

Escenarios gatillantes de alertas públicas por inestabilidad de depósitos de relaves

C. Pastén¹, C. Ihle², D. Comte³, F. Campos⁴, S.Rojas⁵, J. Campaña⁶, J. Troncoso⁷, A. Oblasser⁸ and A. Delzo⁹

1. - 5. Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), Universidad de Chile, Chile
6. ARCADIS Chile, Chile
7. BGC Ingeniería, Chile
8. y 9. Gerencia de Sustentabilidad, Fundación Chile, Chile

RESUMEN

En el marco de la iniciativa Programa Tranque, se ha establecido que para asegurar la estabilidad física de un depósito de relaves se deben monitorear una serie de parámetros críticos de diversa índole, entre ellos de diseño, geométricos, deformaciones, integridad externa, operacionales y respecto a la funcionalidad del sistema de drenaje, los que, en combinación, pueden afectar la estabilidad del depósito. La evaluación de estos parámetros es llevada a cabo a través de un índice de estabilidad física (en adelante IEF), el que tiene los siguientes objetivos: i) la identificación y monitoreo de los parámetros críticos que condicionan la estabilidad física del depósito, ii) la centralización de la información operacional generada que permite mantener un registro histórico de eventos anómalos ocurridos en la operación del depósito y, iii) evaluar el desempeño del depósito de acuerdo con las variables monitoreadas para responder en forma eficaz ante situaciones que puedan comprometer su estabilidad física. Es en relación a este tercer punto que se ha trabajado en la identificación de una serie de escenarios asociados a la activación de alertas que son comunicadas a todos los actores involucrados, esto es autoridades, compañías mineras y comunidades cercanas al depósito de relave dependiendo del grado de criticidad de la misma.

1 Introducción

El IEF de un depósito de relaves está compuesto por la combinación y análisis de distintos sectores de un depósito de relaves, muro, coronamiento, suelo de fundación y cubeta, asociados a los mecanismos de falla establecidos, estos son i) inestabilidad de talud, ii) erosión interna y iii) rebalse. En la Figura 1 se presenta conceptualmente la estructura del IEF. Dependiendo de los valores de los IEF por mecanismo de falla, los niveles de estabilidad física del depósito se clasifican en alto, medio y bajo, en orden decreciente. Cada uno de estos niveles de

estabilidad tiene protocolos de respuesta y acciones asociadas

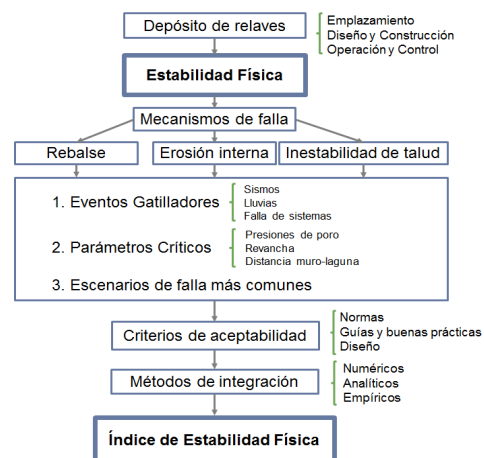


Figura 1: “Modelo Conceptual IEF”

Cada uno de los IEF evaluados por sector del depósito, asociados a los mecanismos de falla en forma individual, tiene una estructura definida la cual se compone de tres módulos de evaluación, ver figura 2.

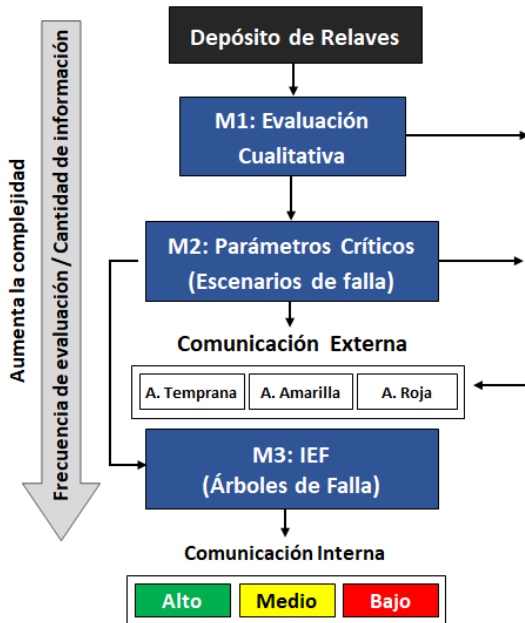


Figura 2: Secuencia verificación IEF

En forma general, el módulo 1 es una herramienta de verificación periódica del estado del depósito y verificador de eventos gatilladores. El módulo 2 es una herramienta de monitoreo de los parámetros críticos con distintos sistemas de instrumentación (sistemas en línea y operador), finalmente el módulo 3 es una herramienta integradora y predictiva que relaciona la información de los módulos 1 y 2 mediante árboles de falla y modelos (sistemas en línea).

En detalle, el módulo 1 (M1) está basado principalmente en inspecciones rutinarias al depósito, las cuales constan de dos partes:

-1. Evaluación de vulnerabilidad (Frecuencia mensual) que considera la evaluación de nueve factores inherentes al depósito al lugar de emplazamiento, tipo de construcción, sistema de gobernanza,

etc. A esta evaluación se asigna puntaje proporcional a la vulnerabilidad.

-2. Evaluación de factores agravantes y pronósticos climáticos (Frecuencia diaria) mediante la realización de un Checklist (inspección de eventos) que corresponde a una evaluación a través de una lista de eventos que pueden ser activados al ser detectados de forma visual por el operador a cargo de la inspección del muro o informado por otros operadores del depósito. Este checklist permite que en la plataforma se genere un proceso de gestión de dicho evento.

Por otro lado, el módulo 2 consta de un monitoreo y evaluación de 30 parámetros críticos y 12 escenarios de falla.

Los 30 parámetros críticos definidos en el IEF se mencionan a continuación:

Tabla 1: Parámetros Críticos

Clasificación	Parámetros Críticos
Aspectos Geométricos	Altura de muro
	Ancho de coronamiento
	Pendiente del muro
	Pendiente de la playa
Deformaciones	Distancia mínima de la laguna
	Deformaciones del suelo de fundación
	Deformaciones del muro
Integridad Externa	Deformaciones del coronamiento
	Grietas
	Humedad o filtraciones
Aspectos Operacionales	Subsistencia o socavación
	Integridad del estribo
	Revancha hidráulica
	Revancha operacional
	Tonelaje relave depositado
	Estado vertedero de emergencia
	Nivel freático en la cubeta
Presión de poros	
Aspectos de Diseño	Intensidad de lluvia
	Potencial de rebalse
	Densidad del Muro
	Granulometría del material del muro (%)
	Aceleraciones sísmicas del muro (g)
	Resistencia [F/L2] del material de relaves de la cubeta del muro (Aplicable a relaves espesado, filtrado y en pasta)
Funcionalidad del Sistema de Drenaje	Módulo de deformación y resistencia al corte del muro del depósito
	Módulo de deformación y resistencia al corte del suelo de fundación
	Estudio de revanchas mínimas
Funcionalidad del Sistema de Drenaje	Integridad del sistema de drenaje (L/s)
	Turbiedad del agua en el sistema de drenaje (NTU)
	Cumplimiento de las características de diseño del dren

Cabe mencionar que los parámetros críticos que aplican a un depósito se definen en la etapa inicial de integración

de un nuevo depósito a la evaluación del IEF. De estos parámetros el IEF indica el cumplimiento de una frecuencia y precisión de la variable medida.

Los escenarios de falla corresponden a una combinación de situaciones anormales detectadas en el depósito que dadas sus condiciones pueden generar alertas amarillas o rojas.

Actualmente el IEF cuenta con 6 escenarios para inestabilidad de talud, 3 para rebalse y 3 para erosión interna.

El IEF tiene la capacidad de generar una serie de eventos asociados a situaciones específicas ocurridas en el depósito de relaves. Estas situaciones, a su vez, están relacionadas con el monitoreo de parámetros críticos definidos por el IEF, los cuales son capturados, ya sea, por medio de instrumentación en línea o a través de inspecciones rutinarias, y retrasos en el ingreso de información.

Cada evento detectado se relaciona a un determinado grupo, A, B, C o D, dependiendo, necesariamente, de la importancia de éste y la forma en que pueda afectar a la estabilidad física del depósito de relaves.

Los grupos en los cuales pueden ser vinculados los eventos generados por el IEF permiten diferenciar el grado de visibilidad de éstos para los tres actores involucrados, vale decir autoridades, compañía minera y comunidades, ver Figura 3.



Figura 3: Visualización y comunicación de eventos IEF

La gestión de estos eventos, a su vez, se asocia con el grupo al que pertenece el evento, ya que se requiere cumplir una serie de condiciones para cerrarlos o, si es necesario, escalarlo ante el comportamiento del problema detectado.

Se ha definido que los eventos de grupo A corresponden a aquellos que están a cargo de la gestión interna de la compañía minera, los del grupo B a aquellos de gestión interna de la compañía minera pero con visualización del evento por parte de la autoridad y los del grupo C y D con visualización por parte de la compañía minera, la autoridad y la comunidad, diferenciándose entre ellos por el tipo de alerta que será informada a la comunidad, ya sea alerta amarilla o alerta roja.

La definición de alertas establecidas en el IEF está basada en el principio establecido por la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior) ONEMI (, que establece lo siguiente, ver Tabla 2:

Tabla 2: “Tipos de Alerta”

ALERTA VERDE	●	Condición normal en el depósito
ALERTA AMARILLA	●	Situación de peligro en el deposito que debe ser informada externamente
ALERTA ROJA	●	Situación crítica del que compromete la estabilidad física del depósito y se sugiere una evacuación.

2 Eventos

Para un mejor entendimiento del funcionamiento del IEF, se ha establecido que un evento se define como el cumplimiento de una condición específica dentro de la plataforma. Los posibles eventos que pueden ocurrir dentro de la plataforma se separan en siete grandes grupos:

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

2.1 Gestión de Eventos

Dado que los eventos permiten gestionar cualquier desviación en los parámetros normales del IEF, es necesario definir el proceso de gestión de éstos. Para los eventos se tienen tres estados:

- Por gestionar: estado inicial de un evento ocurrido dentro del cálculo del IEF durante la actualización de datos, ya sea en el módulo 1 o 2 del IEF. Su función es alertar

al operador sobre la ocurrencia de un evento y que es necesario que lo verifique y genere un plan de acción.

- En gestión: estado del evento una vez el operador ingresa a la plataforma y accede al evento que se activó previamente, confirmando la lectura de las recomendaciones de acción e indicando las medidas que se están tomando para gestionar el evento (plan de acción).
- Cerrado: estado del evento una vez que el operador indica que el evento fue solucionado o controlado dentro de la operación. Quien tiene la autoridad para cerrar un evento no es siempre la misma persona y depende del grupo al que pertenece el evento que se activó.

2.2 Escalamiento de eventos

El escalamiento es un atributo que tienen los eventos y está asociado a un cambio de grupo debido a un cambio en las condiciones del parámetro evaluado. Este escalamiento permite detectar cuando una condición en el parámetro se agrava modificando los niveles de comunicación ante dicha situación.

A continuación, se presenta un esquema con los posibles tipos de escalamientos considerados por el IEF, los que pueden generarse en forma automática y en forma manual.

2.3 Cierre de eventos

El cierre de eventos generados por el IEF está condicionado al tipo de alerta que genera. En el caso que la alerta sea verde, es la compañía minera quien tiene la posibilidad de cerrar estos eventos, y en caso de que sean alertas amarillas o rojas, será la autoridad quien realice el respectivo levantamiento del evento.

3 Escenarios de falla

Los escenarios de falla, como se mencionaron anteriormente, se definen como el conjunto de eventos gatilladores y parámetros críticos que al superar sus umbrales o presentar una tendencia desfavorable, pueden generar una inminente falla en el depósito de relaves.

Estos escenarios están asociados a los 3 principales modos de falla (rebalse, inestabilidad de talud y erosión interna), y se definen a partir de las principales fallas históricas registradas y la experiencia de asesores expertos en depósitos de relaves.

Las principales consideraciones en la definición de escenarios de falla son:

- Los escenarios están asociados a cada uno de los modos de falla.
- Se consideran escenarios de falla particulares que incluyen las fallas conocidas más relevantes, desencadenadas por una combinación de parámetros críticos y eventos gatilladores (según corresponda).
- Considera las tendencias de los parámetros críticos (definidas, por ejemplo, de acuerdo a la cercanía del parámetro a su valor umbral, tasa de crecimiento, riesgo de superar el umbral).
- Los parámetros críticos considerados en cada escenario deben superar los umbrales en la misma sección transversal, a menos que sea un parámetro puntual o global.

4 Escenarios gatillantes de alertas públicas

El IEF, como se explicó anteriormente, puede generar alertas no sólo a la compañía minera o a la autoridad, sino que también tiene información hacia las comunidades cercanas al depósito de

relaves. Estas alertas públicas, pertenecientes a los grupos C y D, a su vez, pueden ser activadas por superación de umbrales o la detección de condiciones desfavorables en los parámetros críticos o por la conjugación de estos últimos con eventos gatilladores.

4.1 Activación de alertas públicas por parámetros críticos

La activación de alertas públicas por un parámetro crítico definido por el IEF, está asociada a la activación de eventos por superación de umbrales o la detección de condiciones desfavorables.

A continuación, se presenta el detalle de alertas públicas generadas por parámetros críticos, ver Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros críticos y alertas públicas

Parámetro Crítico		
Ancho de Coronamiento	1	0
Pendiente del Muro	2	0
Pendiente de Playa	1	0
Distancia mínima lagua aguas claras	1	0
Deformación suelo de fundación	2	0
Desplazamiento y deformación del muro	5	0
Deformación coronamiento	3	0
Presencia de grietas muro	3	0

continuación Tabla 3

Parámetro Crítico	2	0
Evidencia de humedad y/o Filtraciones	2	0
Fenómeno de subsidencia o socavación	2	0
Integridad de estribo	1	1
Revanca hidráulica	1	1
Revanca operacional	2	0
Tonelaje de relaves o lamas depositadas	1	0
Presión de poros	2	2
Modulo deformación y resistencia al corte relleno muro	2	1
Integridad del sistema de drenaje	1	0
Turbiedad del Agua Sistema Drenaje	1	0

A modo de ejemplo se presentan 2 casos asociados a la activación de alertas publicas asociadas a la superación de umbrales o detección de condiciones desfavorables de los parámetros críticos aquí mencionados.

Caso 1 Distancia de la laguna aguas claras respecto al muro.

La distancia entre el muro del depósito de relaves y la laguna de aguas claras debe predefinir la existencia de 2 umbrales de alerta con la finalidad de poder tomar las medidas correctivas a tiempo por parte del equipo de operaciones del depósito de relave, ver Figura 4.

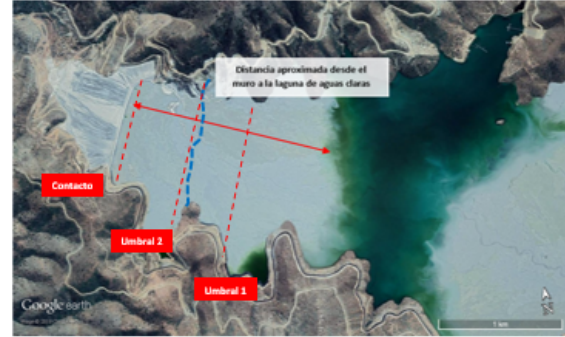


Figura 4: Distancia muro depósito y laguna de aguas claras.

La activación de eventos en este parámetro crítico se establece cuando en primera instancia la distancia laguna-muro alcanza su primera superación de umbral generando un evento del GRUPO A, es decir, de comunicación y gestión interna de la compañía minera, ver Figura 5



Figura 5: Activación por superación de primer umbral.

Si se detecta que la distancia supera el segundo valor umbral predefinido, se activa un evento en el GRUPO B en donde además de la compañía minera, existe comunicación del evento a la autoridad, quienes podrán solicitar a la compañía minera información asociada a las medidas correctivas o el plan de acción a seguir para poder levantar esta condición, ver Figura 6.



Figura 6: Activación por superación de segundo umbral.

Si se detecta que existe contacto de la laguna con el muro del depósito de relaves, la información asociada a este evento es comunicada, además de la compañía minera y a la autoridad, a la comunidad cercana al depósito, ya que esta condición supone una situación de inestabilidad peligro en el depósito, ver Figura 7



Figura 7: Comunicación asociadas a superaciones de umbrales.

Caso 2 Detección de Grietas en muro o coronamiento

Este caso se genera a partir de la detección de grietas en el muro, el que se activa mediante la inspección rutinaria explícita del módulo 1 del IEF. La activación de este evento lo ubica en el GRUPO B de gestión de alarmas, vale decir, que toman

conocimiento del hecho tanto la compañía minera como la autoridad. El IEF además bajo esta condición, indica la generación de un plan de acción por parte de la compañía minera y la elaboración de un reporte técnico, ver Figura 8

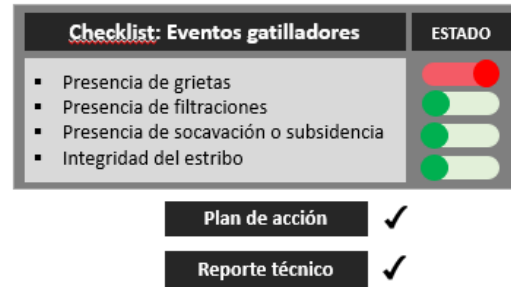


Figura 8: Activación de evento en Grupo B.

Si una vez realizado un análisis se logra determinar que las grietas ponen en riesgo la integridad del muro este evento debe escalar al GRUPO C en donde se debe comunicar a la comunidad que se supone una situación de peligro en el depósito. De igual forma, el escalamiento de este evento puede ser producto de la aparición de grietas posterior a un evento sísmico siempre y cuando se logre determinar que estas ponen en riesgo la integridad del muro, ver Figura 9



Figura 9: Escalamiento del evento de Grupo B a Grupo C

4.2 Activación de alertas públicas por escenarios de falla.

Los escenarios de falla sólo activan alertas públicas que corresponden a los GRUPOS C y D. A continuación, se detalla el tipo y número de alertas que pueden ser generados por cada uno de los escenarios de falla definidos por el IEF, ver Tabla 4

Tabla 4: Escenarios de falla.

Escenario de Falla		
IT-01 Inestabilidad por sismo y efectos adversos	0	1
IT-02: "Inestabilidad por aumento de presión de poros con evidencia de deformación"	0	1
IT-03: "Inestabilidad por licuación estática"	1	1
IT-04: "Inestabilidad por sollicitación cíclica"	0	1
IT-05: "Inestabilidad por falta de integridad en estribos"	0	1
IT-06: "Inestabilidad por deslizamiento del muro"	1	2
Re-01: "Rebalse por pérdida de revancha hidráulica durante lluvia intensa"	1	1
Re-02: "Rebalse por ola debido a deslizamiento"	0	2
Re-03: "Rebalse de relaves producto de licuefacción de la cubeta"	1	1
El-01: "Erosión interna producto de filtración descontroladas"	0	1
El-02: "Erosión interna producto de subsidencias en la cubeta del muro"	1	1
El-03: "Erosión interna producto de aparición de subsidencias en el muro"	0	2

A continuación, se indican 3 ejemplos o de casos asociados a la activación de escenarios de falla

Caso 1 "IT-02: "Inestabilidad por aumento de presión poros con evidencia de deformación"

Para la activación de este escenario de falla es necesario que inicialmente se active un evento asociado al parámetro crítico "presión de poro" que evidencie la superación del umbral de alerta de 3

piezómetros en un sector del muro. 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 (evidencia de una tendencia o superación de un umbral asociado a la deformación del muro).
- Deformación del coronamiento (evidencia de una tendencia o superación de umbral asociado a la deformación del muro).

La activación de este escenario genera la activación de una alerta roja que informa una situación crítica del depósito que compromete su estabilidad física y se sugiere una evacuación.

A continuación, se presenta esquemáticamente la activación de este escenario de falla, ver Figura 10.

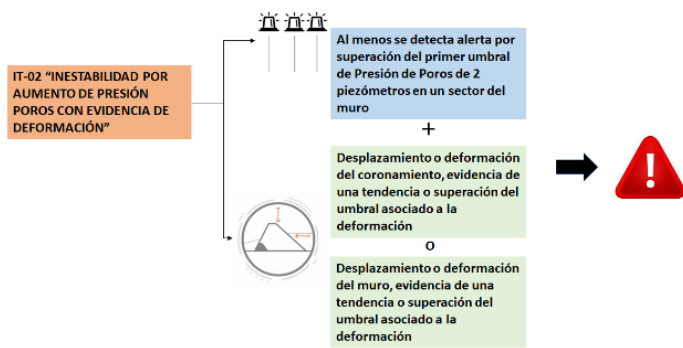


Figura 10: Descripción generación de alerta escenario de falla IT-02

Caso 2 RE-01: “Rebalse por pérdida de revancha hidráulica durante lluvia intensa”

La activación de este escenario de falla se inicia con la activación del evento gatillador asociado a lluvia (módulo 1). Si al momento de activar este evento se detecta que la revancha hidráulica comienza a decrecer respecto a la última medición registrada por el sistema y, además el parámetro crítico **potencial de rebalse** indica que, de acuerdo al pronóstico meteorológico, debido al ingreso de aguas lluvia al depósito de relaves puede ocurrir un rebalse, el sistema activa una alerta amarilla, comunicando a la compañía minera, la autoridad y a la comunidad cercana al depósito que éste se encuentra en una situación de inestabilidad

En el caso que este evento gatillador (lluvia) se haga efectivo bajo las condiciones indicadas por el pronóstico meteorológico, este escenario de falla debe escalar a una alerta roja el cual informa una situación crítica del depósito que compromete su estabilidad y se sugiere una evacuación, ver Figura 11.

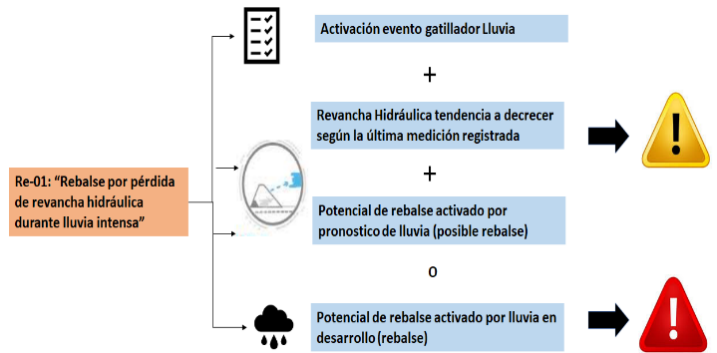


Figura 11: Descripción generación de alerta escenario de falla Re-01

Caso 3 EI-01: “Erosión interna producto de filtraciones descontroladas”

La activación de este escenario de falla debe cumplir con la activación de dos condiciones desfavorables. La primera condición es la detección de filtraciones en un sector del muro del depósito que pongan en riesgo su integridad (ya sea de forma espontánea o posterior a un evento sísmico) y la segunda condición, es que se cumpla uno de los siguientes escenarios.

- La laguna de aguas claras este cerca o en contacto con el muro.
- Se detecta que 3 piezómetros ubicados en un sector del muro superen el primer umbral de alerta.
- Se detecta que existe evidencia de salida de material particulado saliendo del sistema de drenaje.
- Se detectan grietas en el muro del depósito que ponen riesgo su estabilidad.

Cabe recordar que esta información debe ser validada por in EoR o personal capacitado de la compañía minera.

La conjugación de estos escenarios activa una alerta roja identificando que está comprometida la estabilidad del depósito y

se sugiere una evacuación de la comunidad aledaña, ver Figura 12.

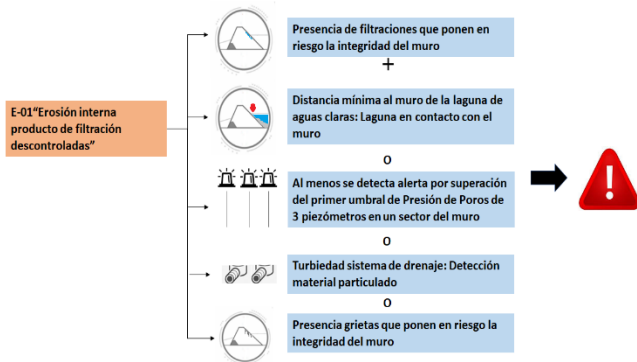


Figura 12: Descripción generación de alerta escenario de falla E-01

5 CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado por Programa Tranque en el transcurso de tres años de ejecución ha permitido contar con una herramienta innovadora respecto de la evaluación de la estabilidad física de un depósito de relaves. Este desarrollo, producto de una alianza público-privada, entrega hoy definiciones claras acerca de situaciones que deben ser comunicadas a los diferentes actores, generando así alertas de diferente tipo cuya gestión depende de su magnitud. El objetivo es que durante 2020 se realice la puesta en marcha del sistema de alertas a través de la implementación del próximo Observatorio Nacional de Relaves de Chile.

6 REFERENCIAS

Blight, G. (2000) Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities.

Columbia Water Center (2017) Assessing Risks of Mine Tailing Dam Failures.

European Commission (2009) Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities.

Fell, R. et al (2003) Time for development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(4), 307-314.

Foster et al. (2000) A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. Canadian Geotechnical Journal, 39(2).

Fundación Chile & CORFO (2015) Hoja de Ruta de la Minería 2035.

Golder Associates (2016) Review of Tailings Management Guidelines and Recommendation for Improvement. International Council on Mining and Metals.

Ministerio de Minería de Chile (2007) Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la aprobación

de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.

Ministerio de Obras Públicas (2005) Decreto 50.

Morgenstern et al (2016) Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundao Dam. Fundao Tailings Dam Review Panel.

Villavicencio, G et al. (2013) Failure of sand tailings dams in a highly seismic country. Canadian Geotechnical Journal, 51, 449-464.

Campos, Felipe. (2019) Criterios de Activación, gestión y cierre de eventos y alertas IEF, AMTC. Informe Corfo