probabilidades de cada nodo causal y su efecto en la saturación para determinar la complejidad del cálculo.

A continuación, se presentará la forma de realizar el cálculo de las probabilidades a posteriori considerando cuando existe un nodo causal para un nodo efecto y cuando son varios nodos causales.

5.1.1.1 Un nodo causal

Cuando se tiene solo un nodo causal, cada probabilidad de ocurrencia de sus nodos dependientes podrá ser calculados si se conoce el estado del nodo causal y la probabilidad de ocurrencia de cada estado en particular (Ec: 5-1).

$$P(Y_j) = \sum_{i=1}^n P(Y_j|X_i) \times P(X_i) \quad (5-1)$$

Donde:

- j = Número entero que determina la cantidad de estado del nodo efecto.
- Y_j = Nodo efecto a evaluar.
- $P(Y_j)$ = Probabilidad de ocurrencia del estado del nodo efecto a evaluar.
- n = Cantidad total de estados del nodo causal.
- X_i = Nodo causal a evaluar.
- $P(X_i)$ = Probabilidad a priori del nodo causal a evaluar.
- $P(Y_j|X_i)$ = Probabilidad a priori que ocurra el efecto según una causa a evaluar.

En todo momento las probabilidades a priori y posteriori deben sumar 100%, de modo que un valor distinto quiere decir que la forma en que se realizó el cálculo es errónea.

Si la red bayesiana actúa con una dependencia lineal (**Figura 5-1**), se debe conocer el valor de cada nodo para calcular el efecto siguiente. Para ello se considera la dependencia de cada nodo a su predecesor.

5.1.1.2 Varios nodos causales

En este caso se basa en el segundo caso de las formas de conexión de redes (**Figura 5-1**). La complejidad del modelo dependerá de la cantidad de nodos causales, la cantidad de estados de la causa y del efecto.

La forma más simple de evaluar esta situación es considerar una combinatoria entre las probabilidades condicionales ligadas al nodo evaluado. Sin embargo, no es un dato fácil de obtener, de modo que en primer lugar se debe evaluar cómo obtener la combinatoria a partir de la relación individual de cada causal y el nodo dependiente.

En función a la cantidad de causales, sus respectivos estados y las relaciones a priori con el efecto evaluado, se puede calcular la combinatoria como el producto de cada caso (Ec: 5-2).

$$P(Y_j|X_1, \dots, X_m) = \prod_{i=1}^m P(Y_j|X_i) \quad (5-2)$$

Donde:

- m = Cantidad de nodos causales que influyen en el nodo efecto.

- $(Y_j|X_1, \dots, X_m)$ = Combinatoria de probabilidades que generan el nodo efecto.
- $P(Y_j|X_i)$ = Probabilidad de ocurrencia del nodo efecto según la causal a evaluar.

Conociendo la probabilidad por medio de la combinatoria, ya es posible estimar la probabilidad de ocurrencia de un nodo dependiente. Para ello, se necesita conocer la cantidad de causales, los estados en que se puede encontrar cada uno y la probabilidad en conjunto de cada estado del efecto (Ec: 5-3).

$$P(Y_j) = \sum_{i=1}^n P(Y_j|(X_1, \dots, X_m)_i) \times P((X_1, \dots, X_m)_i) \quad (5-3)$$

Donde:

- $(X_1, \dots, X_m)_i$ = Combinatoria de cada posible estado de cada causa.
- $P((X_1, \dots, X_m)_i)$ = Probabilidad a priori de cada causal, según su estado.
- $P(Y_j|(X_1, \dots, X_m)_i)$ = Probabilidad a priori de relación entre las causales y el efecto.
- $P(Y_j)$ = Probabilidad a posteriori del estado del efecto a evaluar.

5.1.2 Etapa de inferencia

En la etapa de inferencia se considera que el modelo ya está diseñado y cumple con los requisitos básicos en su programación, sin embargo, se desconoce la veracidad de sus resultados. Por este motivo, el siguiente paso es evaluar los resultados con un caso real.

Para ello, se deben fijar parámetros en el modelo, de modo que se sabe con un 100% de certeza que el nodo correspondiente se encuentra en cierto estado, de modo que los otros estados son nulos. Dependiendo del parámetro que se considere como conocido, se debe estudiar su efecto que genera en las variables a su alrededor y en un cierto parámetro a estudiar, de modo que se tenga una idea de la dependencia a este parámetro.

Hay que considerar que, al conocer un nodo, cambian sus nodos predecesores y los posteriores, de ese modo, la diferencia radica en lo que se busca responder con el modelo. Vale decir, reconocer si se desea evaluar la influencia en un nodo causal o en un efecto.

Para esta etapa es sumamente recomendable el uso de herramientas computacionales especializadas en las redes bayesianas, ya que, al evaluar la probabilidad de nodos previos y posteriores, se pueden generar confusiones que terminarían afectando el resultado que propone el modelo. Para ello existen softwares como “Elvira”, el cual, será explicado en el próximo capítulo.

6. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos descritos en el capítulo 2, se debe considerar la recopilación de información sobre los mecanismos de falla asociados a los muros de relave. Luego, será posible un análisis probabilístico de los parámetros que generan fallas (geotécnicos, mecánicos entre otros).

Habiendo obtenido la información y determinado los parámetros, se procede a generar una tabla informativa que relaciona los parámetros con las fallas asociadas, los rangos permitidos por un decreto o por el diseño y la fuente de donde se extrajo la información.

En esta tabla se presentarán los parámetros en general, sin hacer separaciones según los mecanismos de falla, de modo que se conozca el total de parámetros. Posteriormente, se conforma un diagrama de árbol entre las relaciones de cada mecanismo de falla, los cuales, serán la base que permitirá constituir la red bayesiana de cada mecanismo.

6.1 Matlab

Para el desarrollo de las redes bayesianas se emplea el software Matlab, en donde se desarrolla el cálculo de las combinatorias necesarias y posteriormente el cálculo de cada probabilidad de ocurrencia, tanto de los parámetros implicados como de los mecanismos de falla. Para los cálculos se emplean las ecuaciones vistas en la sección de redes bayesianas.

Teniendo las probabilidades de ocurrencia, la dependencia de cada variable y el orden específico para no generar errores de cálculo, el siguiente paso es realizar las redes bayesianas de cada mecanismo. Este paso está contemplado en la fase de edición. Para ello se emplea la función “*digraph*”, que permite la formación de un grafo dirigido (la generación de un grafo acíclico debe ser evaluada previo al uso de Matlab).

Luego de emplear la función, se utiliza la función “*plot*” para hacer la representación gráfica visible. La representación contempla el uso de nodos con una barra de colores que abarca desde el 0 al 100, con un degradado de color que va de 10 en 10. Cada color corresponde a la probabilidad de ocurrencia de las variables, incluido el mecanismo de falla.

Posteriormente, se representa en un gráfico circular la probabilidad de cada mecanismo, de modo que se pueda analizar la frecuencia que posee cada falla de ocurrir.

En la sección Anexo B: Cálculo de probabilidades, se describe un caso ejemplar básico sobre el cálculo de probabilidad y como se lleva a cabo la representación de la red bayesiana.

6.2 Elvira

El programa Elvira es un proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España. Sus usos están ligados a modelos probabilísticos enfocados en redes bayesianas y está escrito en Java, permitiendo que sea ocupado en distintos sistemas operativos [46].

Es empleado en la fase de inferencia por sus resultados eficaces. Para ello, en principio se deben conocer las variables, sus dependencias y las combinatorias probabilísticas que reflejan la dependencia de sus estados.

Dentro del programa, se puede fijar los nodos con sus estados conocidos y este arrojará el efecto que causa en la red (**Figura 6-1**). De este modo, se deberá tener en claro cuáles fueron las causales de un caso real.

Para este trabajo, el caso de estudio utilizado será la falla del Tranque Las Palmas en 2010, la cual, se explicará con mejor detalle en la sección Caso de estudio: Tranque Las Palmas. Cada red será puesta a prueba, de modo que se pueda evaluar que tanto varía la probabilidad de cada falla.

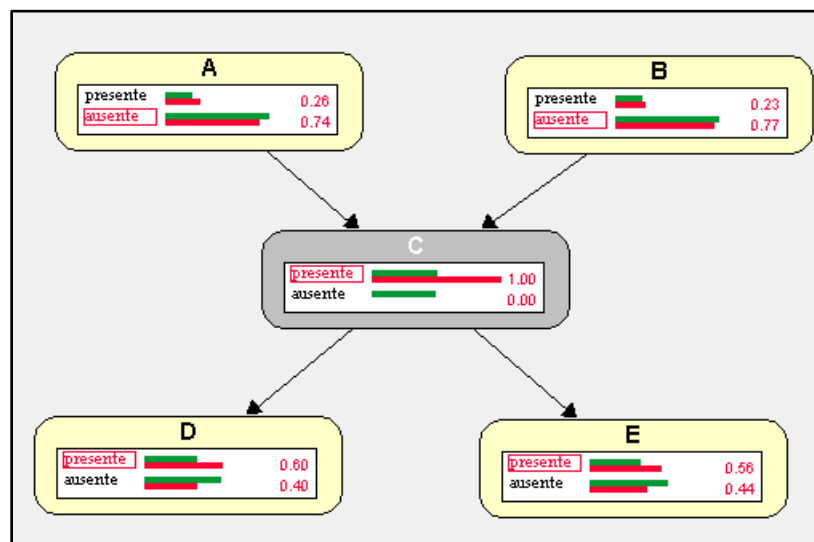


Figura 6-1: Representación propia del uso de Elvira. Las barras verdes son las probabilidades a priori, mientras que al conocer el estado de la variable “C”, eso genera un impacto en cada nodo presente en la red (barra roja).

El mecanismo de falla que posea la mayor cantidad de parámetros y con la probabilidad de ocurrencia más alta, corresponderá a la falla que el modelo considera como más probable a ocurrir.

Finalmente, la falla elegida será representada nuevamente mediante Matlab, de modo que se reflejen los nodos conocidos y se pueda caracterizar cuál fue el efecto en la red mediante el uso de la función “highlight”.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En base al estado del arte y al marco teórico, se comprende que hay una gran cantidad de parámetros que pueden ser formadores de una falla en un depósito minero. Estos pueden ser de tipo mecánico, reológico, geotécnico, hidrológico y químicos.

Los parámetros por evaluar corresponden a posibles errores que se llevan a cabo en las etapas de diseño, construcción y monitoreo de un tranque de relave (Anexo A: **Tabla 11-2**). Sin embargo, se omiten aquellos que forman directamente la falla, así como las fallas.

Esta decisión fue tomada considerando que los parámetros seleccionados poseen ciertos rangos de aceptabilidad y pueden ser controlados. Además, estas variables pueden ser originados indirectamente por una mala gestión del depósito, desde la etapa operativa, hasta el cierre y post cierre de esta.

Adicionalmente, se considera como parámetros que podrían ser controlados las filtraciones en muro y tuberías; los afloramientos de grietas subterráneas y las formaciones de grietas en los muros. Sin embargo, el estudio de cada uno de estos factores no está delimitado por alguna normativa en concreto.

Mientras que las filtraciones pueden ser monitoreadas visualmente, los afloramientos de grietas subterráneas son tratados mayormente en obras civiles y no hay una normativa relacionada directamente con la minería. Por último, la formación de grietas en un muro es un parámetro que se considera de gravedad, sin embargo, para este trabajo solo se considera el impacto que este genera en las deformaciones del muro.

A continuación, se presentarán las relaciones que tienen estas variables con sus respectivos mecanismos de falla. Este paso es fundamental para poder iniciar el estudio de las redes bayesianas y para estimar la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de falla.

7.1 Representación de las fallas mediante diagramas de árbol

Para que la representación sea lo más simple de analizar, se considera que:

- Cada mecanismo de falla será estudiado de forma independiente, aun cuando los parámetros involucrados puedan generar una correlación entre sí.
- A excepción de un caso en específico, no existen más de 3 nodos causa para un mismo efecto, de modo que no se sobrecargue el modelo.
- Los diagramas presentan simplificaciones que son explicadas en la sección correspondiente a cada falla.

Para facilitar la visualización de los diagramas, estos son representados con un fondo degradado del color gris, así como también, se emplean flechas que vinculan cada parámetro (**Figura 7-1**).

En ciertos casos se presentan líneas segmentadas, las cuales, son estéticas para no perder el sentido de relación entre flechas que se interceptan.

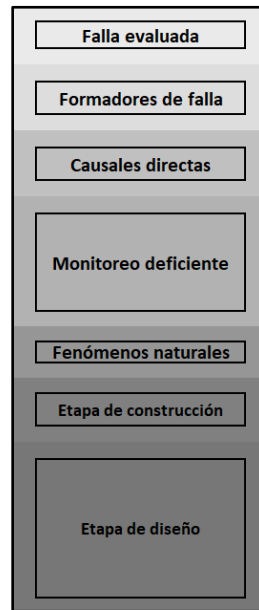


Figura 7-1: Guía de cómo se ordenan los parámetros – Elaboración propia.

En las etapas de diseño y/o construcción, no se afirma que exista una falla en estos procesos, sin embargo, son la base de la planificación para llevar a cabo la deposición de relave en una zona segura. Por ello, se debe evaluar estas variables para descartar un problema de diseño.

Los fenómenos naturales abarcan los vientos, deshielos, Aguas arriba, precipitaciones y la actividad sísmica, sin embargo, se omiten los efectos causados como lo pueden ser la aceleración sísmica, esfuerzos cíclicos, entre otros. Respecto al nivel de monitoreo deficiente, se considera un error humano al no medir la gravedad de un problema visible, así como también, la falta de equipos de monitoreo y/o la regularidad de las revisiones.

Las causales directas son parámetros que pueden llevar a cabo los parámetros formadores de falla. Este nivel fue definido para poder facilitar la comprensión del diagrama, sin embargo, puede abarcar un error de cualquier tipo ya mencionado. Los parámetros formadores de falla fueron estudiados en el estado del arte.

7.1.1 Falla de flujo

Hay que destacar que solo ocurre cuando ocurre una Licuefacción y un evento sísmico que afecta la resistencia al corte del suelo. La Licuefacción ocurre en el relave o en el suelo que sostiene el depósito. En caso de que no se registre un sismo o una Licuefacción, la probabilidad de ocurrencia de esta falla es del 1 [%] (Anexo A: **Figura 11-3**).

7.1.2 Falla de filtración

En esta falla la variable “fenómenos naturales” se encuentra en un nivel superior por pura estética, además, se omite el análisis de eventos sísmicos, debido a que su estudio debería realizarse de forma aparte por su impacto en variables como la rotura de tuberías, Licuefacción del suelo, entre otros (Anexo A: **Figura 11-4**).

El afloramiento de grietas se refiere a la presencia de fallas subterráneas que afloran por efecto del Nivel freático y que generan cavidades por donde el agua puede fluir. Si bien se puede considerar como válida una erosión interna de los suelos, esta se omite debido a que se presenta con mayor frecuencia las filtraciones. Por otro lado, las filtraciones en tuberías y muros pueden generar erosiones internas que terminan desmoronando el depósito.

7.1.3 Falla de talud

En las fallas de talud se destaca la influencia de parámetros que alteran al muro, tales como los deslizamientos de tierra, la presión de poros y la posibilidad de formar grietas que generen una deformación.

Sin embargo, se omite la formación de esfuerzos cíclicos y de aceleraciones sísmicas, ya que esto sobrecarga el diagrama. Estos dos parámetros mencionados son el vínculo que une un evento sísmico con los desplazamientos de muro.

En el caso de la Licuefacción del muro, solo se considera que proviene de las precipitaciones, mientras que no se toma la influencia del Nivel freático del depósito (Anexo A: **Figura 11-5**).

7.1.4 Falla de fundación

Para este caso, se evalúa el impacto de los parámetros en la cimentación bajo el muro y a lo largo y Ancho del depósito. De ese modo, se consideran los asentamientos diferenciales y el hundimiento del suelo como principales formadores de falla. Las fallas o grietas subterráneas que ascienden a la superficie son factores clave en estos formadores.

Por otro lado, las inestabilidades del suelo se deben principalmente a aceleraciones sísmicas y a inconvenientes relacionados con la geometría del depósito.

En el diagrama se menciona como 2 variables distintas a los sismos, esto solo es estético, dado que afecta a los tres tipos de formadores de falla (Anexo A: **Figura 11-6**).

7.1.5 Falla por desbordamiento

Por último, en esta falla se da que es el único diagrama con un efecto producto de más de tres causales. Esto se debe a que existen diversos casos que pueden generar una falla por desbordamiento. Mientras que el rebalse operacional y extraordinario se diferencian mayoritariamente en la presencia de precipitaciones intensas, las otras causales se deben al oleaje de la Laguna o a una reducción de la altura del muro.

En esta falla es donde se considera el mayor número de fenómenos naturales, debido a que está relacionado en mayor medida al aumento de nivel de Laguna que no está vinculado con el material estéril depositado (Anexo A: **Figura 11-7**).

7.2 Desarrollo de las redes bayesianas

En esta sección se presentarán las redes bayesianas en su etapa de edición y posteriormente la etapa de inferencia. En la edición se presentará cada red bayesiana con las consideraciones respectivas.

Por otro lado, en la inferencia se hará un desglose de las variables conocidas en la falla del Tranque Las Palmas, para posteriormente presentar la red que mejor se aplica. Cada variable presentada en las redes bayesianas cuenta con dos posibles estados, siendo en su mayoría variables en peor y mejor caso posible que induce a la falla.

7.2.1 Formación de las redes bayesianas

Cada red bayesiana tiene sus respectivas variables que generan un posible efecto y que alteran el mecanismo de falla evaluado.

Las probabilidades de ocurrencia consideran un estudio probabilístico con una visión a 50 años del futuro.

De esa forma, las probabilidades a priori estimadas tomaron en cuenta las fallas que han ocurrido hace ± 50 años.

Existen ciertos nodos con estados únicos, que difieren del resto, como lo pueden ser:

- Sismos: En este caso ocurre un sismo máximo creíble o un sismo con magnitud en escala Richter superior a 7. En ningún caso se considera que no ocurre un sismo.
- Precipitaciones intensas: Si bien existe el parámetro precipitaciones, en el caso de las que son intensas se cuenta con el efecto del cambio climático.
- Deformaciones en suelo: Se considera que hay un límite permisible y un exceso.
- Vientos: Pueden ocurrir vientos fuertes o suaves.
- Presencia de sales: Considera la probabilidad de que exista una salinidad del suelo superior al 10% o la posibilidad de un suelo que tenga un nivel más regulado.
- Posición y distancia de la Laguna: La laguna se ubica cerca o lejos del muro.

7.2.1.1 Falla de flujo

Como se mencionó en el estado del arte, en este mecanismo es muy importante la presencia de un evento sísmico y de una Licuefacción del suelo o relave. Por este motivo, los factores que puedan inducir una Licuefacción son considerados, como lo puede ser la posición de Laguna, la cual, influye en el grado de saturación del suelo (**Figura 7-2**).

Al no existir datos concretos de la posibilidad de que las fallas de flujo sean provocadas en mayor o menor medida por una Licuefacción previa o posterior al sismo, se considera que ambos casos tienen una probabilidad condicional de generar la falla de un 50 [%].

A partir de los resultados de esta red bayesiana, se puede determinar que, si bien un evento sísmico es un evento impredecible y, por tanto, solo se puede evaluar las mitigaciones cuando ocurre el evento, se puede tomar en consideración un enfoque que evite la Licuefacción previa. Para este caso, la Licuefacción del relave se debe a la densidad de la mezcla de relave almacenado, mientras que la Licuefacción del suelo puede ocurrir por factores como la saturación del suelo.

Por otro lado, la Licuefacción del suelo es más fácil de prevenir, puesto que surgen factores como la posición de la Laguna y las deformaciones del suelo, las cuales poseen una alta probabilidad de ocurrencia y condicional, de modo que pueden ser evaluadas en la etapa de diseño para reducir desde un principio las probabilidades de colapso.

7.2.1.2 Falla de filtración

En esta falla existen causales que son independientes y que están relacionadas con las tuberías, como lo son las roturas y la corrosión. Estos parámetros podrían considerar la influencia externa de equipos mineros o el grado de ácido del material contenido.

La erosión interna en tuberías es el formador de falla más común para este mecanismo, mientras que la filtración en el suelo se regula con capas de impermeabilidad (**Figura 7-3**). Respecto a las erosiones en el muro, el alza de presión de poros es la causal más destacable.

Como se mencionó con anterioridad, la presencia de un evento sísmico generaría conflictos con el modelo actual, debido a las implicancias que genera en distintas zonas del depósito. Por ese motivo, su análisis debería ser realizado de forma aparte, considerando el efecto por separado en cada zona que se desee analizar.

Entre las posibles mitigaciones para reducir la probabilidad de falla, se debe tomar en cuenta un monitoreo de las tuberías, al igual que un estudio enfocado en el afloramiento de grietas subterráneas por presencia de fallas en el suelo que pueden no ser documentadas.

7.2.1.3 Falla de talud

La falla de talud se caracteriza por tener distintas causales que afectan al muro en sí, de modo que este se desmorone. En este mecanismo la posición de la Laguna es relevante debido a su impacto en la presión de poros del muro, ya que, mientras más cerca se encuentre, mayor es la probabilidad de generar un impacto.

Respecto al ancho del Coronamiento, si en la etapa de construcción respectiva, este parámetro no es monitoreado con eficiencia, el resultado sería un incremento en los esfuerzos tanto verticales como horizontales que podrían deformar el muro (**Figura 7-4**).

Aun cuando el formador de falla “Colapso de muro” tiene la probabilidad de ocurrencia más baja, es la causal que mayor influencia tiene para este mecanismo de falla con cerca de un 46 [%] [6], lo cual, puede ser reforzado al considerar que es de los parámetros más frecuentes a escala mundial dentro de esta falla [6].

El problema presente en este mecanismo radica en que existe una gran variedad de causales que provocan la falla y que alteran de formas muy distintas al muro. Principalmente, el enfoque de prevención debiera considerar un análisis de la presión de poros, la formación de grietas y la Licuefacción del muro.

Sin embargo, una mitigación que no sea regulada correctamente podría ser contraproducente, pues podría empeorar otros factores dentro del muro, ejemplo de ello sería implementar un material de construcción que reduzca la presión de poros pero que sea más vulnerable frente a una posible Licuefacción.

7.2.1.4 Falla de fundación

Este mecanismo se caracteriza por la presencia de variables que pueden inducir problemas en el suelo aun cuando no están en contacto directo. Un claro ejemplo es la posición de la Laguna, ya que si la Laguna se ubica en una zona donde la separación con el suelo es mínima, esto puede provocar un aumento en el grado de saturación de los suelos.

La presencia de sismos puede provocar tanto asentamientos diferenciales como el hundimiento del suelo, de igual forma que el contenido de sales del terreno (**Figura 7-5**). En cuanto a la mitigación, esta debe enfocarse en afloramiento de grietas y saturación de los suelos. Además, se podría mitigar la sobrecarga que genera el muro sobre la cimentación.

7.2.1.5 Falla de desbordamiento

Este mecanismo posee 4 parámetros formadores de falla debido a la separación entre un rebalse extraordinario y operacional, tal cual se ve en el estado del arte. Si bien, la falla ocurre por efectos de fenómenos naturales, también puede ser inducida por características propias del muro y del material contenido.

Los rebalses producto del oleaje son los tipo de parámetros que mejor pueden ser controlados, ya que, para ello debe existir un fuerte oleaje acompañado de una distancia de la Laguna al muro muy reducida. Por otro lado, el rebalse extraordinario solo puede ser aligerado en caso de contar con un sistema de drenes eficaz (**Figura 7-6**).

Una consideración que se tuvo es que tanto la reducción de Coronamiento como el rebalse por oleaje tienen un vínculo con los rebalses operacionales debido a que, de alguna forma, ambos casos inducen una reducción en la Revancha.

En este caso, la mitigación se debe centrar en un sistema de dren capaz de contener precipitaciones intensas, ya que es de las causales a nivel mundial que más provocan esta falla.

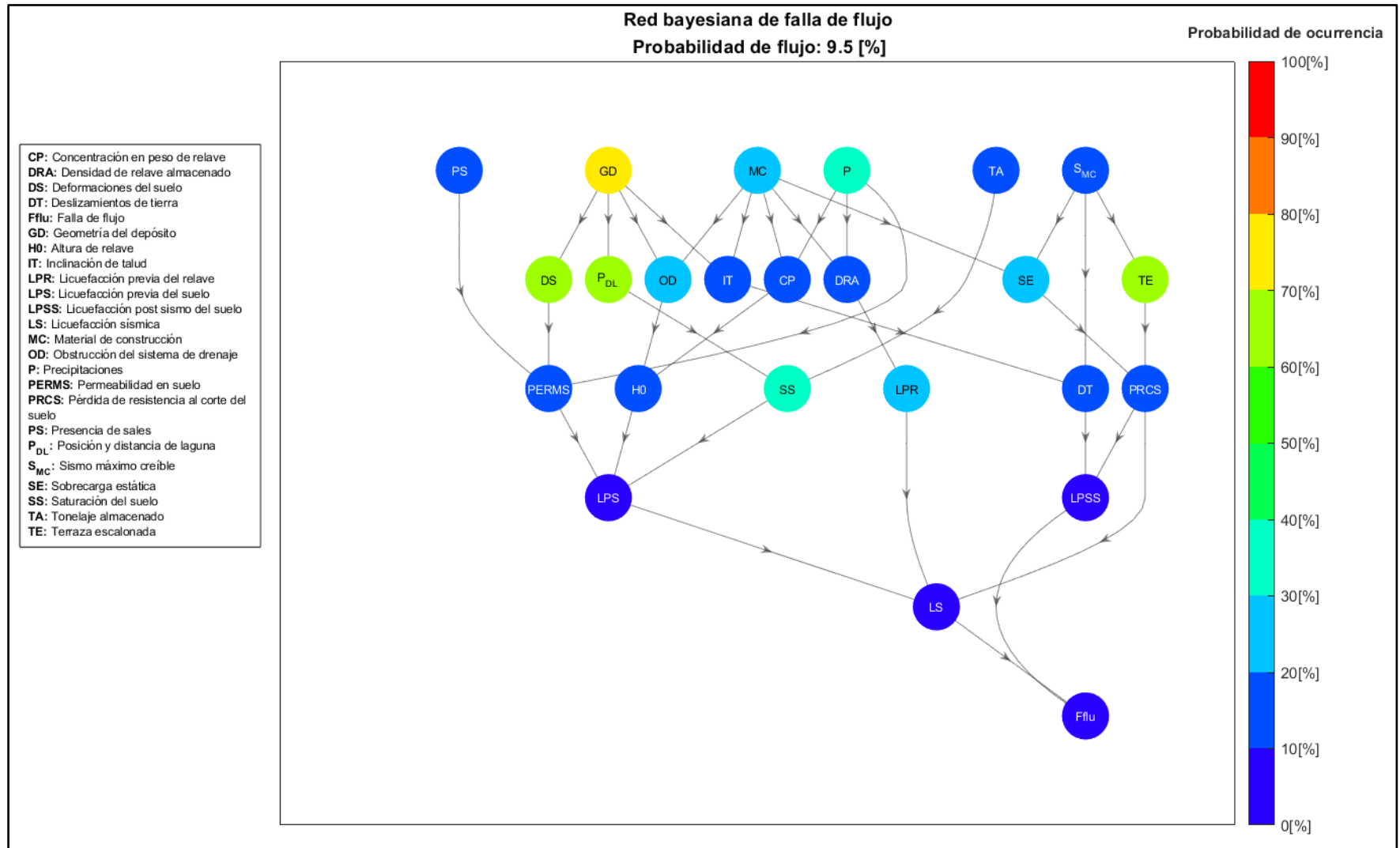


Figura 7-2: Falla de flujo es de las fallas menos comunes. Si bien las probabilidades de ocurrencia de la licuefacción sísmica y post sismo son inferiores a 20 [%], la situación cambia al considerar que existe una pérdida de resistencia al corte del suelo – Elaboración propia.

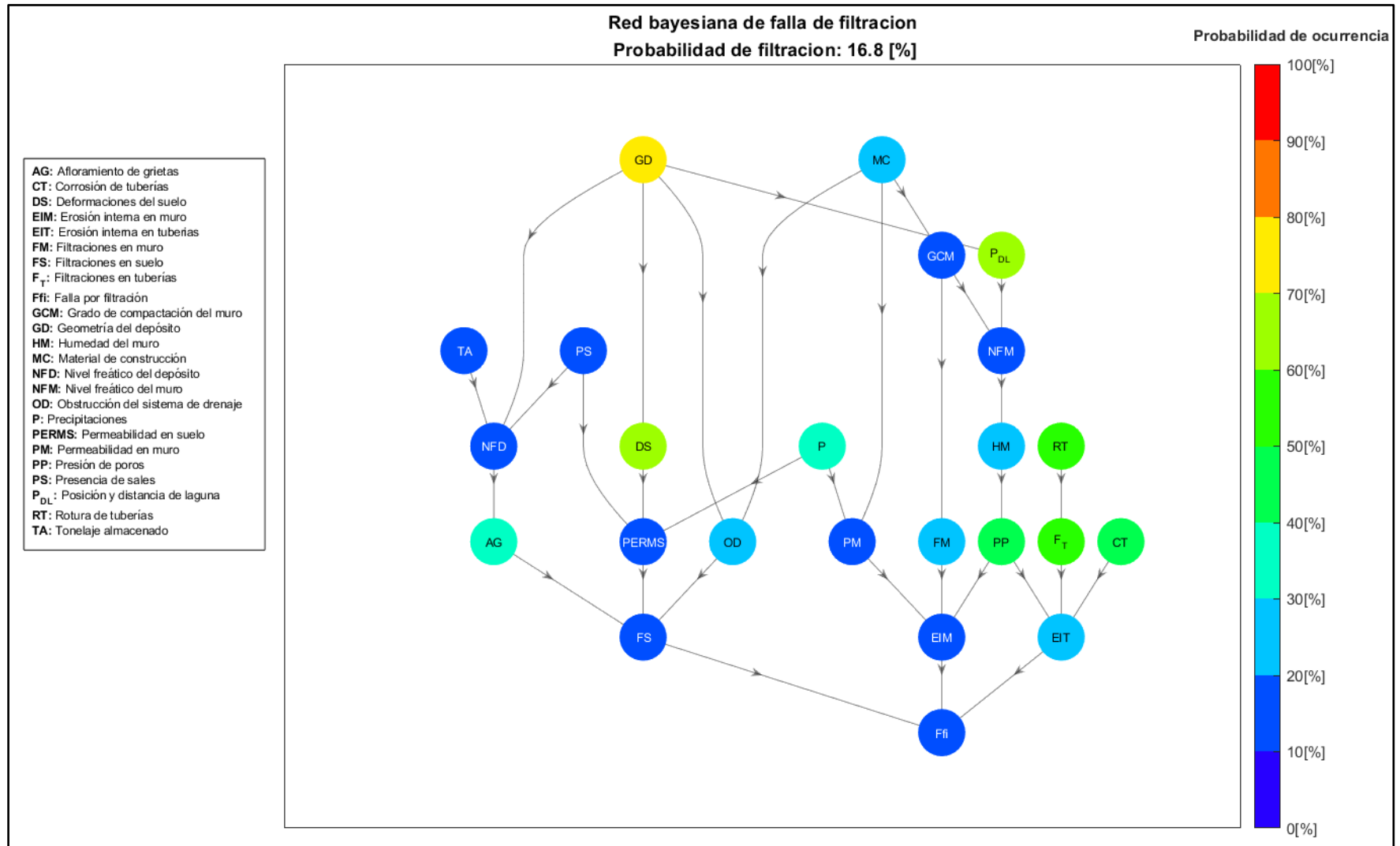


Figura 7-3: La falla de filtración tiene una gran cantidad de parámetros con altas probabilidades de ocurrencia. En este tipo de falla influye el grado de saturación debido a la presencia de agua en el depósito – Elaboración propia.

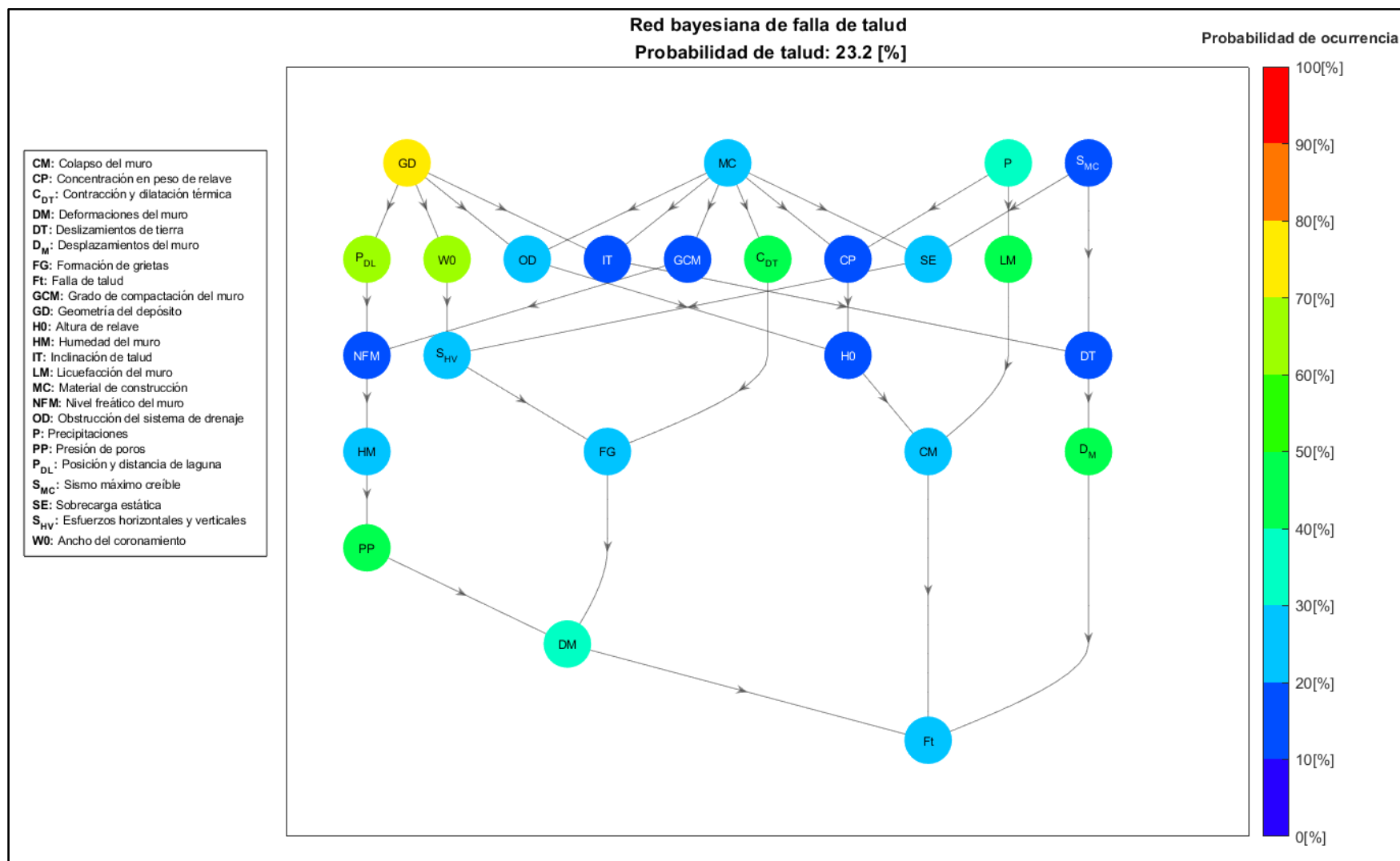


Figura 7-4: Según el estudio, es la segunda falla más común. Se caracteriza por tener una gran variedad de factores que de forma independiente pueden causar una falla de talud – Elaboración propia.

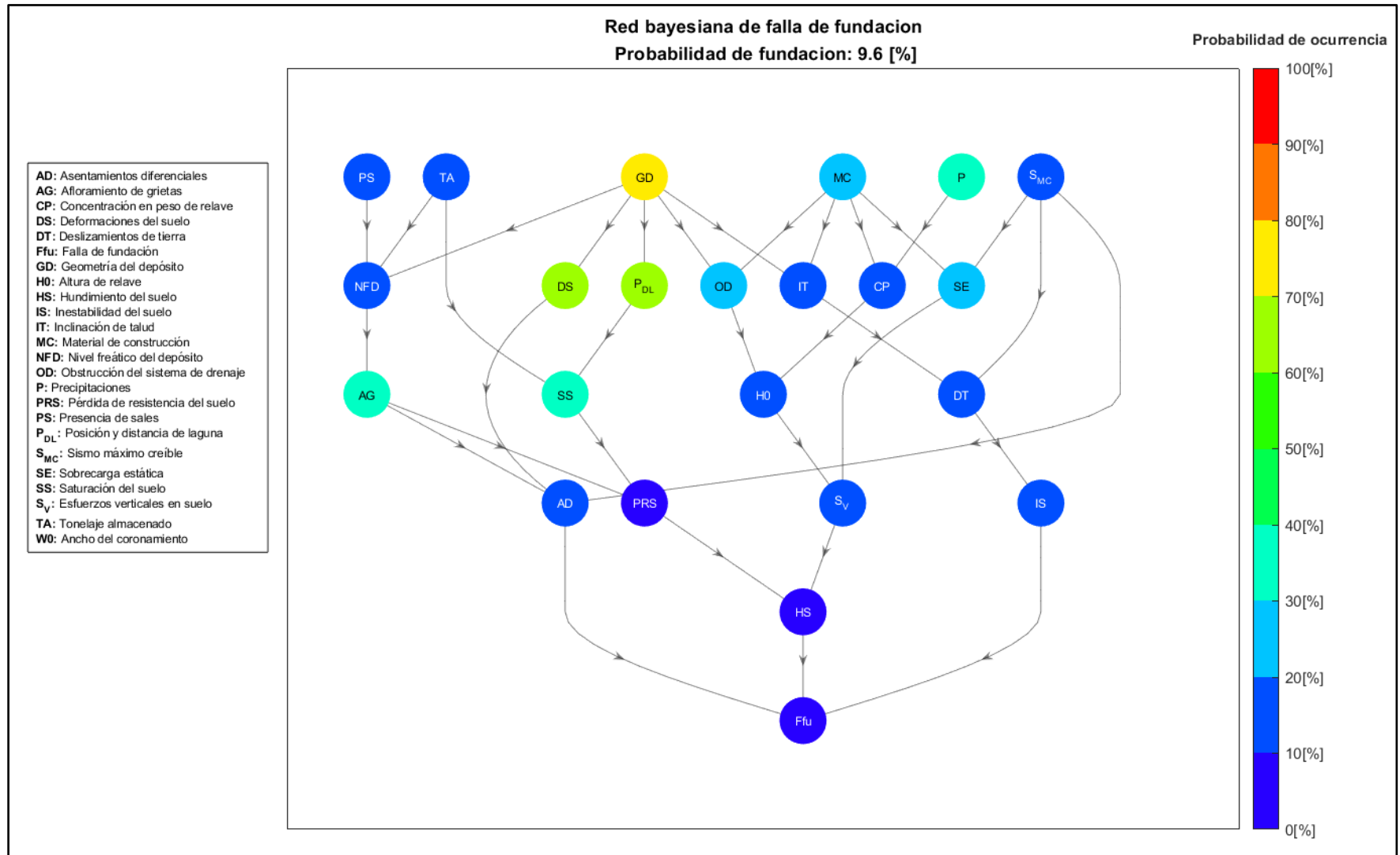


Figura 7-5: El mayor impacto que se puede generar para este mecanismo viene dado por un problema en la etapa de planificación y de construcción, donde no se considera la presencia de fallas subterráneas – Elaboración propia.

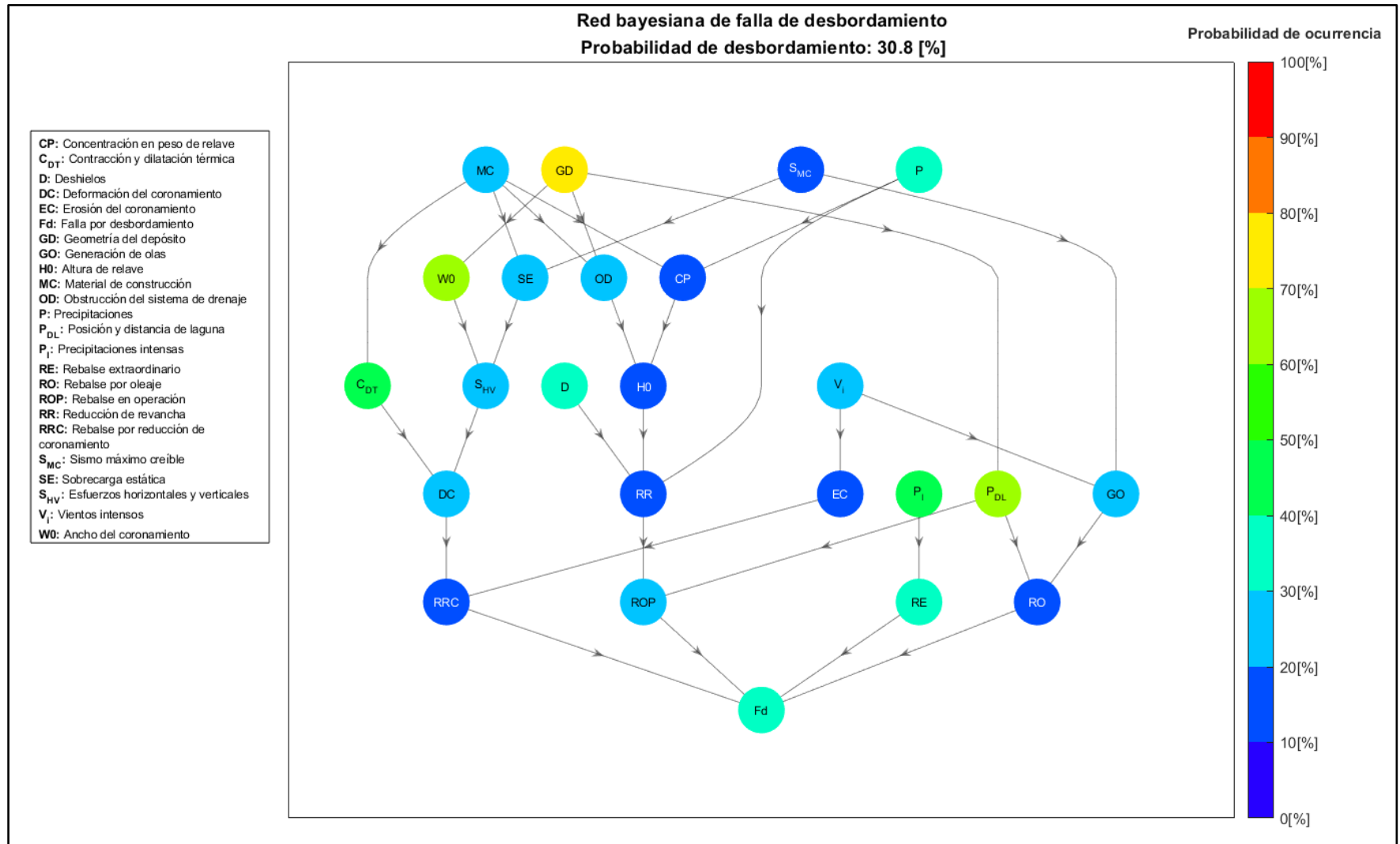


Figura 7-6: La falla por desbordamiento es la falla más común y se debe a los rebales por aumento de laguna. En esta falla, mayor impacto viene dado por el mal monitoreo de los eventos naturales y por una construcción deficiente – Elaboración propia.

Al evaluar las probabilidades de ocurrencia de cada red, se observa que cada mecanismo tiene un respectivo valor. Este valor indica la probabilidad de ocurrencia, mientras que el valor restante es asociado a otro tipo de falla no evaluada en la red.

Tomando en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada mecanismo de falla, se obtiene que una suma que no da un total de 100 [%]. Esto debido a que existe un rango de probabilidad asociado a otros mecanismos no estudiados en este trabajo (**Figura 7-7**).

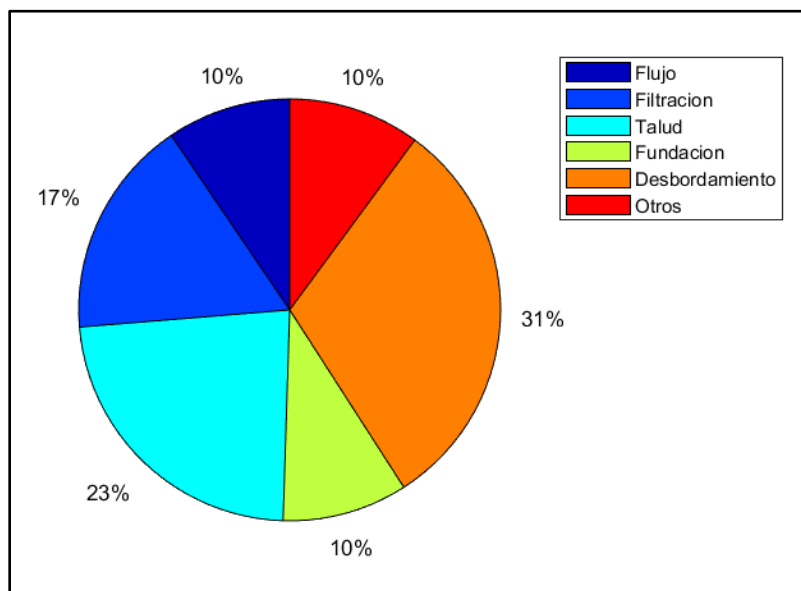


Figura 7-7: Probabilidad de ocurrencia de cada mecanismo de falla obtenido mediante redes bayesianas. En una proyección a 50 años, se espera que la falla más común sea el desbordamiento – Elaboración propia.

Las probabilidades de ocurrencia tienen un comportamiento similar a las probabilidades que se representan a una escala mundial el catálogo histórico de WISE (**Figura 7-8**) [6]. Esto se debe a que para estimar las probabilidades a priori y condicionales dentro de la etapa de edición se emplearon parámetros a escala mundial y suposiciones propias, ya que la información escaseaba respecto a sucesos que ocurrieron en Chile.

Si se hace una comparación sobre las probabilidades de falla en tranques de Chile, es evidente que debe existir un replanteamiento de las probabilidades incluidas en el modelo. Un ejemplo de ello, es que la probabilidad de una falla de flujo es de 50 [%] que es 5 veces mayor a lo que representa el modelo calculado [22].

Esta diferencia tan abrupta en las probabilidades se da principalmente al peso de la variable sísmica y al terreno donde se construye el tranque (**Figura 7-9**). Además, en Chile no se han dado casos de fallas por erosión interna, aun cuando hay casos registrados de roturas de tuberías, estas no han culminado en una falla [22]. Un ejemplo es la rotura de tuberías de un tranque de la Minera Las Cenizas [47].

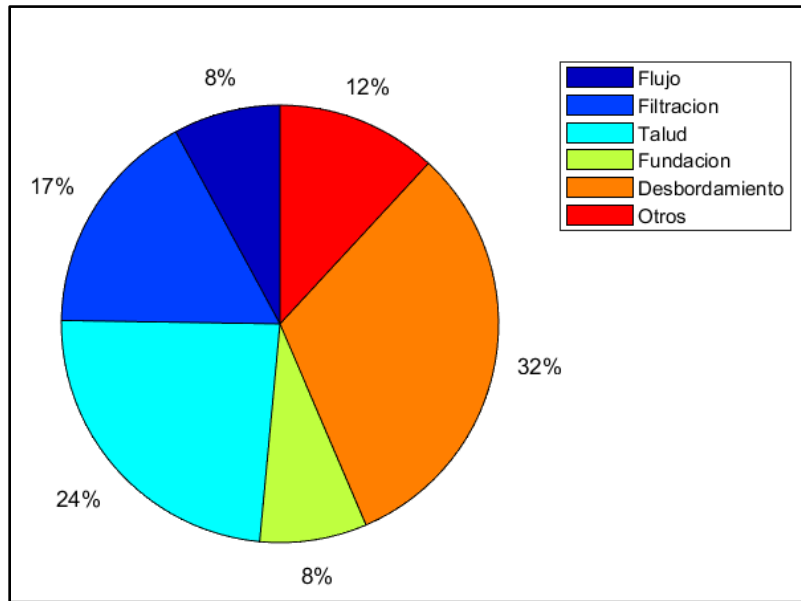


Figura 7-8: Probabilidades de ocurrencia de fallas en tranques de relave ubicados en todo el mundo [6].

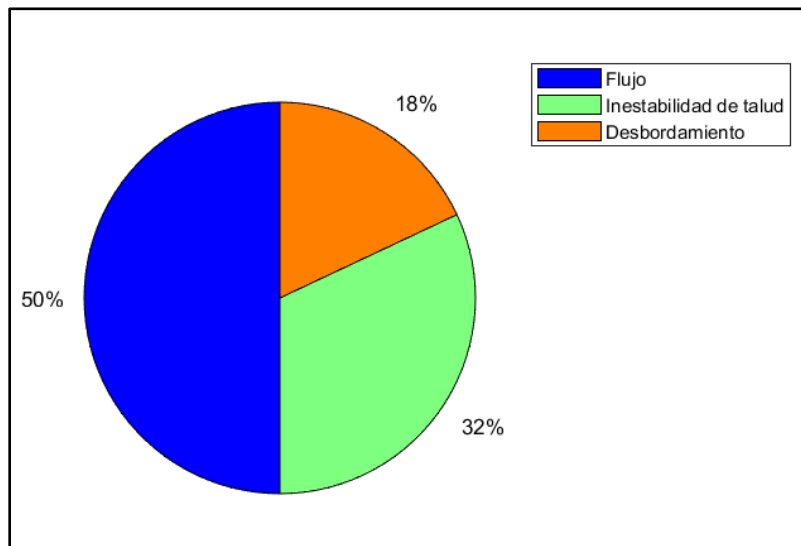


Figura 7-9: Probabilidades de ocurrencia de los principales mecanismos de falla en Chile [22].

Conociendo las probabilidades de la etapa de edición de las redes bayesianas, el siguiente paso es detallar cuáles son parámetros conocidos del colapso del Tranque Las Palmas. Posteriormente se analizarán estos parámetros para determinar la falla que el modelo considera como más probable. Hay que considerar que al plantear una etapa de inferencia que afecta a 5 redes distintas, es posible que la probabilidad total exceda el 100 [%]. Esto se debe principalmente a las variables conocidas e implicadas en cada caso.

7.2.2 Caso de estudio: Tranque Las Palmas

El Tranque Las Palmas es un tranque que almacenaba relaves de oro ubicado en la comuna de Péncahue, Región del Maule (Chile) a unos 30 kilómetros de la ciudad de Talca, la compañía minera a cargo era Minera Las Palmas S.A. [48].

Su construcción comenzó en 1981, considerando un terreno con una inclinación Aguas arriba de $H: V= 4:1$, mientras que Aguas abajo del tranque era una pendiente de 15:1 [40]. Estas inclinaciones son superiores a las permisibles en cada caso, por lo que en un principio se puede considerar un error en la etapa de construcción.

Los muros de contención fueron desarrollados por medio del método aguas abajo, lo que es aceptable, teniendo en cuenta que una década atrás fue prohibido el método aguas arriba y que aún no se evaluaba el uso de método eje central.

El año 1997, el tranque fue cerrado y como medida de prevención, se recubrió el relave almacenado con una capa arcillosa para evitar problemas de erosión y posible fallas. Para esa fecha, el muro de contención de mayor altura rondaba los 28 [m], mientras que el depósito abarcaba un ancho de hasta unos 400 [m] (**Figura 7-10**).

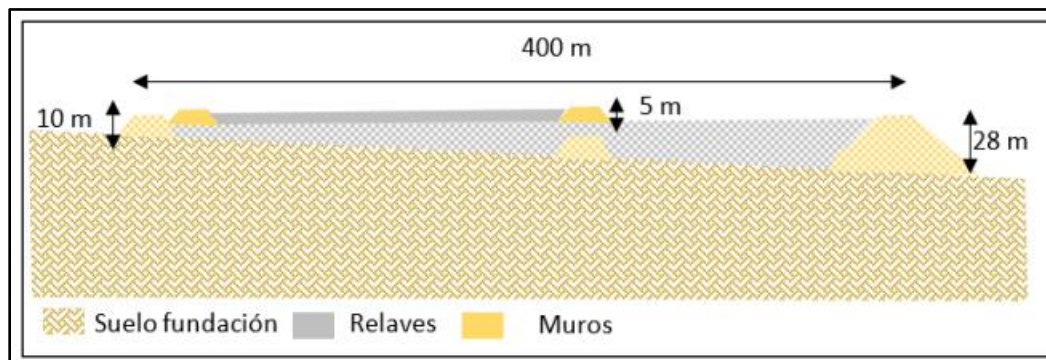


Figura 7-10: Tranque Las Palmas en 1997. Corresponde a la 4ª etapa de expansión que buscó resguardar el depósito [48].

Durante los siguientes años, existen estudios que afirman que aumentó un proceso de saturación de los suelos debido a la presencia de aguas subterráneas que no habían sido descubiertas con anterioridad [22]. Esta saturación provocó una Licuefacción de los suelos que, para este estudio, será considerado como una Licuefacción previa al sismo.

El 27 de febrero de 2010 se registra uno de los mayores sismos ocurridos a la fecha en cuanto a magnitud. Este terremoto ocurrió en la Región del Biobío, con una magnitud de $M_w=8.8$, trayendo consigo graves daños a nivel nacional, principalmente en su epicentro y la Región del Maule. Para el estudio, el sismo es considerado como un sismo de magnitud sobre 7.0.

A raíz del sismo, hubo daños a una gran variedad de tranques entre la Región de Valparaíso, hasta la Región del Maule. Entre ellos, el tranque que más sufrió daños fue el Tranque Las Palmas [49].

Según diversos autores, el tranque sufrió una falla de flujo, ocasionada por la Licuefacción y pérdida de resistencia al corte del suelo [50]. Esta pérdida podría estar ligada a la presencia de terrazas escalonadas formadas a partir del sismo, mientras que la Licuefacción pudo ocurrir previamente debido a la saturación del suelo.

Además de terrazas escalonadas, en el suelo del depósito fue posible encontrar cráteres de arena, que son el resultado de un incremento en la presión de poros de los suelos (**Figura 7-11**). Otro factor que pudo provocar los cráteres tiene que ver con la nula compactación del suelo producto del deficiente monitoreo de este [11].



Figura 7-11: La presencia de ebulliciones de arena en el suelo reafirman la posibilidad de una falla de flujo [22].

Durante las fechas en que sucedió el sismo y el colapso del tranque, no se registraron precipitaciones intensas, lo que descarta en gran medida la posibilidad de un rebalse extraordinario [51]. Finalmente, se realizaron estudios post colapso para determinar la concentración en peso del relave almacenado, obteniendo un valor de 0.65, lo cual es un rango normal, considerando el contenido de Laguna presente en estos depósitos [48].

7.2.3 Resultado de la etapa de inferencia

Del inciso anterior, se desprenden los estados conocidos de los siguientes parámetros:

- Precipitaciones intensas: No ocurren.
- Concentración en peso del relave: Normal (o baja probabilidad de generar falla).
- Saturación del suelo: Ocurre.
- Pérdida de resistencia al corte en suelo: Ocurre.
- Sismo= Magnitud sobre 7,0.
- Licuefacción previa del suelo.

Por medio del programa Elvira, se determina que el mecanismo de falla más propenso a ocurrir en base a los parámetros es la falla de flujo. Esto se da considerando la cantidad de parámetros y la probabilidad de falla obtenida (**Figura 7-12**).

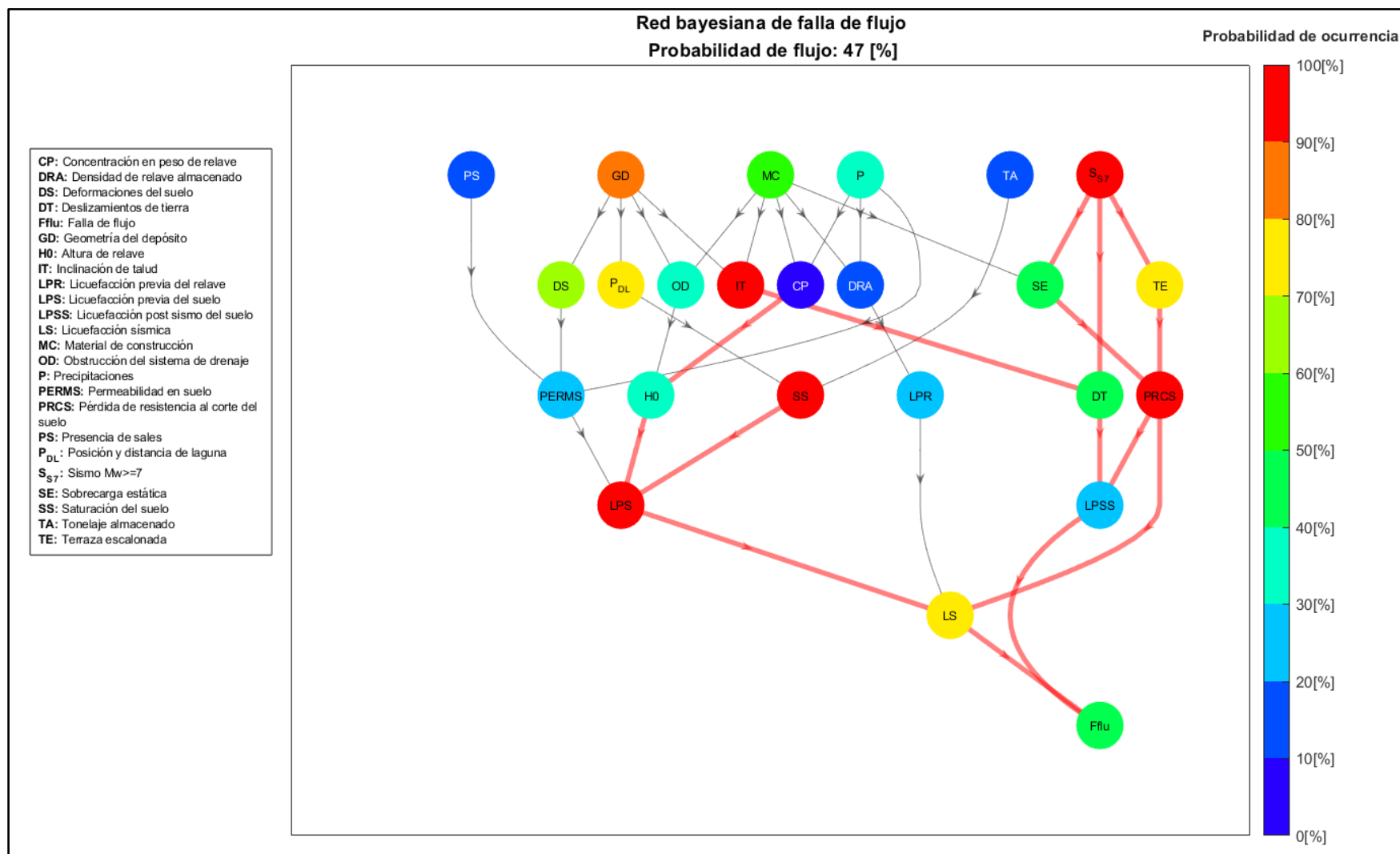


Figura 7-12: Red bayesiana del mecanismo de falla más probable en base a información del Tranque Las Palmas. Los arcos de color rojo indican la influencia de los parámetros conocidos hasta el mecanismo de falla – Elaboración propia.

La probabilidad de falla de flujo tuvo un alza desde el 10 al 47 [%], llegando a un aumento cercano a 5 veces respecto a la etapa de edición de este mecanismo. Respecto al resto de probabilidades, tuvieron una disminución considerable (Anexo A: Gráficos y tablas de información: **Tabla 11-3**).

Una vez que se conocen los estados de ciertos nodos dentro de las redes, esto provoca un efecto en los nodos alrededor, las cuales pueden ser calculadas mediante el teorema de Bayes (Ec: (7-1), el cual dicta que se puede estudiar las implicancias que generan conocer un nodo dependiente sobre su causa.

$$P(A|B) = \frac{P(A) \times P(B|A)}{P(B)} \quad (7-1)$$

Donde:

- $P(A|B)$ = Probabilidad a posteriori de que ocurra una causal dado un efecto.
- $P(A)$ = Probabilidad a priori de la causal.
- $P(B|A)$ = Probabilidad condicional de que ocurra un efecto dada una causa.
- $P(B)$ = Probabilidad a priori del efecto.

A raíz de la información obtenida se obtuvo un alto índice de ocurrencia de la falla de flujo, sin embargo, la mayor influencia la otorga la presencia de una pérdida de resistencia al corte del suelo y de las licuefacciones previas del suelo. En caso de no conocer alguna de estas causales, la probabilidad puede descender hasta el orden de 20-25 [%].

La saturación de los suelos es un parámetro que en este caso se considera como un efecto de la Laguna y del tonelaje almacenado. Sin embargo, un factor que podría incluirse a futuro es la presencia de agua subterránea o superficial que se encuentre en un radio que pueda influir en la capacidad del suelo.

A partir de la red bayesiana (**Figura 7-12**), se desprende que, al conocer parámetros como las causales directas o formadores de falla, el resultado de cual mecanismo es más probable que ocurra es evidente.

Sin embargo, no se puede olvidar que los problemas pueden provenir desde los inicios de la planificación del tranque, aun cuando no sean visibles los problemas. Por este motivo, se debería evaluar un estudio más en profundidad de la etapa de diseño hasta la etapa de monitoreo.

Entre las posibles problemáticas relacionadas al modelo se da que en un caso donde más de un mecanismo genere un colapso de tranque, el modelo no puede arrojar un resultado aceptable. De modo que se debería tomar en cuenta un estudio enfocado tanto en el uso de las redes bayesianas como una resolución propia donde se elijan los mecanismos con mayores parámetros conocidos y con las mayores probabilidades de falla.

8. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era la propuesta de una hipótesis que permita calcular la probabilidad de ocurrencia de los diversos mecanismos de falla que afectan a los tranques en estado de inactividad o abandono en Chile. Para ello se realizó una recopilación de información sobre los mecanismos más comunes que existen.

A raíz de la recopilación, el segundo paso fundamental era poder determinar las relaciones e implicancias entre las variables que puedan generar cada mecanismo, así como también buscar variables en común.

Las probabilidades a priori obtenidas por medio de datos históricos sirven como precursores para el desarrollo de las redes bayesianas. Sin embargo, debido a la antigüedad que poseen los tranques, es muy posible que no se encuentre información específica acerca de los parámetros evaluados. Por ese motivo, es necesario realizar suposiciones en función a la recopilación sobre las posibles probabilidades restantes.

El modelo final contempla el uso de 5 redes bayesianas, las cuales, corresponden a cada mecanismo de falla estudiado. Las probabilidades obtenidas se asemejan a los resultados obtenidos en los datos históricos de WISE. De esa manera, se puede determinar que, si bien se omiten variables de estudio, es un acercamiento lo suficientemente aceptable para una primera aplicación de las redes bayesianas.

En la etapa de inferencia fue posible evaluar el modelo, considerando que el Tranque Las Palmas tuvo un colapso debido a una falla de flujo. Los resultados de esta etapa permitieron corroborar que el modelo puede funcionar correctamente si es que se conocen bien las causales que dieron pie a la falla, así como también la falla que ocurrió.

Hay que considerar que en caso de que un tranque sufra más de una falla, el modelo no sería capaz de determinar si es que ocurren ambos mecanismos. Esto dado que cada red bayesiana actúa de forma independiente de cada a los parámetros formadores de falla. El mejor acercamiento posible sería si existe más de un mecanismo con una alta probabilidad de ocurrencia y que de forma manual se caracterice que el resultado viable es considerar ambos casos.

Para ello, las redes bayesianas deberían trabajarse como si fuera una sola red que considera cada variable implicada. De ese modo, se podría estimar de forma cerrada las mayores probabilidades, vale decir, sin la presencia de posibles fallas no analizadas.

9. RECOMENDACIONES

Para un trabajo futuro que esté ligado con los cálculos probabilísticos mediante redes bayesianas, se podría implementar un estudio donde se considere el efecto del tiempo y como esto va modificando las probabilidades de cada variable. Este estudio podría realizarse con una variación temporal cada 5 años de aquí a unos 50 años, de modo que existan ciertas situaciones que generen un cambio en las probabilidades, como lo es, el cambio climático.

Respecto al cálculo de las probabilidades a priori, en caso de no obtener información relevante, una tercera opción recomendable podría ser realizar experimentos o simulaciones, que reflejen los casos de estudio y caracterizar las variables que se encuentran fuera de rango en el instante que ocurre la falla.

Otra posible consideración, sería profundizar a nivel monetario en el modelo presente, considerando que cada red bayesiana tiene una serie de parámetros que son más probables de originar fallas y que pueden ser previstos con anterioridad. De ese modo, el estudio podría evaluar donde realizar monitoreos más exigente y cuánto sería el costo de ello.

Tomando en cuenta los niveles de estudio en los diagramas de árbol, otro enfoque podría estar dirigido a considerar que existe una etapa de construcción inicial, con sus respectivos monitoreos, seguido de una etapa de expansión y posteriormente un monitoreo que transcurre después del cierre del tranque.

Por último, las variables mencionadas podrían poseer distintos estados dentro de las redes bayesianas, de modo que aumenta el costo computacional, pero podría generar una mejora a los resultados. Por otro lado, podrían considerarse nuevos parámetros como lo podría ser la presencia de aguas subterráneas o profundizar en las causales de posibles variables ya evaluadas en este trabajo.

10. REFERENCIAS

- [1] S. G. Vick, «Failure of the Omai Tailings Dam», 1996.
- [2] Sernageomin, «Depósitos de relaves - Datos Públicos de depósitos de relave». octubre de 2022. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- [3] P. Bustamante, «Relaves mineros: Un peligro latente para miles de chilenos». <https://olca.cl/articulo/nota.php?id=108212>
- [4] NASA Earth Observatory, «Jagersfontein Covered in Mining Waste», octubre de 2022. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/150497/jagersfontein-covered-in-mining-waste>
- [5] M. Rico, G. Benito, y A. Díez-Herrero, «Floods from tailings dam failures», 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.110>.
- [6] World Information Service on Energy, «Chronology of major tailings dam failures». <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
- [7] ICOLD CIGB, «Commission Internationale Des Grands Barrages». 2020. https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/general-synthesis
- [8] ExpertCivil, «Earthen Dam - Its Components, Types, Methods, Advantages & Disadvantages». <https://expertcivil.com/earthen-dam/>
- [9] UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (UCAR), «Dam Failure Concepts and Modelling». https://download.comet.ucar.edu/memory-stick/hydro/damfailure/applications_int/print.php.htm
- [10] L. Valenzuela, «Improving Risk Management in Tailings Deposits and Dams», presentado en 6th International Seminar on Tailings Management, 2019.
- [11] Sernageomin, «Guía Metodológica para Evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes», 2018.
- [12] C. Chinnarasri, S. Jirakitlerd, y S. Wongwises, «Embankment dam breach and its outflow characteristics», dic. 2004, doi: 10.1080/10286600412331328622.
- [13] Codelco, «Criterios para estudio de distancia peligrosa», Amec Foster Wheeler, 2018.
- [14] SEA y Sernageomin, «Guía trámite pas artículo 135 reglamento del SEIA», mar. 2020. https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2020/03/13/guia_pas_135.pdf
- [15] Ministerio de Minería, «Decreto Supremo 248», 2007. <https://bcn.cl/2f8x6>
- [16] Minería Chilena, «Los nuevos tranques de relaves», octubre de 2010. <https://www.mch.cl/reportajes/los-nuevos-tranques-de-relaves/#>
- [17] A. William, M. K. Hustrulid, y D. J. V. Z. McCarter, *Slope Stability in Surface Mining*. 2001.
- [18] Sonami, Sernageomin, y Bgr, «Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería - Construcción y operación de tranques de relave». 2003. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/21.construccion-operacion-tranques.pdf>
- [19] N. Ramírez, «Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves.», 2007. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>

- [20] A. Vergara, «Influencia de la reología de un relave en la distancia peligrosa mediante herramientas de fluidodinámica computacional (CFD)», Universidad Técnica Federico Santa María, 2021.
- [21] CDA, «Dam Safety Guidelines», 2007.
- [22] G. Villavicencio, R. Espinace, J. Palma, A. Fourie, y P. Valenzuela, «Failures of sand tailings dams in a highly seismic country», 2014.
- [23] G. Taguchi, «Fault tree analysis of slurry and dewatered tailings management – a framework», University of British Columbia, 2014. doi: 10.14288/1.0103393.
- [24] D. Froehlich, «Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties», 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708).
- [25] J. Lamberti, «De Canadá a Brasil, un año de grandes accidentes mineros en América», diciembre de 2015. <https://poderlatam.org/2015/12/de-canada-a-brasil-un-ano-de-grandes-accidentes-mineros-en-america/>
- [26] A. G. Rojas, «Grupo México: la polémica multinacional detrás de uno de los peores desastres de la industria minera en el país», *BBC*.
- [27] C. Migoya, «A casi 7 años del derrame minero, comunidades del Río Sonora siguen sin agua limpia», mayo de 2021.
- [28] M. Abarca, «Estudio del comportamiento dinámico de un muro de un tranque de relaves ubicado sobre suelo salino con presencia de oquedades», Universidad de Chile, 2021.
- [29] C. Sanhueza Plaza y L. Rodríguez Cifuentes, «Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales», abr. 2013, doi: 10.4067/S0718-915X2013000100003.
- [30] M. Carvajal, «Desarrollo de una metodología para análisis de estabilidad», Universidad de Chile, 2018.
- [31] M. Rodríguez Segurado, «Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona», 2005. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3363>
- [32] Earthworks, «La seguridad ante todo - Lineamientos para el manejo responsable de relaves», agosto de 2022. <https://earthworks.org/resources/safety-first/>
- [33] P. Panadero, M. P. Sweeney, y J. McElroy, «Residents calling it an environmental disaster: tailings pond breach at Mount Polley Mine near Likely, BC», agosto de 2014.
- [34] G. Novoa, «Control operacional de depósitos de relaves», 2017. <https://www.geotecniaambiental.cl/wp-content/uploads/2017/07/Presentacion-SNGM-relaves-Control-Operacional.pdf>
- [35] Tailings.info, «Merriespruit Tailings Dam Failure, Virginia, South Africa». 2023. <https://www.tailings.info/casestudies/merriespruit.htm>
- [36] R. Fell, C. Wan, J. Cyganiewicz, y M. Foster, «Time for development of internal», 2003.
- [37] Bizcommunity, «Wits study investigates why Jagersfontein dam failed», 2023.
- [38] F. B. Quesada, «Evaluación del Potencial de licuefacción de suelos», 2008.
- [39] P. C. Falla Rufasto, «Propuesta de Mejoramiento de suelos licuables mediante el uso de columnas de grava en áreas portuarias – Puerto del Callao», Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2021. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655860>

- [40] A. Hernández, «Colapso del Tranque de Relaves Las Palmas durante el sismo del Maule 2010», Pontificia Universidad Católica de Chile, 2021.
- [41] P. Concha y U. Lall, «Tailings Dams Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and Runout», 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/environments5020028>.
- [42] IBM Documentation, «Nodo Red bayesiana». <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=models-bayesian-network-node>
- [43] S. Hebert, V. Lee, M. Morabito, y J. Polan, «13.5: Teoría de Redes Bayesianas», LibreTexts Español. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/13%3A_Estad%C3%ADsticas_y_antecedentes_probabil%C3%ADsticos/13.05%3A_Teor%C3%ADa_de_Red_Bayesianas](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/13%3A_Estad%C3%ADsticas_y_antecedentes_probabil%C3%ADsticos/13.05%3A_Teor%C3%ADa_de_Red_Bayesianas)
- [44] J. C. S. Rojas, D. U. Pérez, y C. E. H. Reyes, «Definición de Redes Bayesianas y sus aplicaciones», Revista Vinculando. <https://vinculando.org/articulos/redes-bayesianas.html>
- [45] F. Díez, «Ejemplos de aplicación de Redes bayesianas». 2009. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/1/CC52A/1/material_docente/bajar?id_material=221688
- [46] Elvira, «Elvira. Manual introductorio». [En línea]. Disponible en: <http://www.ia.uned.es/~elvira/manual/manual.html>
- [47] D. Salgado, «Rotura de tubería genera derrame de relave en Cabildo: Minera Las Cenizas afirma que reparó fuga», BioBioChile - La Red de Prensa Más Grande de Chile. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-de-valparaiso/2023/07/12/rotura-de-tuberia-genera-derrame-de-relave-en-cabildo-minera-las-cenizas-afirma-que-reparo-fuga.shtml>
- [48] C. A. Quilodrán Cortés, «DISTANCIA PELIGROSA TRANQUE DE RELAVES LAS PALMAS».
- [49] Minería Chilena, «Presentan catastro de tranques colapsados», *Minería Chilena*, 3 de junio de 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.mch.cl/reportajes/presentan-catastro-de-tranques-colapsados/>
- [50] T. R. Gebhart, «POST-LIQUEFACTION RESIDUAL STRENGTH ASSESSMENT OF THE LAS PALMAS, CHILE TAILINGS FAILURE», California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, 2016. doi: 10.15368/theses.2016.130.
- [51] Weather Spark, «Talca 2010 Past Weather (Chile) -». [En línea]. Disponible en: <https://weatherspark.com/h/y/25795/2010/Historical-Weather-during-2010-in-Talca-Chile#Figures-ObservedWeather>
- [52] S. Urbano y M. Falcón, «Guía para el cumplimiento de DS248 Depósitos de relaves bajo producción de 5000 tpm», 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/GuiaDS248.pdf>
- [53] Ministerio de Minería, «Decreto Supremo 132», 2004. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=221064>
- [54] Ministerio de Minería, «Resolución 31 EXENTA», 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1171893>
- [55] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, «NCh 3394 - Suelos salinos - Mecánica de Suelos y Fundaciones». <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-tecnologica-metropolitana/mecanica-de-suelos-y-fundaciones/nch-3394-suelos-salinos/64952640>

- [56] Ministerio de Agricultura, «Estudio de prefactibilidad “Mejoramiento del sistema de riego en Río Claro de Rengo, Región del Libertador General Bernardo O’Higgins”», 2013.
- [57] F. Sofra, R. Jewell, S. Lawson, y P. Newman, «Rheological Assessment – A Road Map for Plant Designers and Operators», Australian Centre for Geomechanics, abr. 2006. doi: 10.36487/ACG_repo/663_2.
- [58] D. Celis Sepúlveda, «Análisis del modelo del balance de aguas del tranque de relave laguna sea y de su impacto económico en los procesos de Minera Escondida Limitada», Pontifica Universidad Católica de Valparaíso, 2012. [En línea]. Disponible en: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCF3375_01.pdf
- [59] Consejo Minero, «Anglo American - El Torito». [En línea]. Disponible en: <https://consejominero.cl/plataformas-digitales/plataforma-de-relaves/fichas-relaves-cm/anglo-american/>
- [60] E. Carnero y G. Carnero, «Análisis numérico de infiltración de agua en un suelo residual no saturado utilizando la curva de retención de agua», oct. 2018, doi: 10.18271/ria.2018.421.
- [61] Consejo Minero, «Anglo American - Las Tórtolas». [En línea]. Disponible en: <https://consejominero.cl/plataformas-digitales/plataforma-de-relaves/fichas-relaves-cm/anglo-american/>
- [62] Instituto Nacional de Normalización, «Nch1726 - Determinación de las densidades máximas y mínimas y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos.», 1980. https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh1726Of_1980.pdf
- [63] A. Opazo, «Roturas de ductos de relave, derrames de desechos mineros: ¿Quién se hace cargo?», El Ciudadano. [En línea]. Disponible en: <https://www.elciudadano.com/chile/roturas-de-ductos-de-relave-derrames-de-desechos-mineros-quien-se-hace-cargo/08/30/>
- [64] R. A. Parish y R. A. Rhea, «Chapter 10 - Piping Arrangement Drawings, Sections, and Elevations», en *Pipe Drafting and Design (Fourth Edition)*, Boston, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128220474000030>
- [65] M. A. Sepúlveda, «Determinación de la resistencia al corte superficial de relaves convencionales mediante el desarrollo e implementación de una veleta de corte manual», Universidad de Talca, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.utalca.cl/bitstream/1950/12713/3/2020A000457.pdf>
- [66] R. Espinace *et al.*, «Evaluacion Del Efecto Eolico en Tranques De Relave», 2006, https://www.academia.edu/59160987/Evaluacion_Del_Efecto_Eolico_en_Tranques_De_Relave
- [67] P. Quiroz, «Análisis de deformaciones estáticas en muros de depósitos de relaves tradicionales», 2021.

11. ANEXO A: GRÁFICOS Y TABLAS DE INFORMACIÓN

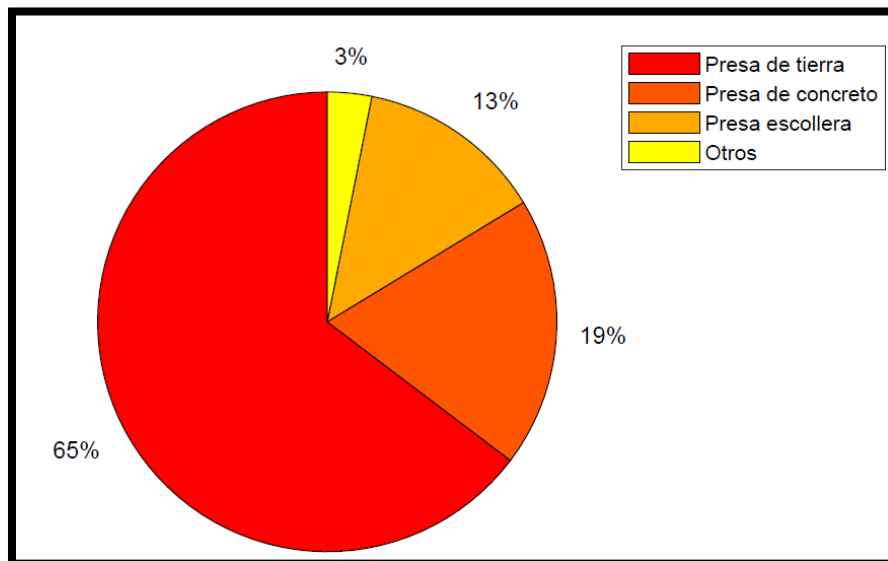


Figura 11-1: Representación del material de construcción de los muros de contención. De un total de 58.713, el 65% corresponden a presas de tierra [7].

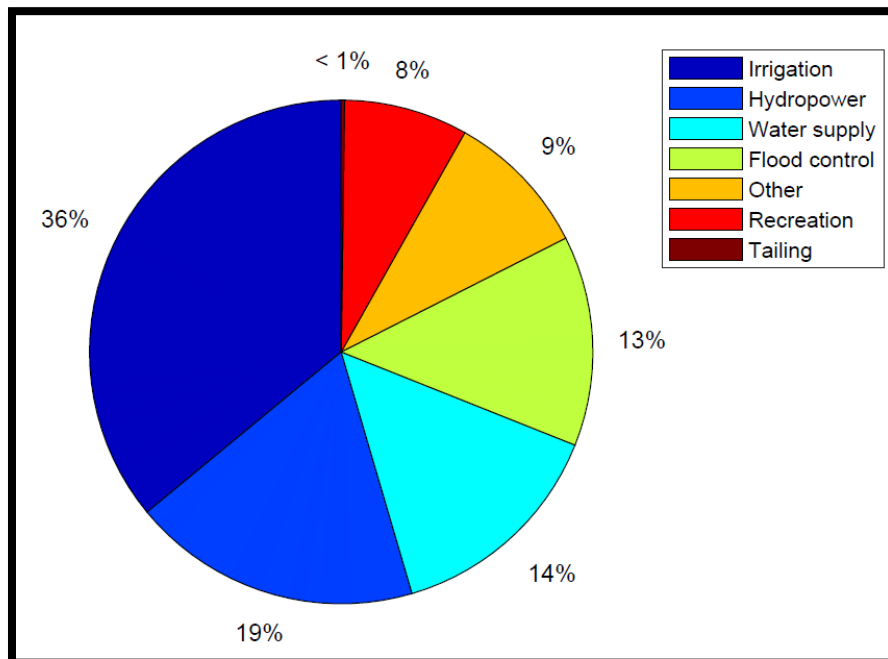


Figura 11-2: Usos que tienen las grandes represas. La baja participación en desechos tiene relación con la gran demanda de material contenido que debe tener el depósito [7].

Tabla 11-1: Registro de presas de relave con el que se obtuvo la profundidad de brecha de la falla por talud [13].

Depósito de relaves	Ubicación	Fecha de la falla	Altura presa H [m]	Ancho brecha [m]	Profundidad brecha, HB	Razón B/H	Razón H/HB
Huogudu tin tailings pond	China	26-sep-62	19	79	14	4.16	0.74
Deneen Mica Yancey	USA	01-jun-74	18	60	18	3.33	1.00
Bafokeng	South Africa	11-nov-74	20	130	-	6.50	-
Mochikoshi No. 1	Japan	14-ene-78	28	73	14	2.61	0.50
Mochikoshi No. 2	Japan	15-ene-78	23	65	22	2.83	0.96
Phelps -Dodge	USA	13-oct-80	66	215	35	3.26	0.53
Balka Chuficheva	Russia	20-ene-81	25	55	-	2.20	-
Stanci	USA	25-ago-89	9	75	-	8.33	-
Tapo Canyon	USA	17-ene-94	24	60	24	2.50	1.00
Placer Bay	Philippines	02-sep-95	17	100	-	5.88	-
Gullbridge	Canada	17-dic-12	7	50	7	7.14	1.00
Fundao	Brazil	05-nov-15	110	520	90	4.73	0.82

Tabla 11-2: Parámetros involucrados en los mecanismos de falla – Elaboración propia.

Parámetro	Tipo de falla	Efectos provocados	Solución o prevención	Referencias
Geometría del depósito	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla por filtración Falla de flujo	Diferencias y/o incongruencias en la geometría diseñada y en su crecimiento.	Respetar la geometría presentada en la etapa de diseño y en la planificación de expansión.	[52]
Material de construcción	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla por filtración Falla de flujo	Error en etapa de diseño relacionado con el tipo de material y la granulometría del relave y del muro.	Trabajar con máximo 20% de partículas bajo malla #200. La granulometría debe evitar segregación del relave.	[15] [53]

Parámetro	Tipo de falla	Efectos provocados	Solución o prevención	Referencias
Tonelaje almacenado	Falla de fundación Falla por filtración	Error en etapa de diseño y de monitoreo relacionado con el relave total depositado.	El tonelaje para operar debe ser aprobado por SERNAGEOMIN.	[54]
Presencia de sales	Falla de fundación Falla por filtración Falla de flujo	Un mayor contenido de sales genera suelos solubles en agua. La presencia de sales puede aumentar las filtraciones en el suelo.	El contenido de sales no puede exceder el 10% de una cimentación natural. De ser el caso, debe ser removido.	[55] [28]
Posición y distancia de la Laguna	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla de filtración Falla de flujo	La cercanía de la Laguna al muro aumenta los problemas de tipo hidráulico.	La Laguna debe estar lo más alejada posible del muro. En el plan de cierre del tranque se debe considerado el secado de las Aguas claras.	[15] [53]
Ancho del Coronamiento	Falla por desbordamiento Falla de talud Falla de flujo	Un ancho de Coronamiento deficiente puede aumentar los esfuerzos verticales y horizontales en el depósito.	Por normativa Chilena, el ancho no puede ser inferior a 2 metros. Una forma de medir el ancho sería entre [8-12]% de la altura del muro.	[15] [56]
Inclinación del talud	Falla de fundación Falla de talud Falla de flujo	La inclinación pronunciada genera deslizamientos de tierra e inestabilidades de talud.	La razón H: V debe ser 2:1 Aguas arriba al muro y menor a 4:1 Aguas abajo. El factor de seguridad debe dar superior a 1,2.	[15]
Grado de compactación del muro	Falla de talud Falla por filtración	Una compactación deficiente reduce la resistencia del muro y genera poros por donde ocurre filtración.	Las capas del muro deben tener un grosor entre 30 a 50 [cm]. Ensayo con un Proctor estándar debe dar sobre 95% en densidad.	[52]
Fenómenos naturales	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla por filtración Falla de flujo	La actividad sísmica debilita el depósito. Las precipitaciones aumentan el nivel contenido y en la Licuefacción del muro.	Se debe presentar el vertedero de emergencia en el PAS. Chile al ser un país sísmico debe realizar estudios de las aceleraciones sísmicas.	[14] [19]

Parámetro	Tipo de falla	Efectos provocados	Solución o prevención	Referencias
Concentración de peso en relave	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla de flujo	A medida que sea menor, aumentan las deformaciones en el talud y la Licuefacción del suelo.	Controlar el material que ingresa al depósito. Implementar densímetros para estudiar el Cp. Idealmente se debe mantener un Cp sobre el 50%.	[57] [58] [19]
Obstrucción del sistema de drenaje	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla por filtración Falla de talud Falla de flujo	Un estancamiento de drenes aumenta el nivel del depósito, las presiones internas y genera filtraciones por otros medios.	Realizar estudios del caudal que es capaz de recolectar el drenaje durante la operación. Informar a la DGA la ubicación del dren, sus características y el caudal a drenar.	[59] [53]
Efecto de la temperatura (dilatación y contracción térmica)	Falla por desbordamiento Falla de talud	Las fluctuaciones de temperatura pueden inducir la formación de grietas, erosión y deformaciones en el muro.	Cuando hay temperaturas bajo el límite permitido se debe paralizar la deposición de arenas. Emplear material con baja propiedad térmica como la arcilla.	[15]
Sobrecarga estática	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla de flujo	La presencia de sobrecarga provoca pérdida de resistencia, deformaciones del muro, Licuefacción y hundimientos del suelo.	Respetar la máxima carga estática definida en el diseño. Se debe estudiar el efecto de la sobrecarga estática frente a un evento sísmico de gran magnitud.	[40]
Saturación del suelo	Falla de fundación	Una vez que el suelo es saturado, este pierde su resistencia hasta que se produzca un hundimiento.	Uso de piezómetros para regular el Nivel freático. Mantener alejada la Laguna del muro y del suelo.	[60] [15]
Nivel freático del depósito	Falla de fundación Falla por filtración	Mientras más cerca de la superficie, se forman asentamientos diferenciales y filtraciones de relave al suelo.	El Nivel freático mínimo del muro y depósito debe ubicarse 10 metros bajo la cimentación. Instalar piezómetros en el muro y depósito para un mejor control.	[30] [59]
Deformaciones del suelo	Falla de fundación Falla por filtración Falla de flujo	La presencia de deformaciones excesivas produce asentamientos diferenciales y alteran la permeabilidad del suelo.	Para controlar se pueden emplear asentímetros, los cuales, miden el hundimiento del suelo. Monitoreo por medio de piezómetros, acelerómetros y Extensómetro.	[61]

Parámetro	Tipo de falla	Efectos provocados	Solución o prevención	Referencias
Nivel freático del muro	Falla de talud Falla por filtración	Cuando el Nivel freático del muro es elevado, aumenta la humedad de este, lo que induce erosiones internas y deformaciones.	Se puede instalar un dren en la base del muro para disminuir el Nivel freático. Instalar piezómetros en el muro y depósito para un mejor control.	[15] [59]
Densidad del relave almacenado	Falla de flujo	La densidad influye en la capacidad del material a sufrir una Licuefacción. A menor densidad, menos compacto estará el relave.	Tomar muestras del muro para comprobar la densidad del material. Realizar cálculo de densidad en etapa de diseño para estimar los límites que se deben regularizar.	[19] [62]
Rotura de tuberías	Falla de filtración	Las roturas de tuberías dan paso a la liberación del material contenido. Es un parámetro recurrente relacionado con depósitos mineros.	Cambiar las tuberías de forma regular. En caso de rotura detener las operaciones.	[63]
Altura del relave	Falla por desbordamiento Falla de fundación Falla de talud Falla de flujo	Variaciones en la altura alteran la Revancha. Un aumento de altura induce una mayor carga en el muro y una Licuefacción del suelo.	La Revancha no puede ser inferior a 1 metro en ninguna situación. Hacer mantenimiento de drenes para evitar estancamiento. Respetar y regular la altura del relave según la etapa de diseño.	[61] [15]
Deslizamientos de tierra	Falla de fundación Falla de talud Falla de flujo	Los deslizamientos de tierra generan deslizamientos del talud, inestabilidades y Licuefacción del suelo.	Control de la vegetación, ya que puede ayudar a absorber las filtraciones de agua o la presencia de raíces puede inestabilizar el talud.	[17]
Permeabilidad en suelo y en muro	Falla de filtración Falla de flujo	Un suelo permeable es más propenso a tener filtración de Aguas claras. Los muros permeables provocan erosiones internas en el muro.	Emplear capas impermeables entre la fundación y las arenas depositadas. Utilizar una capa impermeable entre el muro y el relave.	[39] [19]
Presión de poros	Falla de talud Falla por filtración	Un alza de la presión de poros reduce la resistencia al corte del muro. Es clave en la erosión interna de muro y tuberías.	El uso de piezómetros regula la presión de poros en muros. Se debe mantener alejada la Laguna al muro, para evitar que aumente la presión de poros.	[59]

Parámetro	Tipo de falla	Efectos provocados	Solución o prevención	Referencias
Corrosión de tuberías	Falla por filtración	La corrosión química de las tuberías provoca erosiones internas en los drenes.	Para elegir un tipo de tubería, se debe determinar el material, la temperatura y presión ideal y su resistencia tanto a la erosión como la corrosión.	[64]
Pérdida de resistencia del suelo	Falla de fundación	Una reducción de capacidad de carga del suelo genera socavaciones del suelo.	No existe un rango permisible de resistencia, sin embargo, se considera que debe ser tal que se obtenga un factor de seguridad igual o superior a 1,2.	[30]
Resistencia al corte del suelo	Falla de flujo	La presencia de terrazas escalonadas debilita la resistencia al corte del suelo, provocando a una Licuefacción sísmica.	Debe ser tal que se cumpla el factor de seguridad sobre 1.2. Emplear material con alta resistencia al corte como el concreto o la roca sólida.	[15] [65]
Generación de olas	Falla de desbordamiento	La generación de olas puede inducir un rebalse debido al efecto del viento, presencia sísmica y la posición de la Laguna.	No existe un límite definido para las alturas de las olas, pero se pueden realizar monitoreos para evaluar si la Revancha actual puede evitar el rebalse.	[11]
Erosión del Coronamiento	Falla de desbordamiento	La erosión del muro por los vientos y desgaste del material alteran la estabilidad mecánica, operacional y ambiental.	Implementar vegetación que contrarreste la acción del viento. Evaluar la erosión que sufre el muro en todas las etapas desde el diseño hasta el cierre del depósito.	[66]
Deformación del Coronamiento	Falla de desbordamiento	Las deformaciones del Coronamiento dependen de la altura del muro, así como del desgaste del material y el tiempo.	Para regular las deformaciones se emplean celdas de asentamiento las cuales monitorean los posibles asentamientos que tiene el muro.	[67] [30]

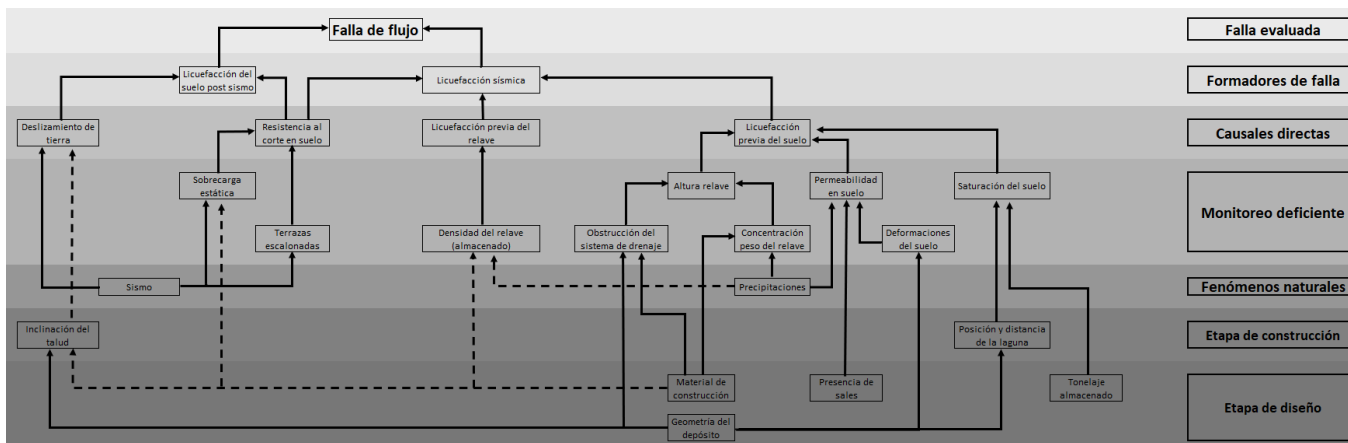


Figura 11-3: Diagrama de árbol de la falla de flujo – Elaboración propia.

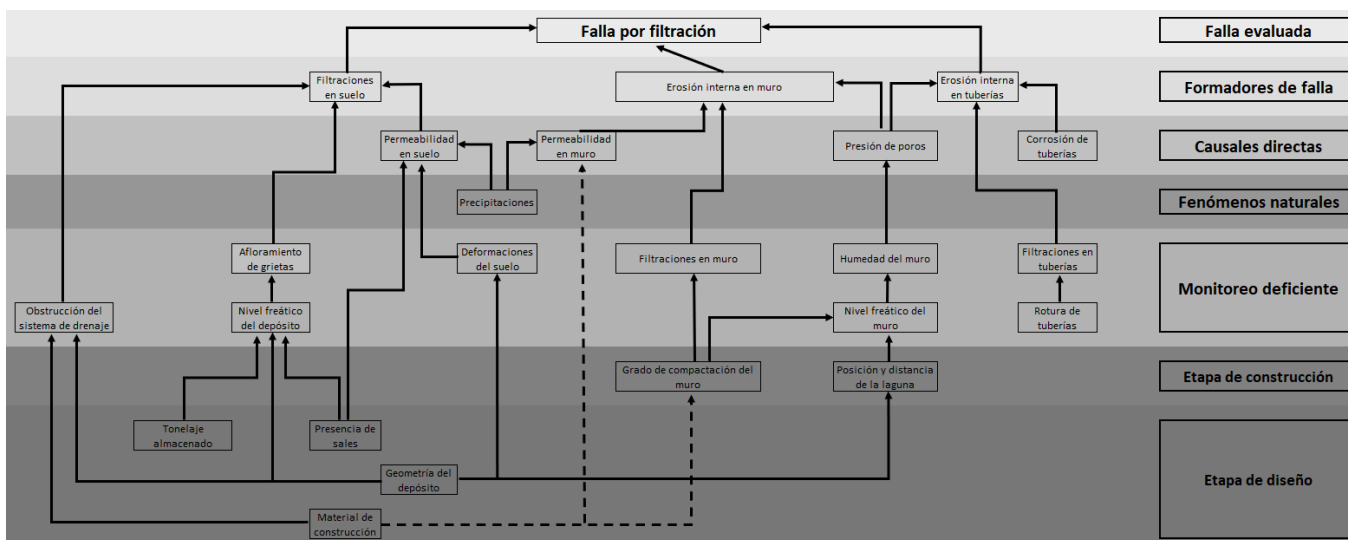


Figura 11-4: Diagrama de árbol de la falla por filtración – Elaboración propia.

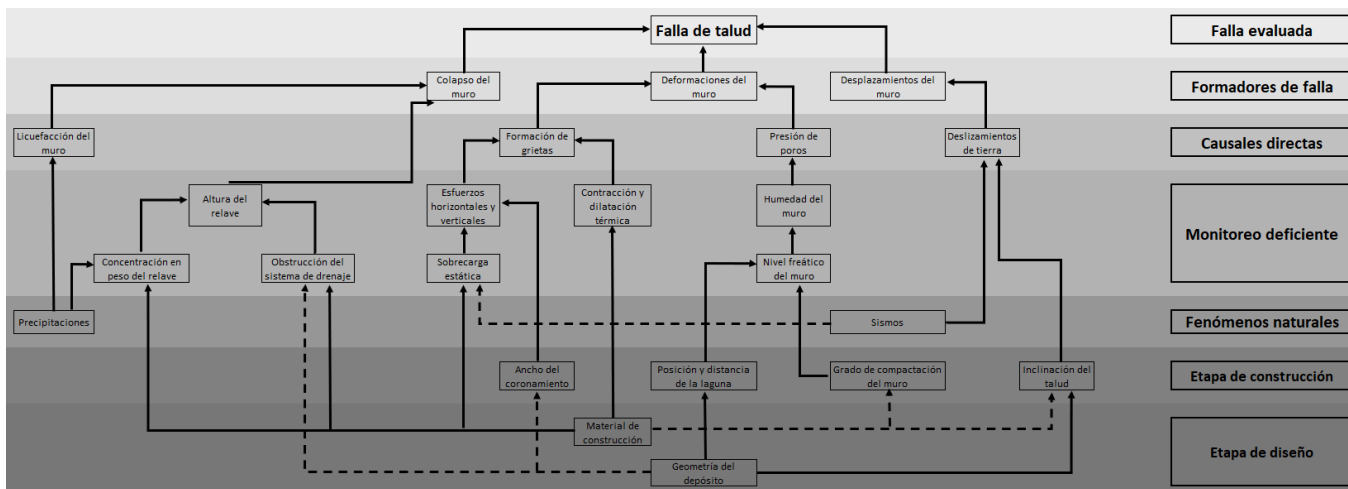


Figura 11-5: Diagrama de árbol de la falla de talud – Elaboración propia.

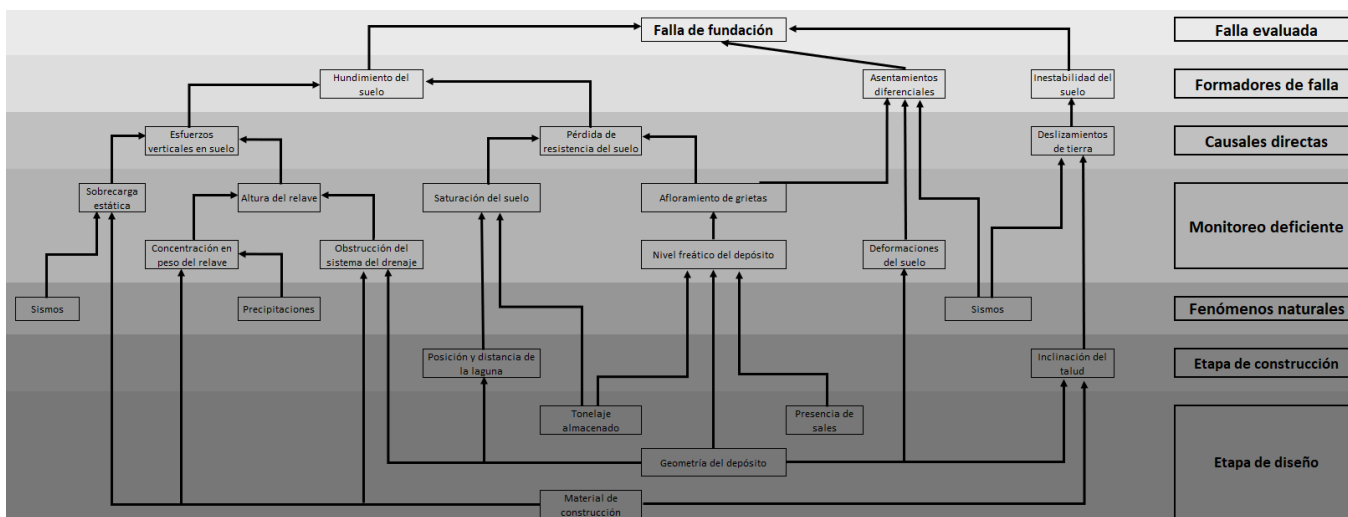


Figura 11-6: Diagrama de árbol de la falla de fundación – Elaboración propia.

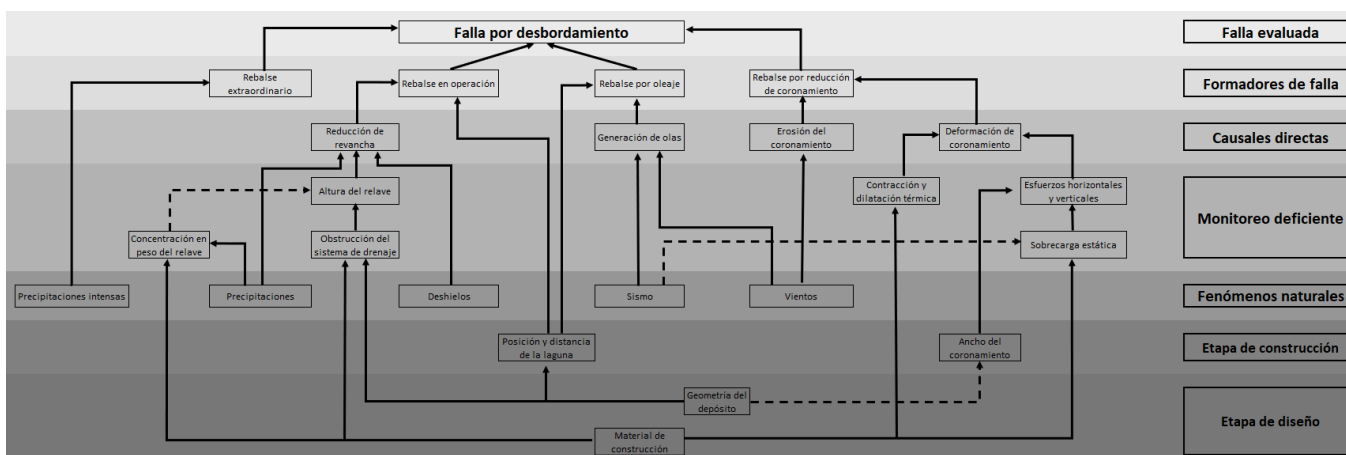


Figura 11-7: Diagrama de árbol de la falla por desbordamiento – Elaboración propia.

Tabla 11-3: Probabilidad de falla según caso de estudio – Elaboración propia

Mecanismo de falla	Probabilidad de ocurrencia edición	Probabilidad de ocurrencia inferencia
Flujo	9,5 [%]	47 [%]
Filtración	16,8 [%]	11,6 [%]
Talud	23,2 [%]	16,3 [%]
Fundación	9,6 [%]	8,8 [%]
Desbordamiento	30,8 [%]	9,5 [%]
Otros	10,1 [%]	6,8 [%]

12. ANEXO B: CÁLCULO DE PROBABILIDADES

Para el desarrollo de este ejemplo sobre el cálculo de probabilidades que se llevó a cabo dentro de Matlab (**Figura 12-1**) se debe que cada nodo dentro la red posee un máximo de 2 estados, donde el objetivo será estimar la probabilidad de ocurrencia de las variables D y E.

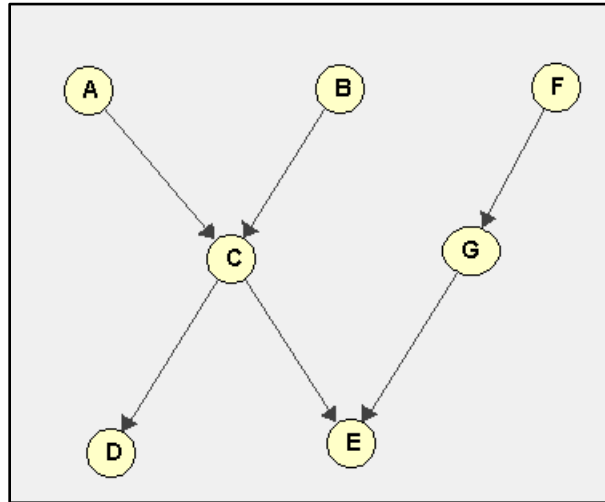


Figura 12-1: Caso de ejemplo, donde los nodos A, B y F corresponden a variables independientes – Elaboración propia.

```
clc;clear;close all;
%Lectura de datos
NAME="Combinatoria_Ejemplo.xlsx";
A1=readtable(NAME,"range","A1:C3","Sheet","PRIORI");
A2=readtable(NAME,"range","A1:K5","Sheet","CONDICIONAL");
A3=readtable(NAME,"ReadVariableNames",false,"range","A1:B6","Sheet","Predecesores_Ejemplo");
Largo1=height(A1);Largo2=height(A2);Largo3=height(A3);
Largo=Largo1+Largo2;
Probi=string(missing);
K=0;iteracion=1;
listo=zeros(Largo,1);
%Almacenamiento de probabilidades a priori
for i=1:Largo1
    Probi(i,1)=string(cell2mat(table2cell(A1(i,1)))));
    Probi(i,2)=cell2mat(table2cell(A1(i,2)));
    Probi(i,3)=cell2mat(table2cell(A1(i,3)));
    listo(i,1)=1;
end
while K==0
    for i=1:Largo2
        z=zeros(1,1);
        if listo(i+3,1)==0
            C=string(cell2mat(table2cell(A2(i,1)))));
```

```

C1=string(cellstr(table2cell(A3(:,1)))));
compara=strcmp(C1,C);contador=1;
for real=1:length(compara)
    if compara(real)==true
        z(contador)=real;
        contador=contador+1;
    end
end
%Comprueba el orden de los parámetros que generan el nodo
X1=string(cellstr(table2cell(A2(i,"Orden"))));
if contains(X1,',')==true
    A_1=strsplit(X1,',');z0=zeros(1,1);
    for idx=1:length(z)
        P1=string(cellstr(table2cell(A3(z(idx),2)))));
        depx=strcmp(A_1,P1);
        z0(depx)=z(idx);
    end
    z=z0;
end
k1=1;z1=zeros(1,1);
for i1=1:length(z)
    B=string(cellstr(table2cell(A3(z(i1),2)))));
    B1=Probi(:,1);
    compara1=strcmp(B1,B);
    for real1=1:length(compara1)
        if compara1(real1)==true
            z1(k1)=real1;
            k1=k1+1;
        end
    end
end
if length(z)<k1
    n=length(z);it=1;
    prob=zeros(1,1);
    while it<n+1
        i3=1;

```

En caso de que la variable dependa de un solo nodo, no se modifica su probabilidad condicional, mientras que sí depende de más de un nodo, se acumulan las probabilidades en un conjunto.

```

if it==1
    for i1=1:2
        prob(i1)=str2double(Probi(z1(it),i1+1));
    end
else
    for i1=1:2^(it-1)
        for i2=1:2

```

```

        Q=str2double(Probi(z1(it),i2+1));
        prob(it,i3)=prob(it-1,i1)*Q;
        i3=i3+1;
    end
end
end
it=it+1;
end
if n==1
    probable=prob;
else
    probable=prob(height(prob),:);
end
Proba=0;
it=1;it1=4;
while it<=2^n

```

Se calcula la probabilidad de ocurrencia considerando las probabilidades a priori y condicionales. Posteriormente, se almacenan para diseñar las redes bayesianas.

```

        Calculo=str2double(cell2mat(table2cell(A2(i,it1)))));
        L=Calculo*probable(it);
        Proba=L+Proba;
        it=it+1;it1=it1+2;
    end
    Probi(i+3,1)=C;
    Pro=round(Proba,5);
    Probi(i+3,2)=num2str(Pro);
    Anti=1-Pro;
    Probi(i+3,3)=num2str(Anti);
    listo(i+3,1)=1;
end
end
end
if listo==ones(Largo,1)
    K=1;
else
    X=height(Probi);
    iteracion=iteracion+1;
    if X~=Largo
        for X1=X+1:Largo
            Probi(X1,1:3)=string(missing);
        end
    end
end
end
Probabilidades=Probi;
end

```

Se recorre cada variable dentro de la red, de modo que se comprueba la probabilidad del peor caso posible. Luego, se debe comprobar a que nivel probabilístico corresponde, considerando que los rangos de probabilidad van de 10 en 10 [%].

```
for i=1:length(Probabilidades)
    prob=0;tam=1;
    value=str2double(Probabilidades(i,2));
    while prob<1.1
        if prob<=0.9
            if prob<=value && value<prob+0.1
                Color(i)=tam;
                prob=1.1;
            elseif prob==0.9
                prob=round(prob+0.1,1);
                tam=tam;
            else
                prob=round(prob+0.1,1);
                tam=tam+1;
            end
        elseif prob==1.0
            if prob<=value && value<=prob+0.1
                Color(i)=tam;
                prob=1.1;
            else
                prob=round(prob+0.1,1);
                tam=tam+1;
            end
        end
    end
end
name= cellstr(Probabilidades(:,1));
```

La variable actual corresponde a los nodos dependientes, mientras que la variable previo hace alusión a la variable que es su causal. Esto es importante para el diseño de la red, al igual, que reconocer el total de variables y su respectivo nombre.

```
for i=1:Largo3
    actual(1,i)=string(cellstr(table2cell(A3(i,1))));
    previo(1,i)=string(cellstr(table2cell(A3(i,2))));
end
%Diseño y formación de una red bayesiana
X=1.3/0.1;
G=digraph(previo,actual,[],name);
color=flipud(hsv(X));
color(1:3,:)=[];
for d1=1:length(Probabilidades)
    COLOR(d1,:)=color(Color(d1),:);
end
```

```

figure(1);
h=plot(G,"EdgeColor","k","NodeColor",COLOR,"MarkerSize",27,"ArrowPosition",0
.5,"Layout","layered");
pbaspect([1.25 1 1.25])
colores=zeros(1,3);
for i=1:length(COLOR)
    if Color(1,i)==10
        colores(i,:)=[1 1 1];
    elseif Color(1,i)<3
        colores(i,:)=[1 1 1];
    else
        colores(i,:)=[0 0 0];
    end
    text(h.XData(i), h.YData(i),h.NodeLabel(i), ...
        'VerticalAlignment','middle',...
        'HorizontalAlignment','center',...
        'FontSize', 7,'Color', colores(i,:));
end
h.NodeLabel = {};
v=strcat("Red bayesiana de ejemplo ");
title(v);
colormap(color(1:10,:));
c=colorbar;
c.Label.String="\bf Probabilidad de ocurrencia";
c.Label.Position=[1.346,1.051,0];
c.Label.Rotation=0;
x1=linspace(0,1,length(color)+1);
for x2=1:length(x1)
    X1(x2)=strcat(num2str(x1(x2)*100),"%");
end
c.TickLabels=X1;
for x=1:length(Probabilidades)
    v2_1=strcat('\bf ', "Probabilidad de ", Probabilidades(x,1));
    v2(x)=strcat(v2_1,": ", ...
        '\rm', num2str(round(str2double(Probabilidades(x,2))*100,1)), "
[%]");
end
annotation('textbox',[0.15,0.53,0.09,0.13], ...
    'String',v2,'EdgeColor','k','FontSize',7);

```

Respecto a la parte final del código, en donde se realiza el diseño y formación de las redes, hay que considerar que el caso presentado considera dos nodos dependientes no formadores de nuevos parámetros, mientras que, en el tema de memoria, cada red se enfoca en solo uno. En este caso, la probabilidad de que ocurra D es de cerca de un 50 [%], mientras que E ronda el 43 [%] (**Figura 12-2**).

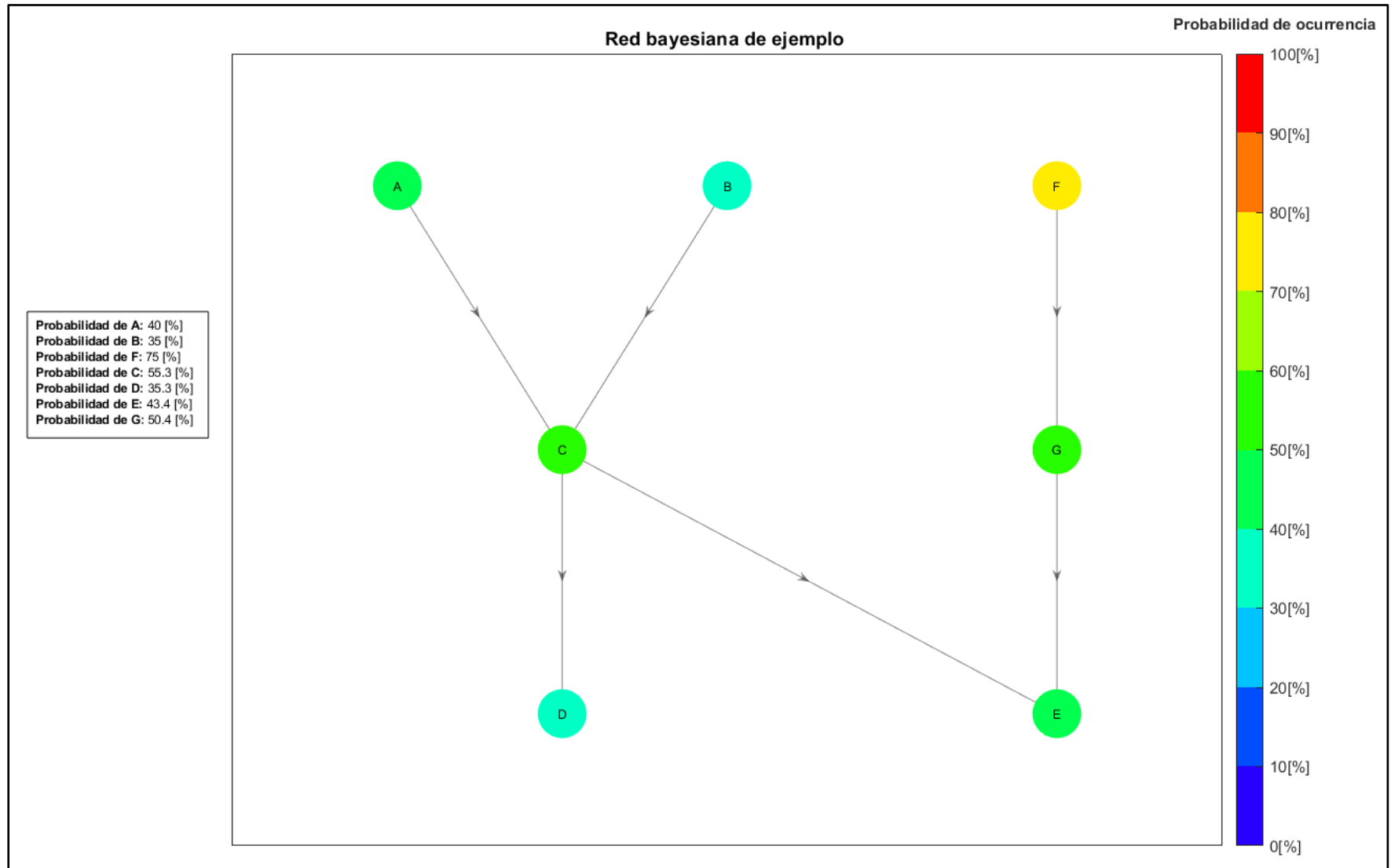


Figura 12-2: Red bayesiana de un caso de ejemplo mediante el uso de Matlab – Elaboración propia.