



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DEFINICIÓN DE UN ÍNDICE DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA DEPÓSITOS DE  
RELAVES EN BRASIL

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA, MENCIÓN INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

DAYANA TREVISAN

PROFESOR GUÍA:  
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
CHRISTIAN FELIPE IHLE BASCUÑÁN  
RAFAEL VINÍCIUS BASSO

SANTIAGO DE CHILE

2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL  
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MENCIÓN INGENIERÍA  
ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA  
POR: DAYANA TREVISAN  
FECHA: 2022  
PROFESOR GUÍA: CÉSAR PASTÉN PUCHI

## DEFINICIÓN DE UN ÍNDICE DE ESTABILIDAD FÍSICA PARA DEPÓSITOS DE RELAVES EN BRASIL

El presente trabajo tiene como principal objetivo analizar la legislación vigente sobre seguridad de presas en Brasil y utilizar la herramienta del Índice de Estabilidad Física (IEF) definido para Chile como estándar para la creación de un sistema de gestión de manejo de depósitos de relaves en Brasil. Para esto, se estudia la actual clasificación de los depósitos de relaves en Brasil mediante el Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería SIGPM (2021) donde se obtiene información de las presas que están sometidas a la Política de Seguridad de Presas, su método constructivo, su Categoría de Riesgo (CRI) y su Daño Potencial Asociado (DPA). Posteriormente, se seleccionan seis presas para analizar detalladamente su sistema de monitoreo geotécnico. Se revisa también la Ordenanza 70.389 de 2022 de la Agencia Nacional de Minería ANM, modificada tras las roturas de las presas Feijão en Brumadinho (2019) y Cachoeirinha (2022). Se identifica mediante el estudio de la Ordenanza, que todavía hay cambios necesarios para que la fiscalización sea más efectiva. Las dos presas ya citadas poseían una clasificación equivocada, ya que eran clasificadas con Categoría de Riesgo baja, lo que significaba que sus fallas no significaban un peligro para la población. Esta tesis pretende encontrar limitaciones de la actual legislación brasileña, para que no sean necesarios cambios reactivos siempre que hay una nueva falla. La adaptación del IEF para los depósitos de relaves brasileños ofrece una gestión de manejo y una alternativa de fiscalización por parte de la autoridad, que puede suplir las brechas existentes por parte de la Ordenanza actual.

*a las 270 víctimas de Brumadinho*

## **Agradecimientos**

A Jesucristo que nunca me ha dejado sola, ni siquiera un solo día, a Él por dirigirme al lugar correcto y a hacer lo correcto.

A mi madre Carmen, por creer que puedo hacer todo lo que me proponga. A mi padre Nilson por decirme siempre que debo dar lo mejor de mí, en lo que me proponga. Ustedes son mi inspiración y mi fuerza, son mi razón.

A mi hermana Aline por nunca renunciar a mí y ayudarme a tener la vida que sueño tener, fuiste fundamental para que yo lograra todo lo que ya he logrado.

A mis amigos David, Paul, José y Alejandro que me ayudaron en el camino, fueron días difíciles y de mucho aprendizaje, nunca olvidaré las noches de estudio y diversión en la casa de David.

A mi amigo Alejandro, quien me ayudó en muchos momentos difíciles de inseguridad, desesperación y soledad. Siempre de buen humor me hacías reír en medio de días tan difíciles, tienes un lugar reservado en mi caja de recuerdos.

A mi maestro César Pastén, quien con excelencia y mucho amor por su profesión me encaminó por el camino correcto para producir un trabajo relevante. Gracias por ayudarme con el idioma y por su paciencia de siempre, sin duda eres una gran inspiración.

A los profesores miembros de la comisión, Rafael Basso y Christian Ihle por la disponibilidad de tiempo para contribuir en esta tesis con sus conocimientos y correcciones.

A la Universidad de Chile por la excelencia y comprensión de las dificultades que atraviesa el estudiante durante la graduación, este centro académico siempre busca lo mejor para sus estudiantes y esto hay que reconocerlo.

Por último, pero no menos importante, gracias a mí por nunca rendirme.

# Tabla de contenido

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1    Objetivo General .....	2
1.2    Objetivos Específicos .....	2
1.3    Estructura de este trabajo .....	2
<b>Capítulo 2: Índice de Estabilidad Física para depósitos de relaves chilenos .....</b>	<b>4</b>
2.1    Índice de Estabilidad Física.....	5
2.2    Eventos y Alertas .....	7
2.3    Mecanismos de falla.....	8
2.4    Módulo M1.....	9
2.4.1    Vulnerabilidad Física .....	11
2.4.2    Factores agravantes: eventos de activación directa .....	12
2.4.3    Factores agravantes: desviaciones de diseño.....	13
2.4.4    Factores agravantes: eventos gatilladores .....	14
2.4.5    Factores agravantes: pronósticos.....	15
2.5    Módulo M2.....	15
2.5.1    Parámetros Críticos .....	16
2.5.2    Escenarios de Falla.....	19
<b>Capítulo 3: Clasificación de las presas en Brasil por medio de la legislación .....</b>	<b>24</b>
3.1    Política Nacional de Seguridad de Presas .....	25
3.2    Clasificación de los depósitos de relaves brasileños .....	28
3.2.1    Clasificación según Categoría de Riesgo (CRI).....	29
3.2.2    Clasificación según Daño Potencial Asociado (DPA) .....	34
3.2.3    Matriz de Daño Potencial Asociado y Categoría de Riesgo.....	36
3.3    Análisis de los depósitos de relaves brasileños .....	37
3.3.1    Análisis de los depósitos según sus métodos constructivos .....	39
<b>Capítulo 4: Selección y estudio de depósitos de relaves en Brasil .....</b>	<b>42</b>
4.1    Presa Azul .....	43
4.2    Presa Conceição .....	45
4.3    Presa Sossego .....	47
4.4    Presa Itabiruçu.....	49
4.5    Presa Maravilhas II.....	51
4.6    Presa Gelado.....	53
4.7    Observaciones sobre los ejemplos revisados.....	54
<b>Capítulo 5: Posibles brechas en la Legislación de Seguridad Nacional de Presas .....</b>	<b>57</b>

5.1	Política Nacional de Seguridad de Presas (PNSP) .....	57
5.2	Daño Potencial Asociado en la determinación de directrices de monitoreo .....	59
5.3	Reportes del estado de estabilidad de los depósitos de relaves .....	61
<b>Capítulo 6: Referencias utilizadas en la adaptación del IEF para los depósitos de relaves en Brasil</b>		<b>63</b>
6.1	Categoría de Riesgo – Matriz de Estado de Conservación.....	63
6.2	Guía de buenas prácticas de la Agencia Nacional de Aguas (ANA).....	68
6.3	Guía de buenas prácticas del Instituto Brasileño de Minería (IBRAM).....	68
<b>Capítulo 7: Adaptación del Índice de Estabilidad Física para depósitos de relaves en Brasil</b>		<b>70</b>
7.1	Adaptación Módulo 1 .....	71
7.1.1	Vulnerabilidad Física .....	71
7.1.2	Factores Agravantes: Activación directa.....	74
7.1.3	Factores Agravantes: Desviaciones de diseño.....	74
7.1.4	Factores Agravantes: Integridad de la Instrumentación .....	76
7.1.5	Factores Agravantes: Eventos gatilladores.....	76
7.1.6	Factores Agravantes: Pronósticos .....	79
7.2	Adaptación del Módulo 2.....	79
7.2.1	Parámetros Críticos .....	79
7.2.2	Escenarios de falla.....	88
<b>Capítulo 8: Discusión .....</b>		<b>98</b>
<b>Capítulo 9: Conclusiones .....</b>		<b>100</b>
<b>Bibliografía .....</b>		<b>102</b>
<b>Anexo .....</b>		<b>105</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Eventos y alertas .....	7
<b>Tabla 2:</b> Puntajes de la evaluación de vulnerabilidad física (Módulo M1).....	11
<b>Tabla 3:</b> Suma de los parámetros de la (VF) vulnerabilidad física. ....	12
<b>Tabla 4:</b> Parámetros de activación directa (Módulo M1).....	12
<b>Tabla 5:</b> Desviaciones de diseño (Módulo M1) .....	13
<b>Tabla 6:</b> Eventos gatilladores (Módulo M1) .....	14
<b>Tabla 7:</b> Pronósticos (Módulo M1) .....	15
<b>Tabla 8:</b> Relación de los parámetros críticos y su tipo de medición .....	17
<b>Tabla 9:</b> Informaciones detalladas del parámetro crítico PC-05: Distancia mínima entre el muro y la laguna de aguas claras. ....	18
<b>Tabla 10:</b> Clasificación relacionada a Geometría (Módulo M2).....	19
<b>Tabla 11:</b> Clasificación relacionada a Integridad externa del depósito (Módulo M2) .....	19
<b>Tabla 12:</b> Clasificación Categoría de Riesgo. (ANM, 2022) .....	29
<b>Tabla 13:</b> Matriz de Características Técnicas (CT) para la clasificación según la Categoría de Riesgo.....	30
<b>Tabla 14:</b> Matriz Estado de Conservación (EC) para la clasificación según la Categoría de Riesgo .....	31
<b>Tabla 15:</b> Matriz de Plan de Seguridad de la Presa (PS) para la clasificación según la Categoría de Riesgo.....	32
<b>Tabla 16:</b> Clasificación Daño Potencial Asociado. (ANM, 2022).....	34
<b>Tabla 17:</b> Matriz de clasificación según la Daño Potencial Asociado .....	35
<b>Tabla 18:</b> Matriz de Clase A, B, C, D y E. (ANM, 2022).....	36
<b>Tabla 19:</b> Matriz de Daño Potencial Asociado y Categoría de Riesgo de los 444 depósitos.....	36
<b>Tabla 20:</b> Depósitos con geometría desproporcionada en relación a Altura y Volumen .....	38
<b>Tabla 21:</b> Número de presas construidas con el método aguas arriba clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (64 presas en total) .....	40
<b>Tabla 22:</b> Número de presas construidas con el método de etapa única clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (204 presas en total).....	40
<b>Tabla 23:</b> Número de presas construidas con el método de eje central clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (53 presas en total). ....	41
<b>Tabla 24:</b> Número de presas construidas con el método de aguas abajo clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (123 presas en total).....	41
<b>Tabla 25:</b> Identificación de los depósitos de relaves seleccionados y analizados en este estudio ...	42
<b>Tabla 26:</b> Ficha técnica de la Presa Azul. (Souza, 2018).....	44
<b>Tabla 27:</b> Ficha técnica de la presa Conceição. (CBDB, 2012).....	45
<b>Tabla 28:</b> Ficha técnica de la presa Sossego. (CBDB, 2012).....	47
<b>Tabla 29:</b> Ficha técnica de la presa Itabiruçu. (CBDB, 2012) .....	49
<b>Tabla 30:</b> Ficha técnica de la presa Maravilhas II. (CBDB, 2012) .....	51
<b>Tabla 31:</b> Ficha técnica de la presa Gelado. (CBDB, 2012) .....	53
<b>Tabla 32:</b> Clasificación de los depósitos que están en nivel de emergencia y la ley no exige los criterios de monitoreo. ....	59

<b>Tabla 33:</b> Casos hipotéticos con DPA medio cuyas consecuencias en el caso de una rotura de presa podría ser considerado alto.....	60
<b>Tabla 34:</b> Reportes de estabilidad de depósitos de relaves en Brasil. (ANM, 2022) .....	61
<b>Tabla 35:</b> Ejemplo de Extracto de Inspección Regular (EIR) (Modificado de Neves, 2020) .....	64
<b>Tabla 36:</b> Suma de puntuación de vulnerabilidad física para depósitos de relaves brasileños. (Elaboración propia).....	71
<b>Tabla 37:</b> Adaptación de la Vulnerabilidad física (Módulo M1) .....	72
<b>Tabla 38:</b> Adaptación de factores agravantes de activación directa (Módulo M1).....	74
<b>Tabla 39:</b> Adaptación de factores agravantes de desviaciones de diseño (Módulo M1).....	75
<b>Tabla 40:</b> Adaptación de factores agravantes por integridad de la instrumentación (Módulo M1) .	76
<b>Tabla 41:</b> Adaptación de factores agravantes por eventos gatilladores (Módulo M1).....	77
<b>Tabla 42:</b> Adaptación factores agravantes por pronósticos (Módulo M1).....	79
<b>Tabla 43:</b> Parámetros críticos en la adaptación del módulo M2 .....	80
<b>Tabla 44:</b> Adaptación de parámetros críticos de geometría (Módulo M2) .....	81
<b>Tabla 45:</b> Adaptación de parámetros críticos de deformaciones (Módulo M2).....	82
<b>Tabla 46:</b> Adaptación de parámetros críticos de integridad externa del depósito (Módulo M2) .....	83
<b>Tabla 47:</b> Adaptación de parámetros críticos de aspectos operacionales (Módulo M2).....	84
<b>Tabla 48:</b> Adaptación del parámetro crítico de Documentación del diseño (Módulo M2).....	85
<b>Tabla 49:</b> Adaptación del parámetro crítico de Integridad del sistema de drenaje (Módulo 2) .....	87
<b>Tabla 50:</b> Roturas de presas de relaves en Brasil (modificado de Lima, 2016) .....	88
<b>Tabla 51:</b> Escenarios de falla en Chile y en Brasil.....	89
<b>Tabla 52:</b> Adaptación del escenario de falla IT-01 (Módulo M2).....	90
<b>Tabla 53:</b> Adaptación del escenario de falla IT-02 (Módulo M2) .....	91
<b>Tabla 54:</b> Adaptación del escenario de falla IT-03 (Módulo M2) .....	91
<b>Tabla 55:</b> Adaptación del escenario de falla LE-01 (Módulo M2) .....	92
<b>Tabla 56:</b> Adaptación del escenario de falla LE-02 (Módulo M2) .....	93
<b>Tabla 57:</b> Adaptación del escenario de falla RE-01 (Módulo M2) .....	93
<b>Tabla 58:</b> Adaptación del escenario de falla RE-02 (Módulo M2) .....	94
<b>Tabla 59:</b> Adaptación del escenario de falla EI-01 (Módulo M2) .....	95
<b>Tabla 60:</b> Adaptación del escenario de falla EI-02 (Módulo M2) .....	95
<b>Tabla 61:</b> Adaptación del escenario de falla EI-03 (Módulo M2) .....	96



## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Diagrama de la estructura del trabajo. (Elaboración propia).....	3
<b>Figura 2:</b> Modelo conceptual del IEF para Chile (Programa Tranque, 2019) .....	4
<b>Figura 3:</b> Estructura del Índice de Estabilidad Física. (modificado de Programa Tranque, 2019) ....	5
<b>Figura 4:</b> Estructura detallada del módulo M1 y M2 del IEF. (Elaboración propia) .....	6
<b>Figura 5:</b> Mecanismos de falla. (Modificado de Programa Tranque, 2019) .....	8
<b>Figura 6:</b> Estructura esquemática del Módulo M1. (Elaboración propia).....	9
<b>Figura 7:</b> Estructura esquemática del Módulo 2. (Elaboración propia) .....	15
<b>Figura 8:</b> Ejemplo de sectorización de una presa (Programa Tranque, 2019).....	16
<b>Figura 9:</b> Mecanismos de falla y escenarios de falla. (Modificado de Programa Tranque, 2019)...	20
<b>Figura 10:</b> Escenario de falla IT-02. (Modificado de Programa Tranque, 2019).....	21
<b>Figura 11:</b> Escenario de falla RE-02. (Modificado de Programa Tranque, 2019) .....	22
<b>Figura 12:</b> Escenario de falla EI-03. (Modificado de Programa Tranque, 2019).....	23
<b>Figura 13:</b> Estructura de la tesis en materia de legislación y ordenanza. (Elaboración propia).....	24
<b>Figura 14:</b> Métodos constructivos de las presas existentes en Brasil. (Elaboración propia).....	25
<b>Figura 15:</b> Número de presas incluidas y no incluidas en la PNSP según su método constructivo registradas en la ANM. ....	26
<b>Figura 16:</b> Volumen, altura y método constructivo de las 444 presas incluidas en la PNSP. DPA: Daño potencial asociado. El recuadro en rojo indica alturas inferiores a 15 m y volúmenes inferiores a 3.000.000 m <sup>3</sup> .....	27
<b>Figura 17:</b> Tipos de relaves de acuerdo a los minerales extraídos en 444 presas incluidas en la PNSP. (Elaboración propia) .....	28
<b>Figura 18:</b> Criterios para establecer niveles de emergencia de una presa de relaves (Elaboración propia) .....	33
<b>Figura 19:</b> Clasificación y nivel de emergencia de las 444 presas de relaves incluidas en la PNSP. Casos anómalos de relación altura-volumen almacenado se destacan en cuadros rojos. (Elaboración propia) .....	37
<b>Figura 20:</b> Razón de aspecto como función del volumen almacenado de las 444 presas de relaves incluidas en la PNSP. (Elaboración propia) .....	38
<b>Figura 21:</b> Presas clasificadas por clase, nivel de emergencia y tipo de minería. Presas construidas con (a) método aguas arriba (64 presas), (b) método etapa única (204 presas), (c) método eje central (53 presas) y (d) método aguas abajo (123 presas). (Elaboración propia) .....	39
<b>Figura 22:</b> Depósitos de relaves aguas abajo seleccionados y analizados en este estudio.....	42
<b>Figura 23:</b> Mapa con la ubicación de depósitos de relaves seleccionados y analizados en este estudio .....	43
<b>Figura 24:</b> Presa Azul. Coordenadas: -06°04'41.300'', -50°17'29.300'' (Google Earth, 2021) .....	43
<b>Figura 25:</b> Sección transversal de la Presa Azul. (Modificado de Souza, 2018).....	44
<b>Figura 26:</b> Presa Conceição. Coordenadas: -19°38'51.300'', -43°16'26.900'' (Google Earth, 2021) .....	45
<b>Figura 27:</b> Vista en planta de la Presa Conceição. (Modificado de CBDB, 2012) .....	46

<b>Figura 28:</b> Sección transversal de la Presa Conceição. (Modificado de CBDB, 2012) .....	46
<b>Figura 29:</b> Presa Sossego. Coordenadas: 06°25'44.792'', -50°04'12.554'' (Google Earth, 2021).	47
<b>Figura 30:</b> Sección transversal de la Presa Sossego. (Modificado de CBDB, 2012).....	48
<b>Figura 31:</b> Presa Itabiruçu. Coordenadas: -19°41'07.300'', -43°41'07.300'' (Google Earth, 2021) .....	49
<b>Figura 32:</b> Vista de la Presa Itabiruçu. (Modificado de CBDB, 2012) .....	50
<b>Figura 33:</b> Sección transversal de la Presa Itabiruçu. (Modificado de CBDB, 2012).....	50
<b>Figura 34:</b> Presa Maravilhas II. Coordenadas: -20°12'51.900'', -43°53'30.100'' (Google earth, 2021) .....	51
<b>Figura 35:</b> Vista de la Presa Itabiruçu. (CBDB, 2012) .....	52
<b>Figura 36:</b> Sección transversal de la Presa Maravilhas II. (Modificado de CBDB, 2012) .....	52
<b>Figura 37:</b> Presa Gelado. Coordenadas: -05°58'45.400", -50°08'29.100" (Google earth, 2021) .....	53
<b>Figura 38:</b> Representación de una sección típica de una presa de relaves en Brasil. (Modificado Carvalho, 2021).....	54
<b>Figura 39:</b> Balance de agua de una presa de relaves (Modificado de Soares, 1998) .....	55
<b>Figura 40:</b> Porcentaje de utilización de los instrumentos por parte de 58 presas. (Elaboración Propia, basado en CBDB 2012) .....	56
<b>Figura 41:</b> Volumen y altura de 440 presas no incluidas en la PNSP. (Elaboración propia).....	57
<b>Figura 42:</b> Ejemplos de clasificación de presas incluidas y no incluidas en la PNSB, según DPA y CRI en el SIGPM. (SIGPM, 2021) .....	58
<b>Figura 43:</b> Esquema IEF de Chile. (Elaboración propia) .....	65
<b>Figura 44:</b> Diagramas de las matrices de Categoría de Riesgo. (Elaboración propia) .....	66
<b>Figura 45:</b> Esquema IEF con los parámetros exigidos por la Ordenanza 70.389/2022 de la ANM. (Elaboración propia).....	67
<b>Figura 46:</b> Ejemplo de orientaciones retiradas de la guía de la Agencia Nacional del Agua. (ANM, 2016) .....	68
<b>Figura 47:</b> Monitoreo de Estructura de disposición de relaves. (Modificado de IBRAM, 2019)....	69
<b>Figura 48:</b> Secuencia para la adaptación del IEF.....	70
<b>Figura 49:</b> Esquema IEF con la adaptación de los parámetros. (Elaboración propia) .....	97



## Capítulo 1: Introducción

Los depósitos de relaves en Brasil han surgido de las actividades de minería iniciadas cerca de 300 años atrás. En relación a los relaves, las actividades de minería, por mucho tiempo descartaron sus residuos en la naturaleza, en cursos de agua o lanzándolos en terrenos adyacentes, formando depósitos sin ninguna preocupación de orden o sistematización (CBDB, 2012).

Como resultado de estas construcciones más rudimentarios y del problema en la fiscalización y manutención de los depósitos de relaves, se tiene la rotura de siete presas en Brasil en los últimos 36 años: Fernandinho (1986), Mina Rio Verde (2001), Mirai (2007), Herculano (2014), Fundão (2015), Feijão (2019) y Cachoeirinha (2022). Las presas Fundão y Feijão son conocidas en la actualidad como los mayores desastres registrados en el mundo. La rotura de la presa Fundão en Mariana generó la muerte de 19 personas y la presa Feijão en Brumadinho generó la muerte de 270 personas y 11 desaparecidos.

El Instituto Brasileño del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (IBAMA) estima que el rompimiento de la presa de Mariana, perteneciente a la empresa Samarco en Minas Gerais, liberó 50 millones de m<sup>3</sup> de relaves, compuestos principalmente de óxido de hierro y sílice, lanzados en el Río Doce. Sobre el depósito de relaves de Brumadinho, perteneciente a la empresa Vale, el análisis del IBAMA apunta a que los relaves de minería compuestos principalmente de óxido de hierro, devastaron aproximadamente 134 hectáreas de vegetación nativa de la Mata Atlántica y 71 hectáreas de áreas de preservación permanente a lo largo de los cursos del agua afectado por los relaves de minería.

Para que desastres como estos sean evitados, Brasil cuenta con una legislación que determina una Política Nacional de Seguridad de Presas (PNSP) y una ordenanza específica para depósitos de relaves. Con la secuencia de roturas, el gobierno de forma reactiva decidió cambiar la legislación para que sea adecuada al riesgo que un depósito de relaves ofrece en términos sociales, ambientales y socioeconómicos. En este estudio se analizará la ordenanza 70.389 de 2022 de la Agencia Nacional de Minería que propone un sistema de fiscalización para estas presas.

La fiscalización actual es ineficiente dado que determina la vulnerabilidad de una presa solo con datos de su integridad externa. Mecanismos de falla por licuación estática, por ejemplo, pueden ser generados sin aviso previo, pues es un tipo de falla frágil que muchas veces no presenta evidencia. Esto significa que muchas presas en el país pueden tener su integridad interna comprometida sin que las autoridades sean alertadas, ya que la legislación determina que apenas la integridad externa debe ser considerada como peligro para la ruptura.

En base a los antecedentes mencionados es que esta tesis busca definir un Índice de Estabilidad Física (IEF) para los depósitos de relaves brasileños, con la finalidad de suplir las brechas existentes en la fiscalización actual. El IEF es una herramienta diseñada en Chile para evaluar la estabilidad física interna y externa de un depósito de relaves a partir de informaciones cualitativas y cuantitativas obtenidas de sensores, observaciones en terreno y juicio experto.

Para que el IEF pueda ser adaptado para los depósitos de relaves brasileños, es necesario un estudio de las principales características de los depósitos de relaves de Brasil lo cual será realizado mediante

datos obtenidos del Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería (SIGPM), a partir de informaciones del monitoreo de presas en Brasil y la revisión de la legislación aplicada a las presas de relaves brasileñas.

## 1.1 Objetivo General

Proponer un Índice de Estabilidad Física (IEF) para los depósitos de relaves brasileños como medida adicional de control integrada a la normativa brasileña, basado en el IEF desarrollado en Chile, considerando las características de las presas en Brasil y la normativa actual brasileña.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general, los siguientes objetivos específicos fueron establecidos:

1. Determinar las características principales de los depósitos de relaves brasileños para contemplarlas en el desarrollo de un IEF.
2. Analizar la legislación Nacional de Seguridad de Presas y la Ordenanza de la Agencia Nacional de Seguridad de Presas.
3. Clasificar las presas de relaves de Brasil de acuerdo a criterios de vulnerabilidad y peligrosidad definidos por la normativa brasileña.
4. Realizar un levantamiento de los sistemas de monitoreo de algunas presas de relaves representativas de Brasil.
5. Identificar las brechas en la legislación y proponer cambios para contribuir a la mejora de seguridad de presas.

## 1.3 Estructura de este trabajo

Este trabajo está estructurado en 10 capítulos, incluyendo esta introducción. El Capítulo 2 explica los detalles del Índice de Estabilidad Física para depósitos de relaves chilenos, donde se explica cómo funcionan las herramientas para la gestión de riesgo mediante los Módulos M1 y M2. El Capítulo 3 muestra la ley y ordenanza de seguridad de presas de minería en Brasil para clasificar las presas y definir los depósitos que tienen mayor relevancia para ser estudiados posteriormente en el Capítulo 4.

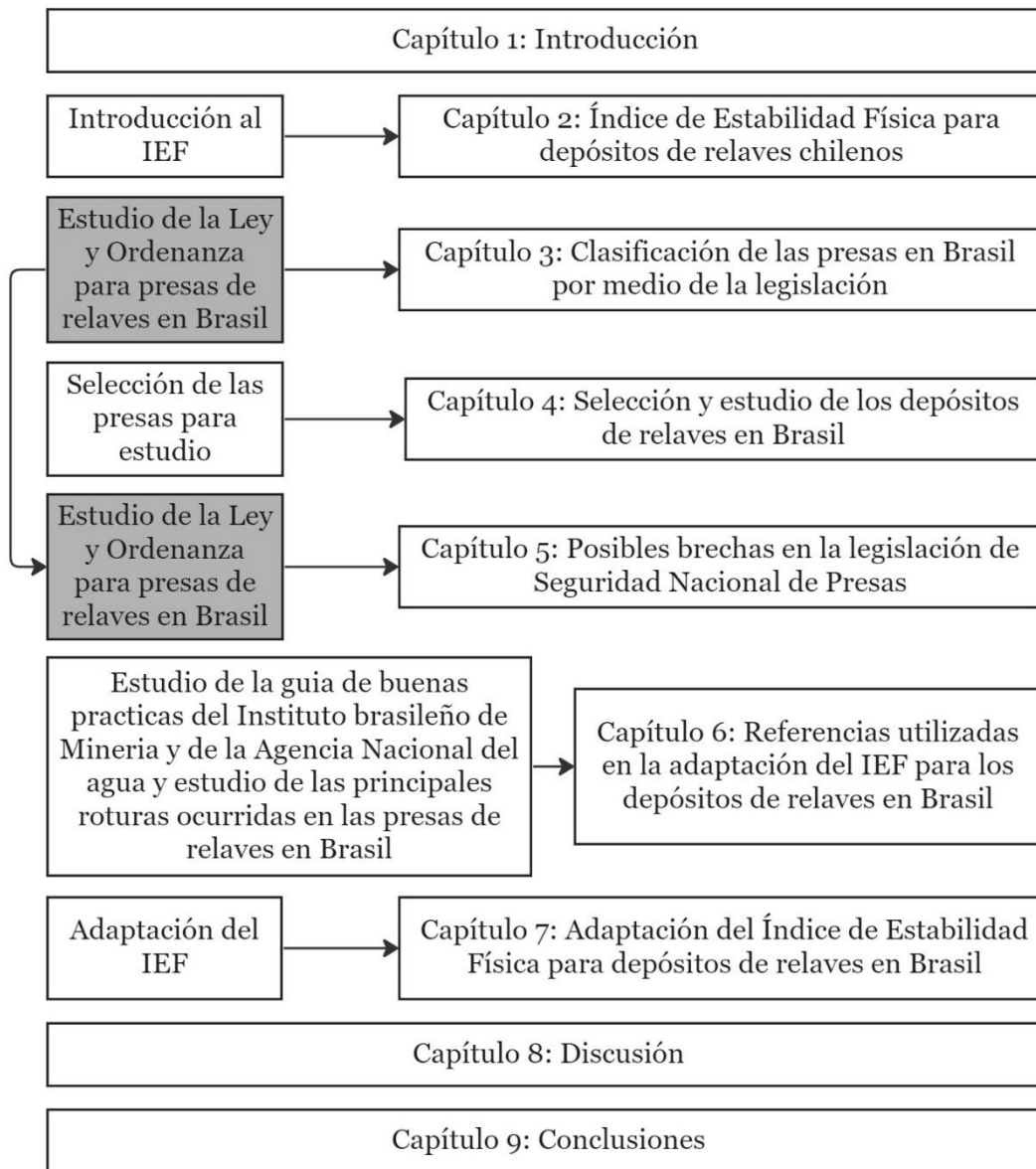
En el Capítulo 4 se estudia los depósitos de relaves mediante imágenes de su estructura y los instrumentos de monitoreo que son utilizados. El Capítulo 5 analiza nuevamente la ley y ordenanza de seguridad de presas de minería para estudiar las brechas existentes en la legislación actual para que la adaptación del IEF pueda ayudar en una correcta fiscalización y monitoreo de las presas características de Brasil.

El Capítulo 6 utiliza informaciones existentes en el Sistema Legislativo actual como base para la adaptación del IEF. El Sistema Legislativo de Brasil está elaborado para las principales características de los depósitos de relaves en Brasil, con esto, se obtiene informaciones importantes para una adaptación más eficaz para el caso brasileño. Además, utiliza la guía de buenas prácticas de la

Agencia Nacional del Agua (ANA) y la guía de buenas prácticas del Instituto Nacional de Minería (IBRAM).

El Capítulo 7 elabora la adaptación del IEF para los depósitos de relaves en Brasil, y cómo deberá ser ejecutada. La misma está separada en tablas, en las cuales se encuentran los parámetros que deben ser monitoreados, su frecuencia y descripción.

El Capítulo 8 corresponde a la discusión del trabajo, donde se encuentra un breve resumen de la adaptación del IEF para las presas en Brasil y una crítica a la actual legislación de Seguridad de Presas en Brasil y el Capítulo 9 corresponde a las conclusiones. La Figura 1 presenta un diagrama esquemático de la estructura de este trabajo. En la sección de anexos se incluyen tablas que complementan las informaciones expuestas en este trabajo.

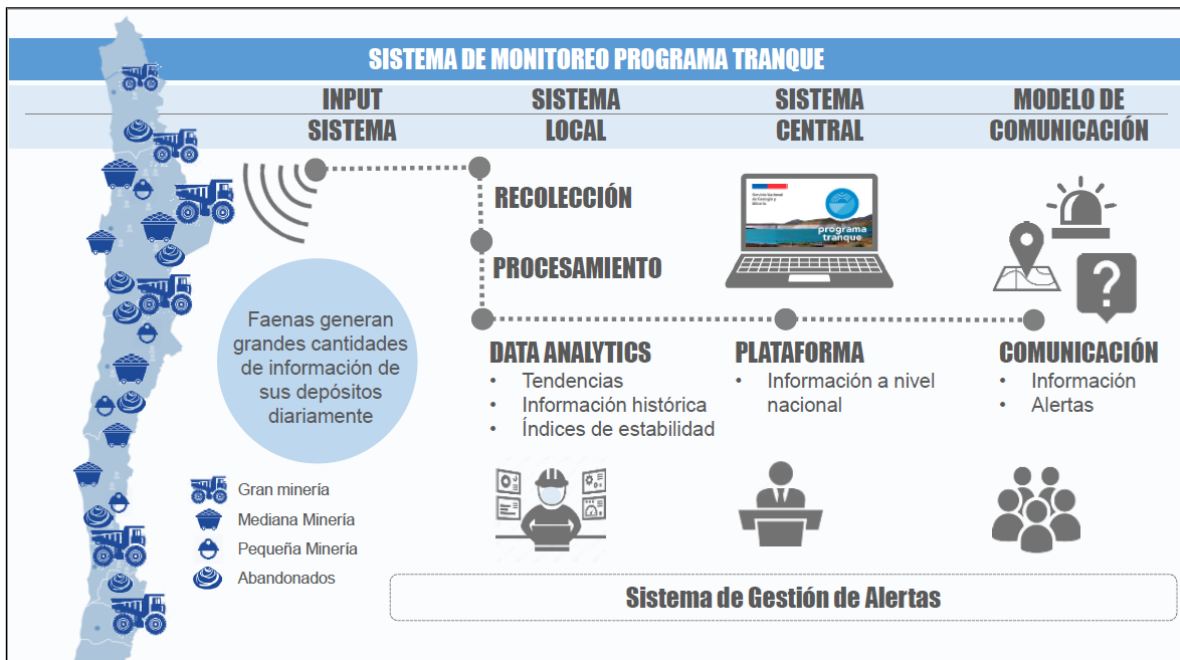


**Figura 1:** Diagrama de la estructura del trabajo. (Elaboración propia)

## Capítulo 2: Índice de Estabilidad Física para depósitos de relaves chilenos

El Índice de Estabilidad Física (IEF) es una herramienta creada por medio de una iniciativa público-privada denominada Programa Tranque, un proyecto lanzado en 2016 destinado a desarrollar una herramienta estándar de vigilancia y alerta para los depósitos de relaves chilenos. El IEF evalúa la estabilidad física de depósitos de relaves mediante informaciones obtenidas del monitoreo de parámetros críticos. Esta herramienta permite también el procesamiento de datos y genera alertas en situaciones que puedan comprometer la estabilidad física de una presa.

Las mediciones de los parámetros críticos son recolectadas por los operadores mineros y son registrados en la plataforma del Programa Tranque (Figura 2). Posteriormente son procesados, generando tendencias, índices de estabilidad y respaldo de las informaciones. En la plataforma, la información respecto de la estabilidad de la presa estará disponible a nivel nacional para la compañía minera, la autoridad y para la comunidad.



**Figura 2:** Modelo conceptual del IEF para Chile (Programa Tranque, 2019)

Los principales objetivos de la plataforma del Sistema de monitoreo Programa Tranque son (Programa Tranque 2019):

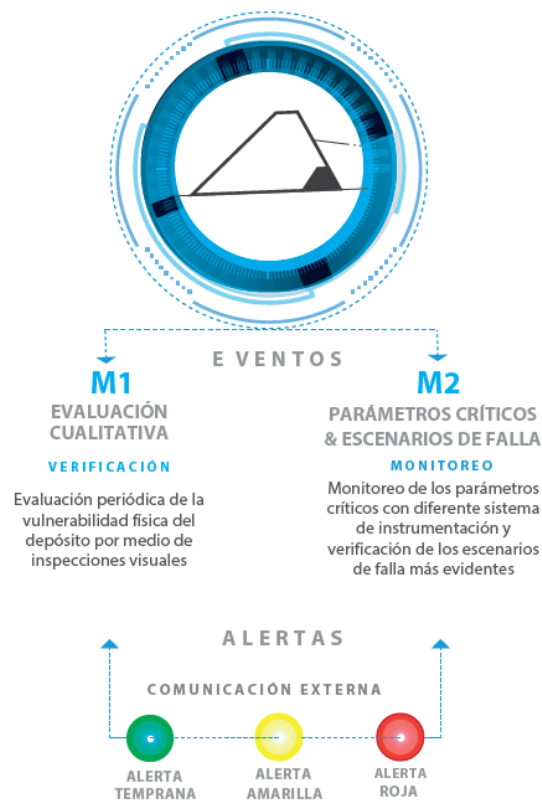
- Identificar y monitorear los parámetros críticos que condicionan la estabilidad física del depósito de relaves.
- Centralizar todas las informaciones de monitoreo en una única herramienta, generando un registro histórico de cada evento ocurrido.

- Identificar eventos irregulares durante el monitoreo, de forma cualitativa y cuantitativa, dejando registro del evento ocurrido y recomendaciones generales para su adecuado proceso de gestión y control.
- Comunicar el desempeño del depósito de acuerdo a las variables monitoreadas con el fin de responder eficazmente ante situaciones que puedan comprometer su estabilidad.
- Considerar el marco regulatorio vigente nacional, guías de buenas prácticas internacionales y recomendaciones de la autoridad.

## 2.1 Índice de Estabilidad Física

El concepto de estabilidad física se define como el estado de equilibrio estructural en que las perturbaciones hidromecánicas no causan falla, colapso, remoción o liberación del material almacenado. Para asegurar la estabilidad física, varios controles de parámetros críticos deberán ser realizados. Tales parámetros críticos son propiedades de un depósito de relaves que individualmente, o en combinación con otros parámetros, podrían afectar la estabilidad física del depósito. El IEF es una herramienta multivariada que evalúa el estado físico de estabilidad del depósito, con informaciones cualitativas y cuantitativas obtenidas mediante observación en campo, sensores y juicio de expertos. (Programa Tranque, 2019)

La estructura del Índice de Estabilidad Física se presenta en la Figura 3, donde se tiene los módulos M1 y M2 que serán descritos más adelante.



**Figura 3:** Estructura del Índice de Estabilidad Física. (modificado de Programa Tranque, 2019)

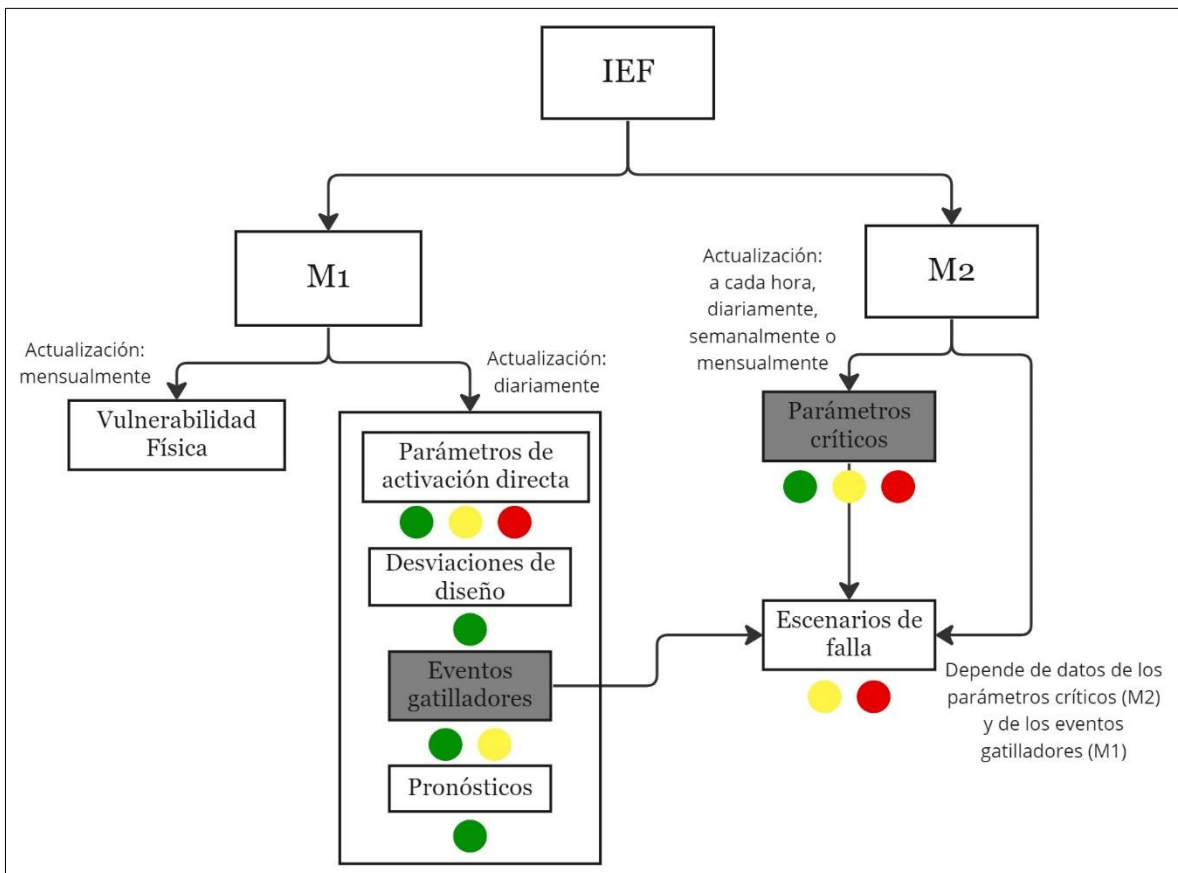


El IEF está dividido en tres módulos, donde en este trabajo solo contempla los 2 primeros, visto que la última etapa todavía se está siendo desarrollada.

**Módulo M1** - El módulo M1 tiene carácter totalmente cualitativo y considera que los operadores de la minera deben realizar una inspección visual del estado del depósito diariamente y los posibles eventos de gatillo. Además, este módulo permite una evaluación mensual de la vulnerabilidad física de la presa. Este módulo está dividido en la evaluación de la vulnerabilidad física de la presa, parámetros de activación directa, desviaciones de diseño, eventos gatilladores y pronósticos. La Figura 4 presenta un esquema de funcionamiento del módulo M1.

**Módulo M2** - El módulo M2 se divide en dos partes, la evaluación de parámetros críticos y de escenarios de falla. Los parámetros críticos son medidos por instrumentos y son actualizados dependiendo del tipo de parámetros, algunos son actualizados a cada hora, otros diariamente, semanalmente o mensualmente. Los escenarios de falla dependen principalmente de las mediciones de los parámetros críticos presentes en el módulo M2 y en algunos casos dependen de información de los eventos gatilladores presentes en el módulo M1. La figura 4 presenta esquemáticamente cómo funciona el módulo M2.

**Módulo M3** - El módulo M3 es una herramienta integradora que relaciona las informaciones de los módulos M1 y M2 mediante árboles de falla. Este módulo no es contemplado en este trabajo.



**Figura 4:** Estructura detallada del módulo M1 y M2 del IEF. (Elaboración propia)

La Figura 4 presenta el esquema del funcionamiento de estos módulos y cómo se relacionan. En el módulo M1 hay pocos casos de alertas amarillas y rojas, las mismas se producen por los eventos gatilladores y parámetros de activación directa. El módulo M2 es un módulo más complejo, que contiene informaciones de instrumentos, combinación de información de inspección visual del módulo M1 (Eventos gatilladores) e informaciones de los datos cuantitativos del módulo M2 (parámetros críticos), que juntos generan los escenarios de falla que son parte del módulo M2, como visto en la Figura 4.

## 2.2 Eventos y Alertas

El IEF cuenta con un sistema de gestión de eventos y alertas que se despliega cuando se detectan situaciones que pueden comprometer la estabilidad física de una presa. Un evento se define como el cumplimiento de una condición en el depósito de relaves, que puede afectar su estabilidad física y una alerta se define como una situación crítica en el depósito que puede afectar significativamente la estabilidad física del depósito.

Los eventos se clasifican en cuatro grupos: A, B, C o D (Tabla 1). Dependiendo de la importancia del evento es la visibilidad y tipo de gestión.

**Tabla 1:** Eventos y alertas

<b>Grupo A (Operación normal)</b>	<b>Grupo B (Operación normal)</b>	<b>Grupo C (Alerta amarilla)</b>	<b>Grupo D (Alerta roja)</b>
Grupo A: Anomalía (Están a cargo de la gestión interna de la compañía minera)	Grupo B: Incidente (Están a cargo de la gestión interna de la compañía minera, pero con visualización del evento por parte de la autoridad)	Grupo C: Incidente Importante (Con visualización por parte de la compañía minera, autoridad y comunidad)	Grupo D: Incidente grave (Con visualización por parte de la compañía minera, autoridad y comunidad)

Los posibles eventos que pueden ocurrir dentro de la plataforma se separan en siete grupos:

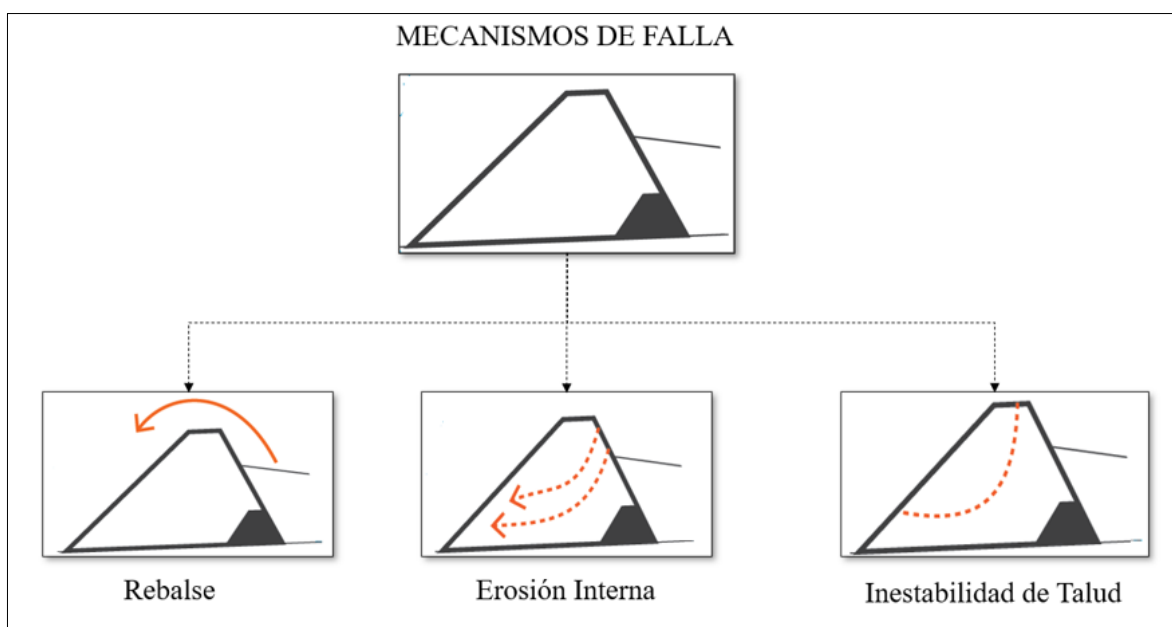
1. Resultado de la evaluación de vulnerabilidad física (módulo M1)
2. Eventos gatilladores, desviaciones con respecto al diseño o pronósticos (módulo M1)
3. Retraso en ingreso de la inspección diaria o mensual (módulo M1)
4. Condiciones asociadas a parámetros críticos (módulo M2)
5. Condiciones asociadas a los escenarios de falla (módulo M2)
6. Problemas de instrumentación en línea (general)
7. Retraso en el ingreso de información asociada al monitoreo manual (general)

## 2.3 Mecanismos de falla

Según el Programa Tranque (2019), mecanismos de falla son definidos como procesos, o una secuencia de procesos que pueden ser desencadenados por eventos gatilladores. Estos procesos pueden resultar en la inestabilidad del depósito generando la pérdida del almacenamiento de relaves.

En el caso de Chile, se tiene que los mecanismos de falla más comunes son por Inestabilidad de Talud, Rebalse y Erosión Interna.

Según Carvajal et al. (2018), la Inestabilidad de Talud es un mecanismo de falla que se caracteriza por el deslizamiento del volumen del muro de la presa, debido a que las fuerzas solicitantes son mayores que las fuerzas resistentes. El Rebalse es el mecanismo que se produce cuando el volumen de relave o agua de entrada al depósito excede la capacidad de manejo de la presa y supera las cotas de protección de la presa. Por último, la Erosión Interna corresponde a la migración de materiales del depósito a través del muro de contención y/o de la fundación, permitiendo la formación de un conducto que proporciona la migración de agua.



**Figura 5:** Mecanismos de falla. (Modificado de Programa Tranque, 2019)

## 2.4 Módulo M1

El módulo M1 determina el estado del depósito con evaluaciones cualitativas, por medio de inspecciones visuales. Este módulo evalúa la vulnerabilidad física y factores agravantes, como se puede ver en la Figura 6.

<b>MÓDULO I</b>	<b>VULNERABILIDAD</b>	<b>Vulnerabilidad Física</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Estado operativo actual</li> <li>2) Método constructivo</li> <li>3) Tipo de relave</li> <li>4) Elementos de gobernanza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>5) Exposición a inundaciones fluviales</li> <li>6) Exposición a la acumulación de escorrentías</li> <li>7) Exposición a avalanchas o inundaciones</li> <li>8) Instrumentación</li> <li>9) Diseño Actualizado</li> </ul>
	<b>FACTORES AGRAVANTES</b>	<p style="text-align: center;"><b>Parámetro de activación directa</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Comienzo de lluvia</li> <li>2) Movimiento notorio del suelo durante un terremoto</li> <li>3) Gran movimiento del suelo durante un terremoto (incapaz de permanecer de pie)</li> <li>4) Deslizamiento natural hacia la presa o sectores críticos</li> <li>5) Severo deslizamiento del material de la superficie de la presa que afecta la geometría del talud</li> <li>6) Rebalse de relaves o aguas claras</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Desviaciones de diseño</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Altura del coronamiento</li> <li>2) Revancha operativa e hidráulica</li> <li>3) Ancho de corona</li> <li>4) Superficie de la presa de terraplén y estanque de relaves</li> <li>5) Ubicación y tamaño de la piscina de agua decantada</li> <li>6) Pendientes aguas abajo y aguas arriba de la presa</li> <li>7) Materiales de construcción adecuados para la presa</li> <li>8) Instalación y estado de la geomembrana de la presa aguas arriba</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Pronóstico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Lluvia</li> <li>2) Vientos fuertes</li> <li>3) Nieve</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Eventos gatillantes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>1) Reducción del prisma resistente al pie de la presa</li> <li>2) Distribución inadecuada de la descarga de lodos y relaves dentro del estanque.</li> <li>3) Superficie de deslizamiento en un sector de la presa del terraplén</li> <li>4) Problemas de estabilidad de los estribos de la presa</li> <li>5) Fallo o bloqueo del vertedero de emergencia</li> <li>6) Modificación del nivel de operación del vertedero de emergencia</li> <li>7) Falla del sistema de recuperación de agua decantada</li> <li>8) Falla o bloqueo de los canales de desvío</li> <li>9) Evidencia de asentamientos diferenciales de la presa</li> <li>10) Evidencia de falla del sistema de drenaje</li> <li>11) Detección de material particulado a la salida del sistema de drenaje</li> <li>12) Fugas o humedad inusual en la presa</li> <li>13) Hundimientos o sumideros en la presa</li> <li>14) Hundimientos o sumideros en el estanque de relaves</li> <li>15) Grietas en la presa</li> <li>16) Deslizamiento de tierra inminente en el estanque de relaves</li> </ul>

**Figura 6:** Estructura esquemática del Módulo M1. (Elaboración propia)

Existen dos etapas para la evaluación cualitativa. La vulnerabilidad física del depósito, y los factores agravantes que tienen cuatro subdivisiones: los eventos de activación directa, las desviaciones de diseño, los eventos gatilladores y los pronósticos. En seguida se explicará a qué corresponde cada tipo de etapa de este módulo.

- Vulnerabilidad Física

Evaluación de vulnerabilidad: La determinación de la vulnerabilidad física de un depósito impacta de forma general en el sistema de gestión de riesgo del IEF. Si la presa posee una vulnerabilidad física alta, cualquier evento que ocurra en la presa, debe tener más atención por parte de la compañía minera y las autoridades que si fuera una presa de vulnerabilidad física baja. La Tabla 2 presenta los tipos de parámetros que deben ser evaluados en la vulnerabilidad física de un depósito en Chile, juntamente con la puntuación según la gravedad del parámetro para la estabilidad de presa. La Tabla 3 presenta los niveles de vulnerabilidad física (alta, media y baja) según la suma de las puntuaciones de los parámetros de la Tabla 2.

- Factores Agravantes

Los Factores Agravantes son parte del Módulo M1 y se dividen en los siguientes grupos: Eventos de activación directa, desviaciones de diseño, eventos gatilladores y pronósticos. Los resultados de la evaluación de factores agravantes pueden generar eventos que en su mayoría son de grupo A y B. Solamente en casos más extremos como por ejemplo de deslizamiento de tierra en sectores críticos y gran movimiento de suelo por terremoto, se activan alertas amarilla o roja. En el Módulo M2 se presentará la relación entre estos grupos de eventos cualitativos presentes en el módulo M1 y los parámetros críticos con datos cuantitativos del módulo M2 los cuales pueden generar mecanismos de falla.

## 2.4.1 Vulnerabilidad Física

Esta evaluación (Tabla 2), asigna puntajes a los depósitos según diferentes características y condiciones. La vulnerabilidad física es directamente proporcional a la puntuación (un depósito con una puntuación alta es físicamente más vulnerable en comparación a uno con una puntuación más baja). Una evaluación mensual es aconsejada.

**Tabla 2:** Puntajes de la evaluación de vulnerabilidad física (Módulo M1)

<b>Estado Operativo Actual</b>	En Operación (0)	Cerrado (5)	Abandonado (10)	-	-
<b>Método Constructivo</b>	Aguas Abajo (0)	Eje Central (5)	Aguas arriba (10)	-	-
<b>Tipo de relaves</b>	Filtrado (0)	Pasta (4)	Espesado (7)	Convencional (10)	-
<b>Elementos de Gobernanza</b>	Posee los tres Elementos de Gobernanza (Profesional técnico cualificado, Ingeniero de Registro y Panel de Revisión Externos) (0)	Posee dos de los tres Elementos de Gobernanza (Profesional técnico cualificado, Ingeniero de Registro y Panel de Revisión Externos) (5)	Posee uno de los tres Elementos de Gobernanza (Profesional técnico cualificado, Ingeniero de Registro y Panel de Revisión Externos) (10)	Posee estructura de gobernanza definida, pero no tiene personas especializadas (15)	No posee Elementos de Gobernanza (20)
<b>Instrumentación</b>	El depósito tiene todos los instrumentos necesarios operando de forma continua (0)	El depósito no tiene todos los instrumentos operando de forma continua (10)	-	-	-
<b>Exposición a inundaciones del Río</b>	Depósito de relaves NO está expuesto a inundaciones de ríos o riesgo de inundación (0)	Depósito de relaves ESTÁ expuesto a inundaciones de ríos o riesgo de inundación (10)	-	-	-
<b>Exposición a la acumulación de Escorias</b>	Depósito de relaves NO está expuesto a la acumulación de escorias (0)	Depósito de relaves ESTÁ expuesto a la acumulación de escorias (10)	-	-	-
<b>Exposición a Avalanchas o Inundaciones</b>	Depósito de relaves NO está expuesto a avalanchas o Inundaciones (0)	Depósito de relaves ESTÁ expuesto a avalanchas o Inundaciones (10)	-	-	-
<b>Diseño Actualizado</b>	Diseño de presa ACTUALIZADO, considerando posibles modificaciones de diseño durante la etapa operativa actual (0)	Diseño de presa NO actualizado, considerando posibles modificaciones de diseño durante la etapa operativa actual (10)	-	-	-

**Tabla 3:** Suma de los parámetros de la (VF) vulnerabilidad física.

ALTO	$\Sigma VF > 60$	El depósito se encuentra en una condición física muy vulnerable debido al diseño, construcción y forma de operación.
MEDIO	$30 < \Sigma VF \leq 60$	El depósito puede volverse vulnerable debido al diseño, condiciones de construcción y forma de operación.
BAJO	$\Sigma VF \leq 30$	Las condiciones del depósito son favorables, por lo que su vulnerabilidad física es baja tanto para su diseño como para condiciones de su construcción u operación.

#### 2.4.2 Factores agravantes: eventos de activación directa

Son los eventos que requieren acceso directo del operador a nivel de plataforma. Estos eventos requieren un nivel de actualización más rápido que un evento de activación normal. Los eventos de activación directa se encuentran presentes en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Parámetros de activación directa (Módulo M1)

Código	Parámetro	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
a) Eventos Importantes	Comienzo de lluvia				
	Movimiento notorio del suelo del terremoto				
	Gran movimiento del suelo durante un terremoto (incapaz de permanecer de pie)				
b) Eventos críticos que desencadenan una emergencia inmediata	Deslizamiento natural hacia la presa o sectores críticos				
	Severo deslizamiento del material de la superficie de la presa que afecta la geometría del talud				
	Rebalse de relaves o aguas claras.				

### 2.4.3 Factores agravantes: desviaciones de diseño

Realizado por inspección visual diaria basada en los criterios del operador y orientado a una identificación temprana de problemas en el área. La inspección visual no requiere instrumentación o medición en campo. Los eventos de desviaciones de diseño se encuentran presentes en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Desviaciones de diseño (Módulo M1)

<b>Parámetro</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	<b>Grupo D</b>
Altura del muro	Diario				
Revanca operacional e hidráulica	Diario				
Ancho de corona	Diario				
Superficie de la presa de terraplén y estanque de relaves	Diario				
Ubicación y tamaño de la piscina de agua decantada	Diario				
Pendientes aguas abajo y aguas arriba de la presa	Diario				
Materiales de construcción adecuados para la presa	Diario				
Instalación y estado de la geomembrana de la presa aguas arriba	Diario				



## 2.4.4 Factores agravantes: eventos gatilladores

La verificación de estos eventos debe ser diaria, su ocurrencia puede afectar la estabilidad física de la presa. El objetivo es la detección precoz de diferentes eventos. Los eventos gatilladores se encuentran presentes en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Eventos gatilladores (Módulo M1)

Parámetro	Frecuencia	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Reducción del prisma resistente al pie de la presa	Diario				
Distribución inadecuada de la descarga de lodos y relaves dentro del estanque	Diario				
Superficie de deslizamiento en un sector de la presa del terraplén	Diario				
Problemas de estabilidad de los estribos de la presa	Diario				
Fallo o bloqueo del vertedero de emergencia	Diario				
Modificación del nivel de operación del vertedero de emergencia	Diario				
Falla del sistema de recuperación de agua decantada	Diario				
Falla o bloqueo de los canales de desvío	Diario				
Evidencia de asentamientos diferenciales de la presa	Diario				
Evidencia de falla del sistema de drenaje	Diario				
Detección de material particulado a la salida del sistema de drenaje	Diario				
Fugas o humedad inusual en la presa	Diario				
Hundimientos o sumideros en la presa	Diario				
Hundimientos o sumideros en el estanque de relaves	Diario				
Grietas en la presa	Diario				
Deslizamiento de tierra inminente en el estanque de relaves	Diario				

## 2.4.5 Factores agravantes: pronósticos

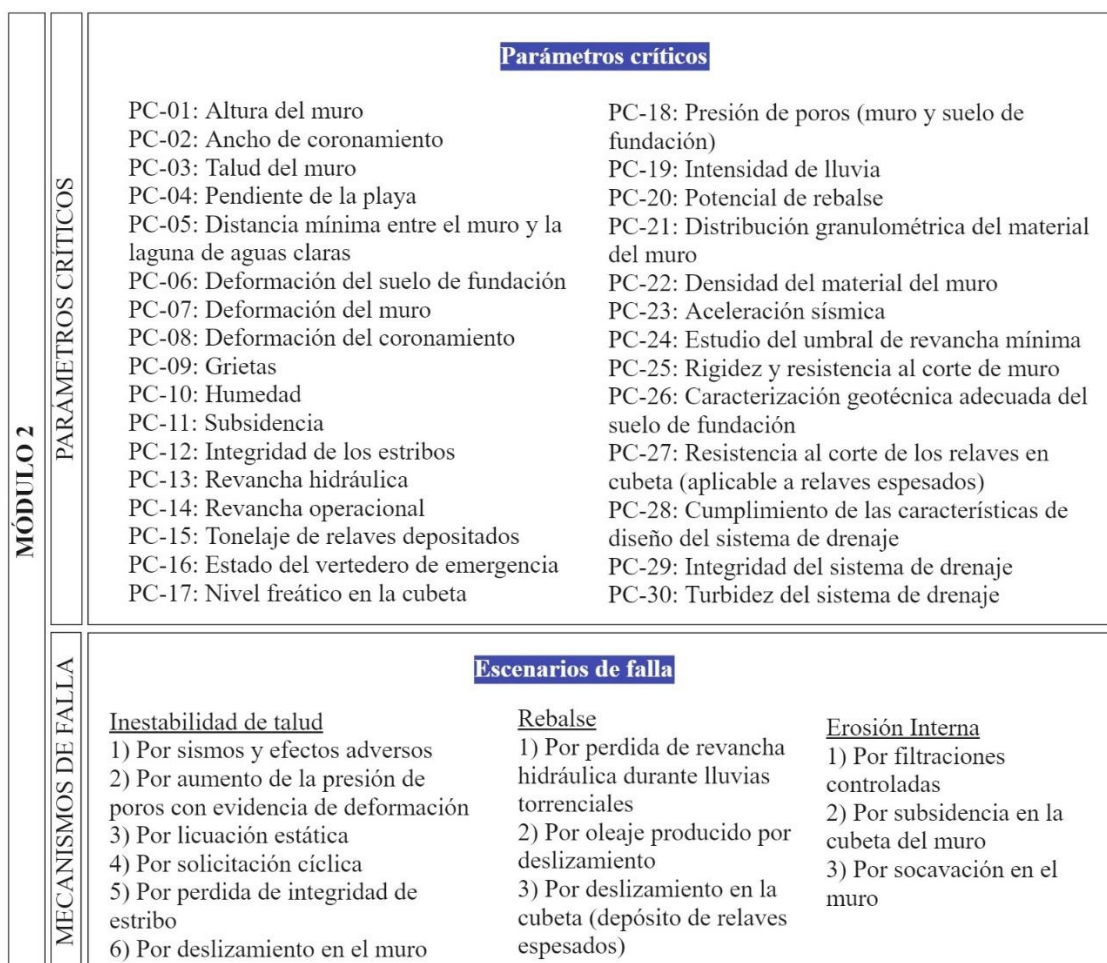
Las verificaciones deben ser diarias. Los diferentes pronósticos climáticos pueden afectar los depósitos de relaves. Los eventos pronósticos se encuentran presentes en la Tabla 7.

**Tabla 7:** Pronósticos (Módulo M1)

Parámetro	Frecuencia	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Lluvia	Diario				
Nieve	Diario				
Vientos fuertes	Diario				

## 2.5 Módulo M2

El módulo M2 es responsable por la evaluación cuantitativa del depósito de relaves, y está dividido en la evaluación de parámetros críticos y escenarios de falla (Figura 6).

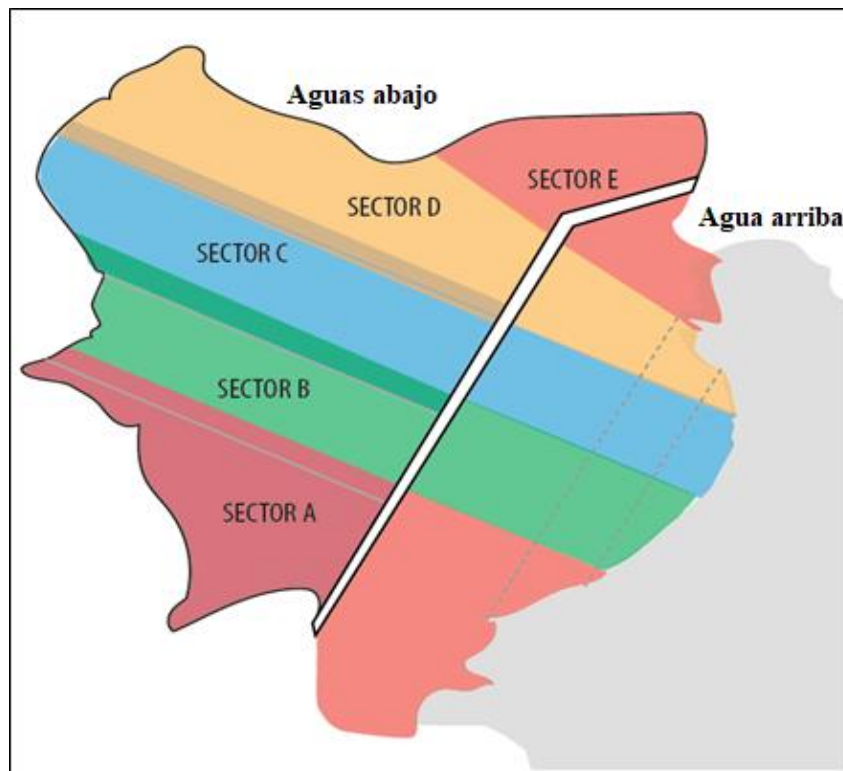


**Figura 7:** Estructura esquemática del Módulo 2. (Elaboración propia)

### 2.5.1 Parámetros Críticos

Los parámetros críticos son propiedades cuantificables en un depósito de relaves, que individualmente o de forma combinada con otros parámetros puede afectar la estabilidad física del depósito, dependiendo de sus valores. Los parámetros críticos son medidos de forma puntual, global o en direcciones longitudinal o transversal al muro, por medio de instrumentos o inspecciones visuales. Algunos de estos parámetros pueden ser medidos en línea, como por ejemplo las presiones de poros y desplazamientos; otros parámetros son actualizados de forma manual por el responsable del cargo.

El muro del depósito debe ser dividido en sectores de 200 metros de longitud aproximadamente, como se muestra en la Figura 8. Estos sectores permiten una evaluación más focalizada. Un grupo de expertos deberá definir la aplicabilidad a un depósito particular de los parámetros críticos y los escenarios de falla, el número de instrumentos instalados en cada sector, además de definir los umbrales para parámetro crítico evaluado.



**Figura 8:** Ejemplo de sectorización de una presa (Programa Tranque, 2019)

La Tabla 8 presenta la relación de los parámetros críticos juntamente con cada tipo de medición que se deberá realizar.

**Tabla 8:** Relación de los parámetros críticos y su tipo de medición

<b>Clasificación</b>	<b>Parámetros Críticos</b>	<b>Tipo de medición</b>
Geometría	PC-01, PC-02, PC-03, PC-04, PC-05	Medición de los aspectos geométricos de la presa para evaluar si hay superación de umbrales
Deformaciones	PC-06, PC-07, PC-08	Obtención de datos mediante lectura de instrumentos para evaluar si hay superación de umbrales
Integridad Externa	PC-09, PC-10, PC-11, PC-12	Evaluación de la integridad externa de la presa mediante inspección visual detectando situaciones adversas en el muro, coronamiento y estribos
Aspectos operacionales	PC-13, PC-14, PC-15, PC-16, PC-17, PC-18, PC-19, PC-20, PC-21, PC-22	Evaluación de la integridad interna del muro mediante la lectura de instrumentos o ensayos para evaluar si hay superación de umbrales
Aspectos de diseño	PC-23, PC-24, PC-25, PC-26, PC-27	Evaluación de la disponibilidad de la documentación de diseño de la estructura de contención
Funcionalidad del sistema de drenaje	PC-28, PC-29, PC-30	Evaluación mediante lectura de instrumentos para evaluar si hay superación de umbrales y el tiempo de ocurrencia de una situación adversa

En total, el IEF evalúa 30 parámetros críticos y cada uno puede activar eventos, los que a su vez pueden activar alertas dependiendo de la gravedad de la situación (alerta roja se asocia a eventos de Grupo D y alerta amarilla se asocia a eventos de Grupo C).

El IEF tiene una estructura bastante compleja, y no es el objetivo de este trabajo presentar todo lo que compone esta herramienta. Por lo tanto, en la Tabla 9 se presenta un ejemplo del parámetro PC-05 y cómo funciona su gestión de eventos.

**Tabla 9:** Informaciones detalladas del parámetro crítico PC-05: Distancia mínima entre el muro y la laguna de aguas claras.

Categoría	Parámetro Crítico	Configuración de datos	Evento A	Evento B	Evento C	Evento D
Geometría del depósito	PC-05: Distancia mínima entre el muro y la laguna de aguas claras	a) Primer valor umbral [m]: Corresponde al valor umbral definido por diseño o por recomendación de un asesor experto para determinar la distancia recomendada a la que debe operar la piscina de agua clara.	a) Evento A1: (informado por sector) Distancia mínima de la pared de la piscina <Primer valor de umbral	b) Evento B1: Se activa el evento asociado a la desviación del diseño “Ubicación y tamaño de la laguna”	a) Evento C1: (informado por sector) Piscina en contacto con el muro (Distancia 0 metros)	
		b) Segundo valor umbral [m]: Corresponde al valor umbral definido por la autoridad para determinar que la ubicación del estanque debe ser informada y controlada por su proximidad al depósito.		c) Evento B2: (informado por sector) Distancia mínima de la pared de la laguna <Segundo valor umbral		
Descripción	Instrumentación	Localización	Unidad	Frecuencia	Precisión	Densidad Instrumental
Parámetro que describe la geometría del depósito	–	–	m	Mensual	1 m	1 medida por sector

Para explicar la gestión de eventos del módulo M2, se muestran como ejemplos la clasificación relacionada a geometría (Tabla 10) e integridad externa del muro (Tabla 11). La clasificación relacionada a geometría es un tipo de clasificación que activa eventos del grupo A, B y C. Se puede destacar que la geometría tiene gran influencia en la estabilidad de la presa, pero si comparamos a la integridad externa del muro, presentes en la Tabla 11, tenemos asociados eventos del grupo A, B, C y D. Esto significa que es una clasificación que ofrece más peligrosidad que la de geometría.

Las demás tablas que contienen todos los parámetros críticos se presentan en el Anexo.

**Tabla 10:** Clasificación relacionada a Geometría (Módulo M2)

Clasificación	Código	Descripción	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Geometría	PC-01	Altura del muro	A1, A2, A3			
	PC-02	Ancho de coronamiento	A1, A2	B1, B2		
	PC-03	Talud del muro	A1, A2, A3	B1, B2, B3, B4		
	PC-04	Pendiente de la Playa	A1	B1, B2		
	PC-05	Distancia mínima entre el muro y la laguna aguas claras	A1	B1, B2	C1	

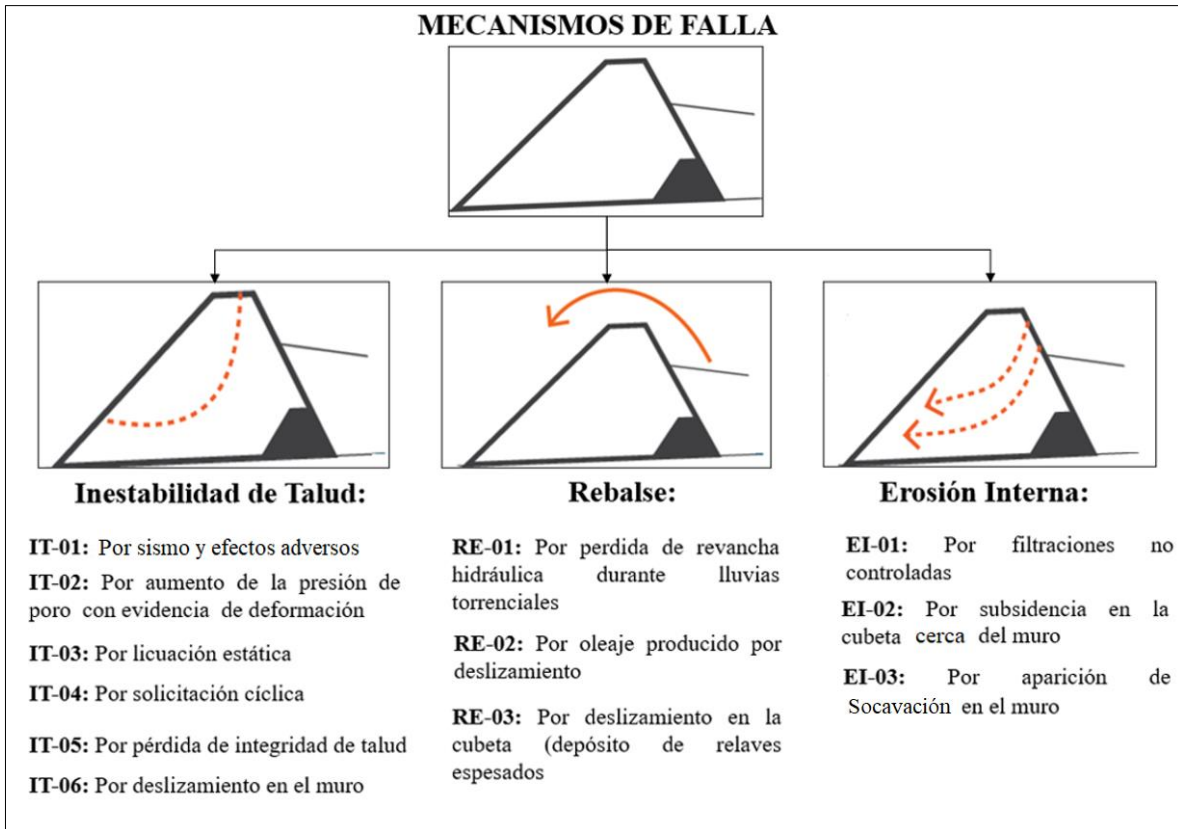
**Tabla 11:** Clasificación relacionada a Integridad externa del depósito (Módulo M2)

Clasificación	Código	Descripción	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Integridad externa del depósito	PC-09	Grietas		B1	C1, C2, C3	
	PC-10	Humedad o Fugas		B1	C1, C2	
	PC-11	Subsistencia o socavones		B1, B2	C1, C2	
	PC-12	Integridad de los estribos		B1, B2	C1	D1

## 2.5.2 Escenarios de Falla

Los escenarios de falla corresponden a una combinación de situaciones anormales detectadas en el depósito que puede provocar la inestabilidad de la presa y la pérdida de almacenamiento de relaves. Los escenarios de falla pueden activar alertas amarillas o rojas.

Los mecanismos de falla de inestabilidad de talud, rebalse y erosión interna (Figura 9), poseen escenarios de falla que pueden ser desarrollados por diferentes eventos gatilladores presentes en el módulo M1 y parámetros críticos presentes en el módulo M2, que cuando superan los umbrales o presentan una tendencia desfavorable de inestabilidad, generan una alerta en la plataforma de monitoreo del depósito.



**Figura 9:** Mecanismos de falla y escenarios de falla. (Modificado de Programa Tranque, 2019)

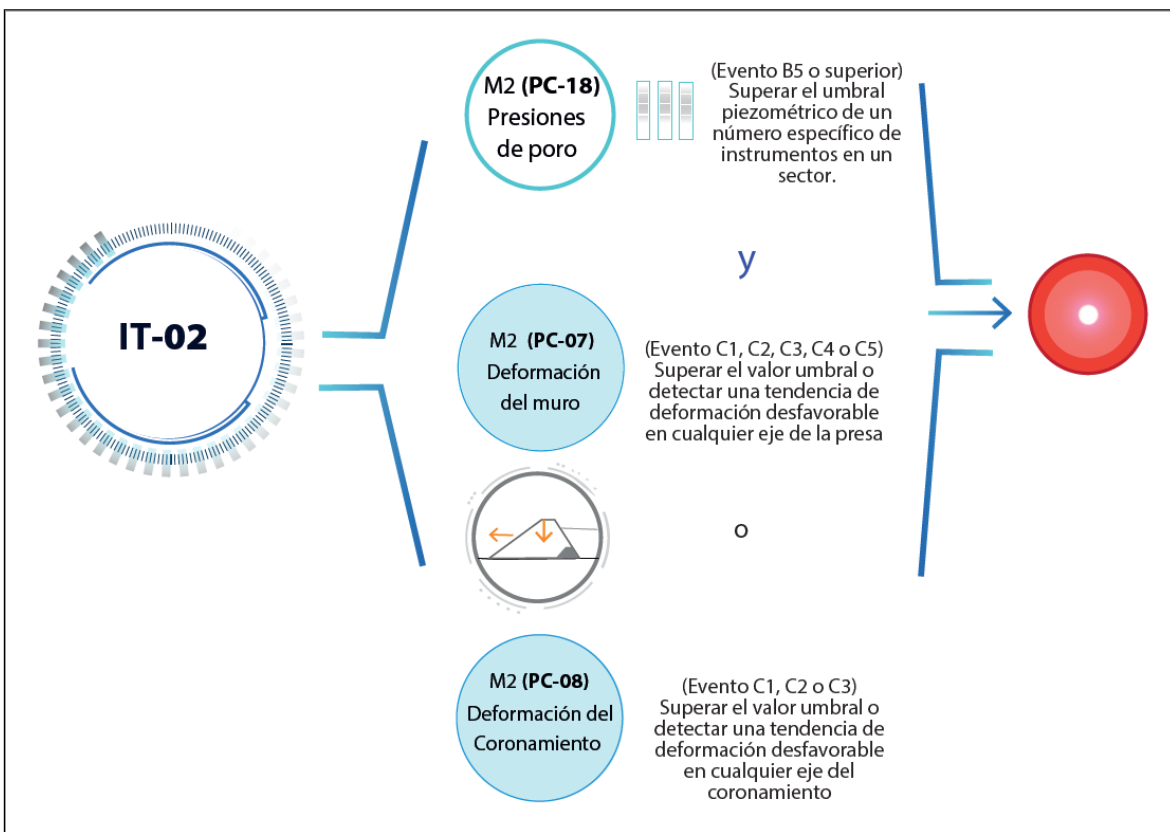
En esta sección se presentará como ejemplo una breve explicación de los escenarios de falla Inestabilidad de Talud por aumento de la presión de poros con evidencia de deformación (IT-02), Rebalse por oleaje producido por deslizamiento (RE-02) y Erosión Interna por aparición de socavación en el muro (EI-03).

### 2.5.2.1 IT-02: Inestabilidad de talud por aumento de la presión de poro con evidencia de deformación

Para la activación del escenario de falla “Inestabilidad de talud por aumento de la presión de poros con evidencia de deformación” (IT-02) es necesario que inicialmente se active un evento asociado al parámetro crítico “presión de poros” (PC-18), que evidencie la superación del umbral de un determinado número de instrumentos en un sector. Cumplida esta primera condición y para la activación de este escenario de falla, se debe cumplir al menos uno de los siguientes eventos.

- “Desplazamiento o deformaciones del muro” (PC-07). Evidencia de una tendencia o superación de un umbral asociado a la deformación del muro.
- “Deformación del coronamiento” (PC-08). Evidencia de una tendencia o superación de umbral asociado a la deformación del coronamiento.

La activación de este escenario genera una alerta roja que informa una situación crítica del depósito que compromete su estabilidad física y se sugiere una evacuación. La Figura 10 presenta esquemáticamente cómo se desarrolla este tipo de falla.



**Figura 10:** Escenario de falla IT-02. (Modificado de Programa Tranque, 2019)

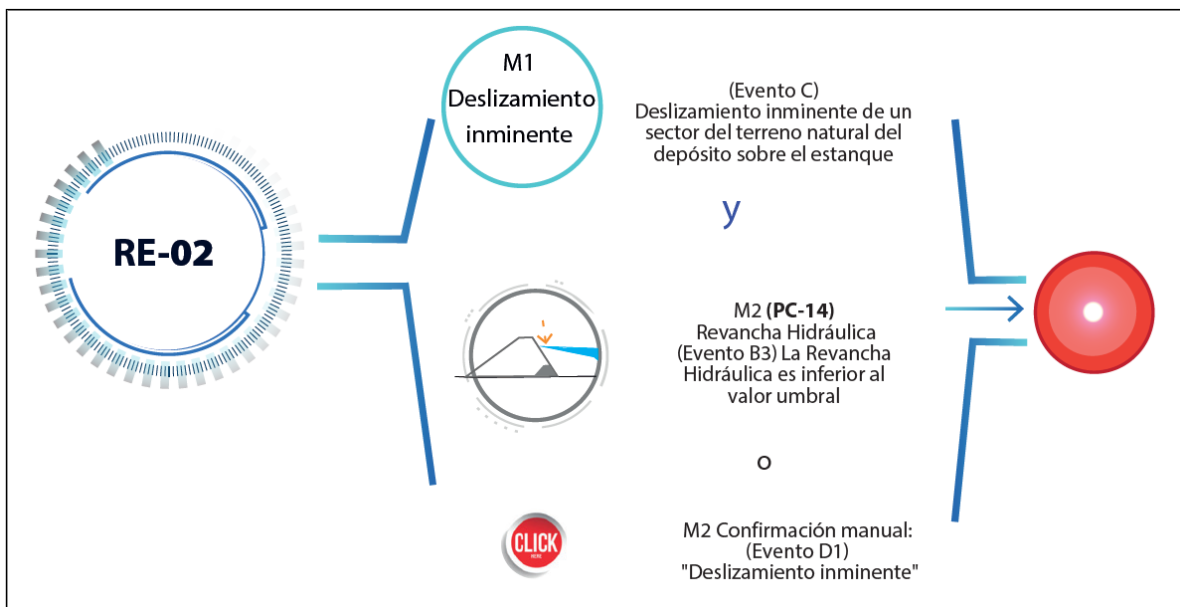


### 2.5.2.2 RE-02: Rebalse por oleaje producido por deslizamiento

Para la activación del escenario de falla “Rebalse por oleaje producido por deslizamiento” (RE-02), debe haber la activación del evento gatillador asociado a Deslizamiento inminente (módulo M1). Cumplida esta condición, la activación de la alerta roja se puede activar si se cumple una de las dos condiciones:

- “Revancha hidráulica” (PC-14). La revancha hidráulica comienza a decrecer respecto a la última medición registrada por el sistema.
- Escalamiento manual del evento relacionado con “deslizamiento inminente”.

La Figura 11 presenta esquemáticamente cómo se desarrolla este tipo de falla.



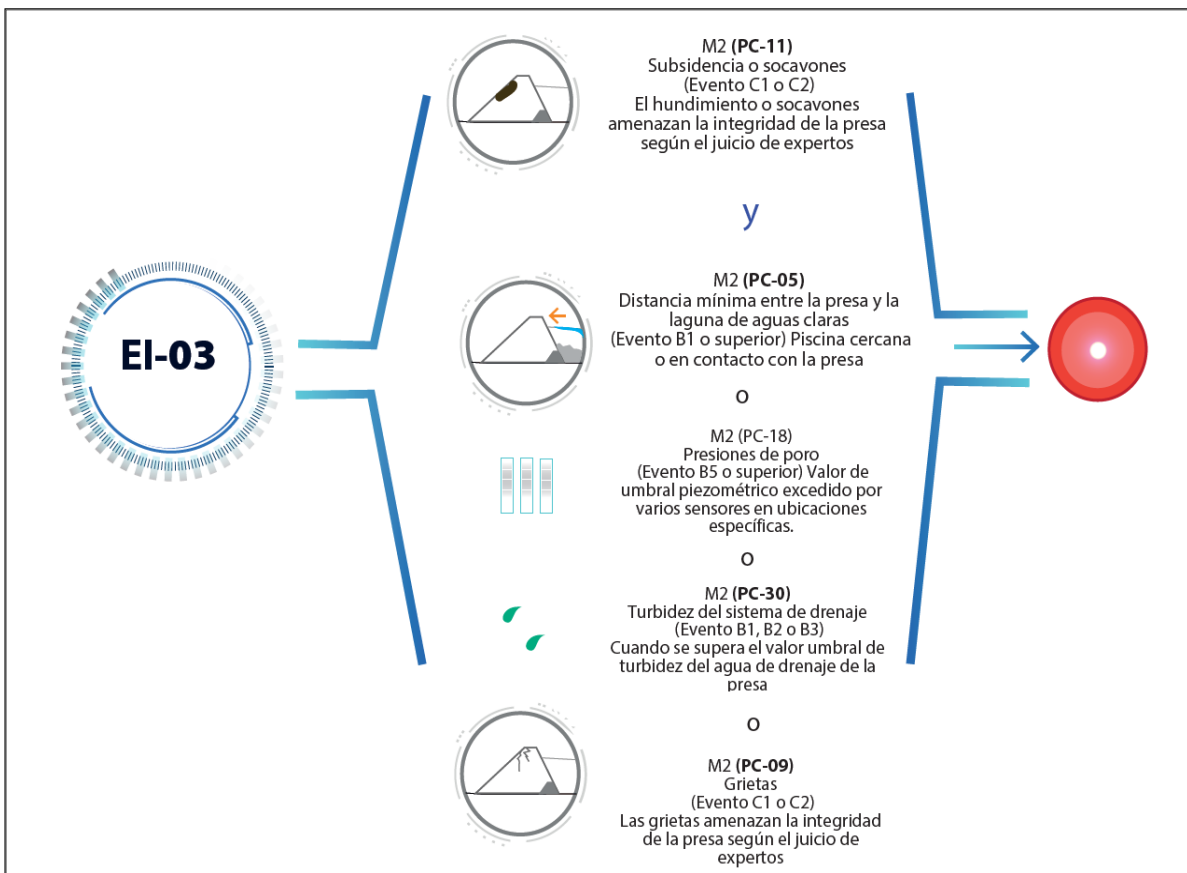
**Figura 11:** Escenario de falla RE-02. (Modificado de Programa Tranque, 2019)

### 2.5.2.3 EI-03: Erosión Interna por filtraciones no controladas

Para la activación del escenario de falla “Erosión interna por filtraciones no controladas” (EI-03), se debe cumplir con la activación de dos condiciones desfavorables. Es necesario que inicialmente se active un evento asociado al parámetro crítico “Subsistencia o Socavones” (PC-11), el cual amenaza la integridad de la presa según juicio experto. Cumplida esta primera condición y para la activación de este escenario de falla, se debe cumplir al menos uno de los siguientes eventos.

- “Distancia mínima entre la presa y la laguna de aguas claras” (PC-05). La laguna de aguas claras debe estar cerca o en contacto con el muro.
- “Presión de poros” (PC-18). Valor de umbral piezométrico excedido por varios sensores en ubicaciones específicas.
- “Turbidez del sistema de drenaje” (PC-30). Superación del valor umbral de turbidez del agua de drenaje de la presa.
- “Grietas” (PC-09). Las grietas amenazan la integridad de la presa según el juicio de expertos.

La Figura 12 presenta esquemáticamente cómo se desarrolla este tipo de falla.

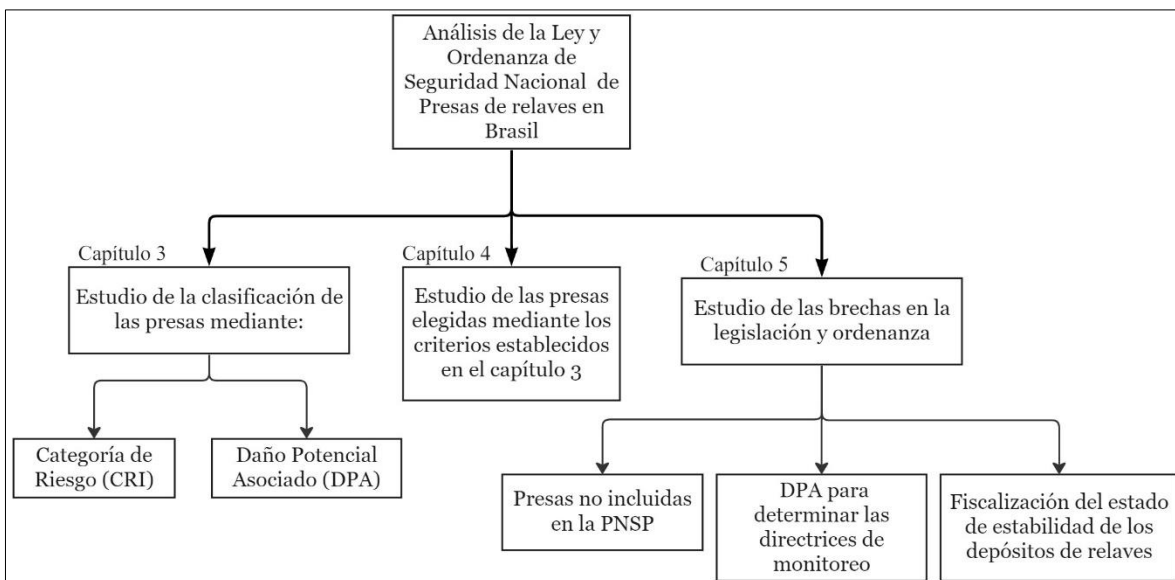


**Figura 12:** Escenario de falla EI-03. (Modificado de Programa Tranque, 2019)

## Capítulo 3: Clasificación de las presas en Brasil por medio de la legislación

Para entender mejor el análisis de la Ley y Ordenanza de Seguridad de presas en Brasil realizado en esta tesis, se presenta la Figura 13 con un diagrama que divide el proceso de estudio. Primero, se clasifican las presas en el Capítulo 3, de acuerdo a la Categoría de Riesgo (CRI) y el Daño Potencial Asociado (DPA). En el Capítulo 4, se determinan las presas más importantes que deben ser estudiadas mediante imágenes de su estructura y los instrumentos utilizados para monitoréarlas. Este estudio ayudará en el Capítulo 7 a la adaptación del IEF para las presas en Brasil.

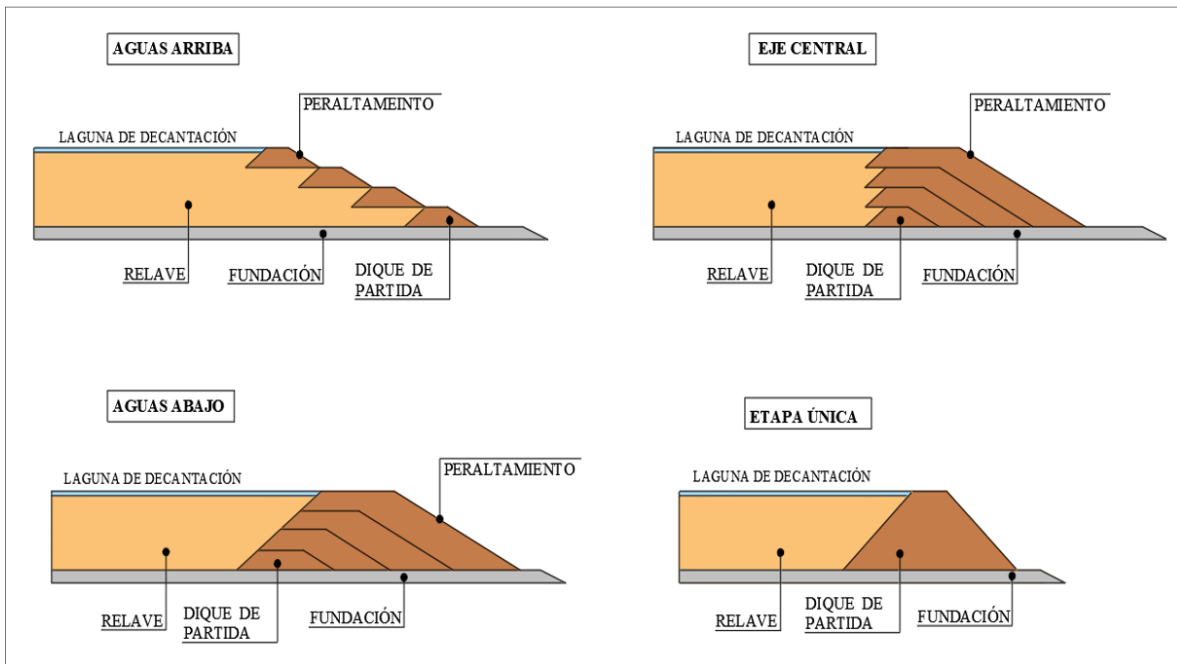
El Capítulo 5 es un estudio de las posibles brechas existentes en la legislación y ordenanza, en especial de las presas no incluidas en la PNSP. Se discute sobre el uso exclusivo del DPA para determinar las directrices de monitoreo y problemas en la evaluación del estado de estabilidad de los depósitos de relaves.



**Figura 13:** Estructura de la tesis en materia de legislación y ordenanza. (Elaboración propia)

En Brasil existen 884 presas registradas en la Agencia Nacional de Minería (ANM, 2021) que es el organismo gubernamental encargado de administrar y supervisar el ejercicio de las actividades mineras en todo el territorio nacional. Las informaciones de las características y clasificación de los depósitos de relaves estudiados en este capítulo fueron obtenidas mediante el Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería (SIGPM), que es una herramienta de la plataforma de la ANM que es actualizada dos veces al año, en el mes de marzo y el mes de septiembre. Las empresas deben declarar la estabilidad de la presa y actualizar los datos catastrales. En este trabajo los datos utilizados fueron actualizados al mes de marzo de 2021.

De las principales características de los depósitos de relaves en Brasil, se tiene los métodos constructivos, los cuales son: aguas arriba, aguas abajo, eje central y etapa única, como se puede ver en la Figura 14.



**Figura 14:** Métodos constructivos de las presas existentes en Brasil. (Elaboración propia)

**Aguas arriba:** es el método considerado más peligroso, porque el depósito crece apoyado sobre el propio relave, que puede estar no consolidado. En este sistema, la presa se eleva en forma de escalones a medida que aumenta el volumen de relaves, la construcción es más simple y económica, pero esto la torna menos segura.

**Aguas abajo:** el depósito crece apoyándose en el suelo de fundación. Por esto, este tipo de construcción necesita de más espacio, que normalmente significa un costo mayor.

**Eje central:** este método es intermedio entre los dos anteriores. La presa crece tanto aguas arriba como aguas abajo, manteniendo el eje vertical del coronamiento. Es un sistema intermedio en términos de costo y seguridad.

**Etapa única:** En este método, no hay peraltamiento durante la fase de operación. La presa se construye para determinada cantidad de relaves y puede ser cerrada cuando alcanza su capacidad máxima o sufrir peraltamiento de acuerdo con los métodos citados anteriormente, pasando a ser clasificada como aguas arriba, aguas abajo o eje central.

### 3.1 Política Nacional de Seguridad de Presas

Entre las presas registradas en la ANM, existen las que están registradas en la Política Nacional de Seguridad de Presas (PNSP), que están destinadas a la acumulación de agua para cualquier uso, a la disposición final o temporario de relaves, y a la acumulación de residuos industriales. La citada Política, tiene como objetivos garantizar el cumplimiento de estándares de seguridad, reglamentar, promover el monitoreo y acompañar las acciones de seguridad empleadas por los responsables de las

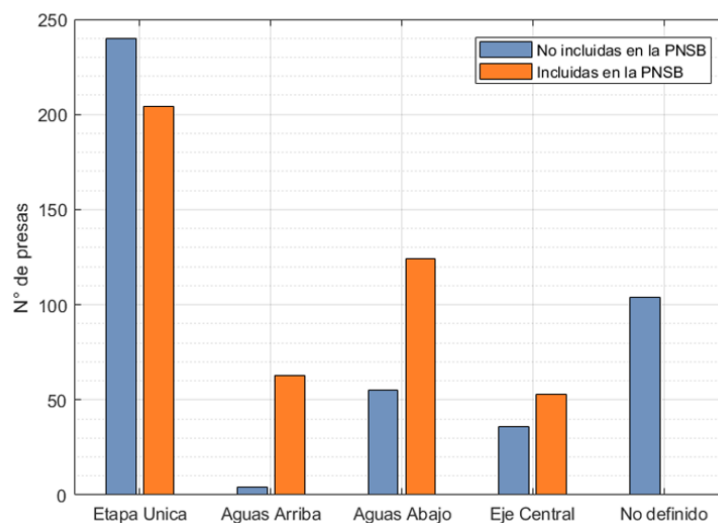
presas, de manera a reducir la posibilidad de accidentes y sus consecuencias, en especial, de la población afectada (Neves L. P., 2018).

La PNSP fue establecida por la Ley n° 14.066, del 30 de septiembre de 2020 y la misma determina que una presa deberá ser incluida en la PNSP si cumple al menos uno de los siguientes requisitos:

1. Altura del muro, medida del punto más bajo de la fundación al coronamiento, mayor o igual a 15 metros;
2. Capacidad total de almacenamiento mayor o igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>;
3. Depósito que contenga residuos peligrosos conforme a las normas técnicas aplicables (por ejemplo: Cadmio, Cromo Hexavalente, níquel, cianuro (NBR 10004 de ABNT));
4. Daño Potencial Asociado (DPA) medio o alto, en términos económicos, sociales, ambiental o de pérdida de vidas humanas;
5. Categoría de Riesgo (CRI) alto.

De las 884 presas registradas en la Agencia Nacional de Minería, 440 no hacen parte de la PNSP, por no cumplir ninguno de los criterios citados anteriormente. Por lo tanto, estos depósitos de relaves no serán considerados en este estudio.

La Figura 15 presenta el número de presas incluidas y no incluidas en la PNSP según su método constructivo. De acuerdo a la figura, el método constructivo etapa única representa la mayoría de las presas, en segundo lugar, se tienen los depósitos aguas abajo, después aguas arriba y, por último, los depósitos eje central. Hay muchos depósitos no incluidos en la PNSP que no tienen el método constructivo definido o conocido. Esto significa que pueden ser construidos con el método aguas arriba o cualquier otro.

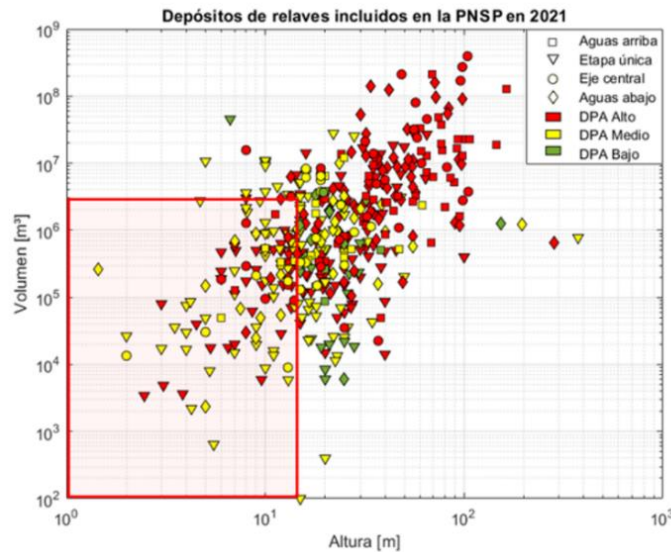


**Figura 15:** Número de presas incluidas y no incluidas en la PNSP según su método constructivo registradas en la ANM.

Una de las características de las presas no incluidas en la PNSP es que su altura es menor a 15 metros. Como se puede ver en la Figura 15, el método constructivo etapa única es el método con más presas de altura inferior a 15 metros, ya que gran parte de los depósitos no incluidos en la política se encuentran asociados a este tipo de construcción.

Se destaca que el criterio de inclusión de las presas en la PNSP puede ser poco conservador, ya que un depósito de dimensiones 500 m x 500 m x 12 m (Volumen = 3.000.000 m<sup>3</sup>) no es considerado en la política. Con esto, se tiene que casi la mitad de las presas existentes en el país, o sea, 440 de las 884 presas no son consideradas relevantes para que tengan un plan de seguridad de presas.

La Figura 16 muestra las presas en Brasil incluidas en la PNSP, considerando la altura de la presa, el volumen almacenado y los métodos constructivos de las presas.

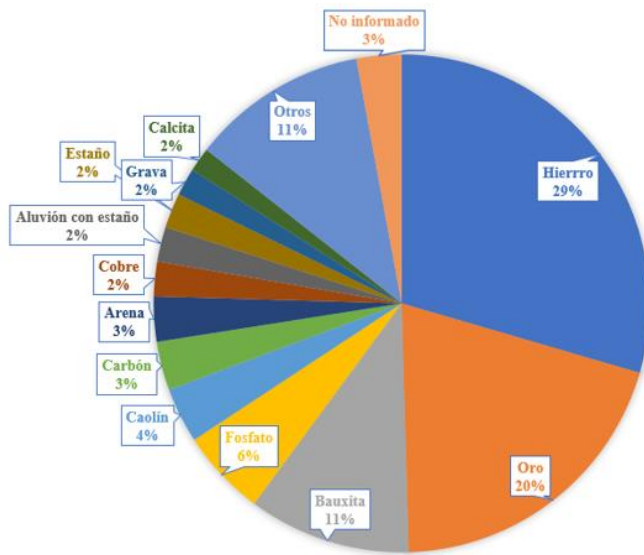


**Figura 16:** Volumen, altura y método constructivo de las 444 presas incluidas en la PNSP. DPA: Daño potencial asociado. El recuadro en rojo indica alturas inferiores a 15 m y volúmenes inferiores a 3.000.000 m<sup>3</sup>.

La Figura 16 confirma que la mayoría de las presas construidas con el método constructivo etapa única son las de menor altura y volumen.

En el cuadrante rojo en la zona inferior izquierda del gráfico, se encuentran las presas que podrían no estar incluidas en la PNSP por tener alturas inferiores a 15 metros y almacenar volúmenes inferiores a 3.000.000 m<sup>3</sup>. Sin embargo, como tienen un Daño Potencial Asociado (DPA) Medio y Alto, se encuentran incluidas en la PNSP y requieren un Plan de Seguridad de Presas (PSP). El DPA se refiere a las consecuencias de la presa y se explica en detalle más adelante.

Otra importante característica de los depósitos es el tipo de relaves almacenados. El territorio brasileño es rico en muchos tipos de minerales, en total 43 tipos, siendo los más extraídos hierro, oro, bauxita (aluminio), fosfato, caolín y carbón, como se puede ver en la Figura 17.



**Figura 17:** Tipos de relaves de acuerdo a los minerales extraídos en 444 presas incluidas en la PNSP. (Elaboración propia)

Las informaciones para la confección de la figura fueron obtenidas mediante el Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería (SIGPM 2021). Estos datos son subidos en la plataforma por un equipo de la compañía minera; por lo tanto, puede haber fallas en el ingreso de datos. Como se puede ver en la Figura 14, el 3% de las presas no tienen información del tipo de minería.

### 3.2 Clasificación de los depósitos de relaves brasileños

La Ordenanza 70.389/2022 de la ANM (2022) menciona que las presas deben ser clasificadas, por Categoría de Riesgo (CRI) y por Daño Potencial Asociado (DPA), basado en criterios establecidos por la ANM. La clasificación por CRI, que representa la vulnerabilidad de la estructura, puede ser definida como alto, medio o bajo, y se hace en función de las características de la presa, de su estado de conservación y del cumplimiento del Plan de Seguridad de Presas (PSP), que tiene como objetivo auxiliar en la gestión de seguridad de la presa. La clasificación por DPA, que representa las consecuencias en caso que haya una rotura de la presa, puede ser definida como alto, medio o bajo. Esta clasificación será realizada en función del potencial de pérdidas de vidas humanas y de los impactos económicos, sociales y ambientales como consecuencia de la rotura de la presa.

Es importante mencionar que la compañía minera debe implementar un sistema de monitoreo de las estructuras dentro de la PNSP, donde su complejidad está directamente relacionada al DPA. Además, la CRI define los Niveles de Emergencia asociados a las presas, que serán explicados posteriormente.

### 3.2.1 Clasificación según Categoría de Riesgo (CRI)

De acuerdo con la Ordenanza 70.389/2022 de la ANM (2022), en cuanto a la categoría de riesgo, las presas deben ser clasificadas de acuerdo con aspectos de vulnerabilidad que puedan influir en la posibilidad de ocurrencia de accidentes. Se deben evaluar tres matrices para establecer la Categoría de Riesgo: Características Técnicas (CT), Estado de Conservación (EC) y Plan de Seguridad de Presas (PS).

Para que una presa sea clasificada con una Categoría de Riesgo, alto, medio o bajo, se debe evaluar el puntaje total como la suma de la puntuación de cada una de las tres matrices. En la Tabla 12 se presenta la puntuación necesaria para la clasificación según la Categoría de Riesgo.

**Tabla 12:** Clasificación Categoría de Riesgo. (ANM, 2022)

<b>CATEGORÍA DE RIESGO (CRI)</b>	
<b>ALTO</b>	Puntaje CRI $\geq$ 80 o Puntaje EC* = 10
<b>MEDIO</b>	40 < Puntaje CRI < 80
<b>BAJO</b>	Puntaje CRI $\leq$ 40

\*Una puntuación de (10) en cualquier columna de Estado de Conservación (EC) implica automáticamente una categoría de riesgo alta y la necesidad de una acción inmediata por parte del propietario de la presa.

Las matrices de Características Técnicas, Estado de Conservación y de Plan de Seguridad de Presa se presentan en las Tablas 13 a 15.



**Tabla 13:** Matriz de Características Técnicas (CT) para la clasificación según la Categoría de Riesgo

<b>1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)</b>				
<b>Altura (a)</b>	Altura ≤ 15 m (0)	15m<Altura<30m (1)	30m≤Altura≤60m (4)	Altura>60m (7)
<b>Pendiente media de los taludes en la sección principal (b)</b>	Baja (<1V:3H) o presa de hormigón (0)	Intermedia (1V:2H < Pendiente < 1V:3H) (3)	Empinada (>1V:2H) (6)	–
<b>Largo coronamiento (c)</b>	Largo ≤ 50m (0)	50m<Largo<200m (1)	200m ≤Largo≤600m (2)	Largo > 600m (3)
<b>Caudal de Diseño (d)</b>	Máxima probable o Decamilenaria TR* = 10000 años (0)	Milenaria TR* = 1000 años (2)	TR* = 500 años (5)	TR menor a 500 años o Desconocida/ Estudio no confiable (10)
<b>Control de compactación (e)</b>	Existen documentos que acreditan el control de compactación según proyecto y que acreditan el control técnico durante la ejecución (0)	Existen estudios geotécnicos que comprueban el grado de compactación según proyecto (4)	No hubo control técnico y/o no hay información y/o compactación en disconformidad con el proyecto (10)	–
<b>Existencia de drenaje interna (f)</b>	Drenaje construido según proyecto o sin drenaje en proyecto (0)	Drenaje correctivo construido después de la finalización de la presa (4)	El sistema de drenaje no está de acuerdo con el diseño o inexistente o desconocido o estudio poco confiable o inoperable (10) Fundación desconocida/estudio no confiable (10)	–
<b>Fundación (g)</b>	Fundación investigada según proyecto (0)	Fundación parcialmente investigada (6)	Fundación desconocida/estudio no confiable (10)	–
<b>Método Constructivo (h)</b>	Etapá Única (0)	Aguas abajo (2)	Eje central (5)	Aguas arriba o desconocido (10)
<b>Instrumentación (i)</b>	Existe instrumentación de acuerdo con el proyecto técnico (0)	Existe instrumentación en desacuerdo con el proyecto, pero en proceso de instalación de instrumentos para adecuación al proyecto (2)	Existe instrumentación en desacuerdo con el proyecto sin proceso de instalación de instrumentos para adecuación al proyecto (6)	Presa no instrumentada en desacuerdo con el proyecto (8)
<b>Edad de la presa (j)</b>	entre 5 y 15 años (1)	entre 15 y 30 años (2)	< 5 años o > 30 años o sin información (3)	

\*El periodo de retorno (TR) es un dato fundamental para el diseño de estructuras hidráulicas en obras de ingeniería y en la obtención de cuotas de alerta de inundaciones.

**Tabla 14:** Matriz Estado de Conservación (EC) para la clasificación según la Categoría de Riesgo

<b>1.2 - ESTADO DE CONSERVACIÓN (EC)</b>				
<b>Confiabilidad del vertedero (k)</b>	Estructuras bien mantenidas y en funcionamiento normal / presa sin necesidad de vertedero (0)	Estructuras con problemas identificados y medidas correctivas en implementación (3)	Estructuras con problemas identificados y sin implementación de las medidas correctivas necesarias (6)	Estructuras con problemas identificados, con capacidad reducida y sin medidas correctivas (10)
<b>Filtración (l)</b>	Filtración totalmente controlada por el sistema de drenaje (0)	Humedad o surgencia en áreas aguas abajo estables y monitoreadas, paramentos, taludes y estribos (3)	Humedad o surgencia en las áreas aguas abajo, muros, taludes o estribos sin implementación de las medidas correctivas necesarias (6)	Surgencia en áreas aguas abajo con transporte de material o con flujo creciente o infiltración de material contenido, con potencial para comprometer la seguridad de la estructura. (10)
<b>Deformación o asentamiento (m)</b>	No hay deformaciones ni asentamientos que puedan comprometer la seguridad de la estructura. (0)	Existencia de grietas y asentamiento con la implementación de medidas correctivas (2)	Existencia de grietas y asentamiento sin implementación de las medidas correctivas necesarias (6)	Existencia de grietas, asentamientos, o deslizamientos, con el potencial de comprometer la seguridad de la estructura. (10)
<b>Deterioro de Taludes / Paramentos (n)</b>	No hay deterioro de taludes y revestimientos. (0)	Falla en la protección de taludes y paramentos, presencia de vegetación arbustiva (2)	Erosiones superficiales, hierros expuestos, presencia de vegetación arbórea, sin implementación de las medidas correctivas necesarias. (6)	Depresiones severas en los taludes, deslizamientos de tierra, surcos de erosión profunda, con el potencial de comprometer la seguridad de la estructura. (10)
<b>Drenaje superficial (o)</b>	Drenaje superficial existente y en funcionamiento (0)	Existencia de grietas y/o sedimentación y/o rebajes con medidas correctivas en ejecución (2)	Existencia de grietas y/o sedimentación y/o rebajes sin que se hayan implementado medidas correctivas (4)	Drenaje superficial no existente (5)

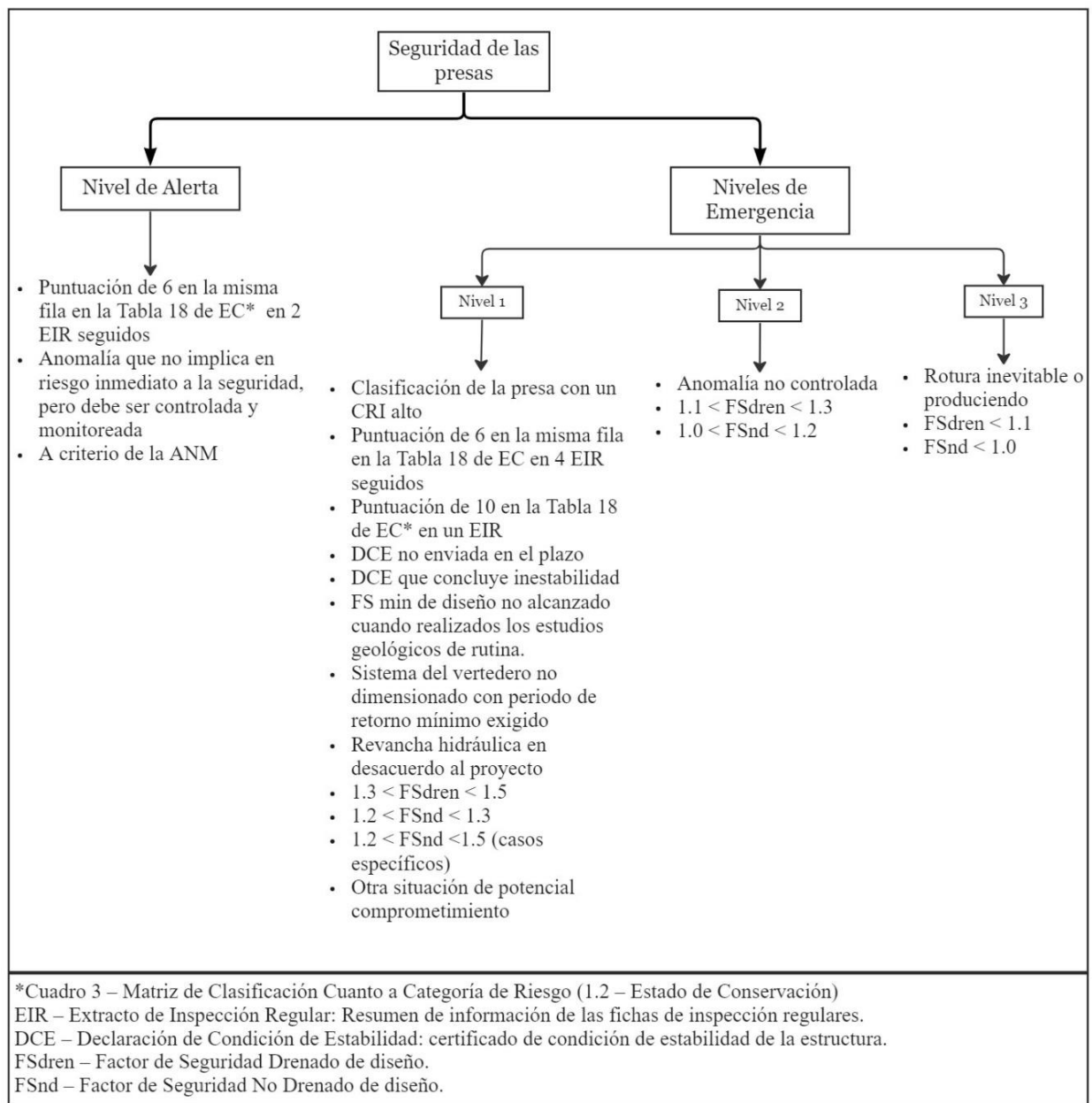
**Tabla 15:** Matriz de Plan de Seguridad de la Presa (PS) para la clasificación según la Categoría de Riesgo

<b>1.3 - PLAN DE SEGURIDAD DE LA PRESA (PS)</b>						
<b>Documentación del proyecto (p)</b>	Diseño con todos los elementos necesarios y suficientes para la correcta ejecución de la obra, y el “as built” (0)	Diseño con todos los elementos necesarios y suficientes para la correcta ejecución de la obra, o “as built” (2)	Proyecto 'como está' (3)	Proyecto básico (5)	proyecto conceptual (8)	No hay documentación del proyecto. (10)
<b>Estructura organizativa y calificación de los profesionales en el equipo de seguridad de la presa (q)</b>	Cuenta con una unidad administrativa con un profesional técnico calificado responsable de la seguridad de la presa. (0)	Cuenta con un profesional técnico calificado (propio o contratado) responsable de la seguridad de la presa (1)	Tiene una unidad administrativa sin un profesional técnico calificado responsable de la seguridad de la presa (3)	No cuenta con unidad administrativa y técnico calificado responsable de la seguridad de la presa (6)	–	–
<b>Manuales de procedimiento para inspecciones de seguridad y monitoreo (r)</b>	Cuenta con manuales de procedimientos para inspección, monitoreo y operación (0)	Solo cuenta con un manual de procedimientos de monitoreo (2)	Solo tiene manual de procedimientos de inspección (4)	No cuenta con manuales o procedimientos formales para monitoreo e inspecciones. (8)	–	–
<b>Plan de acción de emergencia PAE* (cuando lo requiera la agencia de inspección) (s)</b>	Tiene PAE (0)	No tiene PAE (no requerido por la agencia de inspección) (2)	PAE en preparación (4)	No tiene PAE (cuando requerido por la agencia de inspección) (8)	–	–
<b>Informes de inspección y monitoreo de instrumentación y análisis de seguridad (t)</b>	Emite periódicamente informes de inspección y monitoreo basados en la instrumentación y el análisis de seguridad (0)	Emite regularmente solo informes de análisis de seguridad (2)	Emite periódicamente solo informes de inspección y monitoreo (4)	Emite periódicamente solo informes de inspección visual (6)	No emite con regularidad informes de inspección y monitoreo y de análisis de seguridad (8)	–

\*Plan de Acción de Emergencia (PAE) es un documento que todas las presas con DPA alto deben tener y que determina situaciones de emergencia y las acciones que deben ser realizadas en caso de emergencia.

### 3.2.1.1 Nivel de alerta y Niveles de Emergencia para garantizar la seguridad de las presas

La ordenanza n°95 de 2022 de la ANM (2022) define que se deben considerar los niveles de alerta y emergencia para una adecuada seguridad de la presa. Los niveles de emergencia son considerados más graves que los niveles de alerta. Estos son divididos en Nivel 1, donde se requiere un acompañamiento de la estructura; Nivel 2, donde existe una acción realizada para subsanar el problema, pero el control de la anomalía no está siendo eficaz y requiere el reforzamiento de la presa; y Nivel 3, donde la ruptura es inminente o se está produciendo, requiere el rescate de personas. Los criterios para establecer los niveles de alerta y emergencia se detallan en la Figura 18.



**Figura 18:** Criterios para establecer niveles de emergencia de una presa de relaves (Elaboración propia)

### 3.2.2 Clasificación según Daño Potencial Asociado (DPA)

El Daño Potencial Asociado (DPA) de una Presa es el daño que puede ocurrir debido a una eventual rotura, fuga, filtración en el suelo o mal funcionamiento de una presa, independientemente de su probabilidad de ocurrencia, pudiendo ser agravado de acuerdo con las potenciales pérdidas de vidas humanas e impactos sociales, económicos y ambiental.

Para que una presa sea clasificada con un Daño Potencial Asociado, alto, medio o bajo, la presa tiene que cumplir con un puntaje de los criterios establecidos de acuerdo con la Ordenanza 70.389/2022 de la ANM (2022). En la Tabla 16, se presenta la puntuación necesaria para la clasificación segundo el Daño Potencial Asociado.

**Tabla 16:** Clasificación Daño Potencial Asociado. (ANM, 2022)

<b>DAÑO POTENCIAL ASOCIADO (DPA)</b>	
ALTO	Puntaje DPA $\geq$ 13
MEDIO	$7 <$ Puntaje DPA $<$ 13
BAJO	Puntaje DPA $\leq$ 7

La Tabla 17 presenta todos los parámetros utilizados para determinar las consecuencias en caso haya una rotura de presa. La tabla cuenta con puntuaciones según el volumen total del depósito, existencia de población aguas abajo, impacto ambiental e impacto socioeconómico.

**Tabla 17:** Matriz de clasificación según la Daño Potencial Asociado

<b>CLASIFICACIÓN EN CUANTO A DAÑOS POTENCIALES ASOCIADOS - DPA</b>					
<b>Volumen total del depósito (a)</b>	Muy pequeño: <= 500 mil m <sup>3</sup> (1)	Pequeño: 500 mil a 5 millones de m <sup>3</sup> (2)	Medio: 5 millones a 25 millones de m <sup>3</sup> (3)	Grande: 25 millones a 50 millones de m <sup>3</sup> (4)	Muy grande: >= 50 millones de m <sup>3</sup> (5)
<b>Existencia de población aguas abajo (b)</b>	NO EXISTENTE (no hay personas permanentes / residentes o temporales / en tránsito en el área afectada aguas abajo de la presa) (0)	POCO FRECUENTE (no hay personas ocupando permanentemente el área afectada aguas abajo de la presa, pero hay un camino lateral para uso local) (3)	FRECUENTES (no hay personas ocupando permanentemente el área afectada aguas abajo de la presa, pero existe una carretera municipal o estatal o federal u otra ubicación y / o emprendimiento para la eventual permanencia de personas que puedan verse afectadas) (5)	EXISTENTE (hay personas ocupando permanentemente el área afectada aguas abajo de la presa, por lo tanto, vidas humanas pueden verse afectadas) (10)	–
<b>Impacto ambiental (c)</b>	NO SIGNIFICATIVO (el área afectada aguas abajo de la presa está totalmente privada de sus condiciones naturales y la estructura almacena solo relaves de la Clase II 0 - Residuos inertes, según ABNT NBR 10004) (0)	POCO SIGNIFICATIVO (área afectada aguas abajo de la presa sin área de interés ambiental relevante o áreas protegidas en legislación específica, excluyendo APPs, y solo almacena Clase II 8 - Residuos inertes, de acuerdo con ABNT NBR 10004) (2)	SIGNIFICATIVO (el área afectada aguas abajo de la presa tiene un área de interés ambiental relevante o áreas protegidas en legislación específica, excluidas las APPs, y almacena solo la Clase II 8 - Residuos inertes, según ABNT NBR 10.004) (6)	SIGNIFICATIVO (presa almacena relaves o residuos sólidos clasificados en Clase II A-No Inerte, según NBR 10004 de ABNT) (8)	MUY SIGNIFICATIVO AGRAVADO (la presa almacena relaves o residuos sólidos clasificados en Clase I - Peligrosos según ABNT NBR)
<b>Impacto socioeconómico (d)</b>	NO EXISTENTE (no existen instalaciones en la zona afectada aguas abajo de la presa) (0)	BAJO (Existe una pequeña concentración de instalaciones residenciales, agrícolas, industriales o de infraestructura de relevancia cultural socioeconómica en el área afectada aguas abajo de la presa) (1)	MEDIO (hay una concentración moderada de instalaciones residenciales, agrícolas, industriales o de infraestructura de relevancia socioeconómica y cultural en el área afectada aguas abajo de la presa) (3)	ALTO (hay una alta concentración de instalaciones residenciales, agrícolas, industriales o de infraestructura de relevancia cultural y económica en el suelo en el área afectada aguas abajo de la presa) (5)	–

### 3.2.3 Matriz de Daño Potencial Asociado y Categoría de Riesgo

Con el fin de diferenciar el universo de las presas, en cuanto al alcance y frecuencia de las acciones de seguridad, y como herramienta de planificación y gestión, la ANM creó la Matriz de Riesgo y Posibles Daños Asociados para que las presas se agrupen en clases (A, B, C, D o E). La Tabla 18 muestra la matriz de clasificación para establecer la clase de las presas.

**Tabla 18:** Matriz de Clase A, B, C, D y E. (ANM, 2022)

Categoría de Riesgo	Daño Potencial Asociado		
	Alto Puntaje DPA $\geq 13$	Medio $7 < \text{Puntaje DPA} < 13$	Bajo Puntaje DPA $\leq 7$
Alto Puntaje CRI $\geq 80$ o Puntaje EC* = 10	A	B	C
Medio $40 < \text{Puntaje CRI} < 80$	B	C	D
Bajo Puntaje CRI $\leq 40$	B	C	E

\*Estado de Conservación

Con los datos de 2021 del Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería (SIGPM), se analiza en la Tabla 19 la condición de los depósitos de relaves según su DPA y CRI por medio de la matriz anterior, obteniendo el número de depósitos que se clasifica en cada clase, además de su nivel de emergencia asociado por clase.

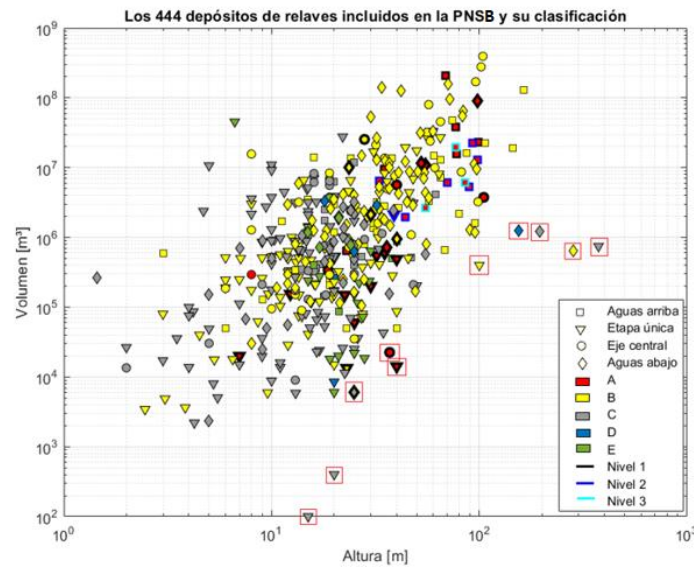
**Tabla 19:** Matriz de Daño Potencial Asociado y Categoría de Riesgo de los 444 depósitos.

Categoría de Riesgo	Daño Potencial Asociado		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	<b>Clase A: 36</b>	<b>Clase B: 11</b>	<b>Clase C: 1</b>
	Nivel 1: 24	Nivel 1: 5	Nivel 1: 1
	Nivel 2: 8	Sin emergencia: 6	Nivel 2: 0
	Nivel 3: 3		Nivel 3: 0
	Sin emergencia: 1		
Medio	<b>Clase B: 16</b>	<b>Clase C: 32</b>	<b>Clase D: 6</b>
Bajo	<b>Clase B: 199</b>	<b>Clase C: 119</b>	<b>Clase E: 24</b>

La Clase A contiene la gran mayoría de los depósitos que están en nivel de emergencia en el país. En esta clase, todos los depósitos tienen DPA alto, o sea, la gran mayoría de los depósitos que se encuentran en condición inestable, pueden provocar daños a las personas, al medio ambiente o daños socioeconómicos. En seguida, se tiene la clase B con cinco depósitos en estado de emergencia y la Clase C con un depósito en nivel 1 de emergencia.

### 3.3 Análisis de los depósitos de relaves brasileños

Para analizar los depósitos de relaves brasileños, se grafican en la Figura 19 los 444 depósitos incluidos en la Política Nacional de Seguridad de Presas, como función del volumen almacenado y la altura de la presa, separándolos por sus métodos constructivos, tipo de clasificación y, si corresponde, su nivel de emergencia. Como se puede ver en la figura, muchos depósitos son de clase B (226) y C (152). Prácticamente todos de clase A (36) tienen algún nivel de emergencia asociado, excepto uno que es eje central. Pocos son los depósitos que tienen clase D (6) o E (24). Se destaca también que hay depósitos que poseen alturas muy grandes en relación a los volúmenes almacenados que son muy pequeños. Algunos de estos casos anómalos se encuentran destacados en cuadros rojos de la Figura 19.



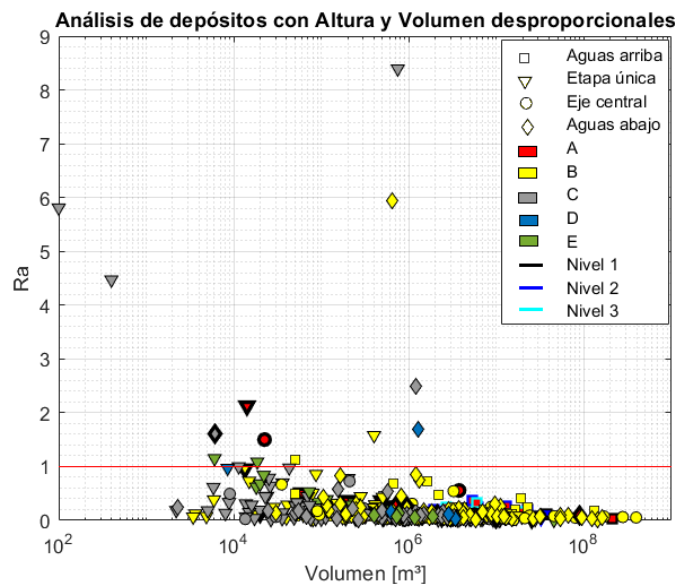
**Figura 19:** Clasificación y nivel de emergencia de las 444 presas de relaves incluidas en la PNSP. Casos anómalos de relación altura-volumen almacenado se destacan en cuadros rojos. (Elaboración propia)

Para analizar las presas que tienen alturas desproporcionadas en relación con el volumen almacenado, se define la razón de aspecto  $R_a$  (Ecuación 1) como la razón entre altura y la raíz del área basal del depósito, que es equivalente a un ancho representativo de la base del depósito.

$$R_a = \frac{Altura}{\sqrt{\frac{Volumen}{Altura}}} \quad (1)$$

Con la ecuación anterior, se puede interpretar cuántas veces la altura es mayor que una de las dimensiones basales de la presa. En la Figura 20 se muestra la razón de aspecto como función del volumen almacenado. Los casos con anomalía son aquellos con  $R_a > 1$  por haber una gran desproporción de las dimensiones basales en relación a la altura. En total se tienen 13 presas que cumplen esta condición, los cuales detallan en la Tabla 20.





**Figura 20:** Razón de aspecto como función del volumen almacenado de las 444 presas de relaves incluidas en la PNSP. (Elaboración propia)

**Tabla 20:** Depósitos con geometría desproporcionada en relación a Altura y Volumen

Nombre de la Presa	Minería	Altura (m)	Volumen (m³)	Razón de Aspecto	Método constructivo	Clase	Nivel de emergencia
Rejeito Não Magnético 04	Vanadio	374.7	775.615,6	8.2	Etapa única	C	Sin emergencia
BR Santa Felicidade	Oro	284	650.000	5.9	Aguas Abajo	B	Sin emergencia
Dique 01	Hierro	15	100	5.8	Etapa única	C	Sin emergencia
Dique 02	Hierro	20	400	4.5	Etapa única	C	Sin emergencia
Rejeito Max	Arena*	196	1.205.302	2.5	Aguas abajo	C	Sin emergencia
II Mina Engenho	Oro	40	14.160,67	2.1	Etapa única	A	Nivel 1
Tanque Fundo	Oro	154	1.267.291	1.7	Aguas abajo	D	Sin emergencia
Dique B4 Ipê	Hierro	25	6.053	1.6	Aguas abajo	C	Nivel 1
Forquilha V	Hierro	100	400.000	1.6	Etapa única	B	Sin emergencia
B1A Ipê	Hierro	37	22.460	1.5	Eje central	A	Nivel 1
II	Hierro	20	6.036	1.2	Etapa única	E	Sin emergencia
Volta Grande 1	Pegmatita	40	50.000	1.1	Aguas Arriba	B	Sin emergencia
Dique Pilha da Vila II	Grava*	28	18.556	1.1	Etapa única	E	Sin emergencia

\*Tipo de minería registrada en el Sistema Integrado de Presas de Minería, que no es considerada como minería, el problema puede estar asociado a que los datos hayan sido subidos de forma equivocada.

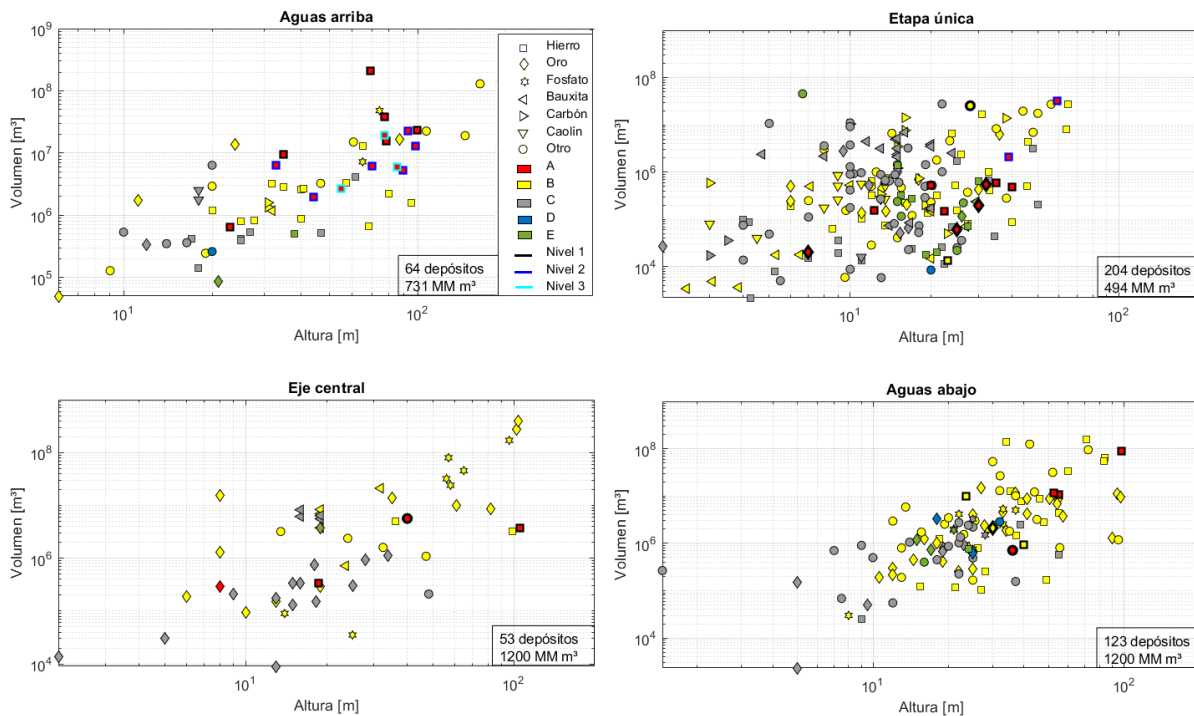
En la mayoría de los casos vistos como anomalía, se puede deducir que los datos ingresados en el Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería (SIGPM) fueron ingresados de forma equivocada, ya que muchos de los datos no conciden con la realidad de las dimensiones de los depósitos. Esto se debe a que la propia compañía minera actualiza los datos en el Sistema y las autoridades no fiscalicen si los datos ingresados conciden o no con la realidad.

Danese (2020) concluyó en su estudio que las informaciones proporcionadas por las empresas en el SIGPM tienen fallas. La misma afirma que inspección por parte de la ANM debería ser más estricta y punitiva, con el fin de evitar discrepancias en las informaciones proporcionadas por las empresas. Para esto, requiere un aumento significativo de inspectores especializados y legislación que permita tales acciones.

Hay casos en que las presas tienen dimensiones no muy comunes, como las presas de la tabla 20, estas presas no serán estudiadas en este trabajo.

### 3.3.1 Análisis de los depósitos según sus métodos constructivos

La Figura 21 presenta los depósitos de relaves según su método constructivo, su clasificación de acuerdo con la matriz de Categoría de Riesgo, Daño Potencial Asociado, niveles de emergencia y tipo de minería.



**Figura 21:** Presas clasificadas por clase, nivel de emergencia y tipo de minería. Presas construidas con (a) método aguas arriba (64 presas), (b) método etapa única (204 presas), (c) método eje central (53 presas) y (d) método aguas abajo (123 presas). (Elaboración propia)

Con 64 presas construidas por el método constructivo aguas arriba, se tiene que este método es el segundo tipo de construcción con menor número. Se destaca también que, aunque haya pocos depósitos de relaves aguas arriba, el mismo tiene asociado gran volumen, con un total de 731 Millones de  $m^3$ . Por ser un método considerado más peligroso, el número de depósito con nivel de emergencia, y clases A y B es el mayor que todos los otros depósitos de relaves, como se muestra en la Tabla 21 y en las próximas tablas con el cuantitativo de presas por clase y nivel de emergencia.

**Tabla 21:** Número de presas construidas con el método aguas arriba clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (64 presas en total)

(CRI)	(DPA)		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	<b>Clase A: 15</b>	<b>Clase B: 1</b>	<b>Clase C: 0</b>
	Nivel 1: 6		
	Nivel 2: 6		
	Nivel 3: 3		
Medio	<b>Clase B: 4</b>	<b>Clase C: 2</b>	<b>Clase D: 1</b>
Bajo	<b>Clase B: 26</b>	<b>Clase C: 13</b>	<b>Clase E: 2</b>

Con la característica de ser un método constructivo menos estable que los demás y por ser el método constructivo de la mayoría de los depósitos que sufrieron rotura, la construcción de depósitos con el método aguas arriba fue prohibida y las existentes deberán ser *descaracterizadas*<sup>1</sup>.

La Tabla 22 contiene informaciones respecto del método constructivo etapa única que es el método con mayor número de depósitos en Brasil, con un total de 204 presas. Este método posee una acumulación de relaves igual a 494 Millones de m<sup>3</sup>, lo que significa que, aunque el método posee un gran número de depósitos, en general son presas de altura y volumen menores. Por ser el método constructivo etapa única el método de menor almacenamiento de relaves y tener alturas y volúmenes menores que otros depósitos, el número de depósitos en clases A y B, y depósitos en nivel de emergencia son menores comparado a otros métodos.

**Tabla 22:** Número de presas construidas con el método de etapa única clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (204 presas en total)

(CRI)	(DPA)		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	<b>Clase A: 12</b>	<b>Clase B: 4</b>	<b>Clase C: 0</b>
	Nivel 1: 10	Sin emergencia: 2	
	Nivel 2: 2	Nivel 1: 2	
Medio	<b>Clase B: 4</b>	<b>Clase C: 18</b>	<b>Clase D: 1</b>
Bajo	<b>Clase B: 80</b>	<b>Clase C: 69</b>	<b>Clase E: 16</b>

La Tabla 23 contiene informaciones de los depósitos de relaves eje central. En Brasil, existen actualmente 53 depósitos construidos con este método de construcción. Es el método con menor número de presas construidas, pero concentra un gran volumen de los relaves almacenados, aproximadamente 1200 Millones de m<sup>3</sup>. El método posee en su mayoría depósitos en clase B y aunque

<sup>1</sup> El término “descaracterizada” es un término que existe en el idioma portugués. La Ley N ° 14.066, de 30 de septiembre de 2020 define por presa *descaracterizada* a aquella que no opera como estructura de contención de sedimentos o relaves, no tiene las características de presa y está destinada a otro propósito. Esta ley exige que el empresario dueño del depósito de relaves deberá tener la presa descaracterizada a más tardar el 25 de febrero de 2022.

haya un gran volumen y altura de presas asociados a este método, existen pocos depósitos en nivel de emergencia.

**Tabla 23:** Número de presas construidas con el método de eje central clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (53 presas en total).

(CRI)	(DPA)		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	<b>Clase A: 5</b>	<b>Clase B: 1</b>	<b>Clase C: 0</b>
	Nivel 1: 4		
	Sin emergencia: 1		
Medio	<b>Clase B: 2</b>	<b>Clase C: 3</b>	<b>Clase D: 0</b>
Bajo	<b>Clase B: 25</b>	<b>Clase C: 16</b>	<b>Clase E: 1</b>

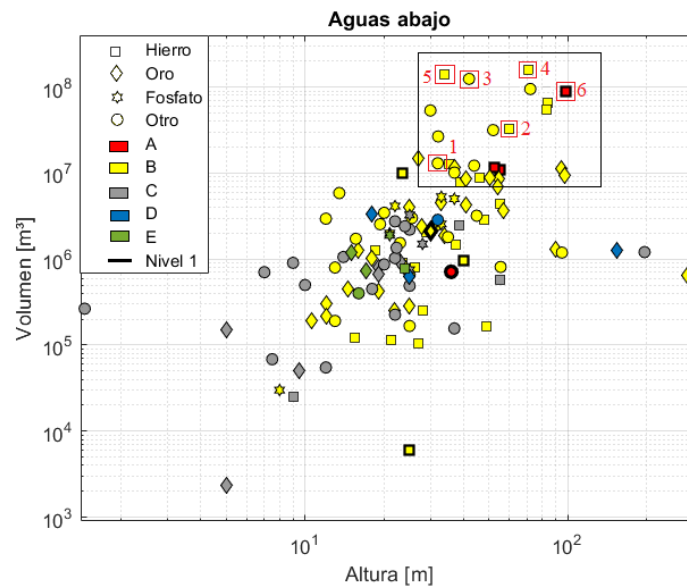
En la Tabla 24 se puede ver informaciones de las presas construidas con el método de aguas abajo que es considerado el método más seguro de construcción y ocupa el segundo lugar con mayor número de depósitos construidos en el país. Este tipo de construcción tiene gran volumen de almacenamiento de relaves, donde los 123 depósitos almacenan 1200 Millones de m<sup>3</sup> de relaves. El método tiene pocos casos de clase A, pero muchos en clase B. El número de depósitos en nivel de emergencia es pequeño, lo que ratifica que el método es un tipo de construcción segura.

**Tabla 24:** Número de presas construidas con el método de aguas abajo clasificadas por Clase y Nivel de Emergencia (123 presas en total).

(CRI)	(DPA)		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	<b>Clase A: 4</b>	<b>Clase B: 5</b>	<b>Clase C: 1</b>
	Nivel 1: 4	Sin emergencia: 2	
		Nivel 1: 3	
Medio	<b>Clase B: 6</b>	<b>Clase C: 9</b>	<b>Clase D: 4</b>
Bajo	<b>Clase B: 68</b>	<b>Clase C: 21</b>	<b>Clase E: 5</b>

## Capítulo 4: Selección y estudio de depósitos de relaves en Brasil

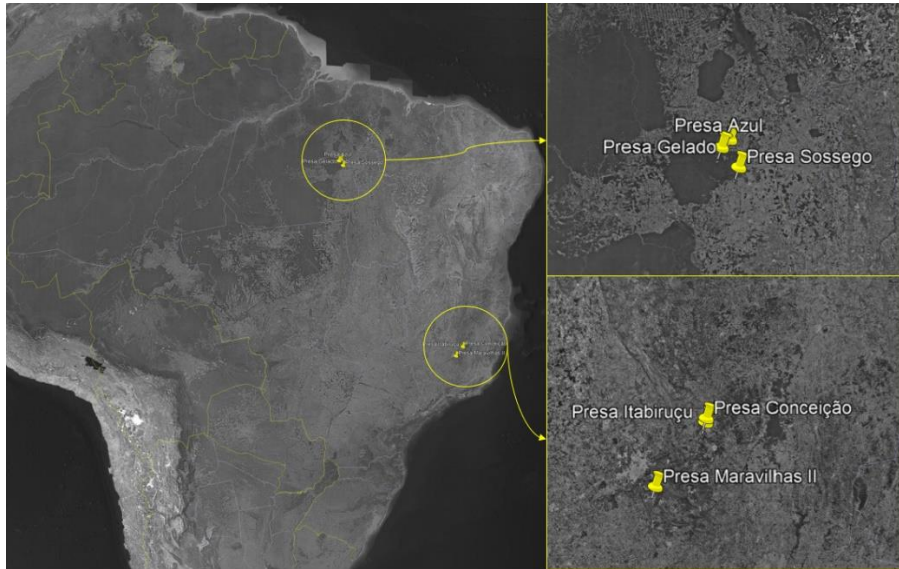
Los seis depósitos de relaves en Brasil que se analizan en esta sección fueron seleccionados según la cantidad de informaciones disponibles y su formato. Estos depósitos se encuentran enumerados en la Figura 22. Todos los depósitos seleccionados tienen gran volumen y altura, y esto por consiguiente se refleja en su clasificación, ya sea de clase A o B. Además, uno de los depósitos se encuentra en nivel 1 de emergencia. La Tabla 25 presenta informaciones detalladas de estos depósitos. La Figura 23 presenta la ubicación de estos depósitos en Brasil.



**Figura 22:** Depósitos de relaves aguas abajo seleccionados y analizados en este estudio.

**Tabla 25:** Identificación de los depósitos de relaves seleccionados y analizados en este estudio

Depósito	Nombre	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Minería
1	Azul	32	12.995.662	Manganeso
2	Conceição	60	32.874.318	Hierro
3	Sossego	42	124.466.706	Cobre
4	Itabiruçu	71	159.240.000	Hierro
5	Maravilhas II	98	90.122.658	Hierro
6	Gelado	34	141.187.217	Hierro



**Figura 23:** Mapa con la ubicación de depósitos de relaves seleccionados y analizados en este estudio

#### 4.1 Presa Azul

La Presa Azul está ubicada en el complejo Carajás, donde la minería extraída es el manganeso. Esta presa pertenece a la empresa VALE S.A. La Figura 24 es una imagen de la Presa Azul. Como se puede ver en la imagen, la presa contiene gran cantidad de agua almacenada. La Tabla 26 contiene informaciones técnicas de la presa.

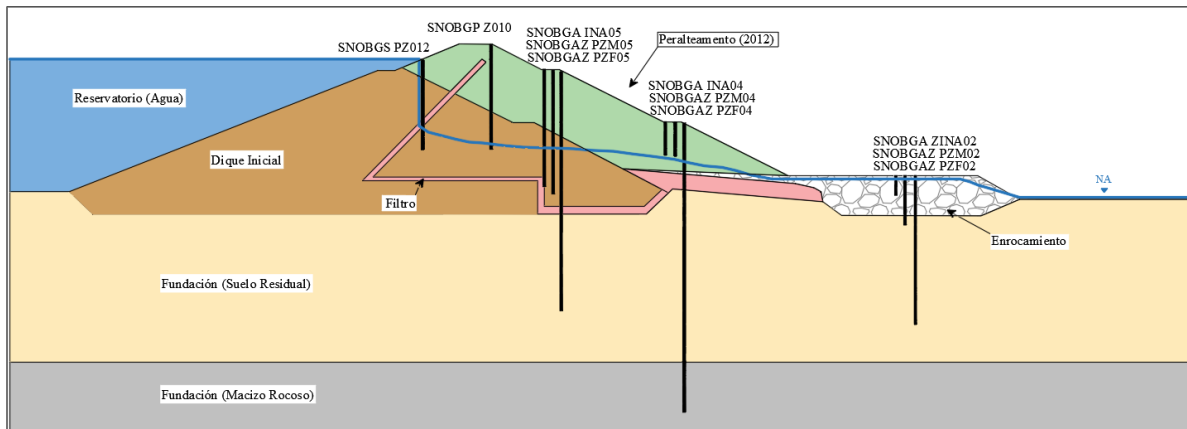


**Figura 24:** Presa Azul. Coordenadas:  $-06^{\circ}04'41.300''$ ,  $-50^{\circ}17'29.300''$  (Google Earth, 2021)

**Tabla 26:** Ficha técnica de la Presa Azul. (Souza, 2018)

DATOS GENERALES		
Estado operacional actual (2021)	En operación	
Tipo de construcción	Aguas abajo	
Minería	Manganeso	
Cota del coronamiento (m)	501	
Largo del coronamiento (m)	305	
Altura de la presa (m)	32	
Área de almacenamiento (m <sup>2</sup> )	1.990.675	
Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> )	12.517.282,37	
INSTRUMENTACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA
Regleta de nivel de agua	1	Mensual
Medidor de desplazamiento	17	Mensual
Medidor de flujo	2	Mensual
Piezómetros	42	Mensual
Indicador de Nivel de Agua	15	Mensual
Inclinómetro	2	Mensual
Marco Superficial	7	Mensual
HIDROLOGÍA/ HIDRÁULICA		
Revancha (m)	3	
Nivel de Agua máximo operacional (m)	498	
Período de Retorno	10.000 años	

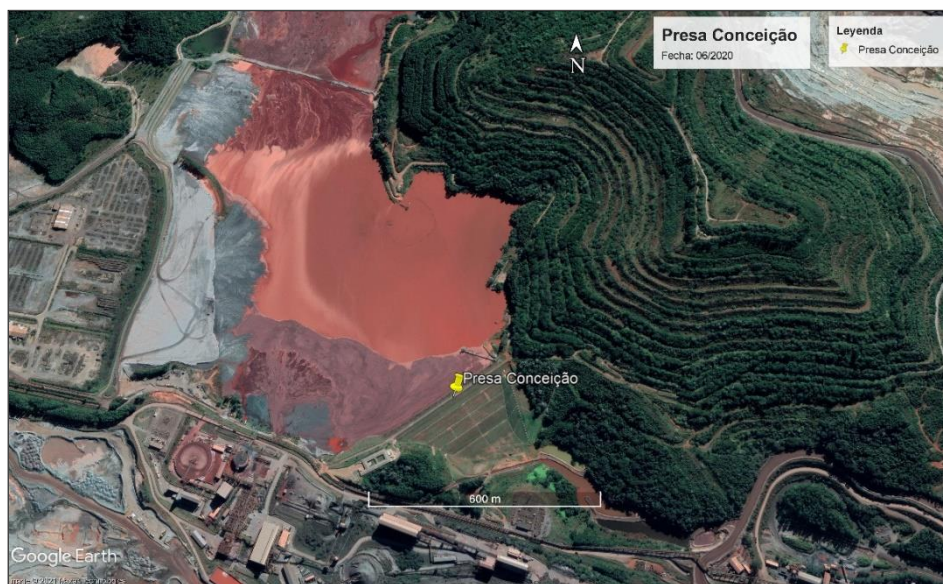
La Figura 25 representa una sección transversal de la Presa Azul con la ubicación de los piezómetros.



**Figura 25:** Sección transversal de la Presa Azul. (Modificado de Souza, 2018)

## 4.2 Presa Conceição

La Presa Conceição está ubicada en el Municipio de Itabira-MG en el Complejo Minerador de Itabira, donde la minería es el hierro. La Presa Conceição pertenece a la empresa VALE S.A. La Figura 26 muestra la Presa Conceição y en la Tabla 27 contiene informaciones técnicas de la presa.



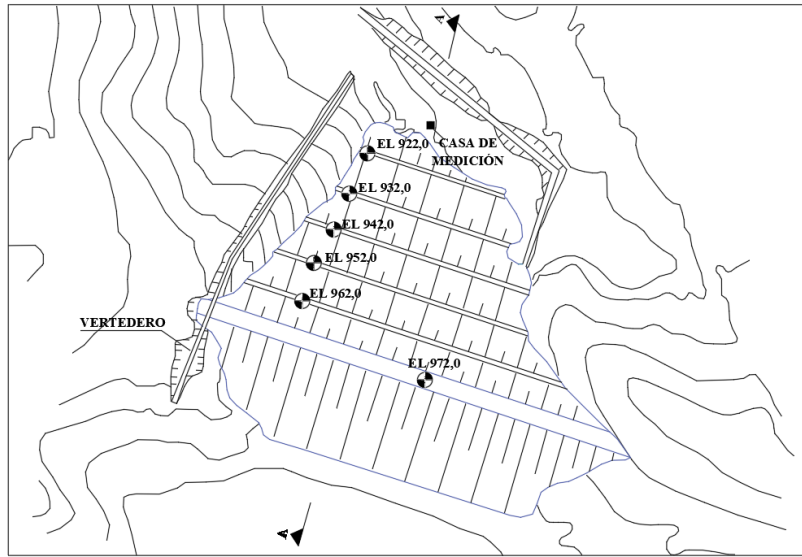
**Figura 26:** Presa Conceição. Coordenadas:  $-19^{\circ}38'51.300''$ ,  $-43^{\circ}16'26.900''$  (Google Earth, 2021)

**Tabla 27:** Ficha técnica de la presa Conceição. (CBDB, 2012)

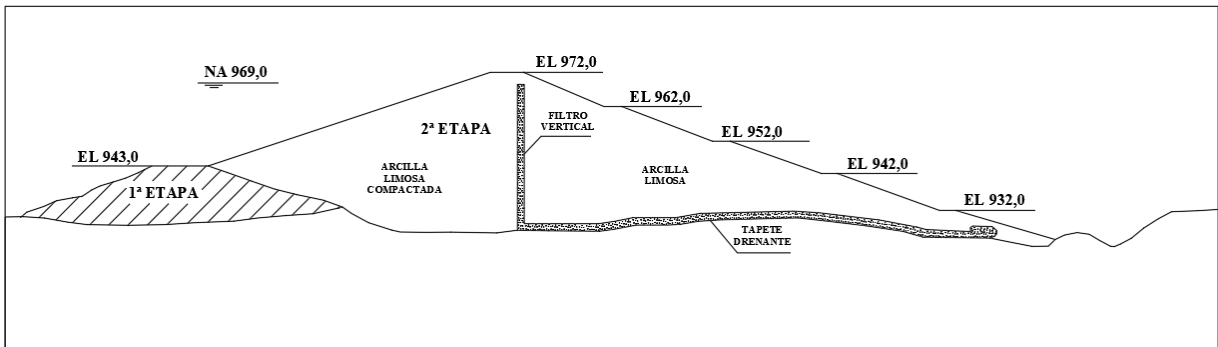
DATOS GENERALES		
Estado operativo actual (2021)	En operación	
Tipo de construcción	Aguas abajo	
Minería	Hierro	
Cota del coronamiento (m)	972	
Largo del coronamiento (m)	No informado	
Altura de la presa (m)	60	
Área de almacenamiento (m <sup>2</sup> )	1.850.000	
Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> )	40.600.000	
INSTRUMENTACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA
Regleta de nivel de agua	1	No informado
Medidor de flujo	3	No informado
Piezómetros	14	No informado
Indicador de Nivel de Agua	3	No informado
Marco Superficial	11	No informado
HIDROLOGÍA/ HIDRÁULICA		
Revancha (m)	1.75	
Nivel de Agua máximo operacional (m)	969	
Período de Retorno	10.000 años	

Las Figuras 27 y 28 presentan respectivamente una vista en planta y una sección transversal de la presa.





**Figura 27:** Vista en planta de la Presa Conceição. (Modificado de CBDB, 2012)



**Figura 28:** Sección transversal de la Presa Conceição. (Modificado de CBDB, 2012)

### 4.3 Presa Sossego

La Presa Sossego está ubicada en el Municipio de Canaã dos Carajás-PA, donde la minería es el cobre. Esta presa pertenece a la empresa VALE S.A. La Figura 29 presenta la presa Sossego y la Tabla 28 contiene informaciones técnicas de la presa.



**Figura 29:** Presa Sossego. Coordenadas: 06°25'44.792'', -50°04'12.554'' (Google Earth, 2021)

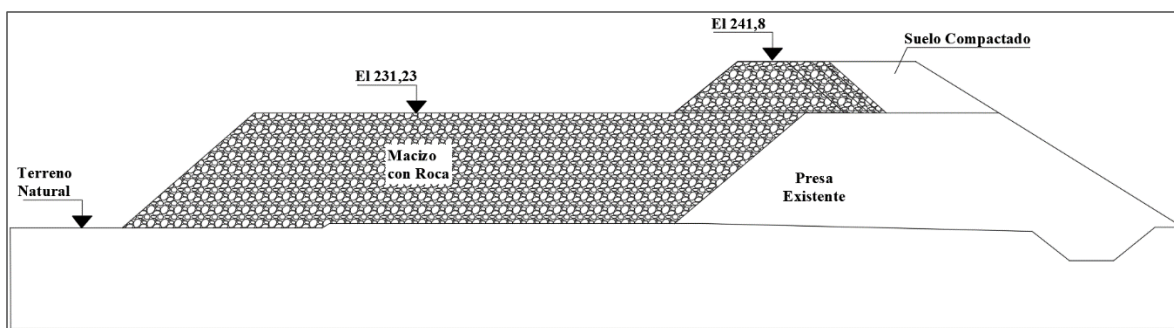
**Tabla 28:** Ficha técnica de la presa Sossego. (CBDB, 2012)

DATOS GENERALES		
Estado operativo actual (2021)	En operación	
Tipo de construcción	Aguas abajo	
Minería	Cobre	
Cota del coronamiento (m)	No informado	
Largo del coronamiento (m)	4770	
Altura de la presa (m)	32	
Área de almacenamiento (m <sup>2</sup> )	No informado	
Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> )	No informado	
INSTRUMENTACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA
Regleta de nivel de agua	3	No informado
Marcos Topográficos	3	No informado
Piezómetros	27	No informado
HIDROLOGÍA/ HIDRÁULICA		
Revancha (m)	No informado	
Nivel de Agua máximo operacional (m)	No informado	
Período de Retorno	No informado	

La instrumentación para el monitoreo geotécnico de la presa consta de:

- 3 unidades de marcos topográficos superficiales atado a puntos de referencia, a mediciones de desplazamiento horizontal y vertical;
- 3 unidades de regleta de nivel de agua – instaladas cerca del aliviadero, para medir el nivel del embalse.
- El sistema de monitoreo piezométrico es realizado a través de tres tramos. instrumentado (secciones 54, 127 y 154), y en cada uno hay 9 piezómetros instalados.

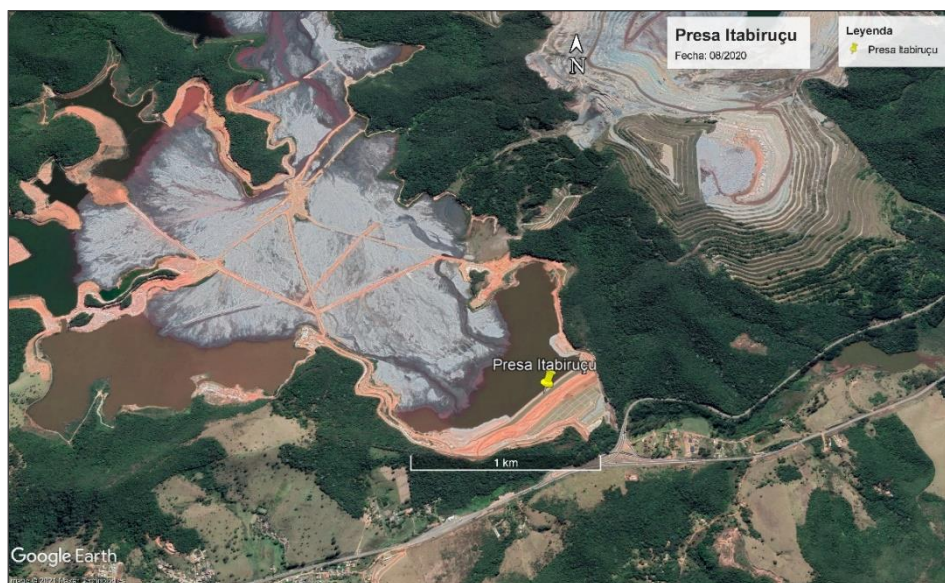
La Figura 30 contiene la sección transversal de la presa Sossego.



**Figura 30:** Sección transversal de la Presa Sossego. (Modificado de CBDB, 2012)

## 4.4 Presa Itabiruçu

La Presa Itabiruçu está ubicada en el Municipio de Itabira-MG, en el Complejo Minerador de Itabira. La minería es de hierro. La presa Itabiruçu pertenece a la empresa VALE S.A. La Figura 31 presenta la presa Itabiruçu y la Tabla 29 contiene informaciones técnicas sobre la presa.

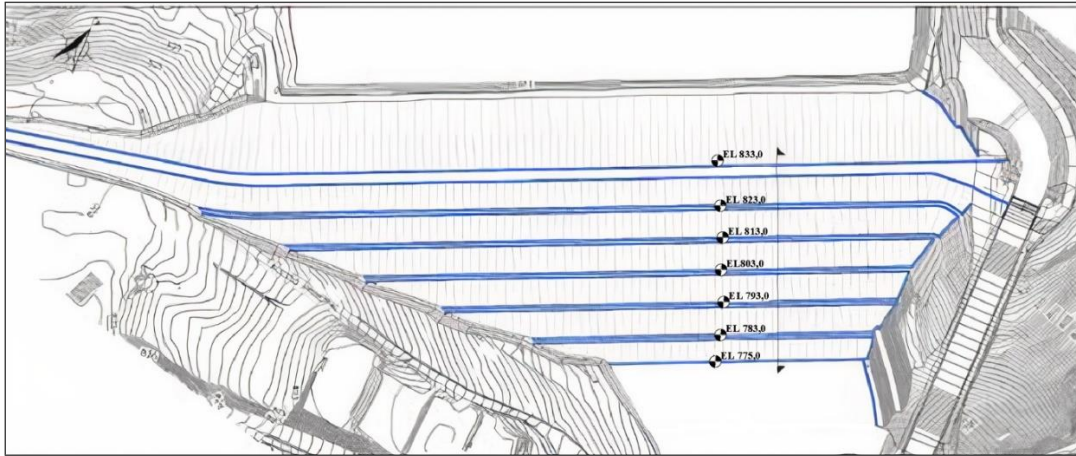


**Figura 31:** Presa Itabiruçu. Coordenadas: -19°41'07.300'', -43°41'07.300'' (Google Earth, 2021)

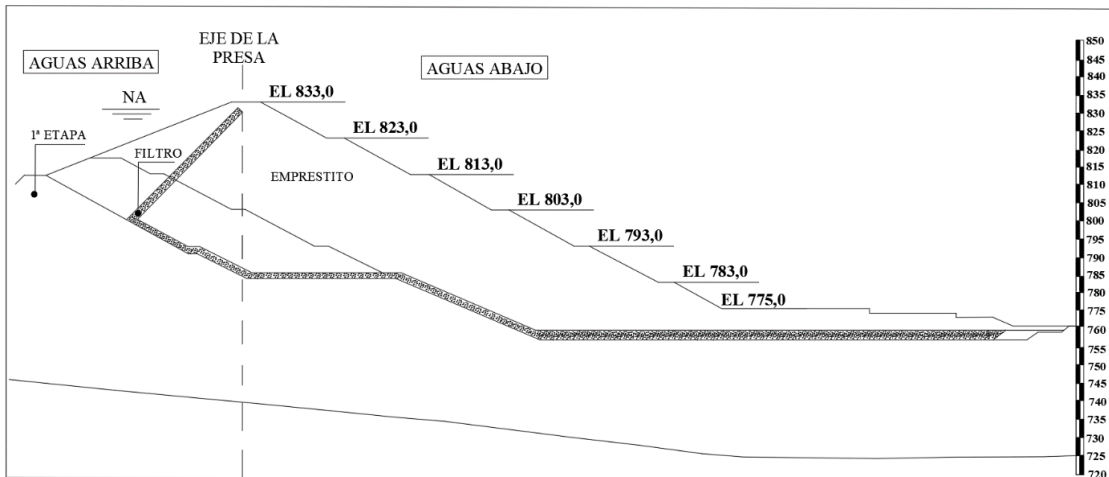
**Tabla 29:** Ficha técnica de la presa Itabiruçu. (CBDB, 2012)

DATOS GENERALES		
Estado operativo actual (2021)	En operación	
Tipo de construcción	Aguas abajo	
Minería	Hierro	
Cota del coronamiento (m)	833	
Largo del coronamiento (m)	758	
Altura de la presa (m)	68	
Área de almacenamiento (m <sup>2</sup> )	No informado	
Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> )	230.000.000	
INSTRUMENTACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA
Regleta de nivel de agua	1	Mensual
Medidor de flujo	1	Mensual
Piezómetros	40	Mensual
Medidor de asentamiento magnético	5	Mensual
Marcos Superficiales	29	Mensual
HIDROLOGÍA/ HIDRÁULICA		
Revancha (m)	2.29	
Nivel de Agua máximo operacional (m)	828	
Período de Retorno	10.000 años	

Los piezómetros son instalados en la fundación, en el macizo y en la alfombra drenante. Las Figuras 32 y 33 presentan respectivamente una vista en planta y una sección transversal de la presa Itabiruçu.



**Figura 32:** Vista de la Presa Itabiruçu. (Modificado de CBDB, 2012)



**Figura 33:** Sección transversal de la Presa Itabiruçu. (Modificado de CBDB, 2012)

## 4.5 Presa Maravilhas II

La presa Maravilhas II está ubicada en el Municipio de Itabirito-MG en el complejo Itabiritos. La minería es de hierro. Esta presa pertenece a la empresa VALE S.A. La Figura 34 presenta la presa Maravilhas II y la Tabla 30 contiene informaciones técnicas sobre la presa.

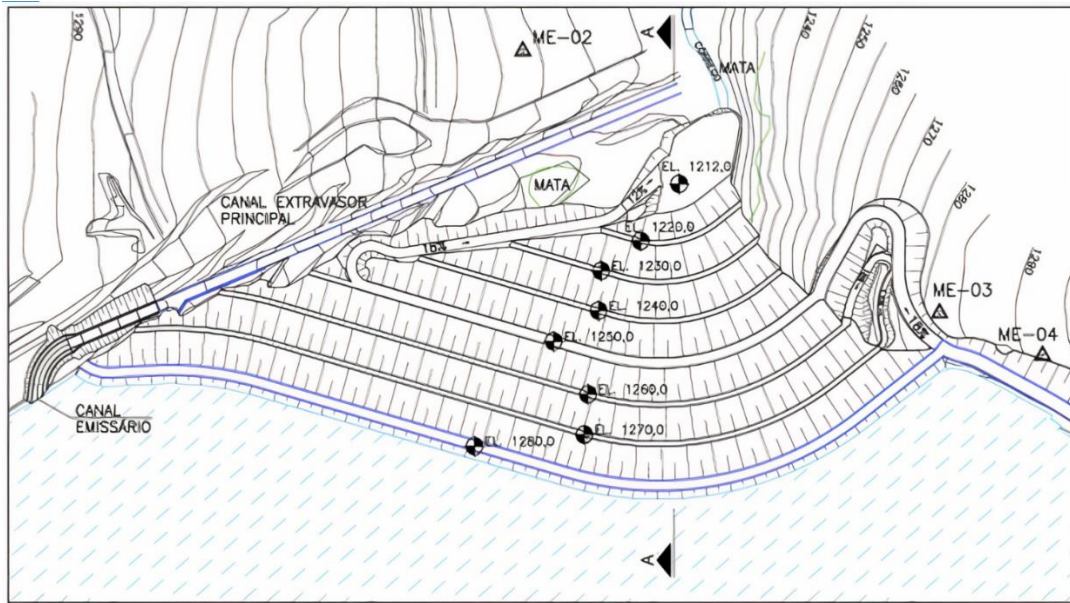


**Figura 34:** Presa Maravilhas II. Coordenadas:  $-20^{\circ}12'51.900''$ ,  $-43^{\circ}53'30.100''$  (Google earth, 2021)

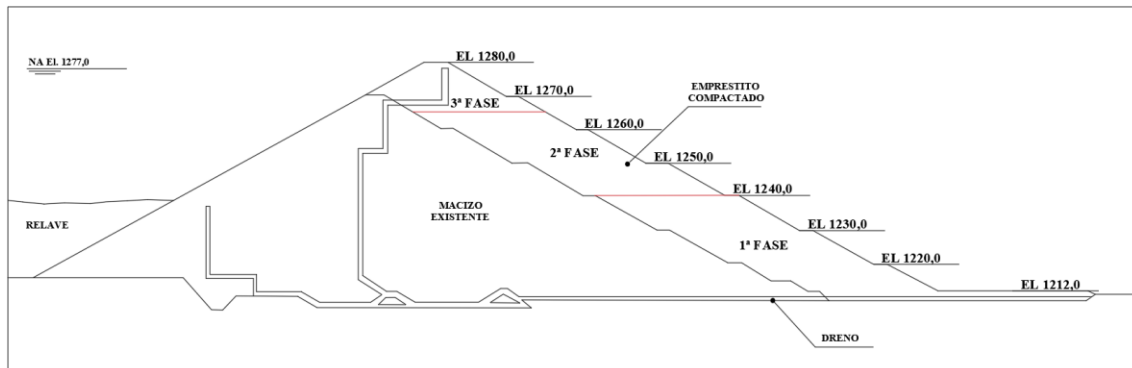
**Tabla 30:** Ficha técnica de la presa Maravilhas II. (CBDB, 2012)

DATOS GENERALES		
Estado operativo actual (2021)	Cerrado	
Tipo de construcción	Aguas abajo	
Minería	Hierro	
Cota del coronamiento (m)	1280	
Largo del coronamiento (m)	550	
Altura de la presa (m)	71	
Área de almacenamiento (m <sup>2</sup> )	1.470.000	
Volumen de almacenamiento (m <sup>3</sup> )	52.600.000	
INSTRUMENTACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA
Medidor de nivel de agua	6	No informado
Medidor de flujo	1	No informado
Piezómetros	8	No informado
Marcos Superficiales	15	No informado
HIDROLOGÍA/ HIDRÁULICA		
Revancha (m)	1.2	
Nivel de Agua máximo operacional (m)	1276.5	
Período de Retorno	10.000 años	

Para ayudar a evaluar el comportamiento de la presa después de la tercera elevación (El. 1.270,00 m), se ejecutaron según lo previsto en proyecto la instalación de piezómetros e indicadores de nivel de agua, además de medidores de flujo y de deformación interna del macizo. Las Figuras 35 y 36 presentan respectivamente una vista en planta y una sección transversal de la presa.



**Figura 35:** Vista de la Presa Itabiruçu. (CBDB, 2012)



**Figura 36:** Sección transversal de la Presa Maravilhas II. (Modificado de CBDB, 2012)

## 4.6 Presa Gelado

La presa Gelado está ubicada en el municipio de Parauabepas-PA. La minería extraída es el hierro. La presa Gelado pertenece a la empresa VALE S.A. La Figura 37 presenta la presa Gelado y la Tabla 31 contiene informaciones técnicas a respecto de la presa.



**Figura 37:** Presa Gelado. Coordenadas:  $-05^{\circ}58'45.400''$ ,  $-50^{\circ}08'29.100''$  (Google earth, 2021)

**Tabla 31:** Ficha técnica de la presa Gelado. (CBDB, 2012)

DATOS GENERALES		
Estado operativo actual (2021)	En operación	
Tipo de construcción	Aguas abajo	
Minería	Hierro	
Cota del coronamiento (m)	212.1	
Largo del coronamiento (m)	994	
Altura de la presa (m)	34	
Área del reservorio (m <sup>2</sup> )	No informado	
Volumen del reservorio (m <sup>3</sup> )	141.187.217	
INSTRUMENTACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA
Medidor de nivel de agua	10	No informado
Medidor de flujo	2	No informado
Piezómetros	16	No informado
Marcos Superficiales	6	No informado
HIDROLOGÍA/ HIDRÁULICA		
Revancha (m)	No informado	
Nivel de Agua máximo operacional (m)	No informado	
Período de Retorno	No informado	



## 4.7 Observaciones sobre los ejemplos revisados

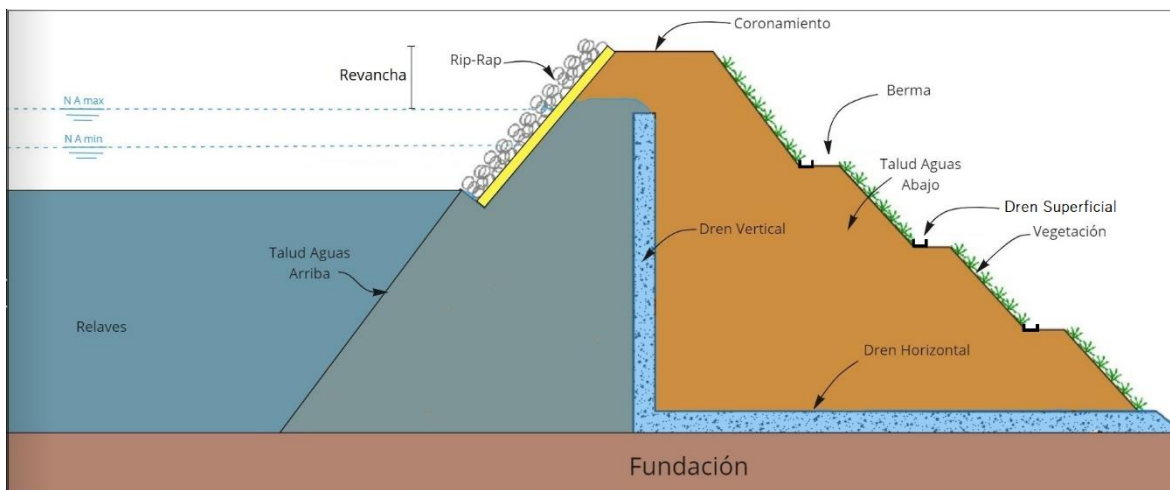
Las seis presas presentadas poseen gran cantidad de agua en la cubeta, por lo que es necesario el uso de piezómetros, medidores de flujo, regla limnimétrica y medidores de nivel de agua, para monitorear los parámetros que son afectados por la presencia del agua, como por ejemplo la presión de poros y la verificación de la integridad del sistema de drenaje interna.

Otro instrumento muy utilizado son los marcos superficiales, que tienen la función de medir el desplazamiento externo del muro y son instalados en las bermas y en el coronamiento.

Este gran volumen de agua demanda preocupaciones con la conservación del estado de la estructura, pues, la probabilidad de mecanismos de falla asociados rebalse, a la filtración de agua, como erosión interna e inestabilidad de talud por licuefacción en la presa aumenta considerablemente comparado a los depósitos de relaves chilenos.

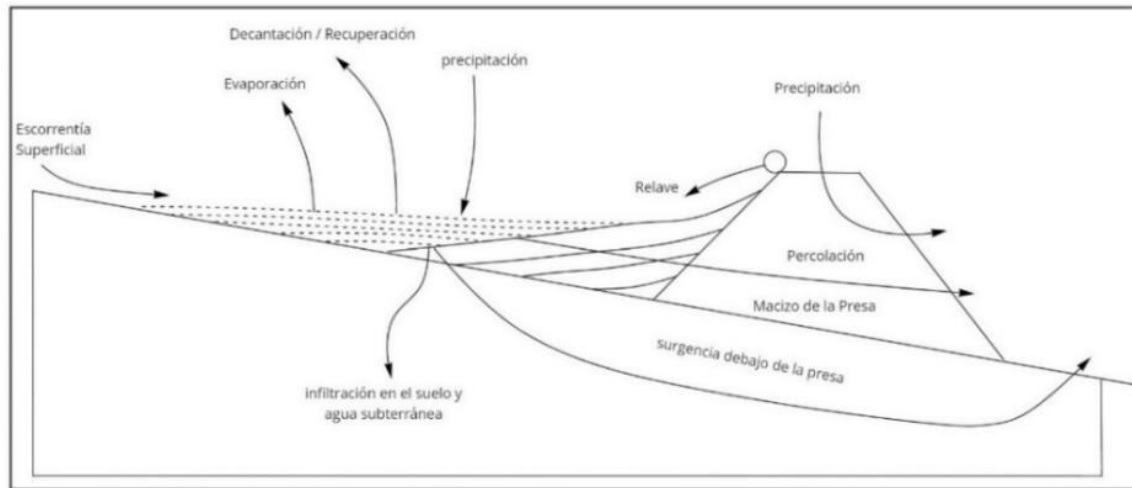
La Figura 38 presenta un esquema genérico de una presa en Brasil con sus características y elementos.

- Rip-Rap: bloques de roca que ayudan a reducir el impacto del agua, que puede generar erosión en el talud aguas arriba.
- Vegetación en el talud aguas abajo: Las raíces del pasto fijadas en el suelo ayudan a evitar la erosión superficial.
- Coronamiento: parte superior de la presa
- Berma: superficie plana en el talud aguas abajo que sirve para que el equipo de inspección supervise las condiciones del talud aguas abajo, además de favorecer el drenaje superficial y reducir la inclinación global del talud aguas abajo.
- Dren vertical y horizontal: son estructuras hidráulicas que sirven para controlar el nivel de agua en el cuerpo de la presa, permitiendo el flujo de agua desde aguas arriba hacia aguas abajo.
- Drenaje superficial: son estructuras ubicadas en las bermas que sirven para redireccionar el agua de la lluvia para fuera de la berma.



**Figura 38:** Representación de una sección típica de una presa de relaves en Brasil. (Modificado Carvalho, 2021)

Los principales datos de monitoreo de presas en Brasil están vinculados a las diferentes formas de entrada y salida de agua del embalse porque se entiende que la principal preocupación para mantener la estabilidad de las presas en Brasil se relaciona al control del agua en la estructura de la presa. La Figura 39 muestra genéricamente estas formas.



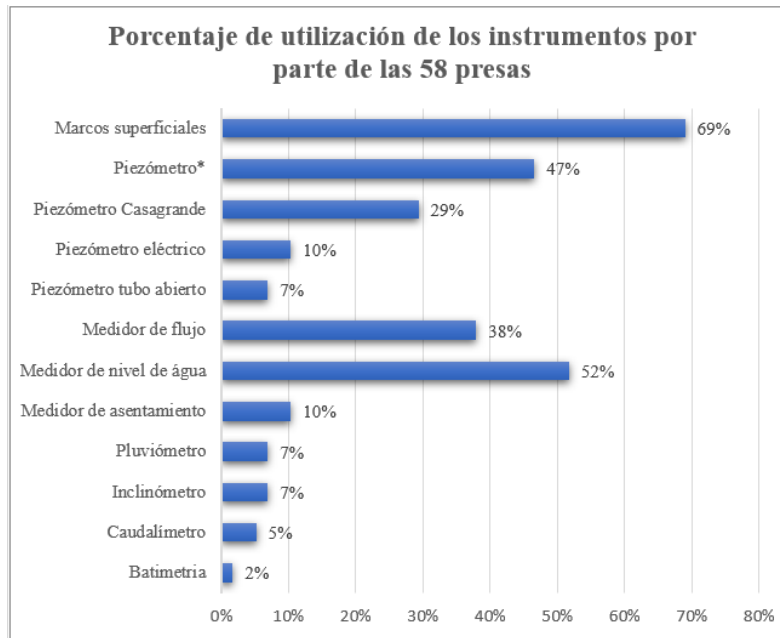
**Figura 39:** Balance de agua de una presa de relaves (Modificado de Soares, 1998)

Los principales parámetros monitoreados por los instrumentos en las presas de Brasil son:

- La piezometría;
- El flujo aguas debajo en los drenes internos;
- Las precipitaciones;
- El nivel del agua del depósito;
- Los puntos de referencia topográficos de la superficie.

Los instrumentos pretenden informar principalmente el comportamiento de la variación del agua en la cubeta y en las estructuras, además de la capacidad de la presa para absorberla, drenar y descargarla aguas abajo.

En un levantamiento de datos del libro Barragem de Rejeitos no Brasil del Comité Brasileño de Presas (CBDB 2012), con información respecto de los instrumentos utilizados por parte de 58 presas hasta el año de 2012, se tiene que los instrumentos más utilizados son los de la Figura 40. Los instrumentos manuales más utilizados según la Figura 40 son: marcos superficiales; piezómetros, piezómetro Casagrande; piezómetro eléctrico; piezómetro tubo abierto; medidor de flujo y medidor de nivel de aguas.



\* Tipo de piezómetro no identificado por las empresas.

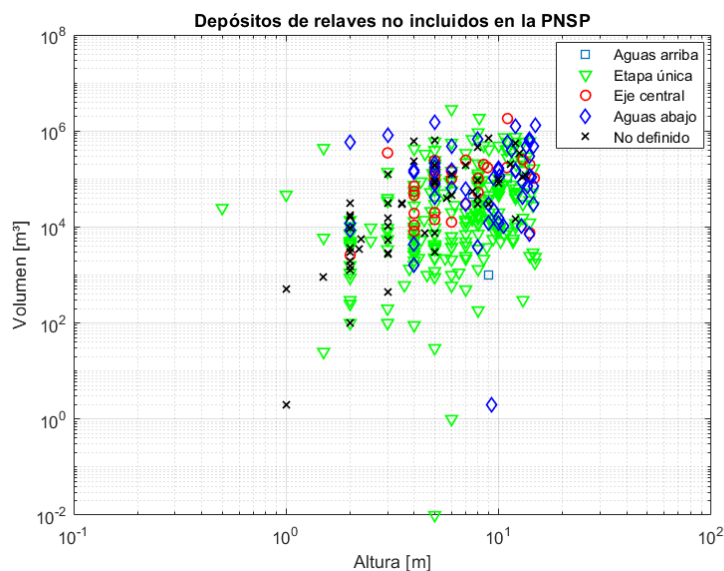
**Figura 40:** Porcentaje de utilización de los instrumentos por parte de 58 presas. (Elaboración Propia, basado en CBDB 2012)

## Capítulo 5: Posibles brechas en la Legislación de Seguridad Nacional de Presas

### 5.1 Política Nacional de Seguridad de Presas (PNSP)

Cómo se mencionó en el Capítulo 3, la primera clasificación es saber si una presa está o no incluida en la Política Nacional de Seguridad de Presas (PNSP) de acuerdo a los criterios establecidos. Una presa que tiene una altura menor a 15 metros, volumen menor a 3.000.000 m<sup>3</sup>, sin relaves tóxicos, sin Daño Potencial Asociado alto o medio y sin Categoría de Riesgo alta, no está incluida en la PNSP. Esto implica que si una presa con estas características falla, la empresa no será sometida a ley.

De los 848 depósitos de relaves existentes en 2021 en Brasil, según el Sistema Integrado Gestión de Presas de Minería (SIGPM 2021), 404 no están incluidos en la PNSP, y como presenta la Figura 41, la mayoría tiene entre 3 y 10 metros de altura y almacena entre 100 y 1.000.000 m<sup>3</sup> de relaves.



**Figura 41:** Volumen y altura de 440 presas no incluidas en la PNSP. (Elaboración propia)

La Ley 14.066 de 2020 establece que un depósito no se considera en la PNSP si no tiene una Categoría de Riesgo alta. Sin embargo, para determinar la categoría de riesgo de un depósito es necesario una fiscalización y la ley no es clara en cuanto la frecuencia de la fiscalización de los depósitos que no son incluidos en la PNSP.

La falta de información clara, como se explica más adelante en la Figura 42, es otro problema de la normativa vigente, la cual, puede generar confusión y una mala interpretación de los deberes tanto de las compañías mineras como de los fiscalizadores.

Las compañías mineras que poseen presas no incluidas en la PNSP no tienen obligación de proveer informes que comprueben la estabilidad de la presa, tampoco su revisión periódica de seguridad. Esto significa que una presa puede estar en un estado inestable sin que la ANM haya sido informada, y

que esta presa puede fallar y no habrá una legislación punitiva para la compañía minera, o sea, los daños generados por la rotura serán costeados por la población y/o gobierno.

Según las obligaciones impuestas por la Ordenanza 70.389/2022 de la ANM (2022), se deben registrar las presas en el SIGPM, la creación de mapas de inundación y análisis de riesgo. Según la ordenanza, todas las presas, incluidas y no en la PNSP, deben tener la clasificación según el Daño Potencial Asociado y Categoría de Riesgo. En el caso de las presas que no están incluidas en la PNSP, las mismas deben tener obligatoriamente un DPA bajo, pero pueden tener el CRI bajo o medio.

Para las presas no incluidas en la PNSP, el SIGPM no tiene información referente a la Categoría de Riesgo de las presas y Daño Potencial Asociado, como se ve en el ejemplo de la Figura 42, donde “N/A” puede significar no aplicable o no disponible. Si no hay datos, no se puede aplicar la metodología de clasificación y la población no puede saber el estado de estas presas en cuanto a riesgo.

PRESAS INCLUIDAS EN LA PNSB					PRESAS NO INCLUIDAS EN LA PNSB				
Nome da Barragem	Categoria de Risco	Dano Potencial Associado	Classe	Inseridas na PNSB?	Nome da Barragem	Categoria de Risco	Dano Potencial Associado	Classe	Inseridas na PNSB?
Xingu	Alta	Alto	A	Sim	VIAMAO	N/A	N/A	N/A	Não
Volta Grande 3	Baixa	Medio	C	Sim	VALE DO IRADAO	N/A	N/A	N/A	Não
Volta Grande 2	Baixa	Alto	B	Sim	Usina	N/A	N/A	N/A	Não
Volta Grande 1	Baixa	Alto	B	Sim	UNIDOS	N/A	N/A	N/A	Não
VILA NOVA	Baixa	Baixo	E	Sim	TQ-2	N/A	N/A	N/A	Não
					TQ-2	N/A	N/A	N/A	Não

**Figura 42:** Ejemplos de clasificación de presas incluidas y no incluidas en la PNSB, según DPA y CRI en el SIGPM. (SIGPM, 2021)

El Plan de Seguridad de Presas (PSP) es un instrumento de la Política Nacional de Seguridad de Presas, que obliga a la compañía minera a elaborar e implementar los siguientes elementos:

- Volumen I, Tomo I (Informaciones general del depósito de relaves): declaración de clasificación de la presa por la ANM en cuanto a CRI y DPA, la estructura organizacional y el contacto de los responsables del equipo de seguridad de la presa actualizadas, entre otros.
- Volumen I, Tomo 2 (Documentación técnica del depósito de relaves): características técnicas del proyecto y de la construcción, proyecto básico y ejecutivo; entre otros.
- Volumen II (Planes y procedimientos): plan de monitoreo e instrumentación, plan de las inspecciones de seguridad de la presa, entre otros.
- Volumen III (Registros y Controles): registro de operación, registro de mantenimiento, registro de monitoreo e instrumentación, fichas de Inspección de Seguridad de Presas, Informe de Inspección de Seguridad Regular, entre otros.
- Volumen IV (Revisión Periódica de Seguridad de la Presa): resultado de la inspección detallada y adecuada del sitio de la presa y de sus estructuras asociadas, reevaluación de la

Categoría de Riesgo y del Daño Potencial Asociado, Declaración del Estado de Estabilidad, entre otros.

- Volumen V (Plan de Acción de Emergencia – PAEBM): acciones esperadas para cada nivel de emergencia, descripción de los procedimientos preventivos y correctivos, informe de las causas y consecuencias de un evento de emergencia nivel 3, descripción del sistema de monitoreo utilizado en la presa, entre otros.

La ausencia de la obligación del cumplimiento de los elementos de la PSP implica impunidad en el caso que haya una rotura de la presa, y que la presa puede no estar segura ya que el PSP sirve para analizar el estado de estabilidad de la presa.

## 5.2 Daño Potencial Asociado en la determinación de directrices de monitoreo

El DPA de una presa tiene un rol muy importante para la determinación de su monitoreo. La Ordenanza N° 70.389/2022 de la ANM (2022), define en el Art. 7° que en el Sistema de Monitoreo deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

§ 1° Para presas clasificadas con DPA alto, la compañía minera está obligada a mantener un sistema de monitoreo de instrumentación automatizado, adecuado a la complejidad de la estructura, con monitoreo en tiempo real (en vivo) y periodo integral (24 horas), incluida la redundancia en el sistema de suministro de energía siguiendo los criterios definidos por el diseñador, y la compañía minera es responsable de definir la tecnología, los instrumentos y los procesos de monitoreo.

§ 2° La información proveniente del sistema de monitoreo debe estar a disposición de los equipos o sistemas de las Defensas Civiles estatales y federales y de la ANM, y para presas mineras con alto DPA, deben mantener video monitoreo las 24 horas del día de su estructura, que debe ser almacenado por la compañía minera por un período mínimo de noventa días.

§ 3° Cuando la presa sea reclasificada a DPA alto, la compañía minera tendrá 1 (un) año para cumplir con lo dispuesto en los incisos § 1° y § 2°.

La ley establece que los depósitos que poseen DPA alto deben contar con monitoreo 24 horas y en tiempo real. Los depósitos con Categoría de Riesgo alta que no tienen DPA alto no tienen la obligación de tener una instrumentación compleja, tampoco mantener el monitoreo 24 horas y en tiempo real. Existen depósitos clasificados con CRI alta y DPA medio o bajo que están en nivel de emergencia y que la ley no exige los criterios de monitoreo ya mencionados, estos depósitos están representados en gris en la Tabla 32.

**Tabla 32:** Clasificación de los depósitos que están en nivel de emergencia y la ley no exige los criterios de monitoreo.

Categoría de Riesgo	Daño Potencial Asociado		
	Alto	Medio	Bajo
Alto	<b>Clase A: 36</b>	<b>Clase B: 11</b>	<b>Clase C: 1</b>
	Nivel 1: 24	Nivel 1: 5	Nivel 1: 1
	Nivel 2: 8	Nivel 2: 0	Nivel 2: 0
	Nivel 3: 3	Nivel 3: 0	Nivel 3: 0
Medio	<b>Clase B: 16</b>	<b>Clase C: 32</b>	<b>Clase D: 6</b>
Bajo	<b>Clase B: 199</b>	<b>Clase C: 119</b>	<b>Clase E: 24</b>

Además del problema de las presas clasificadas con nivel de emergencia y CRI alto que no están obligadas a tener una instrumentación compleja y el monitoreo 24 horas y en tiempo real, se tiene que presas clasificadas con un DPA medio tampoco son obligadas a cumplir con las exigencias de una presa con DPA alto. La Tabla 33 presenta casos en que la suma de los componentes del DPA genera un valor de DPA medio, pero que pueden presentar riesgos efectivos a la población, además de altos impactos ambientales y socioeconómicos. Este tipo de presas están exentas de obligaciones de monitoreo de una presa con DPA alto.

**Tabla 33:** Casos hipotéticos con DPA medio cuyas consecuencias en el caso de una rotura de presa podría ser considerado alto

Caso hipotético	Volumen (m <sup>3</sup> )	Población aguas abajo	Impacto ambiental	Impacto socioeconómico	Puntuación/ Clasificación DPA
1	Grande 25 millones a 50 millones de m <sup>3</sup> (4)	NO EXISTENTE (no hay personas permanentes / residentes o temporales / en tránsito en el área afectada aguas abajo de la presa) (0)	SIGNIFICATIVO (presa almacena relaves o residuos sólidos clasificados en Clase II A-No Inerte, según NBR 10004 de ABNT) (8)	NO EXISTENTE (no existen instalaciones en la zona afectada aguas abajo de la presa) (0)	12/Medio
2	Pequeño 500 mil a 5 millones de m <sup>3</sup> (2)	NO EXISTENTE (no hay personas permanentes / residentes o temporales / en tránsito en el área afectada aguas abajo de la presa) (0)	MUY SIGNIFICATIVO AGRAVADO (la presa almacena relaves o residuos sólidos clasificados en Clase I - Peligrosos según ABNT NBR 10004) (10)	NO EXISTENTE (no existen instalaciones en la zona afectada aguas abajo de la presa) (0)	12/Medio
3	Muy grande >= 50 millones de m <sup>3</sup> (5)	NO EXISTENTE (no hay personas permanentes / residentes o temporales / en tránsito en el área afectada aguas abajo de la presa) (0)	NO SIGNIFICATIVO (el área afectada aguas abajo de la presa está totalmente privada de sus condiciones naturales y la estructura almacena solo relaves de la Clase II 0 - Residuos inertes, según ABNT NBR 10004) (0)	ALTO (hay una alta concentración de instalaciones residenciales, agrícolas, industriales o de infraestructura de relevancia cultural y económica en el suelo en el área afectada aguas abajo de la presa) (5)	10/Medio
4	Medio 5 millones a 25 millones de m <sup>3</sup> (3)	FRECIENTES (no hay personas ocupando permanentemente el área afectada aguas abajo de la presa, pero existe una carretera municipal o estatal o federal u otra ubicación y / o emprendimiento para la eventual permanencia de personas que puedan verse afectadas) (5)	NO SIGNIFICATIVO (el área afectada aguas abajo de la presa está totalmente privada de sus condiciones naturales y la estructura almacena solo relaves de la Clase II 0 - Residuos inertes, según ABNT NBR 10004) (0)	MEDIO (hay una concentración moderada de instalaciones residenciales, agrícolas, industriales o de infraestructura de relevancia socioeconómica y cultural en el área afectada aguas abajo de la presa) (3)	11/Medio
5	Pequeño 500 mil a 5 millones de m <sup>3</sup> (2)	FRECIENTES (no hay personas ocupando permanentemente el área afectada aguas abajo de la presa, pero existe una carretera municipal o estatal o federal u otra ubicación y / o emprendimiento para la eventual permanencia de personas que puedan verse afectadas) (5)	NO SIGNIFICATIVO (el área afectada aguas abajo de la presa está totalmente privada de sus condiciones naturales y la estructura almacena solo relaves de la Clase II 0 - Residuos inertes, según ABNT NBR 10004) (0)	ALTO (hay una alta concentración de instalaciones residenciales, agrícolas, industriales o de infraestructura de relevancia cultural y económica en el suelo en el área afectada aguas abajo de la presa) (5)	12/ Medio

### 5.3 Reportes del estado de estabilidad de los depósitos de relaves

La ANM determina que el reporte del estado de estabilidad física de los depósitos de relaves debe ser realizado mediante tres métodos. La de mayor frecuencia es la Inspección de Seguridad Regular (ISR), realizada cada 15 días, mediante la evaluación de la integridad externa de la presa utilizando la matriz de Estado de Conservación (EC). El segundo método es un Informe de Inspección de Seguridad Regular (RISR), realizado semestralmente, entre los días 1 y 31 de marzo y 1 y 30 de septiembre. Por último, se tiene la Revisión Periódica de Seguridad de la Presa (RPSP). Su periodo de evaluación depende del DPA, entre tres y siete años. La Tabla 34 presenta una descripción más detallada de qué compone cada método de evaluación de estabilidad.

**Tabla 34:** Reportes de estabilidad de depósitos de relaves en Brasil. (ANM, 2022)

<b>Inspección de Seguridad Regular (ISR)</b>	
<b>Período de reevaluación</b>	Cada 15 (quince) días
<b>Responsable</b>	Empresa y/o equipo externo contratado
<b>Evaluación que impactan la estabilidad</b>	Confiability del Vertedero
	Filtraciones
	Deformación de Asentamiento
	Deterioro de Taludes
<b>Declaración</b>	Subir datos del estado de conservación de la presa en el SIGBM
<b>Informe de Inspección de Seguridad Regular (RISR)</b>	
<b>Período de reevaluación</b>	Cada 6 (seis) meses
<b>Responsable</b>	La primera evaluación puede ser realizada por la compañía minera, la segunda deberá ser realizada obligatoriamente por equipo externa contratada
<b>Evaluación que impactan la estabilidad</b>	Descripción de las inspecciones quincenales
	Análisis de Estabilidad de la presa. (Estudio del FS)
	Estudio de las características de los relaves
	Niveles de control de la instrumentación
<b>Declaración</b>	Declaración Condición de Estabilidad
<b>Revisión Periódica Seguridad de la Presa (RPSP)</b>	
<b>Período de reevaluación</b>	DPA alto: cada 3 (tres) años; DPA medio: cada 5 (cinco) años; DPA bajo: cada 7 (siete) años.
<b>Responsable</b>	Equipo externo
<b>Evaluación que impactan la estabilidad</b>	Resultado de inspección detallada y adecuada del local de la presa y de las estructuras asociadas
	Reevaluación de la categoría de riesgo y del Daño Potencial Asociado
	Actualización de estudios hidrológicos y de la capacidad de dispositivos de vertimiento
	Reevaluación de procedimientos de operación, mantenimiento, testes, instrumentación y monitoreo
<b>Declaración</b>	Declaración Condición de Estabilidad



La evaluación mediante la Inspección de Seguridad Regular (ISR), realizada cada 15 días, incluye solo parámetros de integridad externa de la presa, no siendo evaluado valores de las mediciones de los instrumentos. Al no considerar estos valores, es posible que una declaración de estabilidad de la presa sea entregada a las autoridades concluyendo un riesgo bajo, siendo que en realidad la presa es inestable si se evalúa con mediciones de instrumentos.

De las tres evaluaciones, la RISR y RPSP poseen evaluaciones de los instrumentos de monitoreo, pero esta revisión es realizada en un periodo de tiempo muy extenso, cada seis meses la RISR y cada tres a siete años la RPSP. Esto puede ser insuficiente para determinar la estabilidad de una presa en caso de que los instrumentos estén en nivel de alerta. Las dos metodologías mencionadas anteriormente son utilizadas para generar una Declaración de Condición de Estabilidad (DCE) de las presas, esta declaración es realizada cada seis meses por el RISR y de tres a siete años por el RPSP.

Es mediante la DCE que se sabe si una presa presenta o no riesgo a la población, y los datos de la clasificación en cuanto a la Categoría de Riesgo de la presa son actualizados en el sistema del SIGPM. El problema en demorar seis meses para determinar si una presa presenta riesgo o no a la población es que esta evaluación solamente informa si los meses anteriores la presa era segura. Con esto no se sabe si los próximos seis meses esta seguridad se seguirá manteniendo. Esto ofrece a la población una falsa sensación de seguridad.

Como ejemplos del mal funcionamiento de este modelo legislativo, se tienen los desastres de las presas que fallaron en Mariana en 2015, Brumadinho en 2019 y el más reciente en Nova Lima en enero de 2022. Todas las presas mencionadas eran clasificadas con una Categoría de Riesgo baja, lo que ha proporcionado a la población la falsa sensación de seguridad.

Macedo et al. (2020) afirma que la naturaleza del problema de la Política Nacional de Seguridad de Presas (PNSP) es la ausencia de estándares y acciones que promuevan la fiscalización de seguridad de presas, tanto de la compañía minera como del poder público. La ausencia de estos estándares puede contribuir a la ocurrencia de accidentes que incluyen rotura de presas.

## **Capítulo 6: Referencias utilizadas en la adaptación del IEF para los depósitos de relaves en Brasil**

### **6.1 Categoría de Riesgo – Matriz de Estado de Conservación**

La adaptación del Índice de Estabilidad Física para los depósitos de relaves brasileños implica la adaptación del actual sistema normativo que posee brechas.

Para entender cómo será realizada esta adaptación, primero se explicará la adaptación de forma general, esto es, con el sistema normativo actual en Brasil y posteriormente se adaptará lo que se refiere a las propias características de las presas en los Parámetros Críticos del IEF.

El sistema normativo actual de Brasil, cuenta básicamente con el DPA, el cual determina cuáles son los principales parámetros a ser monitoreados y cuales presas deben tener una complejidad mayor de su instrumentación.

La Ordenanza 70.389/2022 de la ANM (2022), define como Fichas de Inspección Regular (FIR) el documento elaborado por la compañía minera con el objetivo de registrar las condiciones de la presa, verificadas durante las inspecciones rutinarias de campo, y debe contener, como mínimo, la tabla de estado de conservación referente a la categoría de riesgo. Estas fichas de Inspección Regular hacen parte de la Inspección de Seguridad Regular (ISR). Como ya se mencionado, la tabla de Estado de Conservación contempla las características externas del depósito de relaves relacionadas a la confiabilidad del vertedero, a la filtración en el muro, la deformación o asentamiento, deterioro de taludes/ paramentos y por fin, al drenaje superficial.

La misma ordenanza define que deben ser realizadas inspecciones regulares en los depósitos de relaves donde las compañías mineras deben emitir un Extracto de Inspección Regular (EIR) que es un elemento bajo la responsabilidad de la compañía minera, que contiene el resumen de las informaciones relevantes de las Fichas de Inspección Regular (FIR). El Extracto es un instrumento creado para que el organismo de control pueda tener una mejor gestión remota de las presas bajo su jurisdicción. En este extracto, se incluye informaciones de las inspecciones regulares y algunos elementos para la gestión remota de ANM. La Tabla 35 presenta un ejemplo de este levantamiento de informaciones.

Esto implica, por ejemplo, que fallas generadas por licuación estática no puedan ser predichas por las autoridades, ya que en algunos casos no hay alteración en la integridad externa de la presa. Esto dificulta la activación de alertas a los mineros que trabajan en la mina y a la población ubicada aguas abajo de la presa.

El IEF abarca las inspecciones externas referentes a datos cualitativos y tiene presente los datos cuantitativos que son datos medibles por instrumentación y por ensayos para determinar, por ejemplo, la resistencia al corte de los materiales del muro. Además, la combinación de informaciones de inspecciones visuales con datos cuantitativos proporcionados por las mediciones permite proporcionar escenarios de falla. En el caso de Brasil, la utilización de datos cuantitativos existe, pero no es considerado relevante en la normativa para considerar que una presa esté en nivel de emergencia.

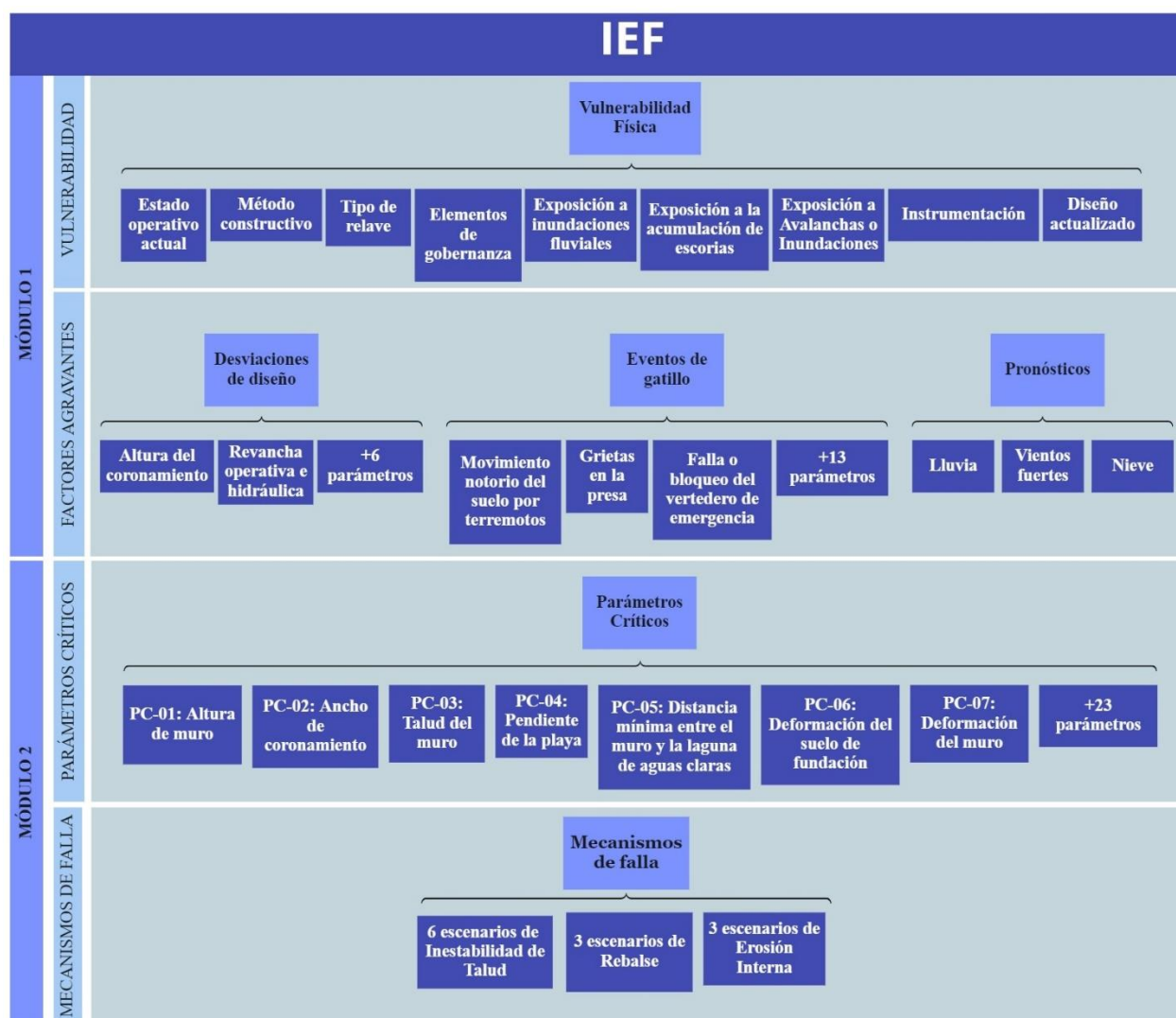
La Tabla 35 presenta un ejemplo del Extracto de Inspección Regular (EIR) con un resumen de las informaciones más importantes obtenidas por medio de la Ficha de Inspección Regular (FIR). En este ejemplo de 2020, la ordenanza 70.389 de la ANM todavía no había sido modificada. Con la modificación de 2022, se incluye un parámetro más en la tabla de estado de conservación que es el drenaje superficial.

**Tabla 35:** Ejemplo de Extracto de Inspección Regular (EIR) (Modificado de Neves, 2020)

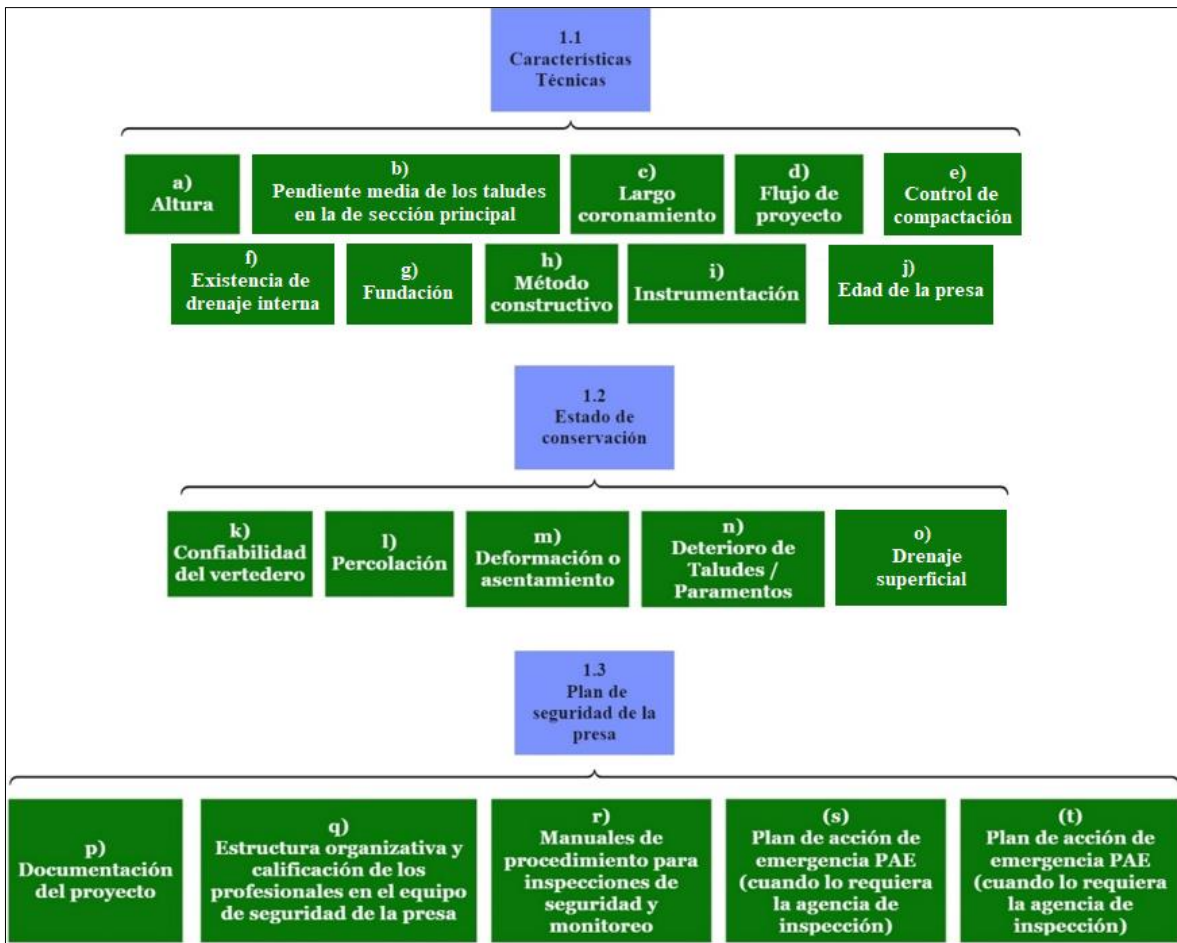
1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)					1.2 - ESTADO DE CONSERVACIÓN - EC			
Nombre inspección	Fecha inspección	Altura Máxima (m)	Largo del coronamiento (m)	Volumen del depósito (m <sup>3</sup> )	Confiabilidad del vertedero	Filtración	Deformación y asentamiento	Deterioro de Taludes / Paramentos
15°/2017	07-08-2017	40	350	843.809	Estructuras con problemas identificados y medidas correctivas en implementación (3)	Filtración totalmente controlada por el sistema de drenaje. (0)	No hay deformaciones ni asentamientos que puedan comprometer la seguridad de la estructura. (0)	No hay deterioro de taludes y revestimientos. (0)
14°/2017	24-07-2017	40	350	843.809	Estructuras con problemas identificados y medidas correctivas en implementación (3)	Filtración totalmente controlada por el sistema de drenaje. (0)	No hay deformaciones ni asentamientos que puedan comprometer la seguridad de la estructura. (0)	No hay deterioro de taludes y revestimientos. (0)
13°/2017	11-07-2017	40	350	843.809	Estructuras con problemas identificados y medidas correctivas en implementación (3)	Filtración totalmente controlada por el sistema de drenaje. (0)	No hay deformaciones ni asentamientos que puedan comprometer la seguridad de la estructura. (0)	No hay deterioro de taludes y revestimientos. (0)

Para que se pueda entender mejor cómo se hará la implementación y cuáles son las brechas en el sistema actual de fiscalización de la seguridad de presas en Brasil, se utilizará un esquema en que primero se presenta el IEF de Chile y posteriormente se muestra el mismo esquema, pero con las componentes de la Categoría de Riesgo (CRI), donde se podrá ver las brechas existentes. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentará el esquema que representa el IEF supliendo las brechas existentes.

En la Figura 43 se observan todos los parámetros utilizados en el IEF de Chile. En Brasil, como ya mencionado anteriormente, se utilizan las matrices de Categoría de Riesgo, que se presentan en la Figura 44 mediante diagramas.



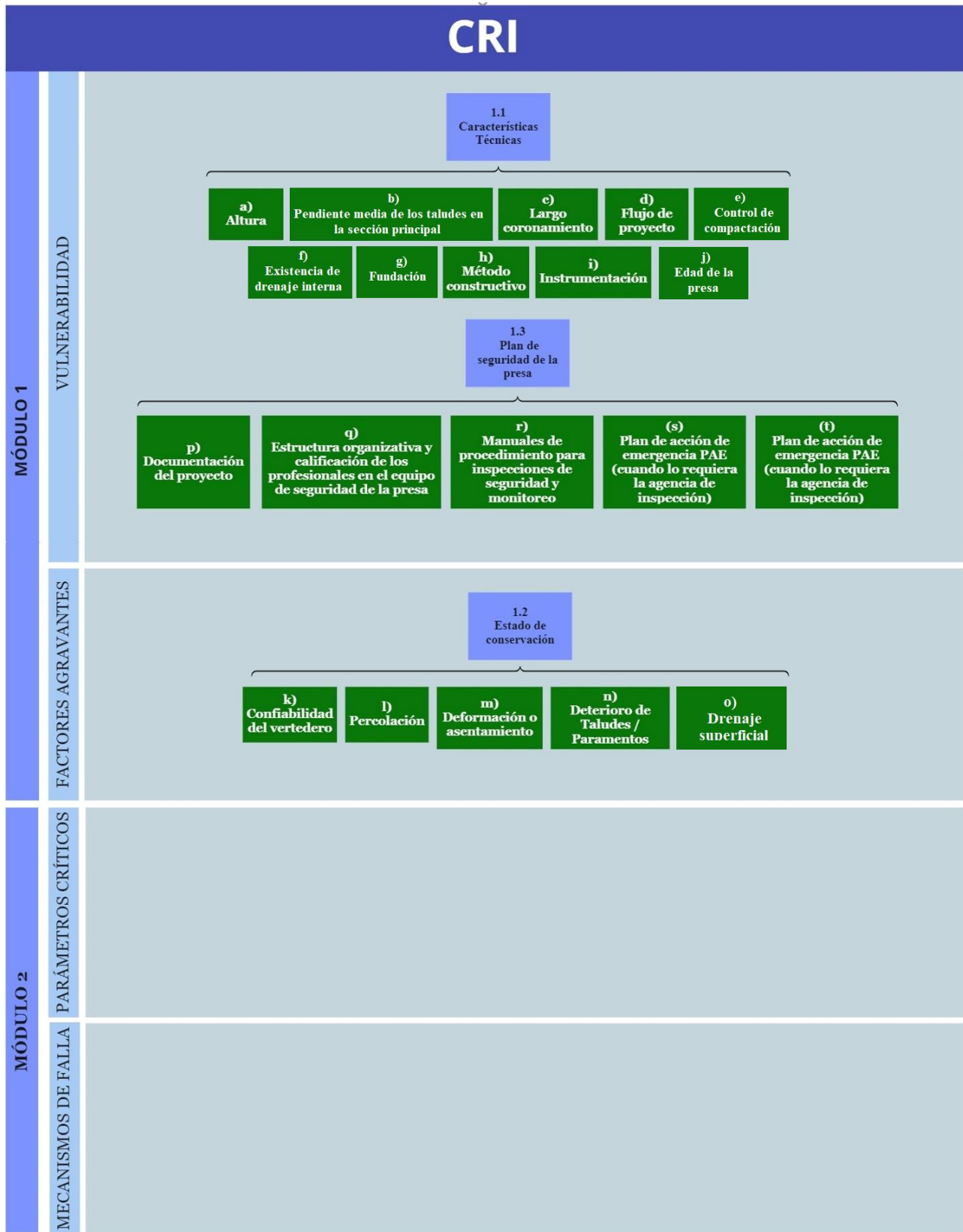
**Figura 43:** Esquema IEF de Chile. (Elaboración propia)



**Figura 44:** Diagramas de las matrices de Categoría de Riesgo. (Elaboración propia)

Los parámetros presentes en los diagramas de la Figura 44, serán reemplazados en el esquema del IEF presentado en la Figura 45, para que sea visible las brechas existentes en el sistema de fiscalización actual de seguridad de presas en Brasil.

Adaptando los parámetros considerados relevantes para la fiscalización de la seguridad de presas en Brasil, se tiene el esquema representado en la Figura 45. Se observan algunas brechas en el sector del módulo M1 comparado con el IEF para los depósitos de relaves chilenos que incluye muchos más parámetros, como es el caso de los factores agravantes en el módulo M1. En el módulo M2 no existen actualmente en la ley exigencias para monitorear estos parámetros, por lo que se puede ver en la Figura 45 que esta sección está vacía.

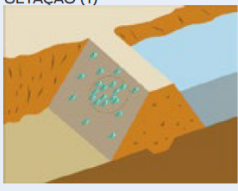
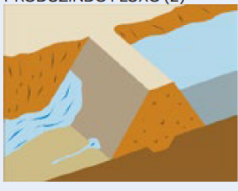


**Figura 45:** Esquema IEF con los parámetros exigidos por la Ordenanza 70.389/2022 de la ANM. (Elaboración propia)

## 6.2 Guía de buenas prácticas de la Agencia Nacional de Aguas (ANA)

La Agencia Nacional de Aguas posee siete volúmenes de guía de buenas prácticas para mantener la seguridad de las presas que almacenan agua. Como las presas de relaves en Brasil almacenan gran cantidad de agua, y su estructura de contención es semejante a la estructura de las presas de tierra que almacenan agua, será utilizado en la adaptación del Índice de Estabilidad Física las informaciones obtenidas a partir del Volumen II del guía de buenas prácticas de la ANA.

La guía del volumen II es una guía de orientación y formularios para inspecciones de seguridad de presa. La guía contiene informaciones sobre las anomalías más comunes en las presas de Brasil. La Figura 46 presenta un ejemplo de las informaciones obtenidas por medio de esta guía, donde se tiene la descripción de las anomalías, cual es la causa de esta anomalía, la consecuencia y las acciones que deben ser realizadas.

BARRAGENS DE TERRA (ATERRO) – INFILTRAÇÕES E FUGAS (surgências) DE ÁGUA NA BARRAGEM (BT4)				
ANOMALIA	CAUSA PROVÁVEL	POSSÍVEL QUÊNCIA	CONSE-	AÇÕES CORRETIVAS
 <p>MUDANÇA ACENTUADA NA VEGETAÇÃO (1)</p>	<p>O material do maciço na área permite fluxo de água.</p>	<p>Pode indicar a existência de uma área saturada.</p>		<p>Por meio de escavação manual, tentar identificar se a área está mais úmida que o restante do talude. Se a área estiver mais úmida que o restante do talude, um engenheiro qualificado deverá inspecionar a barragem e recomendar outras medidas a ser tomadas.</p>
 <p>GRANDE ÁREA MOLHADA OU PRODUZINDO FLUXO (2)</p>	<p>Um caminho preferencial de percolação desenvolveu-se através da ombreira ou do maciço.</p>	<p><b>Perigo</b> O aumento do fluxo pode levar à erosão do maciço e à ruptura da barragem. A saturação do maciço próximo à zona de infiltração pode criar instabilidade, levando à ruptura da barragem.</p>		<p>Inspeccionar e demarcar a área. Acompanhar para averiguar sua expansão. Medir com a maior precisão possível alguma vazão que possa estar ocorrendo. Se a área ou o fluxo aumentar, o nível do reservatório deverá ser reduzido até o fluxo estabilizar ou cessar. Um engenheiro qualificado deve inspecionar a barragem e recomendar outras medidas a ser tomadas.</p> <p>EXIGIDA A PRESENÇA DE ENGENHEIRO.</p>

**Figura 46:** Ejemplo de orientaciones retiradas de la guía de la Agencia Nacional del Agua. (ANM, 2016)

## 6.3 Guía de buenas prácticas del Instituto Brasileño de Minería (IBRAM)

La Ordenanza 70.389/2022 de la ANM (2022), define que los instrumentos deben tener un cierto nivel de complejidad. En la guía de buenas prácticas de gestión de presas y estructuras de disposición de relaves del Instituto Brasileño de Minería (IBRAM), se presenta una imagen con los objetivos del monitoreo y los posibles controles que deben ser realizados en las presas de Brasil. La Figura 47 contempla los sistemas de monitoreo con mayor complejidad (InSAR, SRR, Micro sismo) y de menor complejidad (Marcos Superficiales, Medidores de Nivel de Agua, etc).

		Mecanismos de Falla			
		Rebalse	Inestabilidad	Erosión	Licuefacción
Objetivos de		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ocupación del depósito</li> <li>Revanca hidráulica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nivel freático</li> <li>Presión de poro</li> <li>Desplazamientos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Percolación</li> <li>Desempeño del sistema de drenaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disipación de incrementos de presiones de pro</li> <li>Tensión Efectiva</li> </ul>
	Posibles Controles		<ul style="list-style-type: none"> <li>Topobatimetría</li> <li>Imágenes (Satélites, aéreas)</li> <li>Video monitoreo</li> <li>Medidor de nivel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspección visual</li> <li>Medidor de nivel de agua</li> <li>Piezómetros</li> <li>Medidores de flujo</li> <li>Marcos superficiales</li> <li>Prismas geodésicos</li> <li>Inclinómetros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inspección visual</li> <li>Piezómetros</li> <li>Medidores de flujo</li> <li>Sensores de fibra óptica</li> <li>Micro sismos</li> </ul>

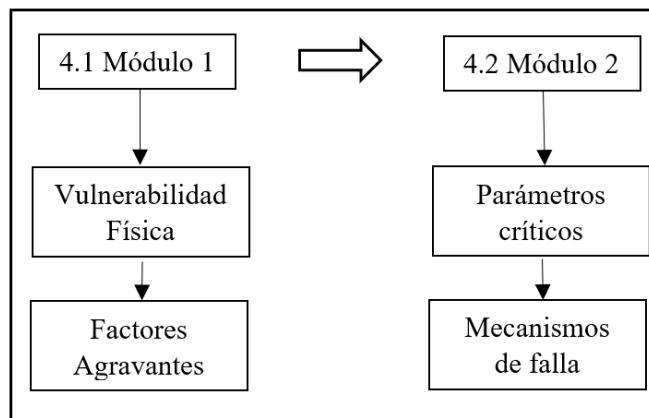
**Figura 47:** Monitoreo de Estructura de disposición de relaves. (Modificado de IBRAM, 2019)



## Capítulo 7: Adaptación del Índice de Estabilidad Física para depósitos de relaves en Brasil

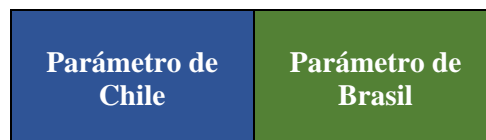
En el capítulo 2 se presenta una explicación completa del funcionamiento del IEF y su sistema de gestión de Eventos. La definición de los Eventos de los Grupos A, B, C o D, que activan alarmas, se realizó mediante un trabajo conjunto con las empresas mineras, las cuales brindan informaciones de los eventos y su gravedad. Como no se obtuvo este tipo de informaciones en este trabajo, los eventos no serán definidos para el caso de Brasil.

La adaptación del IEF comenzará con los parámetros del módulo M1, empezando por la vulnerabilidad física y los factores agravantes (desviaciones del diseño, eventos gatilladores y pronósticos). Posteriormente, se modificará el módulo M2, adaptando los parámetros críticos y posteriormente los mecanismos de falla (Figura 48). En cada adaptación, se presentará una sección de comentarios relevantes para que quede claro el origen del cambio.



**Figura 48:** Secuencia para la adaptación del IEF.

Para que la adaptación sea más intuitiva, se utilizarán colores diferentes para los parámetros originales del IEF de Chile, los cuales serán representados por el color azul, y para los parámetros de Brasil (verdes), adicionados según los estudios de las características de los depósitos brasileños, las normas y las leyes.



## 7.1 Adaptación Módulo 1

### 7.1.1 Vulnerabilidad Física

La Vulnerabilidad Física fue adaptada utilizando nueve parámetros considerados en las matrices de Categoría de Riesgo, las cuales son las matrices de Características Técnicas y Plan de Seguridad de Presa. La matriz de Estado de Conservación será utilizada más adelante en la adaptación de los Eventos Gatilladores del módulo M1 y en los Parámetros Críticos del módulo M2.

La Tabla 36 presenta la suma de los parámetros obtenidos mediante la evaluación de la estabilidad física de una presa por medio de la evaluación de los criterios presentes en la Tabla 37.

**Tabla 36:** Suma de puntuación de vulnerabilidad física para depósitos de relaves brasileños. (Elaboración propia)

ALTO	$\Sigma VF > 76$	El depósito se encuentra en una condición física muy vulnerable debido al diseño, construcción y sistema operativo.
MEDIO	$38 < \Sigma VF \leq 76$	El depósito puede volverse vulnerable debido al diseño, condiciones de construcción y sistema operativo.
BAJO	$\Sigma VF \leq 38$	Las condiciones del depósito son favorables, por lo que su vulnerabilidad física es baja tanto para su diseño como para condiciones de su construcción u operación.

El valor de la vulnerabilidad física alta será la suma de los parámetros críticos considerados en los peores escenarios, o sea, la suma de la puntuación más alta en todas las líneas de la matriz de la Tabla 37, multiplicado por 60%.

$$VF_{alto} = \sum_j^a vulnerabilidad \cdot 0,6 \quad (2)$$

Y para el valor bajo se tiene la misma suma anterior de la vulnerabilidad física, multiplicado por 30%.

$$VF_{bajo} = \sum_j^a vulnerabilidad \cdot 0,3 \quad (3)$$

Los porcentajes de 60% y 30% fueron elegidos aleatoriamente. Un estudio detallado junto a autoridades y especialistas deberá ser realizado para determinar estos valores de manera más adecuada.

**Tabla 37:** Adaptación de la Vulnerabilidad física (Módulo M1)

<b>VULNERABILIDAD FÍSICA: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS - MÓDULO 1</b>				
<b>Estado operativo actual (a)</b>	En Operación (0)	Cerrado (5)	Abandonado (10)	–
<b>Altura (b)</b>	Altura ≤ 15 m (0)	15m<Altura<30m (1)	30m≤Altura≤60m (4)	Altura>60m (7)
<b>Pendiente media de los taludes en la sección principal (c)</b>	Suave (<1V:3H) o presa de hormigón (0)	Intermedio (1V:2H < Pendiente < 1V:3H) (3)	Empinada (>1V:2H) (6)	–
<b>Largo coronamiento (d)</b>	Largo ≤ 50m (0)	50m<Largo<200m (1)	200m ≤Largo≤600m (2)	Largo > 600m (3)
<b>Flujo de Proyecto (e)</b>	Máxima probable o Decamilar (0)	Milenar (2)	TR = 500 años (5)	TR menor a 500 años o Desconocida/ Estudio no confiable (10)
<b>Control de compactación (f)</b>	Existen documentos que acreditan el control de compactación según proyecto y que acreditan el control tecnológico durante la ejecución (0)	Existen estudios geotécnicos que comprueban el grado de compactación según proyecto (4)	No hubo control tecnológico y/o no hay información y/o compactación en disconformidad con el proyecto (10)	–
<b>Existencia de drenaje interna (g)</b>	Drenaje construido según proyecto o no hay drenaje en proyecto (0)	Drenaje correctivo construido después de la finalización de la presa (4)	El sistema de drenaje no está de acuerdo con el diseño o inexistente o desconocido o estudio poco confiable o inoperante (10)	–
<b>Fundación (h)</b>	Fundación investigada según proyecto (0)	Fundación parcialmente investigada (6)	Fundación desconocida/estudio no confiable (10)	–
<b>Método Constructivo (i)</b>	Etapa Única (0)	Aguas abajo (2)	Eje central (5)	Aguas arriba o desconocido (10)

\* Parámetro perteneciente a la matriz de Características Técnicas, de clasificación según la Categoría de Riesgo.

\*\* Parámetro perteneciente a la matriz del Plan de Seguridad de la Presa, de la clasificación según la Categoría de Riesgo.

**VULNERABILIDAD FÍSICA: PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS - MÓDULO 1 (Continuación)**

<b>Instrumentación (j)</b>	Existe instrumentación de acuerdo con el proyecto técnico (0)	Existe instrumentación en desacuerdo con el proyecto, pero en proceso de instalación de instrumentos para adecuación al proyecto (2)	Existe instrumentación en desacuerdo con el proyecto sin proceso de instalación de instrumentos para adecuación al proyecto (6)	Presa no instrumentada en desacuerdo con el proyecto (8)	-	-
<b>Edad de la presa (k)</b>	entre 5 y 15 años (1)	entre 15 y 30 años (2)	< 5 años o > 30 años o sin información (3)	-	-	-
<b>Documentación del proyecto (l)</b>	Proyecto ejecutivo y "como construido" (0)	Proyecto ejecutivo o 'como está' (2)	Proyecto 'como está' (3)	Proyecto básico (5)	proyecto conceptual (8)	No hay documentación del proyecto. (10)
<b>Estructura organizativa y calificación de los profesionales en el equipo de seguridad de la presa (m)</b>	Cuenta con una unidad administrativa con un profesional técnico calificado responsable de la seguridad de la presa. (0)	Cuenta con un profesional técnico calificado (propio o contratado) responsable de la seguridad de la presa (1)	Tiene una unidad administrativa sin un profesional técnico calificado responsable de la seguridad de la presa (3)	No cuenta con unidad administrativa y técnico calificado responsable de la seguridad de la presa (6)	-	-
<b>Manuales de procedimiento para inspecciones de seguridad y monitoreo (n)</b>	Cuenta con manuales de procedimientos para Inspección, Monitoreo y Operación (0)	Solo cuenta con un manual de procedimientos de monitoreo (2)	Solo tiene manual de procedimientos de inspección (4)	No cuenta con manuales o procedimientos formales para monitoreo e inspecciones. (8)	-	-
<b>Plan de acción de emergencia PAE (cuando lo requiera la agencia de inspección) (o)</b>	Tiene PAE* (0)	No tiene PAE (no requerido por la agencia de inspección) (2)	PAE en preparación (4)	No tiene PAE (cuando lo requiera la agencia de inspección) (8)	-	-
<b>Informes de inspección y monitoreo de instrumentación y análisis de seguridad (p)</b>	Emite periódicamente informes de inspección y monitoreo basados en la instrumentación y el análisis de seguridad. (0)	Emite regularmente solo informes de análisis de seguridad (2)	Emite periódicamente solo informes de inspección y monitoreo (4)	Emite periódicamente solo informes de inspección visual (6)	No emite con regularidad informes de inspección y monitoreo y de análisis de seguridad (8)	-

\* Parámetro perteneciente a la matriz de Características Técnicas, de la clasificación según la Categoría de Riesgo.

\*\* Parámetro perteneciente a la matriz del Plan de Seguridad de la Presa, de la clasificación según la Categoría de Riesgo

### 7.1.2 Factores Agravantes: Activación directa

En esta sección se presentará la adaptación de los parámetros de activación directa (Tabla 38). En los factores agravantes de eventos de activación directa, no se adiciona ningún factor específico a depósitos de relaves brasileños, pero se retira los factores relacionados a sismicidad, presentes en el IEF de Chile, quedando solamente cuatro eventos de activación directa.

**Tabla 38:** Adaptación de factores agravantes de activación directa (Módulo M1)

Evento	Parámetro	Descripción
a) Eventos Importantes	<b>Comienzo de lluvia</b>	Corresponde al inicio de una lluvia en el sector de depósitos, independientemente de la intensidad de la lluvia. Este evento de activación se puede activar automáticamente si se detecta una intensidad de lluvia en la estación meteorológica, si no está activo durante una lluvia debe activarse manualmente.
b) Eventos críticos que desencadenan una emergencia inmediata	<b>Deslizamiento natural hacia la presa o sectores críticos</b>	Corresponde a un evento de remoción masiva resultante de un deslizamiento de tierra en el muro, o en instalaciones que comprometen el funcionamiento o la integridad del muro, debido a la incertidumbre asociada al grado de daño causado.
	<b>Severo deslizamiento del material de la superficie de la presa que afecta la geometría del talud</b>	Corresponde a un deslizamiento de la capa superficial del material de la pared, en el sector aguas arriba o aguas abajo. Se considera que si se afecta aproximadamente un área mayor a 100 [m <sup>2</sup> ], resultando en una variación visiblemente considerable en la geometría del muro, es necesario activar este evento disparador.
	<b>Revestimiento de relaves o aguas claras.</b>	Corresponde a la evidencia de un desborde de aguas claras o relaves de la playa del depósito. Si este tipo de situación se detecta visualmente o mediante comunicación con otro operador, es necesario activar el evento de disparo.

### 7.1.3 Factores Agravantes: Desviaciones de diseño

En seguida se presentan los parámetros de desviaciones de diseño (Tabla 39). En esta sección no se obtuvieron informaciones a respecto de los parámetros de desviaciones de diseño monitoreados en Brasil, por este motivo se mantiene los mismos parámetros de los depósitos de relaves en Chile para los depósitos de relaves en Brasil.

**Tabla 39:** Adaptación de factores agravantes de desviaciones de diseño (Módulo M1)

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Altura de la corona</b>	El operador debe verificar que se cumpla con la altura de copa correspondiente al plan de crecimiento del muro, verificando así que no existan sectores con alturas irregulares por crecimiento excesivo o que, por el contrario, estén por debajo de la altura general del muro. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Revancha operacional e hidráulica</b>	El operador debe verificar que se cumplan con la revancha mínima, tanto operativos (asociados con relaves integrales o lodos) como hidráulicos (asociados con la piscina de agua clara). Adicionalmente, se requiere verificar que el francobordo operacional sea constante a lo largo de la pared y no presente sectores específicos en los que los lodos estén peligrosamente cerca de la corona. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Ancho de corona</b>	El operador debe verificar que se cumpla con el ancho mínimo de corona establecido por diseño. Para ello, el operador debe verificar que no existan sectores específicos a lo largo del muro donde el ancho de la corona pueda ser menor o presentar valores cercanos al mínimo establecido. En esta inspección también se deben considerar los deslizamientos de pendiente que reducen el ancho de la corona. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Superficie de la presa de terraplén y estanque de relaves</b>	El operador debe verificar que la superficie ocupada por la presa y la playa estén de acuerdo con los límites establecidos por el plan de deposición. En general, el operador debe determinar si la superficie afectada por la deposición de lodos y el crecimiento de la pared no están aumentando de manera irregular. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Ubicación y tamaño de la piscina de agua decantada</b>	El operador debe verificar que se cumpla con la ubicación y el tamaño de la piscina de agua clara establecidos por el plan de deposición. El operador debe verificar que la piscina no se esté moviendo a través de sectores irregulares y que no se estén formando piscinas secundarias en sectores distintos a la piscina principal. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Pendientes aguas abajo y aguas arriba de la presa</b>	arriba y aguas abajo definidas por diseño, verificando que no existen sectores específicos que presenten un cambio evidente de talud que pueda modificar la geometría del muro. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Materiales de construcción adecuados para la presa</b>	El operador debe verificar que se cumplan los materiales indicados por diseño para la construcción del muro de la presa, verificando que la deposición del material que forma el muro sea la correcta, detectando problemas como la deposición de lodos en el sector del muro, por ejemplo. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Instalación y estado de la geomembrana de la presa aguas arriba</b>	El operador debe verificar que el estado de la geomembrana sea correcto. Para ello, el operador debe inspeccionar la geomembrana desde un sector seguro por cualquier tipo de daño. Si se detecta visualmente un problema de este tipo, es necesario activar este evento.	Diario

### 7.1.4 Factores Agravantes: Integridad de la Instrumentación

La integridad de la instrumentación es considerada de extrema importancia en Brasil, pues la falta de mantenimiento y el mal estado de los instrumentos puede implicar una medición equivocada. En Chile, este parámetro es considerado en la vulnerabilidad física (Tabla 2), donde se evalúa si el depósito tiene o no todos los instrumentos operando de forma continua. Además, el funcionamiento de la instrumentación en el caso chileno se verifica en el sistema de gestión de eventos, el cual no es evaluado en esta tesis.

Según la guía de orientación de inspección de seguridad de presas de la Agencia Nacional de Aguas, debe monitorearse el estado de los instrumentos y el acceso de ellos, como se muestra en la Tabla 40.

**Tabla 40:** Adaptación de factores agravantes por integridad de la instrumentación (Módulo M1)

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Acceso deficiente a los instrumentos</b>	En caso de impedimento del acceso del trabajador al instrumento, por distintos motivos si se detecta visualmente este problema, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Piezómetros obstruidos o defectuosos</b>	Los piezómetros son considerados de extrema importancia para el monitoreo de la presión del agua dentro del macizo, en caso de detección de obstrucciones o defectos alguno de estos instrumentos, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Marcos superficiales obstruidos o defectuosos</b>	Los marcos superficiales son considerados de extrema importancia para el monitoreo del desplazamiento superficial del macizo, en caso de detección de obstrucciones o defectos de alguno de estos instrumentos, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Medidores de flujo defectuoso</b>	Los medidores de flujo son considerados de extrema importancia para el monitoreo del flujo que pasa por los drenes de la presa, en caso de detección de obstrucciones o defectos algún de alguno estos instrumentos, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Ausencia de instrumentación</b>	En caso de que haya la ausencia de algún instrumento previsto en el diseño, es necesario activar este evento.	Diario
<b>Falta de registro de lecturas de instrumentación</b>	En caso de la ausencia de registros de lecturas de los instrumentos, es necesario activar este evento.	Diario

### 7.1.5 Factores Agravantes: Eventos gatilladores

Según la Guía de orientación de inspección de seguridad de presa de la Agencia Nacional de Aguas, los parámetros que deben ser inspeccionados y que tienen relevancia para desarrollar gatillos en la presa son los siguientes: rip-rap incompleto, destruido o desplazado, vegetación excesiva, ausencia de protección vegetal, presencia de hormigueros y madrigueras, falla en el sistema de drenaje superficial.

Todos los parámetros del IEF de Chile fueron mantenidos, por representar el estado de conservación de la presa, y complementar las brechas existentes.

**Tabla 41:** Adaptación de factores agravantes por eventos gatilladores (Módulo M1)

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>Rip-rap incompleto, destruido o desplazado</b>	Corresponde a un deslizamiento del enrocado de protección del talud aguas arriba generado por acciones de ondas en el reservorio, moviendo las rocas y abriendo camino para las ondas atacar directamente el suelo del macizo. En caso de detectar visualmente esta condición, este evento deberá ser activado.	Diario
<b>Vegetación excesiva</b>	Corresponde a aparición de cualquier tipo de vegetación en los taludes aguas abajo y estribos, que no sea la planeada por diseño; y si la vegetación planeada en diseño tiene crecimiento excesivo en periodo de sequías. En caso de detectar visualmente algunas de las condiciones descritas anteriormente, este evento deberá ser activado.	Diario
<b>Ausencia de protección vegetal</b>	Corresponde a ausencia de protección vegetal en un sector o en todo el talud aguas abajo por falta de humedad en período de sequía o por falla en el sistema de drenaje superficial del talud. En caso de detectar visualmente esta condición, este evento deberá ser activado.	Diario
<b>Presencia de hormigueros, termiteros y madrigueras</b>	La presencia de hormigueros, así como termiteros y madrigueras de animales, en el talud aguas arriba y aguas abajo puede provocar galerías internas en el macizo y, por lo tanto, originan vías de filtración de agua, afectando la estructura de la presa. En caso de detectar visualmente esta condición, este evento deberá ser activado.	Diario
<b>Falla en el Sistema de drenaje superficial</b>	Corresponde a obstrucción o falla en el Sistema de drenaje superficial del talud Aguas abajo. En caso de detectar visualmente esta condición, este evento deberá ser activado.	Diario
<b>Reducción del prisma resistente al pie de la presa</b>	Corresponde a cualquier tipo de daño, deformación o deslizamiento en el sector aguas abajo del muro. Concretamente en la zona cercana al contacto entre el terreno natural y el muro. En caso de detectar visualmente algunas de las condiciones descritas anteriormente, este evento de activación debe activarse.	Diario
<b>Distribución inadecuada de la descarga de lodos y relaves dentro del estanque.</b>	Corresponde a una deposición inadecuada de lodos o relaves en el interior del estanque, resultando en una mala distribución del material depositado. Los problemas asociados son: los sectores con pendiente pronunciada dentro de la cuenca, el desplazamiento inadecuado de la piscina de agua clara en sectores distintos a su ubicación normal, la formación de piscinas de parásitos en áreas distintas a la piscina principal y las pérdidas operativas de revancha en sectores localizados del muro. En caso de detectar visualmente algunas de las condiciones descritas anteriormente, este evento de activación debe activarse.	Diario
<b>Superficie de deslizamiento en un sector de la presa del terraplén</b>	Corresponde a un deslizamiento de la capa superficial del material de la pared en el sector aguas arriba o aguas abajo. Se considera que si se afecta un área de 100 [m <sup>2</sup> ], es necesario activar este evento disparador.	Diario
<b>Problemas de estabilidad de los estribos de la presa</b>	Los estribos están asociados al sector de contacto entre el terreno natural y los extremos del muro. Se considera que cualquier problema asociado a fugas, humedad, deformaciones o grietas en esta zona de contacto afecta a la estabilidad de los estribos. En caso de detectar visualmente alguna de estas condiciones, se debe activar el evento de disparo.	Diario
<b>Fallo o bloqueo del vertedero de emergencia</b>	Corresponde a cualquier problema en el vertedero de emergencia que resulte en falta de capacidad operativa. Si se detecta un problema de relleno sanitario que podría afectar su funcionamiento a través de un informe o comunicación con otros operadores, se debe activar el evento disparador.	Diario



<b>Continuación Tabla 41</b>		
<b>Modificación del nivel de operación del vertedero de emergencia</b>	Los vertederos de emergencia asociados con los depósitos de relaves comienzan a operar en un cierto nivel de la piscina de agua clara. Este nivel se define por la elevación de los relaves, la etapa de crecimiento de la presa y el número de losetas instaladas en la estructura, entre otros factores. En caso de una modificación del nivel de operación del vertedero por cualquier motivo, es necesario activar este evento de activación.	Diario
<b>Falla del sistema de recuperación de agua decantada</b>	Corresponde a un problema de cualquier tipo en el sistema de recuperación de aguas claras, que tiene como consecuencia que este último deje de funcionar. Si este tipo de evento se detecta a través de un informe o comunicación con otros operadores, es necesario activar el evento de activación.	Diario
<b>Falla o bloqueo de los canales de desvío</b>	Corresponde a cualquier tipo de evento que afecte el funcionamiento de los canales perimetrales. Entre los principales eventos de esta categoría se encuentran los deslizamientos de tierra en los canales o el deslizamiento directo o colapso de parte de ellos, el bloqueo u obstrucción de algunos sectores de los canales entre otros. En caso de detección mediante la emisión de un informe, comunicación con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones, es necesario activar este evento disparador.	Diario
<b>Evidencia de asentamientos diferenciales de la presa</b>	Corresponde a la detección visual de deformaciones ubicadas en cualquier sector de la presa que generan asentamientos específicos. Si este tipo de situación se detecta visualmente, es necesario activar el evento de disparo.	Diario
<b>Evidencia de falla del sistema de drenaje</b>	Corresponde a cualquier tipo de avería detectada a la salida del sistema de drenaje del muro. La falla puede ser producto de problemas en la salida como variaciones bruscas en el flujo o la ausencia del mismo. En caso de detección mediante informe, comunicación con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones es necesario activar el evento de disparo.	Diario
<b>Detección de material particulado a la salida del sistema de drenaje</b>	Corresponde a la detección visual de material particulado a la salida del sistema de drenaje de la pared. Esto incluye cualquier tipo de material fino o grueso detectado en la salida del drenaje. En caso de detectar mediante un informe, con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones es necesario activar el evento de disparo.	Diario
<b>Fugas o humedad inusual en la presa</b>	Corresponde a evidencia de filtraciones o humedad en la presa, independientemente de la causa o motivo de su aparición. En caso de detectar mediante un informe, comunicación con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones es necesario activar el evento de disparo.	Diario
<b>Hundimientos o sumideros en la presa</b>	Corresponde a la evidencia de un hundimiento o un agujero en el sector del muro de depósito, independientemente de la causa o motivo de su aparición. En caso de detectar mediante un informe, comunicación con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones es necesario activar el evento de disparo.	Diario
<b>Hundimientos o sumideros en el estanque de relaves</b>	Corresponde a la aparición de un hundimiento o un agujero en el área del estanque cerca de la pared (considerar una distancia aproximada de 100 [m]), independientemente de la causa o motivo de su aparición. En caso de detectar mediante un informe, comunicación con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones es necesario activar el evento de disparo.	Diario

Continuación Tabla 41		
<b>Grietas en la presa</b>	Corresponde a la aparición de fisuras en el sector del muro de depósito, independientemente de la causa o motivo de su aparición. En caso de detectar mediante un informe, comunicación con otros operadores o visualmente este tipo de situaciones es necesario activar el evento de disparo.	Diario
<b>Deslizamiento de tierra inminente en el estanque de relaves</b>	Corresponde a la detección de un potencial deslizamiento de tierra natural en un sector aledaño al estanque que por algún motivo se encuentra en una situación de inestabilidad que puede provocar un colapso inminente y que, en caso de este colapso, puede desplazar la pileta. En caso de detectar por medio de un informe, comunicación personal con otros operadores, o la inspección visual de este tipo de situaciones, se requiere para activar el evento de disparo.	Diario

### 7.1.6 Factores Agravantes: Pronósticos

Los parámetros de pronósticos de lluvia y vientos fuertes fueron mantenidos mientras que el parámetro Nevazón fue retirado por no haber precipitación de nieve en los sectores donde las presas están ubicadas en el país.

**Tabla 42:** Adaptación factores agravantes por pronósticos (Módulo M1)

Parámetro	Descripción	Frecuencia
<b>Lluvia</b>	El pronóstico de lluvia debe indicar la cantidad de milímetros de agua esperada en el área donde se ubica el depósito. El tiempo de lluvia durante el cual se desarrollará la lluvia pronosticada y las fechas asociadas.	Diario
<b>Vientos fuertes</b>	Indica si hay pronóstico de vientos fuertes y las fechas a las que corresponde.	Diario

## 7.2 Adaptación del Módulo 2

### 7.2.1 Parámetros Críticos

En la Tabla 43 se muestran todos los parámetros críticos considerados en Brasil y los que se desconocen si son medidos o no. Los códigos de los parámetros críticos en azul representan los parámetros medidos en las presas de Chile, definidos por el IEF y que también son medidos en Brasil, y los verdes representan los parámetros medidos en Brasil. Las Tablas 44 a 49 describen los parámetros críticos. En las tablas, los parámetros con letras azules representan descripciones de las mediciones de estos parámetros, estas descripciones son retiradas del Programa Tranque (2019) y las letras verdes presentan las descripciones agregadas mediante la guía de buenas prácticas de la Agencia Nacional del Agua (2016).

**Tabla 43:** Parámetros críticos en la adaptación del módulo M2

<b>Clasificación</b>	<b>Código</b>	<b>¿Se mide en Brasil?</b>	<b>Descripción</b>
Geometría	PC-01	Se desconoce	Altura del muro
	PC-02	Se desconoce	Ancho de coronamiento
	PC-03	Se desconoce	Talud del muro
	PC-04	Se desconoce	Pendiente de la Playa
	PC-05	Se desconoce	Distancia mínima entre el muro y la laguna aguas claras
Deformaciones	PC-06	Sí	Deformación del suelo de fundación
	PC-07	Sí	Deformación del muro
	PC-08	Sí	Deformación del coronamiento
Integridad externa del depósito	PC-09	Sí	Grietas
	PC-10	Sí	Humedad o fugas
	PC-11	Sí	Subsidencia o socavones
	PC-12	Sí	Integridad de los estribos
	PC-13	Sí	Integridad del vertedero
Proceso de deposición e integridad interna del dique	PC-14	Sí	Revancha hidráulica
	PC-15	Sí	Revancha operacional
	PC-16	Sí	Topobatimetría
	PC-17	¿?	Tonelaje de relaves depositados
	PC-18	Sí	Estado del vertedero de emergencia
	PC-19	Sí	Nivel freático en la cubeta
	PC-20	Sí	Presión de poros (muro y suelo de fundación)
	PC-21	Sí	Intensidad de lluvias
	PC-22	Se desconoce	Potencial de rebalse
	PC-23	Sí	Distribución granulométrica del material del muro
	PC-24	Se desconoce	Densidad del material de muro
Documentación del diseño	PC-25	Sí	Aceleración Sísmica
	PC-26	Sí	Estudio del umbral de revancha mínima
	PC-27	Sí	Rigidez y resistencia al corte del muro
	PC-28	Sí	Caracterización geotécnica adecuada del suelo de fundación
	PC-29	Sí	Resistencia al corte de los relaves en cubeta (aplicable a relaves espesados)
	PC-30	Sí	Caracterización física de relaves
Integridad del sistema de drenaje	PC-31	Sí	Cumplimiento de las características de diseño del sistema de drenaje
	PC-32	Sí	Integridad del sistema de drenaje
	PC-33	Sí	Turbidez del sistema de drenaje

### 7.2.1.1 Parámetros críticos de geometría

No fue encontrado en ninguna guía de buenas prácticas, normas, ley o cualquier otra referencia sobre la medición de los parámetros críticos relacionados a la geometría de la presa (Tabla 44). En general, el peraltamiento de una presa puede tomar mucho tiempo. Sin embargo, en los depósitos chilenos de arena cicloneada, donde la presa crece en un período de tiempo mucho menor que en Brasil, se requiere medir los parámetros relacionados a la geometría más frecuentemente. A pesar de esto, se decide mantener los parámetros establecidos en Chile en la adaptación de IEF.

**Tabla 44:** Adaptación de parámetros críticos de geometría (Módulo M2)

Código	Descripción	Definición	Frecuencia	Instrumento/ Localización
PC-01	Altura del muro	Corresponde a una relación entre la altura del muro con respecto a la fecha en que el muro debe alcanzar esa altura según el diseño o planificación de la operación y corresponde también a la distancia máxima que puede tener la parte superior del muro con respecto al plan de crecimiento del proyecto.	Semanalmente (dique ciclónico-arenoso) Mensual (dique de terraplén)	–
PC-02	Ancho de coronamiento	Corresponde a la medición del ancho de coronamiento para determinar si el valor está de acuerdo con lo propuesto en proyecto	Mensual	–
PC-03	Talud del muro	Corresponde a la medición de la pendiente de inclinación del talud aguas abajo y aguas arriba, para determinar si el valor está de acuerdo con lo propuesto en proyecto	Mensual	–
PC-04	Pendiente de la Playa	Corresponde a la medición de la pendiente de la playa para determinar si el valor está de acuerdo con lo propuesto en proyecto	Mensual	–
PC-05	Distancia mínima entre el muro y la laguna aguas claras	Corresponde a la distancia mínima del muro que la laguna de aguas claras debe operar.	Mensual	–

### 7.2.1.2 Parámetros críticos de deformación

La Tabla 45 presenta todos los parámetros críticos referentes a deformación. La deformación del suelo de fundación PC-06 permanece igual que lo definido en Chile y los parámetros de Deformación del muro PC-07 y Deformación del coronamiento PC-08 sufren alteraciones.

Cuando hay la necesidad de mantener una medición automatizada de las deformaciones, es necesario utilizar la redundancia entre instrumentación para validar los valores entre sí. Por ejemplo, el Radar terrestre es capaz de entregar valores de mediciones cada 2 minutos, en cuanto la estación total robótica entrega datos cada una hora, y el satélite orbital InSAR entrega mediciones cada 15 días.

La precisión de las mediciones de los radares y de las estaciones totales robóticas pueden ser influenciadas por ruidos generados por la vegetación o por condiciones atmosféricas, con esto, se tiene el InSAR para confirmar o no si las mediciones de los dos últimos instrumentos son correctas.

Cuando existe la necesidad de mediciones realizadas por instrumentos automatizados, en general se usa los marcos superficiales, cómo se pudo ver en el capítulo 3, la mayoría de las presas hacen uso de este tipo de instrumento.

**Tabla 45:** Adaptación de parámetros críticos de deformaciones (Módulo M2)

Código	Descripción	Definición	Frecuencia	Instrumentación/localización
PC-06	Deformación del suelo de fundación	Corresponde a la medición de desplazamiento en el suelo de fundación por Inclinómetros. La excedencia de un valor umbral puede activar un evento.	Semanal	Inclinómetro/ Fundación
PC-07	Deformación del muro	Corresponde a la medición de la deformación en el muro. Esta medición puede ser realizada mediante los instrumentos: InSAR, Radar Terrestre, Estación Total Robótica, Marcos Superficiales e inclinómetros. Los cuales los resultados pueden ser complementados entre sí. La excedencia de valores de umbrales puede activar un evento.	2 min/ Semanal/Quincenal	InSAR/Orbital; Radar/En frente al muro; Estación Total Robótica/ En frente al muro; Marcos superficiales/Bermas; Inclinómetros/Bermas
PC-08	Deformación del coronamiento	Corresponde a la medición de la deformación en el coronamiento. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	Semanal	Marcos superficiales/ Coronamiento

### 7.2.1.3 Parámetros críticos de Integridad Externa del depósito

Muchos de los parámetros de integridad externa (Tabla 46), que deben ser monitoreados en Brasil ya hacían parte del IEF de Chile, pero algunas informaciones y definiciones fueron cambiadas. En Brasil, la integridad externa de un depósito es tomado con gran importancia al que se refiere a parte de fiscalización de los parámetros de integridad externa mencionados en la matriz de Estado de Conservación de la Categoría de Riesgo. Las informaciones para la adaptación de esta sección del IEF fue obtenida de la Guía de orientación de inspección de seguridad de presa de la Agencia Nacional del Agua (ANA, 2016).

Tabla 46: Adaptación de parámetros críticos de integridad externa del depósito (Módulo M2)

Código	Descripción	Definición	Frecuencia	Instrumento/ Localización
PC-09	Grietas	Si el evento de presencia de grietas en la pared del depósito es activado; grietas generadas por sequías; grietas longitudinales en el talud aguas abajo; grietas en el coronamiento debido a sequías; grietas transversales en el talud aguas abajo; grietas longitudinales en el coronamiento; grietas pronunciadas en la cubeta del muro.	Semanal	Inspección visual
PC-10	Humedad o Fugas	Si el evento de presencia humedad o fugas es activado; mudanza acentuada en la vegetación; Fugas de agua ubicadas en la parte superior del talud aguas abajo; ruta de filtración preferencial desarrollado a través del estribo o talud aguas abajo; zona húmeda en una tira horizontal en el talud aguas abajo; fuga de agua localizada; fuga a través de los estribos; flujo con burbujas debajo de la pendiente aguas abajo; fugas de agua localizadas "barrenta"; fuga de agua a través de grietas cerca del coronamiento.	Diario	Inspección visual
PC-11	Subsistencia o socavones	Si el evento desencadenante de subsidencia o socavón se activa en la pared del depósito; si el evento desencadenante de subsidencia o socavón se activa en el estanque; si se determina que el fenómeno de hundimiento o socavamiento pone en peligro la integridad del muro; socavón en la cubeta del muro. tierra o piedras deslizan del talud aguas arriba a la cubeta debido a la pendiente muy inclinada; hundimiento en el coronamiento.	Diario	Inspección visual
PC-12	Integridad de los estribos	Si se activa el evento desencadenante asociado con la integridad de los estribos; si se determina por instrumentación que el estribo tiene una tendencia desfavorable asociada a su deformación; se detectan problemas que afectan la estabilidad del estribo asociados a condiciones específicas de cada depósito; se detecta un desplazamiento relativo entre la presa y el suelo de cimentación.	Diario	Inspección visual
PC-13	Integridad del vertedero	Si se activa el evento desencadenante asociado al vertedero de emergencia; canales erosionados o erosión al final del vertedero; paredes del vertedero desplazadas; juntas abiertas o desplazadas; deterioro de la estructura de hormigón; fugas dentro y alrededor del vertedero; filtración mediante juntas en el canal del vertedero; vegetación excesiva en el canal del vertedero; grietas pronunciadas en la estructura del vertedero; pérdida o falla en el Rip-rap.	Diario	Inspección visual

#### 7.2.1.4 Parámetros críticos de aspectos operacionales

En los parámetros críticos de aspectos operacionales (Tabla 47), se agrega un parámetro crítico, que es el PC-16 Topobatimetría. Dado que las presas en Brasil tienen grandes cantidades de agua, hacer el control del volumen útil de la cubeta es importante para saber la capacidad de la presa para almacenar relaves y contener el agua proveniente de la lluvia en el invierno. Los demás parámetros no fueron posible de adaptar por no haber informaciones. Los parámetros PC-17, PC-22 y PC-24 no se sabe si son medidos o no en el país.

**Tabla 47:** Adaptación de parámetros críticos de aspectos operacionales (Módulo M2)

Código	Descripción	Definición	Frecuencia	Instrumento/ Localización
PC-14	Revancha hidráulica	Corresponde a la distancia vertical entre el coronamiento y el nivel de agua del depósito. Es medido mediante regla Limnimétrica. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	Diario	Regla Limnimétrica
PC-15	Revancha operacional	Revancha operacional es la distancia vertical entre el nivel operativo del depósito (a nivel del vertedero) y el coronamiento de la presa. Este valor representa la capacidad de la presa para laminar un evento de lluvia extrema considerando la combinación de capacidad de almacenamiento de lluvia, la capacidad de descarga del vertedero y la altura para contener olas de viento.	Semanal	
PC-16	Topobatimetría	Corresponde al control geométrico de la laguna y del lecho subacuático. Permite la medición de la extensión de la laguna y volumen de control.	Trimestral	Batímetro
PC-17	Tonelaje de relaves depositados	Tonelaje acumulado en el depósito. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	Mensual	
PC-18	Estado del vertedero de emergencia	Si el evento vertedero de emergencia es activado o si el evento es activado y hay evento de lluvia en desarrollo o pronóstico de lluvia.	Diario	
PC-19	Nivel freático en la cubeta	Corresponde a la elevación máxima que pueden alcanzar los niveles piezométricos antes de considerar un valor irregular o fuera de diseño. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	Semanal	Piezómetros
PC-20	Presión de poros (muro y suelo de fundación)	Corresponde a la presión del agua dentro de los poros del suelo disminuyendo los esfuerzos normales entre las partículas. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	A cada 1 hora	Piezómetros
PC-21	Intensidad de lluvias	Corresponde a la medición de la intensidad de lluvias, mediante pluviómetros. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	A cada 1 hora durante la lluvia	Pluviómetro

Continuación Tabla 47				
PC-22	Potencial de rebalse	Corresponde a la relación entre el reservorio y la capacidad del volumen de agua que puede almacenar.	A cada 1 hora cuando existe un pronóstico de lluvia o durante la lluvia	Medición de plataforma global
PC-23	Distribución granulométrica del material del muro	Corresponde al porcentaje de compactación asociado a un tipo de prueba que se puede medir en campo después del proceso de compactación, este umbral está definido por diseño, o a la curva granulométrica de las arenas.	Semanal	
PC-24	Densidad del material de muro	Corresponde a la densidad seca mínima que el material debe alcanzar después del proceso de compactación y corresponde al grado mínimo de compactación de la prueba Proctor, expresado en porcentaje. La excedencia de un valor de umbral puede activar un evento.	Semanal (para presas de relaves de arena)	

#### 7.2.1.5 Documentación del diseño

Para los parámetros de documentación de diseño (Tabla 48), se utilizó como referencia la Norma NBR 13028/2017 que tiene las directrices para el diseño de presas de relaves. Algunas descripciones de lo que existe en los depósitos de relaves chilenos fueron cambiadas, y se agrega el parámetro PC-30 que es el estudio tecnológico y caracterización física de relaves.

**Tabla 48:** Adaptación del parámetro crítico de Documentación del diseño (Módulo M2)

PARÁMETROS CRÍTICOS: DOCUMENTACIÓN DEL DISEÑO - MÓDULO 2				
Código	Descripción	Definición	Frecuencia	Instrumentación/ Localización
PC-25	Aceleración Sísmica	Los estudios sísmicos deben evaluar el potencial de sismicidad en el área de implementación de la presa, incluidos los estándares y registros existentes.	–	–
PC-26	Estudio del umbral de revancha mínima	Estudio para definir nuevo umbral de revancha mínima	A cada 5 años	–
PC-27	Rigidez y resistencia al corte del muro	Ensayo para determinar la resistencia al corte del muro	Pruebas SPT o similares: Campaña anual. Pruebas de laboratorio: anuales Campaña	–



Continuación Tabla 48

PC-28	Caracterización geotécnica adecuada del suelo de fundación	<b>El estudio del suelo de fundación debe presentar los principales resultados del mapeo geológico-geotécnico de investigaciones geotécnicas y pruebas de campo y laboratorio realizadas para conocer las características geotécnicas de los materiales constituyentes y las condiciones hidrogeológicas de la fundación de la presa.</b>	Pruebas SPT o similares: Campaña anual. Pruebas de laboratorio: Campaña anual	-
PC-29	Resistencia al corte de los relaves en cubeta (Aplicable a relaves espesados)	<b>Si se detecta que las propiedades resistentes de la cubeta no cumplen con las especificadas en diseño</b>	Prueba en la cubeta o laboratorio sugerido por diseño, EoR* o similar	-
PC-30	Caracterización física de relaves	<b>En presas de relaves construidas con los relaves en sí, debe existir estudio de las características físicas y propiedades geotécnicas de sedimentación de relaves, como tamaño de partícula, resistencia al corte y permeabilidad.</b>	Prueba en la cubeta o laboratorio sugerido por diseño, EoR* o similar	-

\*Ingeniero de Registro: el ingeniero de registro realiza inspecciones de seguridad con regularidad y emite mensajes técnicos relacionados, interpretando continuamente los resultados de las actividades de inspección y monitoreando las estructuras, entre otras atribuciones.

### 7.2.1.6 Integridad del sistema de drenaje

La integridad del sistema de drenaje (Tabla 49), puede ser considerado uno de los parámetros más importantes para las presas de relaves en Brasil por la gran cantidad de agua. Un único cambio fue realizado en el parámetro PC-31, donde se agrega el instrumento de medición Indicador de Nivel de Agua, que busca medir el nivel de agua dentro del muro para detectar la integridad del dren vertical de las presas.

**Tabla 49:** Adaptación del parámetro crítico de Integridad del sistema de drenaje (Módulo 2)

<b>PARÁMETROS CRÍTICOS: INTEGRIDAD DEL SISTEMA DE DRENAJE - MÓDULO 2</b>				
<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Definición</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Instrumentación/ Localización</b>
<b>PC-30</b>	Cumplimiento de las características de diseño del sistema de drenaje	<b>Corresponde a la existencia de informaciones sobre el cumplimiento de las características de diseño del sistema de drenaje.</b>	Documentación asociado con el diseño y construcción período	–
<b>PC-31</b>	Integridad del sistema de drenaje	<b>Corresponde al nivel piezométrico máximo que puede alcanzar el piezómetro instalado en el desagüe sin tener un fundente presurizado en el desagüe. Corresponde también a una variación de flujo repentina, o corresponde al nivel freático máximo que puede alcanzar el Medidor de Nivel de Agua instalado cerca del dren vertical.</b>	A cada 1 hora	Piezómetro/ En el dren horizontal; Indicador de Nivel de Agua/ En la salida de cada dren; Medidor de flujo/ en la salida de cada dren
<b>PC-32</b>	Turbidez del sistema de drenaje	<b>Corresponde a la cantidad de turbidez que el sensor puede detectar y a la cantidad de tiempo que el evento especificado puede estar activo.</b>	A cada 1 hora	Turbidímetro/ En la salida de cada dren

## 7.2.2 Escenarios de falla

La Tabla 50 resume un estudio realizado por Lima (2016), que presenta una síntesis de las roturas que hubo hasta 2016, y como complemento se agrega las roturas más recientes que son las de la presa Feijão más conocida como Brumadinho en 2019 y la presa Cachoeirinha en 2022. La mayoría de las presas de la Tabla 49 tenían problemas en el sistema de drenaje interno y problemas con la capacidad del vertedero.

**Tabla 50:** Roturas de presas de relaves en Brasil (modificado de Lima, 2016)

<b>Presa</b>	<b>Principales daños</b>	<b>Descripción</b>	<b>Mecanismo de falla</b>
Itaminas Fernandinho (1986)	7 muertes	La pendiente y la altura de la pendiente aguas abajo no eran compatibles con la resistencia al corte del material y con las presiones piezométricas presentes en el macizo. El sistema de <u>drenaje interna</u> podría estar comprometido por acumulación de finos próximo al muro, que durante un cargamento rápido <u>podría provocar condiciones no drenadas</u>	Licuación Estática
Rio Verde Cava 1 (2001)	5 muertes	Geometría inadecuada de elevaciones; método de arrojar relaves al depósito; y la <u>falta de un sistema interno de drenaje y filtración</u> . La asociación de estos factores condujo a una situación de pendiente crítica, con excesiva elevación del nivel freático y consecuente ruptura	Inestabilidad de Talud
Rio Pomba São Francisco (2006-2007)	Fugas de relaves de bauxita. Interrupción de suministro de agua	Falta de <u>capacidad del Vertedero</u> , durante fuertes lluvias	Rebalse
Herculano Retiro do Sapecado (2014)	2 muertes	Aumento del nivel freático en el interior de la presa generado por la saturación de la presa y la <u>falta de un sistema de drenaje en la estructura</u>	Inestabilidad de Talud
Samarco Fundão (2015)	19 muertes	Alta saturación de los relaves arenosos sedimentados; elevada tasa de peraltamiento anual; obstrucción del dique 02; <u>falla en el sistema de drenaje</u>	Licuación Estática
Feijão Brumadinho (2019)	270 muertes	Pendiente muy elevada; manejo de agua inadecuado dentro de la presa; Peraltamiento sobre relaves más finos y más frágiles; <u>Falta de drenaje interna significativa</u> que resultó en un alto nivel de agua en la presa; Alto contenido de hierro creando relave rígido y frágil; intensas lluvias regionales.	Licuación Estática
Cachoeirinha (2022)	Daños socioeconómicos y ambientales	Falta de <u>capacidad del Vertedero</u> , durante fuertes lluvias	Rebalse

Se utiliza también informaciones del Instituto Brasileño de Minería (IBRAM) que menciona los posibles controles para las fallas generadas por Rebalse, Inestabilidad de Talud, Erosión y Licuación Estática presentes en la Figura 47 del capítulo 6. Además, se utiliza como referencia la matriz de Estado de Conservación de la Categoría de Riesgo, ya que la misma es utilizada actualmente para determinar cuándo una presa entra en estado de emergencia. En la Tabla 51 se muestran los escenarios de falla en Chile y los escenarios de falla definidos para presas en Brasil.

**Tabla 51:** Escenarios de falla en Chile y en Brasil.

<b>ESCENARIOS DE FALLA EN CHILE</b>		<b>ESCENARIOS DE FALLA EN BRASIL</b>	
<b>Inestabilidad de Talud</b>		<b>Inestabilidad de Talud</b>	
IT-01	Por sismos o efectos adversos	IT-01	Por aumento de la presión de poro con evidencia de deformación
IT-02	Por aumento de la presión de poro con evidencia de deformación	IT-02	Por pérdida de integridad de talud
IT-03	Por licuefacción Estática	IT-03	Por deslizamiento en el muro
IT-04	Por sollicitación cíclica	<b>Licuación Estática</b>	
IT-05	Por pérdida de integridad de talud	LE-01	Licuación estática sin presencia de anomalía
IT-06	Por deslizamiento en el muro	LE-02	Licuación estática con presencia de anomalía
<b>Rebalse</b>		<b>Rebalse</b>	
RE-01	Por pérdida de revancha hidráulica durante lluvias torrenciales	RE-01	Por pérdida de revancha hidráulica durante lluvias torrenciales
RE-02	Por oleaje producido por deslizamiento	RE-02	Por oleaje producido por deslizamiento
RE-03	Lama de relaves, producto de la licuefacción de la laguna.		
<b>Erosión Interna</b>		<b>Erosión Interna</b>	
EI-01	Por filtraciones descontroladas	EI-01	Por filtraciones descontroladas
EI-02	Por subsidencia en la cubeta cerca del muro	EI-02	Por subsidencia en la cubeta cerca del muro
EI-03	Por subsidencia en el muro	EI-03	Por subsidencia en el muro

El mayor cambio en la adaptación de los mecanismos de falla fue que en el caso de Brasil, se hizo una separación entre el escenario de falla de licuación estática. Como este tipo de falla es muy común en Brasil, se separa del mecanismo de falla por inestabilidad de talud y se agrega un nuevo mecanismo de falla llamado Licuación Estática. En este nuevo mecanismo de falla, se tiene dos escenarios de falla, la licuación estática sin presencia de anomalía y con presencia de anomalía.

Cómo ya visto en los estudios de rotura de las presas en Brasil, hay casos de inestabilidad de talud por falta de un sistema de drenaje interno adecuado, y casos de rebalse por falta de capacidad del vertedero. Estos tipos de fallas serán considerados en la adaptación del IEF.

En el estudio no existen casos por erosión interna, pero los mismos serán considerados, ya que problemas en los drenes internos generan este tipo de falla y en los casos de rotura en Brasil varias presas tienen deficiencia en drenes internos.

A continuación, se presentarán todos los escenarios de fallas propuestos para los depósitos de relaves en Brasil. Las cédulas presentes en las tablas 52 a 61 tienen dos colores, los colores azules representan un parámetro presente en el IEF de Chile, y el color verde representa a un parámetro existente solamente en Brasil.

#### 7.2.2.1 IT-01: Inestabilidad de talud por aumento de la presión de poros con evidencia de deformación

La Tabla 52 presenta el escenario de falla IT-01: Inestabilidad de talud por aumento de la presión de poros con evidencia de deformación. Se decide agregar el parámetro PC-31 referente a la integridad del sistema de drenaje por ser considerado un parámetro importante para la estabilidad de las presas en Brasil, ya que en cinco de las siete presas que fallaron, hubo fallas o problemas en el sistema de drenaje. Además, es un parámetro considerado en la matriz de estado de conservación de la categoría de riesgo y en el Manual IBRAM. Se mantienen los parámetros PC-20, PC-07 y PC-08 ya que son parámetros recomendables por el manual IBRAM.

**Tabla 52:** Adaptación del escenario de falla IT-01 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: IT-01- MÓDULO 2</b>			
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>	
IT-01	Inestabilidad de talud por aumento de la presión de poros con evidencia de deformación	<b>PC-20: Presión de poros (Manual IBRAM e IEF)</b>	<b>+</b> <b>PC-07: Desplazamiento o deformación el muro (Manual IBRAM e IEF)</b>
		Además de los parámetros PC-20 y PC-07 algún de los parámetros abajo deberán ser activados para que el escenario de falla sea desarrollado	
		<b>PC-31: Integridad del sistema de drenaje (Matriz EC, estudio de fallas, Manual IBRAM e IEF)</b>	<b>o</b> <b>PC-08: Deformación en el coronamiento (Manual IBRAM e IEF)</b>

#### 7.2.2.2 IT-02: Inestabilidad de talud por pérdida de integridad de talud

La Tabla 53 presenta el escenario de falla IT-02: Inestabilidad de talud por pérdida de integridad del talud. Se mantiene el parámetro crítico PC-12 y se mantiene el PC-10 y PC-20 por estar presente en el manual IBRAM. Se agregan los parámetros PC-09 y PC-11 por ser considerados parámetros importantes en la matriz de conservación y se agrega el parámetro PC-31 por ser considerado uno de los parámetros más importantes a ser medido por estar presente en los tres criterios elegidos para los escenarios de falla en Brasil.

**Tabla 53:** Adaptación del escenario de falla IT-02 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: IT-02- MÓDULO 2</b>					
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>			
IT-02	Inestabilidad de talud por pérdida de integridad de talud	<b>PC-31: Integridad del sistema de drenaje (Matriz EC, estudio de fallas, Manual IBRAM e IEF)</b>	+	<b>PC-10: Humedad o fugas (Matriz EC e IEF)</b>	
		Además de los parámetros PC-31 y PC-10 algún de los parámetros abajo deberán ser activados para que el escenario de falla sea desarrollado			
		<b>PC-12: Integridad de los estribos (IEF)</b>	o	<b>PC-20: Presión de poros (Manual IBRAM e IEF)</b>	o

### 7.2.2.3 IT-03: Inestabilidad de talud por deslizamiento de muro

La Tabla 54 presenta el mecanismo de falla IT-03: Inestabilidad de talud por deslizamiento de muro. Todos los parámetros presentes en este escenario de falla están presentes también en el IEF de Chile. Los parámetros PC-09 y PC-10 son recomendados por la matriz de estado de conservación. El evento gatillador del módulo M1 y el PC-20 son parámetros recomendados por el manual IBRAM y el PC-31 por ser recomendado por los tres criterios utilizados en la adaptación de los escenarios de falla para presas de relaves en Brasil.

**Tabla 54:** Adaptación del escenario de falla IT-03 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: IT-03- MÓDULO 2</b>					
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>			
IT-03	Inestabilidad de talud por deslizamiento de muro	<b>Evento gatillador: superficie deslizamiento de un sector del pendiente de la pared (Matriz EC e IEF)</b>	+	<b>PC-31: Integridad del sistema de drenaje (Matriz EC, estudio de fallas, Manual IBRAM e IEF)</b>	
		Además del evento gatillador y parámetro PC-31 algún de los parámetros abajo deberán ser activados para que el escenario de falla sea desarrollado			
		<b>PC-20: Presiones de poro (Manual IBRAM e IEF)</b>	o	<b>PC-10: Humedad o fugas (Matriz EC e IEF)</b>	o

### 7.2.2.4 LE-01: Licuación estática sin presencia de anomalía

La Tabla 55 presenta el escenario de falla LE-01: Licuación Estática sin presencia de anomalía. En este escenario de falla se mantienen el PC-27 y el PC-20 por ser del IEF y ser recomendado por el manual IBRAM en fallas de licuación estática. El PC-31 se agrega por ser un parámetro crítico presente en todas las fallas de licuación estática.

**Tabla 55:** Adaptación del escenario de falla LE-01 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: LE-01- MÓDULO 2</b>			
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>	
LE-01	Licuación Estática sin presencia de anomalía	<b>PC-27: Módulo de rigidez y resistencia al corte del muro (IEF)</b>	
		Además del parámetro PC-27 algún de los parámetros abajo deberá ser activado para que el escenario de falla sea desarrollado	
		<b>PC-31: Integridad del sistema de drenaje (Matriz EC, estudio de fallas, Manual IBRAM e IEF)</b>	o <b>PC-20: Presión de poros (Manual IBRAM e IEF)</b>

#### 7.2.2.1 LE-02: Licuefacción estática con presencia de anomalía

La Tabla 56 presenta el escenario de falla LE-02: Licuación Estática con presencia de anomalía. Este escenario de falla es creado porque existen avisos previos para una falla por licuación estática, aunque no haya desplazamiento evidente. Eventos gatilladores como evidencia de falla en el sistema de drenaje, humedad o fugas (PC-10), módulo de rigidez y resistencia al corte de la pared con valores inferiores a lo recomendable (PC-27) y presión de poros (PC-20). Es importante mencionar que esta evaluación y creación del escenario de falla por licuación estática con presencia de anomalía es de la autora mediante estudios de las fallas que ya ocurrieron en el país.

**Tabla 56:** Adaptación del escenario de falla LE-02 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: LE-02- MÓDULO 2</b>				
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>		
LE-02	Licuación Estática con presencia de anomalía	<b>Evento gatillador: Evidencia de falla del sistema de drenaje (Matriz de EC, Fallas en Brasil y IEF)</b>	+	<b>PC-10: Humedad o fugas ( Matriz de EC y IEF)</b>
		Además del evento gatillador y parámetro PC-10 algún de los parámetros abajo deberán ser activados para que el escenario de falla sea desarrollado		
		<b>PC-20: Presiones de poro (Manual IBRAM e IEF)</b>	o	<b>PC-27: Módulo de rigidez y resistencia al corte de la pared (IEF)</b>

7.2.2.2 RE-01: Rebalse por pérdida de revancha hidráulica durante lluvias torrenciales

La Tabla 57 presenta el escenario de falla RE-01: Rebalse por pérdida de revancha hidráulica durante lluvias torrenciales. En este tipo de falla se agregan los parámetros PC-16 como recomendación del manual IBRAM y el PC-13 como parámetro importante de la matriz de estado de conservación. Los demás parámetros ya están presentes en este mismo escenario de falla para presas de Chile. El parámetro PC-14 también es recomendación del manual IBRAM.

**Tabla 57:** Adaptación del escenario de falla RE-01 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: RE-01- MÓDULO 2</b>				
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>		
RE-01	Rebalse por pérdida de revancha hidráulica durante lluvias torrenciales	<b>Evento gatillador: lluvia en desarrollo (IEF)</b>	+	<b>PC-16: Topobatimetría (Manual IBRAM)</b>
		Además del evento gatillador y los parámetros críticos arriba, el evento gatillador o algún de los parámetros abajo deben ser activados para que el escenario de falla sea desarrollado		
		<b>Evento gatillador: lluvia en desarrollo (IEF)</b>	o	<b>PC-14: Revancha Hidráulica (Manual IBRAM e IEF)</b>



### 7.2.2.3 RE-02: Rebalse por oleaje producido por deslizamiento

La Tabla 58 presenta el escenario de falla RE-02: Rebalse por oleaje producido por deslizamiento. Este escenario de falla mantiene el parámetro crítico PC-14 y el evento gatillador de deslizamiento inminente en la laguna y también se agrega el PC-11 como recomendación por estar presente en la matriz de estado de conservación.

**Tabla 58:** Adaptación del escenario de falla RE-02 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: RE-02- MÓDULO 2</b>			
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>	
RE-02	Rebalse por oleaje producido por deslizamiento	<b>PC-11: Subsistencia o socavones (IEF y Matriz EC)</b>	
		Además del parámetro PC-11, el evento gatillador o el parámetro abajo debe ser activado para que el escenario de falla sea desarrollado	
		<b>Evento gatillador: deslizamiento inminente en la laguna (IEF)</b>	<b>o</b>

#### 7.2.2.4 EI-01: Erosión interna por filtraciones controladas

La Tabla 59 presenta el escenario de falla EI-01: Erosión Interna por filtraciones controladas. En estos escenarios todos los parámetros también están presentes en el IEF. El PC-20 es una recomendación del manual IBRAM, el PC-10 por ser recomendación de la matriz de estado de conservación y el PC-33 por estar presente con las fallas de las presas en Brasil, y por ser recomendación del manual IBRAM y estar presente en la matriz de conservación.

**Tabla 59:** Adaptación del escenario de falla EI-01 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: EI-01- MÓDULO 2</b>			
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>	
EI-01	Erosión Interna por filtraciones controladas	<b>PC-10: Humedad o fugas (Matriz EC e IEF)</b>	
		Además del parámetro PC-10, algún de los parámetros abajo deberá ser activado para que el escenario de falla sea desarrollado	
		<b>PC-20: Presión de poro (Manual IBRAM e IEF)</b>	<b>PC-33: Turbidez en el sistema de drenaje (Matriz EC, Manual IBRAM, Fallas en Brasil e IEF)</b>

#### 7.2.2.1 EI-02: Erosión Interna por subsidencia en la cubeta del muro

La Tabla 60 presenta el escenario de falla EI-02: Erosión Interna por subsidencia en la cubeta del muro. Se agrega el PC-09 y se mantiene el PC-11 del IEF por ser también un parámetro presente en la matriz de estado de conservación.

**Tabla 60:** Adaptación del escenario de falla EI-02 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: EI-02- MÓDULO 2</b>			
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>	
EI-02	Erosión Interna por subsidencia en la cubeta del muro	<b>PC-11: Subsidencia o socavones (Matriz EC e IEF)</b>	<b>PC-09: Grietas (Matriz EC)</b>

#### 7.2.2.2 EI-03: Erosión Interna por subsidencia en el muro

La Tabla 61 presenta el escenario de falla EI-03: Erosión Interna por subsidencia en el muro. Se mantienen los parámetros PC-11 por ser considerado importante por la matriz de estado de

conservación y el PC-33 por ser importante en las fallas de presas en Brasil. El parámetro PC-31 es agregado por estar presente los tres criterios ya mencionados anteriormente.

**Tabla 61:** Adaptación del escenario de falla EI-03 (Módulo M2)

<b>ESCENARIO DE FALLA: EI-03- MÓDULO 2</b>			
<b>Código</b>	<b>Escenario de falla</b>	<b>Parámetros</b>	
EI-03	Erosión Interna por subsidencia en el muro	<b>PC-11: Subsidencia o socavones (Matriz EC e IEF)</b>	
		Además del parámetro PC-11, algún de los parámetros abajo deberá ser activado para que el escenario de falla sea desarrollado	
		<b>PC-31: Integridad del sistema de drenaje (Matriz EC, estudio de fallas, Manual IBRAM e IEF)</b>	o <b>PC-33: Turbidez en el sistema de drenaje (Matriz EC, Manual IBRAM, falla en Brasil e IEF)</b>

Figura 49 presenta un resumen de todos los cambios propuesto anteriormente, se finaliza la adaptación con el esquema presentado en el Capítulo 6 (Figura 45). Los parámetros críticos del IEF y los nuevos parámetros críticos, supliendo las brechas existentes en la política de fiscalización de seguridad de presas en Brasil.

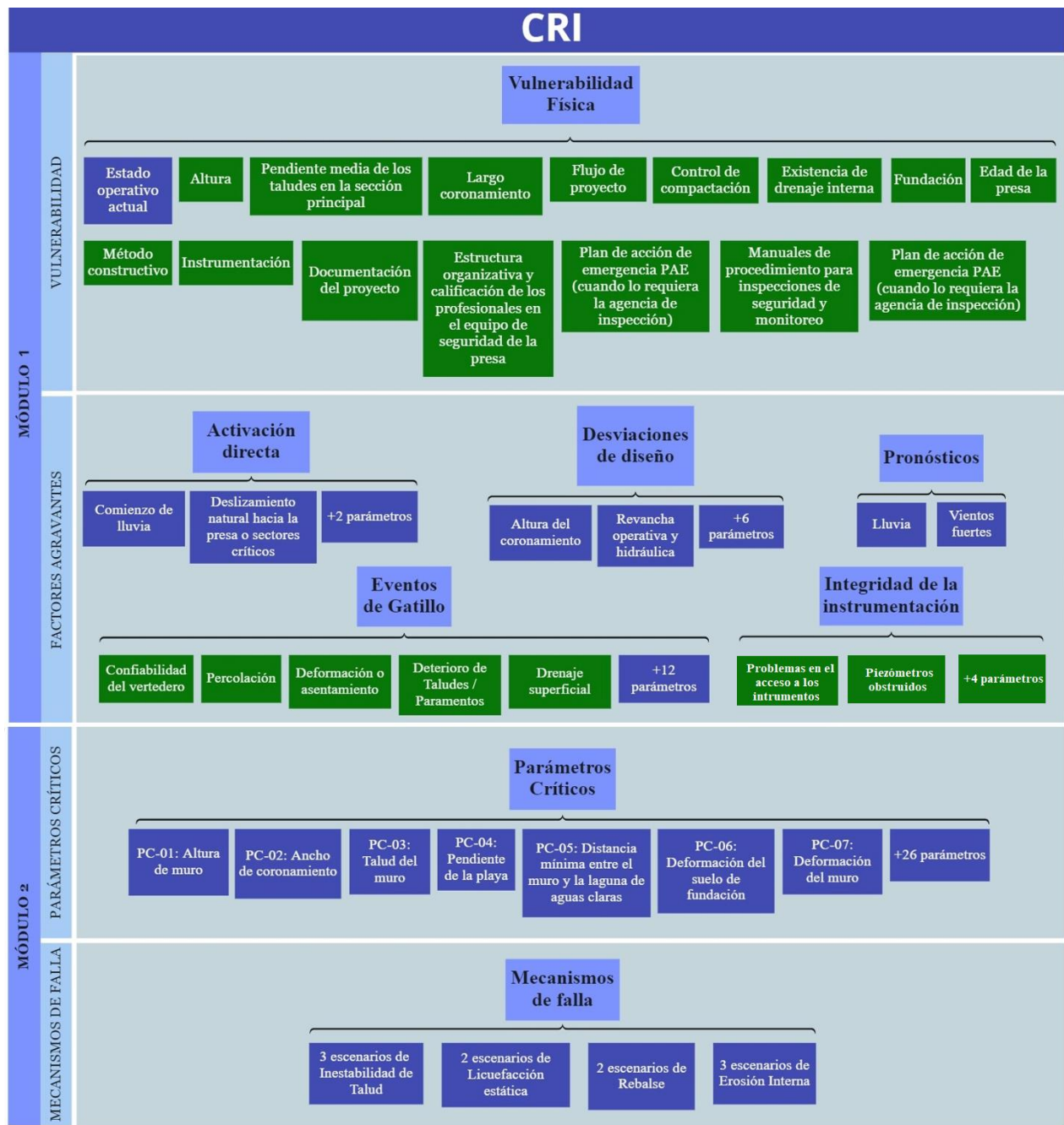


Figura 49: Esquema IEF con la adaptación de los parámetros. (Elaboración propia)

## Capítulo 8: Discusión

La adaptación del Índice de Estabilidad Física para los depósitos de relaves en Brasil propuesto en este trabajo es una contribución para el actual sistema legislativo y de fiscalización de la seguridad de las presas en Brasil. La adaptación de los Módulos M1 y M2 del IEF elimina eventos gatilladores y parámetros críticos comunes en Chile y que no existen en Brasil. Por ejemplo, eventos accionados a sismos. Se agregan parámetros existentes solamente en Brasil que están relacionados a las características de diseño del muro, como ejemplo, la vegetación y el ríppap en el talud aguas arriba.

Los escenarios de falla son modificados de acuerdo con las fallas que ya ocurrieron en Brasil, donde se tiene una posibilidad de ocurrencia de fallas por licuación estática e inestabilidad de talud. Se mantienen también los mecanismos de falla por rebalse y erosión interna. Las modificaciones en los eventos y parámetros críticos que accionan algún escenario de falla son relacionadas con los parámetros que tienen más relevancia a ser medidos en el país. Por ejemplo, los parámetros que miden la turbidez del flujo de agua, el sistema de drenaje interno, y también parámetros que miden el desplazamiento del muro, las grietas, el surgimiento de socavones entre otros.

El IEF adaptado para las presas de Brasil pretende ayudar a la legislación brasileña como una forma eficaz de prevenir nuevas fallas, sin tener que cambiar la legislación siempre que surjan estas fallas. La legislación brasileña viene teniendo cambios a lo largo de los años mediante acciones reactivas, o sea, siempre que hay una falla se realiza la revisión de la legislación y cambios son efectuados. La Agencia Nacional de Minería (ANM), responsable por la fiscalización de los más de 800 depósitos de relaves, tiene un importante rol en la seguridad de las presas en Brasil, ya que tienen la función de validar la seguridad de estas presas en el país, y transmitir las informaciones a la sociedad referente al riesgo que el depósito de relaves representa para la comunidad.

Para una mejor comunicación entre las compañías mineras, autoridades y comunidad, se creó el Sistema Integrado de Gestión de Presas de Minería (SIGPM), donde hay información al público respecto de la clasificación de todas las presas existentes en el país, si la presa tiene Categoría de Riesgo (CRI) alta, media o baja, y si el Daño Potencial Asociado (DPA) es alto, medio o bajo. Además, el sitio ofrece informaciones respecto de la localización de la presa, la empresa responsable, su altura y volumen. Las informaciones son cargadas en el sistema por el propio equipo de la compañía minera. Como se vió en el Capítulo 3, hay informaciones que son cargadas en el sistema y que no se condice con la realidad, y esto puede ser perjudicial para un análisis eficiente de todas las presas.

La metodología de clasificación de las presas según la CRI y el DPA empezó mediante la Ley 12.334 de la Política Nacional de Seguridad de Presas en 2010. El objetivo de las clasificaciones es alertar a las autoridades a respecto de la seguridad de las presas, para que en caso de una emergencia se puedan desarrollar actividades de salvamento de la presa y las personas. En el Capítulo 5 es posible ver que hay limitaciones en estas clasificaciones y sus funciones. Las presas que fallaron en Mariana en 2015, Brumadinho en 2019 y de Nova Lima en 2022, tenían Categoría de Riesgo baja, lo que implica que la autoridad no tenía urgencia en visitar la presa. Esto ofrece a la población una falsa sensación de seguridad.

Con respecto al DPA y las presas que son clasificadas con DPA medio o bajo, se pudo ver en el Capítulo 5 que hay combinaciones de factores existentes en la matriz de clasificación que pueden ofrecer situaciones donde hay casos que existe población frecuente aguas abajo, o que la falla de la presa puede provocar un severo daño ambiental o socioeconómico. Como estos depósitos están clasificados con DPA medio o bajo se exime la responsabilidad de mantener un monitoreo en tiempo real y 24 horas.

Actualmente en Brasil, la manera que se comprueba la seguridad de una presa es mediante un certificado que debe ser enviado a la ANM cada 15 días, firmado por un responsable que indica si la presa tiene problemas asociados a la integridad externa de la presa. Este certificado es una verificación de los parámetros incluidos en la matriz de CRI responsable por el estado de conservación de la presa que utilizan como parámetros la confiabilidad del vertedero, filtración, deformación o asentamiento, deterioro de taludes y drenaje superficial.

Además del certificado enviado cada 15 días, la ley exige una Declaración de Condición de Estabilidad realizada cada seis meses, mediante el Informe de Inspección de Seguridad Regular (IISR) que revisa las inspecciones quincenales, genera un análisis de estabilidad de la presa, hace un estudio de las características de los relaves y revisa los niveles de control de la instrumentación. Sin embargo, esta revisión garantiza lo que fue realizado hace seis meses, lo que no garantiza una fiscalización efectiva de que las personas estarán seguras en los próximos seis meses. Otra forma que la ley tiene de fiscalizar la seguridad de presas es mediante la Revisión Periódica de Seguridad de la Presa (RPSP) que realiza la evaluación detallada de la presa y de sus estructuras asociadas, reevalúa la CRI y DPA, actualiza estudios geológicos y reevalúa los procedimientos de operación, mantenimiento, ensayos, instrumentación y monitoreo. Sin embargo, la periodicidad de la realización del RPSP es de tres a siete años, dependiendo del DPA de la presa. El tiempo de espera para la realización de del RPSP puede ser demasiado largo y las presas pueden estar con un riesgo de rotura alto sin que las autoridades se enteren.

El IEF representa un avance de esta fiscalización, la cual representa en gran parte los objetivos contenidos en el Estándar Global de la Industria de Gestión de relaves (GISTM, en inglés) que debe ser implementada en Brasil en los próximos años. Adecuar una presa al GSTM significa que esta presa debe tener una fiscalización, monitoreo y transparencia de información. Además, la estructura debe recibir una evaluación continua de auditorías e inspecciones realizadas de forma independiente. El objetivo del GISTM es garantizar el menor daño posible a las personas o al medio ambiente en torno de la presa durante todo su ciclo de vida.

## Capítulo 9: Conclusiones

La adaptación del IEF para los depósitos de relaves brasileños cuenta con las siguientes características:

En el módulo M1 sección de vulnerabilidad física, se mantiene el estado operativo actual definido en el IEF de Chile y se agregan nueve evaluaciones presentes en las matrices de Características Técnicas y Plan de Seguridad de Presa de la Categoría de Riesgo (CRI). Se tienen los factores agravantes de activación directa, pero se retiran los factores relacionados a sismicidad y no se agrega ningún factor específico para las presas en Brasil. Se mantienen los factores agravantes relacionados a desviaciones de diseño, evaluados en Chile, ya que no se encontró información para la adaptación. Se agrega una nueva sección en los factores agravantes del módulo M1 relacionada a la integridad de los instrumentos, ya que la falta de mantenimiento y mal estado de los instrumentos pueden resultar en mediciones equivocadas, esta sección es compuesta por seis evaluaciones. En eventos gatilladores, todos los parámetros para Chile fueron mantenidos y se agregan los siguientes parámetros: rip-rap incompleto, destruido o desplazado, vegetación excesiva, ausencia de protección vegetal, presencia de hormigueros y madrigueras y falla en el sistema de drenaje superficial. En los factores agravantes relacionados a pronósticos se mantienen los parámetros de lluvia y vientos fuertes.

- La adaptación del módulo M2 agrega tres parámetros críticos, lo que totaliza 33 parámetros críticos para los depósitos de relaves brasileños. La clasificación de los parámetros críticos de geometría se mantienen, pero en la clasificación de deformación se modifica la definición de cómo se realiza la medición de la deformación del muro. En la clasificación de la integridad externa del muro, hay cambios en la descripción de los parámetros de grietas, humedad o fugas y subsidencia, y se agrega un nuevo parámetro crítico que es la integridad del vertedero. Este último parámetro en el IEF de Chile existe solamente en el módulo M1. En aspectos operacionales, se agrega un nuevo parámetro crítico que es la Topobatimetría. En documentación de diseño se modifica la definición de los parámetros críticos de aceleración sísmica y caracterización geotécnica adecuada del suelo de fundación y se agrega el parámetro crítico caracterización física de relaves. En integridad del sistema de drenaje hay un cambio de la descripción del parámetro crítico integridad del sistema de drenaje.
- Para los escenarios de falla del módulo M2, las modificaciones son las siguientes: de seis escenarios de falla de inestabilidad de talud para el IEF de Chile se reduce a tres. Se crea un nuevo tipo de mecanismo de falla que es por licuación estática donde se tiene dos escenarios de falla. Se tiene un total de tres escenarios de falla por rebalse en el IEF de Chile, en Brasil este número disminuye a dos, y el mecanismo de falla por erosión interna permanece en el mismo número que en Chile, con un total de tres tipos de escenarios de falla.

La legislación brasileña establece algunos parámetros que deben ser fiscalizados para que se compruebe el bajo riesgo de una presa. Estos parámetros incluyen apenas la integridad externa de la presa, que sería: la confiabilidad del vertedero, la filtración, deformación o asentamiento, deterioro de taludes y drenaje superficial, siendo realizado solo por inspección visual.

Se propone en este trabajo la adaptación del Índice de Estabilidad Física (IEF) de Chile al caso Brasileño, ya que ofrece además de la inspección de los parámetros de integridad externa, los parámetros relacionados a eventos que pueden gatillar una falla, desviaciones de diseño, relacionados a la documentación de la presa, parámetros críticos que tienen informaciones cuantitativas como la medición de asentamientos y presión de poro, además de los escenarios de falla generados por la suma de eventos gatillantes y parámetros críticos.

El presente estudio contribuye a determinar las brechas existentes actualmente en la legislación brasileña de seguridad de presas, utilizando como estándar de gestión de operación y riesgo el IEF. Este trabajo también busca adaptar el IEF para las características de depósitos de relaves brasileños. El IEF es una herramienta robusta que contempla parámetros cualitativos, cuantitativos y mecanismos de falla, además de ser una herramienta de gestión de riesgo, que tiene la funcionalidad de comunicar a la autoridad y a la comunidad en tiempo real el estado de vulnerabilidad de la presa.

Con la escasa bibliografía disponible sobre el monitoreo realizado actualmente en Brasil, la adaptación del IEF tuvo limitaciones para determinar algunos parámetros. Para que la adaptación sea realizada de forma eficiente, es importante la colaboración de las empresas de minería y de personas especializadas con experiencia en seguridad de presas en Brasil.

En Brasil, hay un alto índice pluviométrico y el principal factor a monitorear es la presencia del agua, pero, hay otros aspectos que deben ser analizados y detallados, como, por ejemplo, cuáles son los mecanismos de falla desarrollados en el país y cuáles los parámetros combinados que desarrollan este mecanismo de falla. En este estudio, se hizo una estimación de cuáles serían estos mecanismos.

El trabajo en cuestión fue principalmente un análisis de la legislación brasileña de seguridad de presas, ya que muchos de los accidentes son generados por la falta de monitoreo adecuado. Las autoridades de la Agencia Nacional de Minería (ANM) son responsables por la creación de medidas protectoras que deben ser seguidas para que se proteja a la sociedad y el medio ambiente. Si estas medidas no son suficientemente severas, siempre que haya un nuevo desastre, la legislación deberá ser reformulada, reactivamente a los accidentes, y no de forma proactiva. Este trabajo tiene el objetivo de informar los impactos de la falta de medidas severas generadas antes que otro accidente sea necesario para que se cambie la legislación nuevamente.



## Bibliografia

- 12.334, L. n. (2010). Fuente: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm)
- Aguas, A. N. (2016). Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. *Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragens*. Brasília, Brasil.
- Almeida, L. G. (2018). Classificação do índice de perigo (iP) em barragens de rejeito nas bacias hidrográficas da região do quadrilátero ferrífero - Minas Gerais. Ouro Preto, Minas Gerais .
- ANA. (2016). Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem (VOLUME II). Brasília.
- ANA. (2019). *Relatório de Segurança de Barragens*. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
- ANM. (2021). *Agencia Nacional de Mineração*. Fonte: Matriz para classificação de barragens para disposição de residuos e rejeitos. Fuente: [https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7232](https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7232)
- ANM. (22 de 02 de 2022). Veja o que muda com a Resolução ANM n° 95/2022. Fuente: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/veja-o-que-muda-com-a-resolucao-anm-ndeg-95-2022>
- Araújo, A., & Mansur, R. (Enero de 2022). *Globo G1*. Dique de barragem transborda em Nova Lima, e água invade BR-040. Fuente: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/08/dique-de-barragem-transborda-em-nova-lima-diz-defesa-civil.ghtml>
- Carvajal, M., Pastén, C., Campos, F., Christian, I., Comte, D., Campaña, J., . . . Oblasser, Á. (2018). *Avances en la definición de un índice de estabilidad física para depósitos de relaves*.
- Carvalho, D. d. (2011). *Principais Elementos*.
- CBDB. (2012). *Barragens de Rejeitos no Brasil* (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS y PIMENTA DE AVILA CONSULTORIA LTDA ed., Vol. 1). Rio de Janeiro, Brasil. doi:ISBN 978-85-62967-05-4
- Danese, L. C. (Junho de 2020). Síntese geral do diagnóstico e reavaliação geotécnica das barragens de rejeitos de MG inseridas na PNSB. Ouro Preto.
- Dornas, A. L. (2008). Análise do comportamento geotécnico da barragem Forquilha III para a geometria atual e para alteamentos futuros pelo método de montante. Ouro Preto, Minas Gerais.

- Global Tailings . (2020). *Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera*.  
Fuente: [https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard\\_ES.pdf](https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf)
- IBAMA. (2016). Rompimento da barragem de Fundao. Fuente:  
<http://www.ibama.gov.br/recuperacao-ambiental/rompimento-da-barragem-de-fundao-desastre-da-samarco/documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>
- IBAMA. (2019). Rompimento da barragem em Brumadinho. Fuente:  
<http://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares>
- IBRAM. (2019). *Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos*. Brasília.
- Ley n° 14066/2020. (2020). Fuente: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>
- Lima, S. R. (2016). Caracterização e análise dos acidentes com barragens de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais. Belém.
- Macedo, S. V., de Fátima Ramos Silveira, S., Lopes Valadares, J., & Mendes França, V. (2020). Avaliação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) de Mineração: uma Proposta com base na Teoria do Programa. *VII Encontro Brasileiro de Administração Pública*.
- NBR 10004: 2004. (2004). *Resíduos sólidos – Classificação*. Fuente:  
<https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>
- Neves, L. P. (2018). *Segurança de Barragens*. Brasília.
- Neves, L. P. (2020). *Segurança de Barragens . legislação federal brasileira comentada*.
- Ordenanza n° 70.389/2017. (2017). *Agencia Nacional de Mineração*. Fuente:  
[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835)
- Paniago, L. (2020). *Segurança de Barragens. Legistalação Federal Brasileira Comentada*.
- Programa Tranque. (2019). Physical stability monitoring and assessment standard for tailings storage facilities – A proposal from Chile. .
- Programa Tranque. (Agosto de 2019). Transición de un esquema voluntario. Programa Tranque al Observatorio Nacional de Relaves.
- Robertson, P. K., Melo, L. d., Williams, D. J., & Wilson, G. W. (2019). *Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Fail of Feijão Dam I*.
- SIGPM. (2021). *Sistema Integrado de Gestão de Presas de Mineração*. Fuente:  
<https://app.anm.gov.br/Sigbm/publico>
- Silva, M. F. (2019). *Sistema de monitoramento online de barragens de mineração*. Ouro Preto.

- Soares, L. (1998). *Barragens de Rejeito - Metodologia de implantação, operação e manutenção*. São Paulo: Epusp.
- souza, D. O. (2018). Interpretação e aplicação dos níveis de controle do monitoramento geotécnico na avaliação de segurança de barragens de mineração. Tucuruí, Pará.
- Transparent Tailings Initiative Team;. (2019). *Physical Stability Monitoring and Assessment Standard for Tailings Storage Facilities*. Santiago: Transparent Tailings Initiative Team.
- Vale. (Agosto de 2022). *Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos (GISTM): até 2025, todas as barragens de rejeitos da Vale estarão aderentes*. Fuente: <https://g1.globo.com/especial-publicitario/brumadinho-reparacao-e-desenvolvimento/noticia/2022/09/16/padrao-global-da-industria-para-a-gestao-de-rejeitos-gistm-ate-2025-todas-as-barragens-de-rejeitos-da-vale-estarao-aderentes.ghtml>

## Anexo

Las tablas a continuación muestran los parámetros críticos referentes al módulo M2.

**Tabla 1:** Parámetro crítico relacionado a Deformaciones (Módulo M2)

<b>PARÁMETROS CRÍTICOS: DEFORMACIONES - MÓDULO 2</b>						
<b>Parámetro crítico</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	<b>Grupo D</b>
Deformaciones	PC-06	Deformación del suelo de fundación		B1, B2, B3, B4	B1, B2	
	PC-07	Deformación del muro		B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10	B1, B2, B3, B4, B5	
	PC-08	Deformación del coronamiento		B1, B2, B3, B4, B5, B6	B1, B2, B3	

**Tabla 2:** Parámetro crítico relacionado a proceso de deposición e integridad interna del muro (Módulo M2)

<b>PARÁMETROS CRÍTICOS: PROCESO DE DEPOSICIÓN E INTEGRIDAD INTERNA DEL MURO - MÓDULO 2</b>						
<b>Parámetro crítico</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	<b>Grupo D</b>
Proceso de deposición e integridad interna del muro	PC-13	Revanca hidráulica	A1	B1, B2, B3		
	PC-14	Revanca operacional	A1, A2	B1, B2, B3	C1	
	PC-15	Tonelaje de relaves depositados	A1, A2	B1		
	PC-16	Estado del vertedero de emergencia	A1, A2	B1		
	PC-17	Nivel freático en la cubeta	A1	B1		
	PC-18	Presión de poros (muro y suelo de fundación)		B1, B2, B3, B4, B5, B6	C1, C2	D1
	PC-19	Intensidad de lluvias		B1		
	PC-20	Potencial de rebalse	A1, A2, A3	B1, B2, B3, B4		
	PC-21	Distribución granulométrica del material del muro	B1	B1, B2		
	PC-22	Densidad del material de muro		B1, B2		

**Tabla 3:** Parámetro crítico relacionado a Documentación del diseño (Módulo M2)

<b>PARÁMETROS CRÍTICOS: DOCUMENTACIÓN DEL DISEÑO - MÓDULO 2</b>						
<b>Parámetro crítico</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	<b>Grupo D</b>
Documentación del diseño	PC-23	Aceleración Sísmica	A1			D1, D2, D3
	PC-24	Estudio del umbral de revancha mínima	A1	B1		
	PC-25	Rigidez y resistencia al corte del muro		B1, B2	C1, C2	D1
	PC-26	Caracterización geotécnica adecuada del suelo de fundación	B1, B2	B1		
	PC-27	Resistencia al corte de los relaves en cubeta (Aplicable a relaves espesados)		B1		

**Tabla 4:** Parámetro crítico relacionado a la Integridad del sistema de drenaje (Módulo M2)

<b>PARÁMETROS CRÍTICOS: INTEGRIDAD DEL SISTEMA DE DRENAJE - MÓDULO 2</b>						
<b>Parámetro crítico</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Grupo A</b>	<b>Grupo B</b>	<b>Grupo C</b>	<b>Grupo D</b>
Integridad del sistema de drenaje	PC-28	Cumplimiento de las características de diseño del sistema de drenaje	A1, A2	B1		
	PC-29	Integridad del sistema de drenaje		B1, B2, B3	C1	
	PC-30	Turbidez del sistema de drenaje		B1, B2, B3	C1	