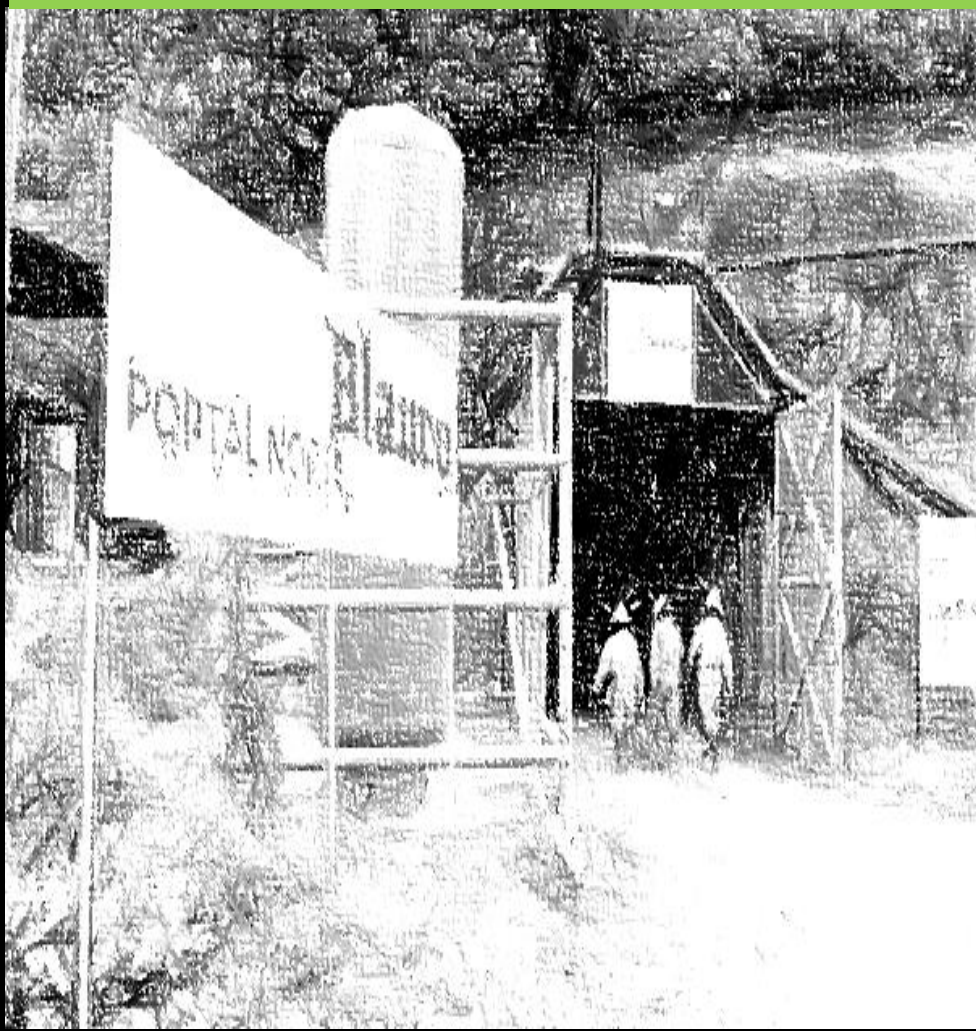


Vol. 4.2022

# Evaluación de la Instalación de Almacenamiento de Relaves Filtrados en la Mina de Oro y Plata Propuesta Cerro Blanco, Sur de Guatemala

*Steven H. Emerman, Ph.D.,  
Malach Consulting*







Published under the following Creative Commons License:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0>.

Attribution – You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor (but not in any way that suggests that, they endorse you or your use of the work). Noncommercial – You may not use this work for commercial purposes. No derivatives – If you remix, transform, or build upon the material, you may not distribute the modified material.

Evaluación de la Instalación de Almacenamiento de Relaves Filtrados en la Mina de Oro y Plata Propuesta Cerro Blanco, Sur de Guatemala

Publicado por la Fundación Heinrich Böll Oficina San Salvador – El Salvador, Costa Rica, Guatemala, Honduras, Nicaragua

Serie Ecología Oficina San Salvador - Vol.4.2022

Autor: Steven H. Emerman, Ph.D., Malach Consulting, LLC, 785 N 200 W, Spanish Fork, Utah 84660, EE. UU., Tel: 1-801-921-1228, E-mail: [SEmerman@gmail.com](mailto:SEmerman@gmail.com)

Coordinación editorial: Ingrid Hausinger

Imagen portada: Foto Diario Co Latino/Archivo/ futuro-de-mina-cerro-blanco-a-consulta-municipal-de-vecinos/

Esta publicación se puede descargar en: <https://madreselva.org.gt/>

**HEINRICH BÖLL STIFTUNG**

**SAN SALVADOR**

El Salvador | Costa Rica | Guatemala |  
Honduras | Nicaragua

# ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN RÁPIDO</b>	<b>5</b>
<b>I. RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>6</b>
<b>II. PERSPECTIVA GENERAL</b>	<b>10</b>
<b>III. REVISIÓN DE RELAVES Y PRESAS DE RELAVES</b>	<b>14</b>
<b>A. LICUEFACCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>B. TECNOLOGÍA DE RELAVES FILTRADOS</b>	<b>17</b>
<b>C. INUNDACIONES DE DISEÑO Y TERREMOTOS DE DISEÑO</b>	<b>28</b>
<b>D. FACTOR DE SEGURIDAD</b>	<b>34</b>
<b>IV. INSTALACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES FILTRADOS EN MINA CERRO BLANCO</b>	<b>38</b>
<b>V. METODOLOGÍA</b>	<b>42</b>
<b>VI. RESULTADOS</b>	<b>46</b>
<b>A. ADECUACIÓN DEL ANÁLISIS DE LAS CONSECUENCIAS DE LA FALLA DE PRESA</b>	<b>46</b>
<b>B. ADECUACIÓN DE LA INUNDACIÓN DE DISEÑO</b>	<b>49</b>
<b>C. ADECUACIÓN DEL TERREMOTO DE DISEÑO</b>	<b>51</b>
<b>D. ADECUACIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE LA INSTALACIÓN DE RELAVES Y LAS COMUNIDADES</b>	<b>53</b>
<b>E. ADECUACIÓN DEL MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN</b>	<b>55</b>

<b>F.</b>	<b>ADECUACIÓN DEL PLAN DE PREVENCIÓN DE LICUEFACCIÓN</b>	<b>57</b>
<b>G.</b>	<b>ADECUACIÓN DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ESTÁTICA Y PSEUDOESTÁTICA</b>	<b>58</b>
<b>H.</b>	<b>ADECUACIÓN DE LA BASE EN LA TECNOLOGÍA ACTUAL</b>	<b>65</b>
<b><u>VII.</u></b>	<b><u>DISCUSIÓN</u></b>	<b><u>66</u></b>
<b><u>VIII.</u></b>	<b><u>CONCLUSIONES</u></b>	<b><u>70</u></b>
<b><u>IX.</u></b>	<b><u>RECOMENDACIONES</u></b>	<b><u>72</u></b>
<b><u>X.</u></b>	<b><u>REFERENCIAS</u></b>	<b><u>73</u></b>



# RESUMEN RÁPIDO

La instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina de oro y plata Cerro Blanco propuesta en el sur de Guatemala tendría 175 metros de altura, estaría a sólo 395 metros de pendiente arriba del pueblo de Trapiche Vargas, y estaría a sólo 103 metros de pendiente arriba de la quebrada El Marial, desde donde los relaves podrían fluir hacia El Salvador. Aunque la instalación de relaves ha sido diseñada para resistir la inundación de 100 años y un terremoto con un período de retorno entre 475 años y 1000 años, con base en la pérdida potencial de más de 100 vidas en caso de falla, la instalación debe ser diseñada para resistir el terremoto de 10.000 años o el Terremoto Máximo Creíble, así como la inundación de 10.000 años o la Inundación Máxima Probable. Aun así, las normas internacionales deberían prohibir la construcción de una instalación de relaves tan cerca de una comunidad.

Palabras claves: Cerro Blanco, minería de oro, relaves filtrados, Río Lempa.

# I. RESUMEN EJECUTIVO

La empresa canadiense Bluestone Resources ha propuesto la mina de oro y plata Cerro Blanco en el sur de Guatemala, a menos de siete kilómetros aguas arriba de El Salvador. La instalación de almacenamiento de residuos mineros tendría 175 metros de altura y almacenaría de forma permanente 54,7 millones de toneladas de relaves mineros filtrados y 145 millones de toneladas de roca estéril. Con base en las directrices de la Asociación Canadiense de Represas, el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) evaluó las consecuencias de la falla de la instalación de almacenamiento de residuos mineros como significativas, pero sin justificación. La clasificación Significativa implica sólo una población temporal en riesgo, “ninguna pérdida o deterioro significativo del hábitat de peces o vida silvestre”, “pérdida de hábitat marginal únicamente”, “restauración o compensación en especie muy posible” y “pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte de uso poco frecuente”. Sin embargo, el borde de la pila de relaves filtrados estaría a sólo 103 metros de pendiente arriba de la quebrada El Marial, desde donde los relaves podrían fluir hacia el río Tancushapa y luego hacia el río Ostua y hacia El Salvador con su depósito final en el Lago de Guija. Además, el borde de la pila de relaves filtrados estaría a sólo 395 metros de pendiente arriba del pueblo de Trapiche Vargas con cientos de viviendas. Incluso sin licuefacción, los relaves podrían deslizarse diez veces la altura de la pila (1750 metros), lo que provocaría el entierro del pueblo de Trapiche Vargas en poco más de un minuto. De manera similar, incluso sin licuefacción, los relaves podrían desarrollar un comportamiento de flujo después de mezclarse con el agua en la quebrada El Marial u otro cuerpo de agua. Sobre la base anterior, la categoría de consecuencia de falla correcta es Extrema, la cual implica la pérdida de más de 100 vidas en caso de falla.

Con base en la asignación a la categoría de consecuencia de falla Significativa, la instalación ha sido diseñada para resistir sólo el terremoto a medio camino entre el terremoto de 475 años y el terremoto de 1000 años (correspondiente a una probabilidad de excedencia anual en el rango de 0,1-0,21 %). Además, los canales de desvío de aguas pluviales y las piletas de almacenamiento han sido diseñados para adaptarse a un evento de 24 horas con un período de retorno de sólo 100 años (lo que corresponde a una probabilidad de excedencia anual del 1 %). No se ha considerado el período de retorno de la tormenta que podría causar el colapso de la pila de relaves filtrados.



Por el contrario, de acuerdo con las directrices de la Asociación Canadiense de Represas, una instalación de relaves en la categoría de consecuencia de falla extrema debe diseñarse para resistir el terremoto de 10.000 años (correspondiente a una probabilidad de excedencia anual de 0,01 %) o el Terremoto Máximo Creíble (MCE), así como la inundación máxima probable (IMP), mientras que otros documentos de orientación permitirían que la construcción resistiera la inundación de 10,000 años. Aun así, otras normas internacionales deberían prohibir la construcción de una instalación de relaves tan cerca de una comunidad.

La instalación de almacenamiento de relaves filtrados incluiría un núcleo de relaves que estaría demasiado húmedo para una compactación adecuada (llamada zona no estructural) y una periferia de relaves con el contenido de agua apropiado para una compactación adecuada (llamada zona estructural). La zona estructural actuaría como una presa para la zona no estructural, mientras que la zona estructural estaría confinada por una periferia de roca estéril. Ambas presas se construirían utilizando el método aguas arriba, en el que la zona estructural se colocaría encima de la zona no estructural, mientras que la roca estéril se colocaría encima de la zona estructural. El peligro del método aguas arriba es que, si los relaves subyacentes se licúan, la presa podría fallar al deslizarse sobre o caer dentro de los relaves licuados. Por la razón anterior, el método de construcción aguas arriba está prohibido en Brasil, Chile, Ecuador y Perú. En general, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados sería demasiado empinada, demasiado sueltamente empaquetada y demasiado húmeda en comparación con las normas de la industria minera. La inclinación del talud exterior de los relaves sería de 1V: 3H (1 metro vertical por 3 metros horizontales), la densidad seca de relaves sería de 1,5 toneladas por metro cúbico y el contenido de agua geotécnico sería del 15 al 20 %, en comparación con las normas de la industria minera de 1V: 3,5H, 1,9-2,6 toneladas por metro cúbico y 12-14 %, respectivamente. De la misma manera, los documentos disponibles no incluyen ninguna discusión sobre las circunstancias bajo las cuales los relaves podrían licuarse ni cualquier medio para prevenir la licuefacción.

El análisis de estabilidad en el EIA indica un factor de seguridad FS menor a 1,0 en respuesta al terremoto de diseño (periodo de retorno en el rango 475-1000 años), donde FS = 1,0 es la cúspide de falla. El EIA no establece el valor exacto del factor de seguridad calculado ni el período de retorno del terremoto para el cual la instalación de almacenamiento de relaves filtrados sería marginalmente estable. Por lo tanto, sólo se sabe que la instalación fallará en respuesta a algún terremoto que ocurrirá con más frecuencia que el terremoto de diseño. Aun así, los parámetros geotécnicos que se utilizaron como datos de entrada para el análisis de estabilidad se asumieron y no se basaron en ninguna medición real. Además, se asumió sin justificación que ninguna superficie de falla podría

atravesar la cimentación. La suposición más significativa fue que no habría nivel freático dentro de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados, por lo que todos los relaves estarían no saturados. Sin embargo, debido a la consolidación de los relaves por el peso de los relaves suprayacentes (lo que reduce el tamaño de los poros), es común que los niveles freáticos se eleven entre un tercio y la mitad de la altura de la pila de relaves filtrados. De hecho, es un procedimiento estándar en los análisis de estabilidad de las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados asumir un nivel freático de la mitad de la altura de la instalación, incluso en entornos muy áridos. Cabe señalar que, en cuanto a los criterios de seguridad de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados, existen numerosas contradicciones entre la información entregada a las agencias reguladoras guatemaltecas en el EIA de noviembre de 2021 y la información entregada a los inversionistas en el Técnico Informe NI 43-101 en abril de 2022.

El principal factor limitante en el tamaño de una instalación de almacenamiento de relaves filtrados es el impacto de la precipitación. Los límites tecnológicos actuales se determinaron mediante la construcción de envolventes de alturas y volúmenes de almacenamiento de las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados existentes en función de la precipitación media anual. Con una precipitación media anual de 1417 mm, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería 48 metros más alta que el límite tecnológico actual y almacenaría 21,6 millones de metros cúbicos más que el límite tecnológico actual. Para mayor contexto, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería la segunda más alta del mundo, el volumen de almacenamiento ocuparía el cuarto lugar en el mundo y la tasa de producción de relaves ocuparía el cuarto lugar en el mundo, con todas las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados más grandes existentes en climas mucho más secos.

Si bien la creatividad generalmente se considera un esfuerzo humano positivo, la creatividad no es un bien absoluto. Existe otro concepto de Creatividad Imprudente, la cual tiene una o más de las siguientes características:

1. No hay andamiaje, lo que significa que la nueva innovación no se basa en innovaciones anteriores a través de una serie de pasos intermedios con pruebas y verificación adecuadas de cada paso.
2. Una o más de las tecnologías requeridas para llevar a cabo la innovación no existe actualmente.
3. Las predicciones se basan en valores de entrada únicos o en los mejores escenarios sin considerar el rango de entradas posibles.

4. Aunque se reconocen los problemas potenciales, rápidamente se descartan como irrelevantes sin justificación.
5. No se toman las precauciones básicas que serían rutinarias para las innovaciones anteriores.
6. No hay consideración de las consecuencias de equivocarse, es decir, de las consecuencias de la falla.

El diseño de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco cumple con todas las características de Creatividad Imprudente. La recomendación de este informe es que la propuesta debe ser rechazada con la revocación de todos los permisos existentes.

## II. PERSPECTIVA GENERAL

La empresa minera canadiense Bluestone Resources ha propuesto la construcción de la mina de oro y plata a cielo abierto Cerro Blanco en el sur de Guatemala, a unos tres kilómetros al este de la ciudad de Asunción Mita (población 18.500) y a menos de siete kilómetros aguas arriba de la frontera con El Salvador (ver Figs. 1-2).



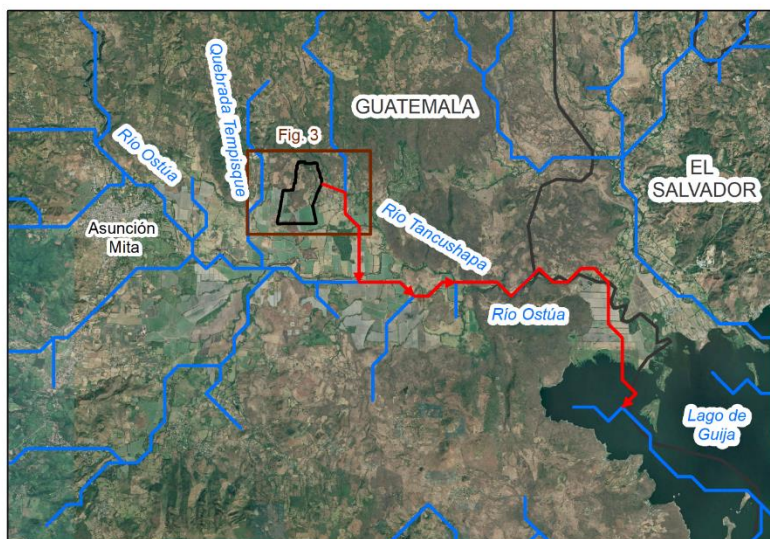
*Ilustración 1: La empresa minera canadiense Bluestone Resources ha propuesto la mina de oro y plata Cerro Blanco en el sur de Guatemala.*

*La instalación de almacenamiento de residuos mineros estaría a menos de siete kilómetros aguas arriba de El Salvador*

La ley promedio del cuerpo de mena objetivo es de 1,64 gramos de oro y 7,27 gramos de plata por cada tonelada de mena. La mina operaría durante 16 años, tiempo durante el cual generaría 145 millones de toneladas de roca estéril y 54,7 millones de toneladas de relaves mineros (Elevar Resources, 2021; G Mining Services, 2022), donde roca estéril se refiere a la roca que debe ser removido para llegar al cuerpo de mena y

los relaves se refiere a las partículas de roca mojadas y trituradas que quedan del cuerpo de mena después de que se haya eliminado la materia prima de valor.

Los relaves se deshidratarían hasta un contenido de agua geotécnico del 15-20 %, donde el contenido de agua geotécnico es la relación entre la masa de agua y la masa de relaves sólidos, y luego se almacenarían permanentemente sobre el suelo en una sola instalación de almacenamiento de residuos mineros junto con la roca estéril (ver Fig. 3).



### Leyenda

- Instalación de Almacenamiento de Residuos Mineros
- Camino de Flujo de Relaves
- Ríos
- Figura a Menor Escala
- Frontera Internacional

0 1 2 4 6 8 10 km

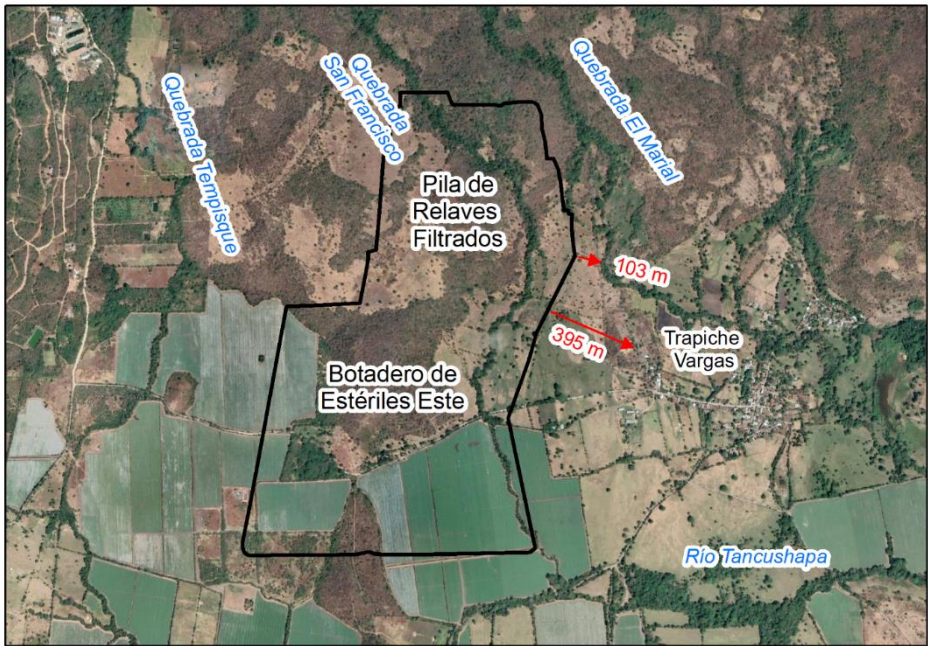


*Ilustración 2: Una falla en la instalación de almacenamiento de residuos mineros en la mina Cerro Blanco propuesta derramará relaves en el río Tancushapa u otros afluentes del río Ostúa. La inundación de relaves llegará al río Ostúa a luego de un recorrido de 4,0 kil kilómetros (máximo de 12 minutos), a la frontera con El Salvador luego de un recorrido de 10,5 kilómetros (máximo de 31,5 minutos) y al lago Guija luego de un recorrido de 16,3 kilómetros (máximo de 49 minutos). Los relaves se quedarán permanentemente en el Lago de Guija. Esquema de la instalación de almacenamiento de residuos mineros trazada a partir de G Mining Services (2022). Ríos de HydroSHEDS (2022). El fondo es una imagen de Google Earth del 29 de junio de 2022.*



G Mining Services (2022) establece que “the ultimate height of the current design is 175 m” [la altura máxima del diseño actual es de 175 m], pero también establece una elevación mínima de la cima para la instalación inicial de 180 metros. En este informe se asumirá una altura de 175 metros, lo que convertiría a la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco en la segunda instalación de almacenamiento de relaves filtrados más alta del mundo, después de la instalación en la mina La Coipa en Chile con una altura de 200 metros (Franks et al., 2021; GRID-Arendal, 2022).

La instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina La Coipa se encuentra actualmente inactiva y ya no recibe relaves adicionales (Franks et al., 2021; GRID-Arendal, 2022). Con base en una densidad seca de 1,5 toneladas por metro cúbico (Elevar Resources, 2021; G Mining Services, 2022), el volumen de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería de 36,5 millones de metros cúbicos, que sería el cuarto más grande del mundo, después de La Coipa con un volumen de 71 millones de metros cúbicos, el CRD Orapa Plant 1 en la mina Orapa en Botsuana con un volumen de 52,4 millones de metros cúbicos, y el CRD Jwaneng RP en la mina Jwaneng en Botsuana con un volumen de 37,5 millones de metros cúbicos (Franks et al., 2021; GRID-Arendal, 2022). La comparación anterior no incluye el volumen de roca estéril que se almacenaría en la misma instalación en la mina Cerro Blanco. Con base en una densidad de roca estéril de 1,6 toneladas métricas por metro cúbico (G Mining Services, 2022), el volumen total de relaves filtrados y roca estéril sería de 127 millones de metros cúbicos, lo que sería mucho mayor que cualquier instalación de almacenamiento de relaves filtrados existente. Finalmente, con base en una tasa de producción de relaves de 10.960 toneladas por día en la mina Cerro Blanco (G Mining Services, 2022), el rendimiento en la instalación de almacenamiento de relaves filtrados ocuparía el cuarto lugar en el mundo, después de la mina Karara en Australia, la mina La Coipa en Chile y la mina Mantos Blancos en Chile, con tasas de producción de relaves filtrados de 50.000, 20.000 y 12.000 toneladas por día, respectivamente (Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes, 2022).

✓ Todas las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados existentes que son más grandes que la instalación en la mina Cerro Blanco propuesta están ubicadas en climas mucho más secos y la importancia de esto será un tema de este informe. Ni la altura propuesta de 175 metros ni la altura mínima de 180 metros, como lo establece G Mining Services (2022), aparecen en Elevar Resources (2021) y, de hecho, tales alturas son inconsistentes con los diagramas en Elevar Resources (2021).



### Leyenda

-  Instalación de Almacenamiento de Residuos Mineros
-  Posible Camino de Flujo de Relaves

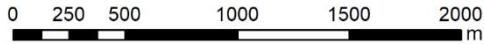


Ilustración 1: . Con base en las directrices de la Asociación Canadiense de Represas (2013, 2019), el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) evaluó las consecuencias de la falla de la instalación de almacenamiento de residuos mineros como Significativas, pero sin justifi justificación. La clasificación Significativa implica sólo una población temporal en riesgo, “ninguna pérdida o deterioro significativo del hábitat de peces o vida silvestre”, “pérdida de hábitat marginal únicamente”, “restauración o compensación en especie muy posible” y “pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte de uso poco frecuente” (Canadian Dam Association, 2013). Con base en la clasificación anterior, la instalación ha sido diseñada para resistir un terremoto con un período de retorno de sólo 475-1000 años (que corresponde a una probabilidad de excedencia anual de 0,1-0,21 %) y los canales de desviación y piletas de almacenamiento de aguas pluviales han sido diseñados para resistir una tormenta de 24 horas con un período de retorno de sólo 100 años (correspondiente a una probabilidad de excedencia anual de 1 %). Sin embargo, el borde de la pila de relaves filtrados estaría a sólo 103 metros de pendiente arriba de la quebrada El Marial, desde donde los relaves podrían fluir hacia el río Tancushapa y luego hacia el río Ostua y el Lago de Guija (ver Fig. 2). Además, el borde de la pila de relaves filtrados estaría a sólo 395 metros de pendiente arriba del pueblo de Trapiche Vargas con cientos de viviendas. Dada la altura de la pila de relaves filtrados (175 metros), los relaves podrían deslizarse hasta 1750 metros incluso sin licuefacción. Así, una falla en la instalación podría sepultar al pueblo de Trapiche Vargas en poco más de un minuto. Sobre la base anterior, la categoría de consecuencia de falla correcta es Extrema, que implica la pérdida de más de 100 vidas en caso de falla. De acuerdo con las directrices de la Asociación Canadiense de Represas, una instalación de relaves en la categoría Extrema debe diseñarse para resistir el terremoto de 10.000 años o el Terremoto Máximo Creíble (MCE), así como la inundación de 10.000 años o la Inundación Máxima Probable (IMP). Esquema de la instalación de almacenamiento de residuos mineros trazado a partir de G Mining Services (2022). El fondo es una imagen de Google Earth del 17 de diciembre de 2021.

Así, otro tema de este informe serán las numerosas contradicciones graves entre el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) que se entregó a las autoridades reguladoras guatemaltecas en noviembre de 2021 (Elevor Resources, 2021) y el Informe Técnico NI 43-101 que se entregó a inversores en abril de 2022 (G Mining Services, 2022). No se intentará documentar todas las contradicciones graves entre los dos documentos y no se abordarán las numerosas contradicciones relativamente menores dentro de ambos documentos.

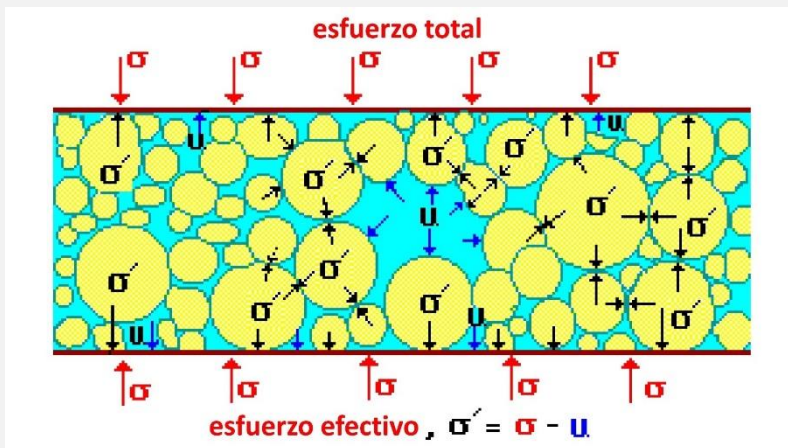
El objetivo de este informe es abordar la siguiente pregunta: ¿El diseño de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco propuesta brinda suficiente protección para las personas y el medio ambiente? Antes de discutir la metodología para abordar el objetivo, este informe tiene dos secciones para revisar los antecedentes esenciales. La primera sección revisa el tema de los relaves y presas de relaves con subsecciones sobre la licuefacción, la tecnología de relaves filtrados, las inundaciones de diseño y los terremotos de diseño, y el factor de seguridad. La segunda sección de revisión es específica de los métodos de construcción y el análisis actual de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco propuesta.

## **III. REVISIÓN DE RELAVES Y PRESAS DE RELAVES**

### **A. Licuefacción**

Una masa de relaves mineros consta de partículas de roca sólida en las que los poros entre las partículas están llenos de una combinación de aire y agua. Desde una perspectiva de ingeniería, una masa de relaves mineros es un tipo de suelo. Desde una perspectiva agrícola, un suelo debe incluir materia orgánica y organismos y ser capaz de soportar el crecimiento de plantas superiores. Sin embargo, estas propiedades biológicas no son relevantes para fines de ingeniería. Una excelente referencia para obtener información más completa sobre las propiedades de ingeniería de los suelos es Holtz et al. (2011).





*Ilustración 4: El esfuerzo efectivo en el suelo es igual al esfuerzo total menos la presión del agua intersticial. El esfuerzo efectivo es una medida de la magnitud en que las partículas sólidas interactúan o se “tocan” entre sí. El Principio de Terzaghi establece que la respuesta de una masa de suelo a un cambio de esfuerzo se debe exclusivamente al cambio de esfuerzo efectivo. Figura de GeotechniCAL (2022) superpuesta con etiquetas españolas.*

Las frases “suelo” y “masa de relaves” se usarán indistintamente en esta subsección, que sigue en gran medida la presentación de Holtz et al. (2011).

Un esfuerzo normal significa cualquier esfuerzo que actúa perpendicularmente a una superficie (ver Fig. 4). Un esfuerzo normal que actúa sobre un suelo puede ser parcialmente contrarrestada por la presión del agua dentro de los poros. El esfuerzo efectivo se define como el esfuerzo normal menos la presión del agua intersticial. El esfuerzo efectivo es una medida del grado en que las partículas sólidas interactúan o se “tocan” entre sí (ver Fig. 4). El esfuerzo normal sin restar la presión del agua intersticial también se denomina esfuerzo total.

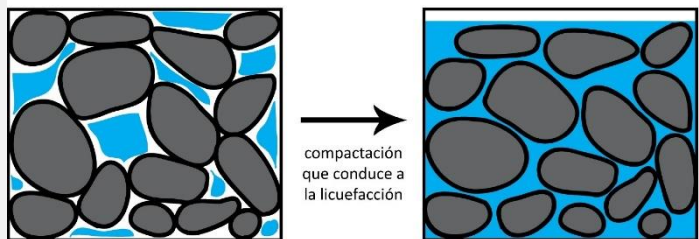
El Principio de Terzaghi establece que la respuesta de una masa de suelo a un cambio en el esfuerzo se debe exclusivamente al cambio en el esfuerzo efectivo (Holtz et al., 2011). Por ejemplo, suponer que los sedimentos se depositan en la llanura de inundación de un río o los relaves se descargan hidráulicamente en un reservorio de relaves sin compactación. El peso de las partículas sólidas crea un esfuerzo normal, de modo que las partículas se consolidarán por su propio peso. La cantidad y la tasa de consolidación están determinadas por el esfuerzo efectivo, es decir, el grado en el que las partículas interactúan entre sí. Una presión de agua suficiente puede compensar el esfuerzo normal, por lo que podría ocurrir poca consolidación y a una tasa lenta.

El fenómeno de la licuefacción, en el que un suelo pierde su fuerza y se comporta como un líquido, se puede explicar mediante la aplicación del Principio de Terzaghi (ver Fig. 5). En el diagrama del lado izquierdo de la Fig. 5, aunque

las partículas sólidas están sueltamente empaquetadas y los poros están saturados con agua, las partículas se tocan entre sí. Debido a que hay contacto entre las partículas, la carga (el peso de las partículas u otros materiales por encima de las partículas que se muestran en el lado izquierdo de la Fig. 5) es soportada por las partículas sólidas. La carga también es soportada parcialmente por el agua debido a la presión del agua. El término permeabilidad se refiere a la capacidad del agua para fluir a través de los poros. Una mezcla de partículas gruesas y finas tendrá baja permeabilidad porque las partículas más finas llenarán los poros entre las partículas más gruesas y, por lo tanto, restringirán el espacio de los poros para el flujo de agua.

Empaquetamiento suelto significa que el suelo está en un estado contractivo (o contractible), por lo que las partículas sólidas tenderán a compactarse a un estado más densamente empaquetado después de un aumento en la carga o una perturbación (como un sismo). Si el agua no puede escapar (debido a la baja permeabilidad o la velocidad de la perturbación), los sólidos no pueden compactarse de modo que el esfuerzo adicional se convierte en un aumento de la presión del agua de poro (ver el lado derecho de Fig. 5).

*Ilustración 5: En el diagrama de la izquierda, aunque las partículas sólidas están sueltamente empaquetadas y los poros están saturados con agua, las partículas se tocan entre sí, de modo que la carga es soportada por las partículas (y parcialmente por el agua).*



*Empaquetamiento suelto significa que el suelo está en un estado contractivo, por lo que las partículas sólidas tenderán a compactarse a un estado más densamente empaquetado después de un aumento en la carga o una perturbación (como un terremoto). Si el agua no puede escapar (debido a la baja permeabilidad o la velocidad de la perturbación), los sólidos no pueden compactarse de modo que el esfuerzo adicional se convierte en un aumento de la presión del agua de poro (ver el diagrama de la derecha). El aumento de la presión del agua puede reducir el esfuerzo efectivo casi a cero o hasta el punto en el que las partículas ya no se “toquen” entre sí (ver Fig. 4). En este punto, la masa del suelo ha sufrido una licuefacción en la que el agua soporta toda la carga y la masa de partículas y agua se comporta como un líquido. Este fenómeno de licuefacción es promovido por poros saturados y partículas empaquetadas sueltamente. Los depósitos de relaves son especialmente susceptibles a la licuefacción porque los relaves están empaquetados muy sueltamente debido a la descarga hidráulica en el reservorio sin compactación. Si los poros están insaturados antes de la perturbación, puede ocurrir algo de compactación (disminuyendo el tamaño de los poros), de modo que los poros se saturen. Cualquier comportamiento contractivo adicional convertirá entonces el esfuerzo adicional en una mayor presión de agua de poro. Sobre esa base, la licuefacción es posible incluso si los poros sólo están saturados en un 80 %. Figura de DoITPoMS (2020) superpuesta con etiquetas españolas.*

El aumento de la presión del agua puede reducir el esfuerzo efectivo casi a cero o hasta el punto en el que las partículas ya no se “toquen” entre sí (ver Fig. 4). En este punto, la masa del suelo ha sufrido una licuefacción en la que el agua soporta toda la carga y la masa de partículas y agua se comporta como un líquido.

El fenómeno de licuefacción es promovido por poros saturados y partículas empaquetadas sueltamente. Las instalaciones de almacenamiento de relaves convencionales son especialmente susceptibles a la licuefacción porque los relaves están empaquetados muy sueltamente debido a la descarga hidráulica en la instalación de almacenamiento de relaves sin compactación. Si los poros están insaturados antes de la perturbación, puede ocurrir algo de compactación (disminuyendo el tamaño de los poros), de modo que los poros se saturen. Cualquier comportamiento contractivo adicional convertirá entonces el esfuerzo adicional en una mayor presión de agua de poro. Sobre esa base, la licuefacción es posible incluso si los poros solo están saturados en un 80 %. Existe una considerable literatura sobre métodos para evaluar la susceptibilidad del suelo o relaves a la licuefacción (Fell et al., 2015). Por ejemplo, la separación por gravedad incompleta durante la descarga hidráulica podría llevar a una mezcla de relaves gruesos y finos, la cual podría hacer que los relaves sean más susceptibles a la licuefacción al reducir su permeabilidad.

Se dice que el suelo que ya está en un estado densamente empaquetado está en un estado dilatativo (o dilatante), de modo que las partículas sólidas tenderán a expandirse después de una perturbación. En este caso, la perturbación provoca un fortalecimiento, en lugar de un debilitamiento del suelo, debido a la disminución resultante de la presión del agua de poro. Un suelo en el que las partículas no se compactan ni se expanden después de una perturbación se dice que está en estado crítico. La base de la Mecánica de Suelos en Estado Crítico es el principio del que, después de una perturbación, todos los suelos tenderán a acercarse al estado crítico de empaquetamiento, en el que la relación crítica de vacíos (relación entre el volumen del espacio poroso y el volumen de partículas sólidas) depende del esfuerzo vertical efectivo.

## **B. Tecnología de Relaves Filtrados**

La tecnología de relaves filtrados busca abordar dos problemas importantes en la minería al deshidratar parcialmente los relaves antes de enviarlos a la instalación de almacenamiento de relaves:

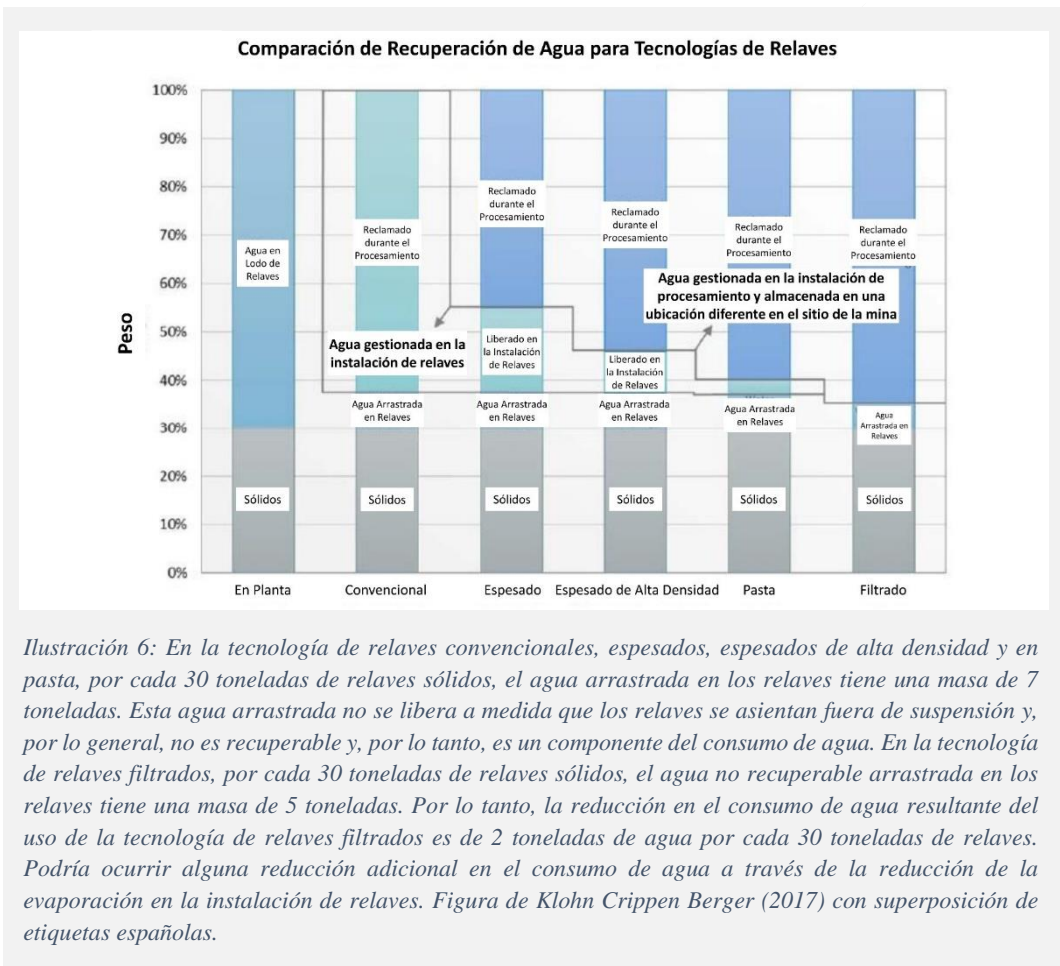
1) El consumo de agua se puede reducir al reciclar el agua de los relaves nuevamente en la operación minera.

2) La probabilidad de licuefacción de los relaves se puede reducir desaturando los relaves y luego compactándolos a medida que se almacenan en una instalación de almacenamiento de relaves filtrados.

En la gestión convencional de relaves, los relaves se envían a la instalación de almacenamiento de relaves desde la planta de procesamiento de mena sin deshidratación, por lo que el contenido de agua geotécnico de los relaves está en el rango de 150 a 400 %, aunque puede ser tan bajo como 67 %. La tecnología de relaves espesados de alta densidad o en pasta deshidrata los relaves a contenidos de agua geotécnicos en el rango de 33-67 % antes de exportarlos a la instalación de almacenamiento de relaves, mientras que la tecnología de relaves filtrados deshidrata los relaves a contenidos de agua geotécnicos inferiores a aproximadamente el 20 %. Los relaves convencionales se comportan como un lodo húmedo, mientras que los relaves espesados de alta densidad o en pasta se comportan como una pasta (como su nombre lo indica) y los relaves filtrados se comportan como un suelo húmedo. Los límites entre las diferentes tecnologías de relaves dependen de las propiedades físicas y químicas de los relaves y se definen por el comportamiento físico, no por el contenido de agua geotécnico. Otras ventajas de la tecnología de relaves filtrados son la reducción de la huella de la instalación de almacenamiento de relaves y la facilitación del cierre seguro de la instalación (Klohn Crippen Berger, 2017).

Aunque Elevar Resources (2021) y G Mining Services (2022) se refieren repetidamente a “relaves secos” y a una “Pila de Relaves Secos (PRS)”, esta es una terminología no estándar. Los relaves no están literalmente secos y, si lo estuvieran, sería imposible compactarlos adecuadamente para un almacenamiento seguro. En su sitio web, la empresa de consultoría Knight-Piésold incluye una publicación de los empleados de Knight-Piésold que dice, “Regarding terminology, the rather misleading term dry stack is generally not a good engineering term since the target moisture content coming from the filter plant is typically desired to be somewhere around the optimum moisture content based on the Proctor compaction procedure ... Geotechnical engineers associate the optimum moisture content with moisture levels just below full saturation after compaction, thus terming such a facility as a dry stack is a misnomer. The present authors would encourage practitioners to abandon the use of the term dry stacking in favor of the more straightforward term, ‘filtered tailings.’ It is not desirable to unintentionally mislead the public at large with an industry term that is noticeably misused [Con respecto a la terminología, el término bastante engañoso de pila seca generalmente no es un buen término de ingeniería, ya que el contenido de humedad objetivo que proviene de la planta de filtración generalmente se desea

que esté en algún lugar alrededor del contenido de humedad óptimo basado en el procedimiento de compactación Proctor ... Los ingenieros geotécnicos asocian el contenido de humedad óptimo con los niveles de humedad justo por debajo de la saturación total después de la compactación, por lo que denominar una instalación de este tipo como una pila seca es un nombre inapropiado. Los presentes autores alentarían a los profesionales a abandonar el uso del término apilamiento en seco en favor del término más sencillo, 'relaves filtrados'. No es deseable engañar involuntariamente al público en general con un término de la industria que se usa claramente de manera incorrecta] (Ulrich and Coffin, 2017).



Con respecto a la mina propuesta Twin Metals en Minnesota (EE. UU.), para la cual se canceló el arrendamiento de minerales, el Minnesota Department of

Natural Resources [Departamento de Recursos Naturales de Minnesota] (2021) preguntó, “Is characterizing the tailings filter cake as being ‘dry’ a common terminology for a product exhibiting a 13% to 16% moisture content” [¿La caracterización de la torta de filtración de relaves como ‘seca’ es una terminología común para un producto que exhibe un contenido de humedad del 13 % al 16 %?]. Finalmente, el Tailings Management Handbook [Manual de Gestión de Relaves] de la SME (Society for Mining, Metallurgy and Exploration [Sociedad Minería, Metalurgia y Exploración]) confirma que “The term dry stacking ... is somewhat of a misnomer. Stacked tailings must be sufficiently dry to allow placement in stable and trafficable piles, but not so dry as to result in dust generation from prevailing wind” [El término apilamiento en seco... es algo inapropiado. Los relaves apilados deben estar lo suficientemente secos para permitir su colocación en pilas estables y transitables, pero no tanto como para generar polvo debido al viento predominante] (Reemeyer, 2022). En este informe, los relaves se denominarán filtrados" en lugar de "secos", excepto para citar documentos proporcionados por los consultores de Bluestone Resources.

Una simple comparación de los contenidos de agua anteriores para las diferentes categorías de relaves exagera la reducción en el consumo de agua que se puede lograr mediante la transición de la tecnología de relaves convencionales a la de filtrados. La razón es que, dentro de la instalación de almacenamiento de relaves, los relaves sólidos se asentarán fuera de la suspensión para que el agua sobrenadante pueda reciclarse nuevamente en la operación minera. Por ejemplo, una planta típica exportará a la instalación de almacenamiento de relaves 70 toneladas de agua por cada 30 toneladas de relaves sólidos (ver Fig. 6). En una instalación de almacenamiento de relaves convencionales típica, de esas 70 toneladas de agua, 7 toneladas de agua permanecerán arrastradas dentro de los relaves para un contenido de agua geotécnico del 23,3 %, mientras que 63 toneladas de agua se liberarán en la instalación de relaves y se reciclarán nuevamente en la operación minera (ver Fig. 6). La progresión de la tecnología desde relaves convencionales a espesados a espesados de alta densidad a en pasta aumenta la proporción de agua que se recicla a través de la deshidratación de los relaves antes del envío a la instalación de almacenamiento de relaves (“reclamado durante el procesamiento”) y disminuye la proporción de agua que se recicla fuera de la instalación de almacenamiento de relaves (“liberado en la instalación de relaves”) (ver Fig. 6). Sin embargo, el resultado final desde el punto de vista del consumo de agua no cambia, a saber, que por lo general, por cada 30 toneladas de relaves sólidos, 7 toneladas de agua permanecen arrastradas permanentemente dentro de los relaves (ver Fig. 6). El cambio radical ocurre en la transición a la tecnología de relaves filtrados, en la que, por lo general, no se puede reciclar agua de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados, mientras que 5 toneladas

de agua permanecen arrastradas dentro de los relaves por cada 30 toneladas de relaves sólidos, para un contenido de agua geotécnico del 16,7 % (ver Fig. 6). En resumen, la reducción típica en el consumo de agua mediante el uso de la tecnología de relaves filtrados es de 2 toneladas de agua por cada 30 toneladas de relaves sólidos, en comparación con cualquier otra tecnología de gestión de relaves (Klohn Crippen Berger, 2017).

Una fuente adicional de reducción en el consumo de agua a través de la tecnología de relaves filtrados es la reducción de la evaporación a través de la eliminación de una superficie de agua libre sobre los relaves. La evaporación del estanque de relaves es muy variable y depende de la radiación solar, la temperatura del agua y factores atmosféricos, como la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento, así como de las tecnologías que se pueden utilizar para reducir la evaporación. De acuerdo con Spiller y Dunne (2017), “The amount of evaporation of water from the TSF [Tailings Storage Facility] may range from about 5% to more than 60% of the total water lost at a TSF” [La cantidad de agua evaporada de la IAR [Instalación de Almacenamiento de Relaves] puede oscilar entre aproximadamente el 5 % y más del 60 % del agua total perdida en una IAR]. Sobre esa base, en el extremo inferior de la evaporación (5 % de la pérdida total de agua), por cada 7 toneladas de agua arrastrada dentro de los relaves, se perderán otras 0,4 toneladas de agua por evaporación. En el extremo superior de la evaporación (60 % de la pérdida total de agua), por cada 7 toneladas de agua arrastrada dentro de los relaves, se perderán otras 10,5 toneladas de agua por evaporación. Por lo tanto, la reducción en el consumo de agua a través de una conversión a la tecnología de relaves filtrados podría llegar a 12,5 toneladas de agua por cada 30 toneladas de relaves si la conversión se produjera desde una instalación existente o planificada con una evaporación extremadamente alta y sin otras tecnologías para reducir la evaporación. Por otro lado, el estanque de relaves también puede ser una fuente de agua a través de la captura de precipitaciones y escorrentías superficiales (Klohn Crippen Berger, 2017). La mayoría de los estudios de caso sobre conversiones a tecnología de relaves filtrados no han tenido en cuenta explícitamente ninguna reducción en el consumo de agua a través de la reducción de la evaporación del estanque de relaves (p. ej., Gagnon y Lind, 2017; Moreno et al., 2018).

La tecnología de relaves filtrados reduce la probabilidad de licuefacción de la pila de relaves mediante la desaturación de los espacios porosos entre los relaves, la reducción de la cantidad total de agua en la instalación de almacenamiento de relaves y la compactación de los relaves dentro de la instalación de almacenamiento de relaves. Esta compactación reduce la probabilidad de licuefacción al poner los relaves en un estado dilatativo (en lugar de contractivo) en el que se expandirán en lugar de consolidarse cuando se cortan o perturban.

## Esquema de una Instalación de Relaves Filtrados

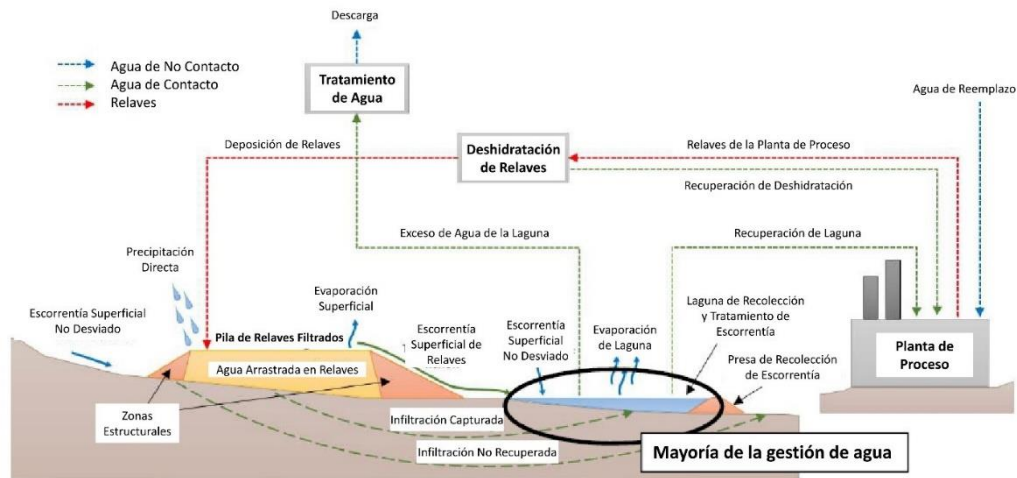


Ilustración 7: La tecnología actual de filtro de prensa no produce consistentemente relaves filtrados con el contenido de agua geotécnico apropiado para una compactación adecuada. Incluso si los relaves salen de los filtros de prensa con el contenido de agua adecuado, pueden volver a humedecerse por la precipitación. La solución estándar para pilas de relaves filtrados es colocar los relaves que están demasiado húmedos o demasiado secos para una compactación adecuada en el centro de la instalación en una zona no estructural, en la que los relaves están sin compactar o ligeramente compactados. Los relaves con el contenido de agua apropiado para una compactación adecuada se colocan luego en la periferia, donde se pueden compactar para formar una zona estructural. La zona estructural cumple la misma función que una presa para la zona no estructural. Figura de Klohn Crippen Berger (2017) con superposición de etiquetas españolas.

Por lo general, las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados se construyen con una capa exterior de relaves compactados (a veces denominada la “zona estructural”) que rodea un núcleo interno de relaves no compactados o ligeramente compactados (ver Fig. 7).

Aunque algunos planes de proyectos mineros recientes han afirmado que los relaves filtrados no requieren una presa, la zona estructural cumple exactamente la misma función que una presa, es decir, es una estructura de ingeniería que evita el flujo de agua ni materiales de desecho que contienen agua. Por ejemplo, con respecto a su propuesta para una mina de cobre en Minnesota, Twin Metals Minnesota (2022) escribió, “Dry stacking filtered tailings means there is no need for a dam – dam failure is impossible [El apilamiento en seco de relaves filtrados significa que no hay necesidad de una presa – la falla de presa es imposible].



La respuesta del Minnesota Department of Natural Resources (2021) fue que una presa es un “structure that impounds water and/or waste materials containing water” [estructura que retiene agua y/o materiales de desecho que contienen agua] (énfasis en el original). Klohn Crippen Berger (2017) también ha enfatizado que una instalación de relaves filtrados “still requires ‘structural zones’ (which perform like dams), made of compacted tailings for confinement” [todavía requiere ‘zonas estructurales’ (que funcionan como presas), hechas de relaves compactados para el confinamiento] y “if filtered tailings are placed in a stand-alone facility (pile/stack), the outer slopes must maintain structural stability (similar to a dam or a waste dump), particularly under seismic loading conditions” [si los relaves filtrados se colocan en una instalación independiente (montón/pila), los taludes exteriores deben mantener la estabilidad estructural (similar a una presa o un botadero de residuos), particularmente en condiciones de carga sísmica]. Finalmente, según La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves, “Ya que [instalaciones de relaves filtrados] siempre requieren de una zona estructural (un tipo de presa) para su contención, deben ser tratados como instalaciones de ingeniería para relaves (es decir, una presa de relaves) desde la óptica regulatoria ... La zona estructural de instalaciones de relaves filtrados cumple la misma función que una presa” (Morrill et al., 2022).

El núcleo interno de una instalación de almacenamiento de relaves filtrados es, de hecho, un requisito para el almacenamiento de relaves que salieron de los filtros de prensa con demasiada agua para una compactación adecuada. Crystal et al. (2018) han enfatizado que los contenidos de agua objetivos para los relaves filtrados rara vez se logran. De acuerdo con Crystal et al. (2018), “Commonly, projects are specifying (or promising) a target filter-cake moisture at the limit of the filter performance (including at the limit of the thickener’s ability to deliver feed at the required solids ratio). This has caused numerous examples where the operating performance does not consistently meet the target ... Essentially, irrespective of site, ore body type, or filter press manufacturer, a 15% moisture content remains a typical target, while tracking of day-in and day-out moisture contents of filter cakes demonstrates that achievable moisture contents are often in the range of 17 to 18% when things are running smoothly and can be up to 20 to 23% when off-spec ... ‘Targets’ may be cited or promised, but achievable filter cake moisture contents and the variability of the process are not generally within the tailings engineer’s control” [Por lo general, los proyectos especifican (o prometen) una humedad de la torta de filtración objetiva en el límite del rendimiento del filtro (incluso en el límite de la capacidad del espesador para suministrar alimentación a la proporción de sólidos requerida). Esto ha provocado numerosos ejemplos en los que el rendimiento operativo no cumple con el

objetivo de forma consistente ... Esencialmente, independientemente del sitio, el tipo de cuerpo de mena o el fabricante del filtro de prensa, un contenido de humedad del 15 % sigue siendo un objetivo típico, mientras que el seguimiento del contenido de humedad diario de las tortas de filtración demuestra que los contenidos de humedad alcanzables a menudo están en el rango del 17 al 18 % cuando todo funciona sin problemas y puede ser de hasta el 20 al 23 % cuando no cumple con las especificaciones ... Se pueden citar o prometer 'objetivos', pero los contenidos de humedad alcanzables de la torta de filtración y la variabilidad del proceso generalmente no están bajo el control del ingeniero de relaves]. Por ejemplo, las minas mexicanas de oro y plata que utilizan tecnología de relaves filtrados han alcanzado contenidos de agua geotécnicos en el rango de 14 a 19 % (Espinosa-Gomez et al., 2018). Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes, 2022) enumeran 28 depósitos de relaves filtrados con contenidos de agua geotécnicos que van del 12 al 20 %, aunque sin aclarar si se trata de contenidos de agua objetivos o alcanzados. Incluso si los relaves salen de los filtros de prensa con el contenido de agua geotécnico objetivo, aún pueden volver a humedecerse por la precipitación. Hasta ahora, estas instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados han sido en su mayoría pequeñas y construidas en su mayoría en áreas con climas áridos (Klohn Crippen Berger, 2017). La restricción parcial a regiones áridas ha sido motivada en parte por la mayor necesidad de reciclar agua en regiones con alta escasez de agua. Sin embargo, un factor adicional han sido los desafíos para lograr el contenido de agua apropiado para una compactación adecuada en climas húmedos. En la actualidad, la solución estándar tanto en climas áridos como húmedos es reservar un núcleo interno (una región alejada de los taludes externos) para colocar los relaves que no pueden compactarse adecuadamente. Crystal et al. (2018) continúa, "The tailings engineer can, however, specify acceptable moisture contents for different areas of the dry stack, depending on stacking strategies. For example, external structural zones may have more stringent criteria than non-structural zones, for which reduced constraints may be allowed [Sin embargo, el ingeniero de relaves puede especificar contenidos de humedad aceptables para diferentes áreas de la pila seca, según las estrategias de apilamiento. Por ejemplo, las zonas estructurales externas pueden tener criterios más estrictos que las zonas no estructurales, para las cuales se pueden permitir restricciones reducidas].

Debido a su capacidad para reducir tanto la probabilidad como las consecuencias de fallas en las instalaciones de almacenamiento de relaves, la tecnología de relaves filtrados se considera actualmente como una de las mejores tecnologías disponibles. Según el informe del panel de expertos sobre la falla de la instalación de almacenamiento de relaves en la mina Mount Polley, "BAT [Best Available Technology] has three components that derive from first principles of

soil mechanics: 1. Eliminate surface water from the impoundment. 2. Promote unsaturated conditions in the tailings with drainage provisions. 3. Achieve dilatant conditions throughout the tailings deposit by compaction ... Filtered tailings technology embodies all three BAT components ... There are no overriding technical impediments to more widespread adoption of filtered tailings technology” [Las MTD contienen tres componentes derivados de los principios fundamentales de la mecánica del suelo: 1. Eliminar el agua superficial del embalse. 2. Promover condiciones insaturadas en los relaves con provisiones de drenaje. 3. Lograr condiciones dilatantes en todo el depósito de relaves por compactación ... La tecnología de relaves filtrados incorpora los tres componentes de las MTD ... No existen impedimentos técnicos primordiales para una adopción más generalizada de la tecnología de relaves filtrados]. El documento La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves también exige el “uso de las Mejores Tecnologías Disponibles para relaves, particularmente el uso de relaves filtrados” (Morrill et al., 2022).

Al mismo tiempo, no hace falta decir que el uso de la tecnología de relaves filtrados no puede ser una licencia para ignorar otros aspectos de la seguridad. Aunque Twin Metals Minnesota (2022) escribe “Dry stacking filtered tailings means there is no need for a dam – dam failure is impossible” [El apilamiento en seco de relaves filtrados significa que no hay necesidad de una presa – la falla de presa es imposible], la falla nunca es imposible. De hecho, una instalación de almacenamiento de relaves filtrados colapsó en la mina de mena de hierro Pau Branco en Brasil el 8 de enero de 2022 (Angelo, 2022; Morrill, 2022; Petley, 2022; ver Fig. 8). Cabe señalar que la instalación fallada en la mina Pau Branco combinó relaves filtrados y roca estéril de manera similar a la mina propuesta Cerro Blanco. De hecho, el uso de tecnología de relaves filtrados puede conducir a la complacencia por una ilusión de seguridad. De acuerdo con Oboni y Oboni (2020), “Dewatered tailings would tend to bring the probability of failure towards the bottom of the historical range, provided, of course the dewatering is effective, and does not generate excessive risk taking based on its promises” [Los relaves deshidratados tenderían a llevar la probabilidad de falla hacia la parte inferior del rango histórico, siempre que, por supuesto, la deshidratación sea efectiva y no genere una asunción de riesgos excesivos en función de sus promesas]. Una vez más, según Oboni y Oboni (2020), “The problem is that the possible alternatives to slurry deposition have not yet created the same body of knowledge that could support development of professional guidances and protocols of a quality equal to that for slurry deposition” [El problema es que las posibles alternativas a la deposición de lodos aún no han creado el mismo cuerpo de conocimiento que podría respaldar el desarrollo de guías y protocolos profesionales de una calidad

igual a la de la deposición de lodos]. En la sección Discusión se desarrollarán más temas relacionados con la adopción de nuevas tecnologías.

Una cuestión clave es que, aunque los relaves filtrados pueden estar no saturados cuando se depositan en la instalación de almacenamiento de relaves, aún es necesario evitar la resaturación de los relaves para evitar una licuefacción futura. El problema es particularmente grave, ya que el contenido de agua geotécnico objetivo para la máxima compactación es típicamente sólo unos pocos puntos porcentuales menos que el contenido de agua geotécnico saturado. Los espacios de poro entre las partículas de relaves pueden volver a saturarse simplemente mediante la consolidación bajo el peso de relaves superpuestos adicionales, lo que reduce el volumen de los poros para que se llenen de agua (Klohn Crippen Berger, 2017). De hecho, no es inusual que el tercio a la mitad inferior de una pila de relaves filtrada esté saturado. El agua también puede ingresar a la instalación de almacenamiento de relaves filtrados a través de la escorrentía superficial, la filtración ascendente de aguas subterráneas y la precipitación directa sobre los relaves. Las fuentes de agua mencionadas



*Ilustración 8: Una pila de relaves filtrados de 48 metros de altura colapsó en la mina de mineral de hierro Pau Branco en Brasil el 8 de enero de 2022. Aunque los relaves filtrados se consideran la Mejor Tecnología Disponible en la actualidad (Engineering Investigation and Review Panel [Investigación de Ingeniería y Panel de Revisión de Expertos Independientes], 2015; Morrill et al., 2022), el uso de la tecnología de relaves filtrados no es una licencia para ignorar todos los demás aspectos de la seguridad. Foto de Angelo (2022).*

anteriormente requieren canales de desvío que aíslen la instalación de almacenamiento de relaves del resto de la cuenca y una infraestructura de drenaje adecuada para transportar el exceso de agua fuera de los relaves.

Es importante señalar que las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados tienen otros posibles mecanismos de falla además de la licuefacción. Por ejemplo, la escorrentía superficial que fluye sobre la zona estructural podría erosionarla, exponiendo así los relaves no compactados que estaban detrás de la zona estructural (ver Fig. 7). El asentamiento desigual o la falla de la cimentación debajo de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados podría provocar la falla de toda la estructura. Finalmente, la zona estructural (la presa) podría fallar simplemente por deslizamiento sin licuefacción u otro comportamiento de flujo. Según Klohn Crippen Berger (2017), debido al típico bajo contenido de agua de los relaves filtrados, “Failure, if it occurs, would likely be local slumping and consequences would be restricted to the local area (or the distance equivalent to roughly 10 times the height [of the tailings dam]) ...” [La falla, si ocurre, probablemente sería un deslizamiento local y las consecuencias estarían restringidas al área local (o la distancia equivalente a aproximadamente 10 veces la altura [de la presa de relaves]...)]. Por otro lado, el comportamiento del flujo de los relaves podría desarrollarse si los relaves se mezclan con suficiente agua después de la falla de la presa. La cita anterior continúa, “... unless the material slumps into a water body ... When large water ponds are located downstream of high-density thickened/paste facilities, cascading failures are possible and should be accounted for when developing the risk profile of tailings failure management [ ... a menos que el material se deslice en un cuerpo de agua ... Cuando se ubican estanques de agua grandes aguas abajo de instalaciones de pasta/espesado de alta densidad, es posible que se produzcan fallas en cascada y se deben tener en cuenta al desarrollar el perfil de riesgo de la gestión de fallas de relaves] (Klohn Crippen Berger, 2017). Sobre la base anterior, los estanques de recolección de drenaje y escorrentía deben ubicarse lo suficientemente lejos aguas abajo de la instalación de almacenamiento de relaves y se debe evitar la acumulación excesiva de agua en estos estanques (Klohn Crippen Berger, 2017; ver Fig. 7).

## C. Inundaciones de Diseño y Terremotos de Diseño

Cualquier instalación de almacenamiento de relaves debe ser diseñada para resistir una inundación en particular y un terremoto en particular, llamado la inundación de diseño y el terremoto de diseño. Sin conocimiento de la inundación de diseño y el terremoto de diseño, no hay ninguna base para determinar las inclinaciones de los terraplenes, las dimensiones del canal de derivación ni cualquier otro aspecto de una facilidad de almacenamiento de relaves. El terremoto de diseño es realmente una aceleración sísmica de diseño, que depende de la magnitud del terremoto de diseño, la distancia desde la falla en la que se espera que ocurra el terremoto y la naturaleza del material debajo de la instalación. En esta sección, se considerarán tres directrices ampliamente reconocidas para determinar inundaciones y terremotos de diseño, las cuales son las directrices de (U.S.) Federal Emergency Management Agency [(EE. UU.) Agencia Federal de Manejo de Emergencias] (FEMA, 2005, 2013), U.S. Army Corps of Engineers [Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos] (USACE, 1991, 2014, 2016), y Canadian Dam Association [Asociación Canadiense de Presas] (2013). Todas las directrices anteriores se refieren a presas en general, en lugar de presas de relaves en particular. Las directrices complementarias de la Canadian Dam Association (2019) consideran la aplicación de las directrices generales de seguridad de presas a las presas de relaves. Finalmente, se considerarán dos directrices recientes que buscan el reconocimiento como estándares globales (ICMM-UNEP-PRI, 2020; Morrill et al., 2022). No tengo conocimiento de ninguna directriz de las agencias reguladoras guatemaltecas para determinar inundaciones de diseño ni terremotos de diseño, ni ninguno de los documentos de los consultores de Bluestone Resources se refiere a dichas directrices.

La Federal Emergency Management Agency clasifica las presas en tres categorías según el potencial de peligro (FEMA, 2013). Potencial de alto peligro significa “probable loss of life due to dam failure or misoperation” [la probable pérdida de vida debido a la falla o mal funcionamiento de la presa]. Se aclara que “probable loss of life” [la probable pérdida de vida] se refiere a “one or more expected fatalities” [una o más muertes esperadas] y que “economic loss, environmental damage or disruption of lifeline facilities may also be probable but are not necessary for this classification” [la pérdida económica, el daño ambiental o la interrupción en las instalaciones vitales también pueden ser probables, pero no son necesarios para esta clasificación]. Un potencial de peligro significativo significa “no probable loss of human life but can cause economic loss,

environmental damage, or disruption of lifeline facilities due to dam failure or misoperation” [no hay pérdida probable de vidas humanas, pero puede causar la pérdida económica, el daño ambiental o la interrupción en las instalaciones vitales debido a la falla o mal funcionamiento de la presa]. Potencial de bajo peligro significa “no probable loss of human life and low economic and/or environmental losses due to dam failure or misoperation” [no hay pérdida probable de vidas humanas y bajas pérdidas económicas y/o ambientales debido a la falla o mal funcionamiento de la presa].

Cada una de las clasificaciones de potencial de peligro corresponde a una inundación de entrada de diseño (FEMA, 2013). Una presa con un potencial de bajo peligro debe diseñarse para una inundación de 100 años (inundación con una probabilidad de excedencia del 1 % en un cualquier año dado) o “a smaller flood justified by rationale” [una inundación más pequeña justificada por razones fundamentadas] (FEMA, 2013). Una presa con un potencial de peligro significativo debe diseñarse para una inundación de 1.000 años (inundación con una probabilidad de excedencia del 0,1 % en cualquier año dado). Sin embargo, una presa cuya falla se espera que resulte en la pérdida de al menos una vida (potencial de alto peligro) debe diseñarse para la Inundación máxima probable (IMP), que se define como “the flood that may be expected from the most severe combination of critical meteorologic and hydrologic conditions that are reasonably possible in the drainage basin under study” [la inundación que se puede esperar de la combinación más severa de condiciones meteorológicas e hidrológicas críticas que son razonablemente posibles en la cuenca de drenaje en estudio] (FEMA, 2013). La magnitud del IMP normalmente se deriva de la Precipitación máxima probable (PMP), que se define como “the theoretical greatest depth of precipitation for a given duration that is physically possible over a particular drainage area at a certain time of year” [la mayor profundidad de precipitación teórica para un período determinado que es físicamente posible en un área de drenaje particular en una cierta época del año] (FEMA, 2013). Vale la pena señalar que, según el U.S. Army Corps of Engineers , “the PMF does not incorporate a specific exceedance probability, but is generally thought to be well beyond the 10,000 year recurrence interval” [el IMP no incorpora una probabilidad de excedencia específica, pero en general se considera que está mucho más allá del intervalo de recurrencia de 10.000 años] (USACE-HCE, 2003).

De manera similar, cada uno de los potenciales de peligro corresponde a un terremoto de diseño. Según la Federal Emergency Management Agency, el Terremoto Máximo Creíble (TMC), es “the largest earthquake magnitude that could occur along a recognized fault or within a particular seismotectonic province or source area under the current tectonic framework” [la mayor

magnitud de terremoto que podría ocurrir a lo largo de una falla conocida o dentro de una provincia sismotectónica particular o área fuente bajo el marco tectónico actual] (FEMA, 2005). Además, para las presas de potencial de alto peligro, “the MDE [Maximum Design Earthquake] usually is equated with the controlling MCE [Maximum Credible Earthquake]” [el TMC [Terremoto de Diseño Máximo] por lo general se equipara con el TMC de control]. Al igual que en las inundaciones de diseño, “where the failure of the dam presents no hazard to life, a lesser earthquake may be justified, provided there are cost benefits and the risk of property damage is acceptable” [donde la falla de la presa no representa un peligro para la vida, se puede justificar un terremoto menor, siempre que haya beneficios de costo y el riesgo de daños a la propiedad sea aceptable] (FEMA, 2005). El U.S. Army Corps of Engineers utiliza un lenguaje similar para afirmar que “for critical features, the MDE is the same as the MCE” [para características críticas, el SDM es el mismo que el TMC] y al igual que con la IMP, ha enfatizado “There is no return period for the MCE” [No hay ningún período de retorno para el TMC] (USACE, 2016). Por otro lado, en el contexto de la discusión de los criterios para determinar el TMC en un lugar en particular, FEMA (2005) declara, “For high-hazard potential dams, movement of faults within the range of 35,000 to 100,000 years BP is considered recent enough to warrant an ‘active’ or ‘capable’ classification” [Para las presas de potencial de alto peligro, el movimiento de fallas dentro del rango de 35.000 a 100.000 años AP se considera bastante reciente para justificar una clasificación “activa” o “capaz”]. En otras palabras, el TMC puede ser tan raro como un terremoto de 100.000 años, con una probabilidad de excedencia anual correspondiente del 0,001 %.

En términos de inundaciones de diseño, las directrices de seguridad para presas diseñadas por el U.S. Army Corps of Engineers son, en algunos casos, incluso más estrictas que las recomendadas por FEMA (2013). Para todas las presas diseñadas o mantenidas por el U.S. Army Corps of Engineers, “APF [Annual Probability of Failure]  $\geq 1$  in 10,000 (0.0001) Per Year. Annual probability of failure in this range is unacceptable except in extraordinary circumstances” [PFA [Probabilidad de falla anual]  $\geq 1$  en 10.000 (0,0001) por año. La probabilidad de falla anual en este rango es inaceptable, excepto en circunstancias extraordinarias] (USACE, 2014). El U.S. Army Corps of Engineers tiene cuatro categorías de estándares de seguridad de presas, similares a los tres potenciales de peligro de la Federal Emergency Management Agency. La más estricta “Standard 1 applies to the design of dams capable of placing human life at risk or causing a catastrophe, should they fail” [Estándar 1 se aplica al diseño de presas capaces de poner en riesgo la vida humana o causar una catástrofe, en caso de que falle] (USACE, 1991). Para esta estándar, “structural designs will be such that the dam will safely pass an IDF [Inflow Design Flood]



computed from probable maximum precipitation (PMP) occurring over the watershed above the dam site” [los diseños estructurales serán tales que la presa pasará de manera segura una IED [Inundación de entrada de diseño] calculada a partir de la precipitación máxima probable (PMP) que se produce sobre la cuenca hidrográfica sobre el sitio de la presa] (USACE, 1991). Para la tercera más estricta presa de Estándar 3, “the base safety standard will be met when a dam failure related to hydraulic capacity will result in no measurable increase in population at risk and a negligible increase in property damages over that which would have occurred if the dam had not failed” [la norma de seguridad básica se cumplirá cuando una falla de la presa relacionada con la capacidad hidráulica resulte en un aumento no medible de la población en riesgo y un aumento insignificante en los daños a la propiedad por encima de lo que habría ocurrido si la presa no había fallado] (USACE, 1991). Para las presas de Estándar 3, “one-half of the PMF is the minimum acceptable IDF” [la mitad de la IMP es la IED mínima aceptable] (USACE, 1991).

Las directrices de la Canadian Dam Association (2013) incluyen cinco clases de presas, clasificadas según las consecuencias de falla. El riesgo para cualquier población permanente coloca a una presa en las tres categorías de mayor consecuencia, en las que las categorías de consecuencia de Alta, Muy Alta y Extrema corresponden a muertes esperadas de diez o menos, 100 o menos, y más de 100, respectivamente. Las directrices consideran los criterios de diseño de inundaciones y terremotos basados tanto en un enfoque informado por riesgo como un enfoque tradicional, basado en estándares. De acuerdo con el enfoque basado en el riesgo, la probabilidad de excedencia anual mínima de la inundación de diseño o el terremoto de diseño en la categoría de Alta consecuencia debe ser  $1/2475$  (correspondiente a un período de retorno de 2475 años), mientras que la probabilidad de excedencia anual mínima en las categorías de Muy Altas o Extremas consecuencias deben ser  $1/10.000$  (correspondiente a un período de retorno de 10.000 años). Según el enfoque tradicional, basado en estándares, para una presa en la categoría de Alta consecuencia, la inundación de diseño debe ser  $1/3$  entre la inundación de 1.000 años y la IMP, mientras que el terremoto de diseño debe estar el terremoto de 2.475 años. Para la categoría de Muy Alta consecuencia, la inundación de diseño debe ser  $2/3$  entre la inundación de 1.000 años y el IMP, mientras que el terremoto de diseño debe estar a medio camino entre el terremoto de 2.475 años y el terremoto de 10.000 años o el TMC. Para una presa en la categoría de Extrema consecuencia, la inundación de diseño debe ser la IMP, mientras que el terremoto de diseño debe ser el terremoto de 10.000 años o el TMC. La aplicación a las presas de relaves sigue el enfoque basado en estándares y hace las mismas recomendaciones (Canadian Dam Association, 2019).

Siguiendo las directrices de la Canadian Dam Association (2013), si no hay riesgo para una población permanente, la categoría de consecuencia de falla es Baja si no hay ningún riesgo y Significativa si sólo hay riesgo para una población temporal. Otros aspectos de la categoría de consecuencia de falla Significativa son “ninguna pérdida o deterioro significativo del hábitat de peces o vida silvestre”, “pérdida de hábitat marginal únicamente”, “restauración o compensación en especie muy posible” y “pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte de uso poco frecuente”. De acuerdo con el enfoque basado en el riesgo, la probabilidad de excedencia anual mínima de la inundación de diseño o el terremoto de diseño en la categoría de consecuencia Significativa debe ser 1/1000 (correspondiente a un período de retorno de 1000 años). De acuerdo con el enfoque tradicional basado en estándares, para una presa en la categoría de consecuencia Significativa, la inundación de diseño debe estar entre la inundación de 100 años y la inundación de 1000 años, mientras que el terremoto de diseño debe estar entre el terremoto de 100 años y el terremoto de 1000 años. Al igual que antes, la aplicación a las presas de relaves sigue el enfoque basado en estándares y hace las mismas recomendaciones (Canadian Dam Association, 2019).

El reciente La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves (Morrill et al., 2020) generalmente sigue las directrices de las agencias gubernamentales de los EE. UU. al pedir el diseño para los IMP y TMC si existe la pérdida potencial de una sola vida y para la inundación de 10.000 años y el terremoto de 10.000 años (probabilidad de excedencia anual del 0,01 %) en caso contrario. La excepción es que, debido al daño ambiental generalizado que puede resultar del drenaje ácido de mina, las presas que almacenan relaves que son generadoras de ácido potenciales (GAP) también deben diseñarse para el IMP y TMC (Morrill et al., 2020). El reciente Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (EGGRIM) (ICMM-UNEP-PRI, 2020) se basa en las directrices de la Canadian Dam Association (2013, 2019) con cinco categorías de consecuencias de fallas de presas en las que Alta, Muy Alta y Extrema se refieren a pérdidas potenciales de 1-10, 10-100 y más de 100 vidas, respectivamente. La categoría de consecuencia de falla Significativa es similar a la de la Canadian Dam Association (2013), pero no especifica una población temporal en riesgo y también incluye “Potencial contaminación del suministro de agua para ganado o fauna sin efectos en la salud. Aguas de proceso de baja toxicidad potencial. Relaves sin potencial generación de ácido y con bajo potencial de lixiviación neutra. Restauración posible en un plazo de 1 a 5 años ... Interrupción significativa de actividades económicas y servicios, o desintegración del tejido social. Baja probabilidad de pérdida de patrimonio o bienes comunitarios, culturales o recreativos regionales. Baja probabilidad de efectos en

la salud”, así como pérdidas económicas menores a EE. UU. \$10 millones (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Según ICMM-UNEP-PRI (2020), las presas de relaves en las categorías de Significativa, Alta, Muy Alta y Extrema consecuencia deben diseñarse para resistir la inundación de 1000 años, la de 2475 años, la de 5.000 años y la de 10.000 años, respectivamente, así como terremotos con los mismos períodos de retorno. Notar la dificultad de comparar diferentes estándares de inundaciones de diseño y de terremotos de diseño debido a los diferentes usos de “potencial”, “probable” y “esperado” con respecto a la pérdida de vidas.

Aunque los dos estándares recientes anteriores buscan reconocimiento como estándares globales, todavía no existe ninguna agencia reguladora gubernamental que haya adoptado estos estándares. Por otro lado, Morrill et al. (2022) ha sido aprobado por 158 organizaciones civiles y naciones tribales, así como por un partido político español, y el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) espera que sus 28 empresas miembros implementen el EGGRIM antes de agosto de 2023 (ICMM-UNEP-PRI, 2020; ICMM, 2022). Bluestone Resources no es una Empresa Miembro del ICMM, pero cabe destacar que los miembros de la asociación incluyen el Canada Mining Innovation Council [Consejo de Innovación Minera de Canadá] (CMIC), la Mining Association of Canada [Asociación Minera de Canadá], la Prospectors and Developers Association of Canada [Asociación de Prospectores y Desarrolladores de Canadá] (PDAC) y el World Gold Council [Consejo Mundial del Oro] (ICMM, 2022).

De acuerdo con todas las directrices anteriores que son específicas para las presas de relaves, los criterios del terremoto de diseño y de la inundación de diseño son aún más estrictos después del cese del proyecto minero (durante la fase de cierre de la presa de relaves) que durante el proyecto minero. La lógica es que una presa de relaves que no se haya cerrado de manera segura permanecerá como un pasivo permanente y podría crear una región aguas abajo permanente que nunca podría ser habitada. Según la Canadian Dam Association (2019), las presas de relaves cerradas en la categoría de Alta consecuencia deberían poder resistir una inundación de 2/3 entre la inundación de 1.000 años y la IMP y un terremoto a medio camino entre el terremoto de 2.475 años y el terremoto de 10.000 años o el TMC. En otras palabras, una presa de relaves cerrada en la categoría de Alta consecuencia debe tener los mismos criterios de diseño contra inundaciones y sísmicos que una presa de relaves en operación en la categoría de Muy Alta consecuencia. Las presas de relaves cerradas en las categorías de Muy Alta y Extrema consecuencias deberían poder resistir tanto la IMP como el terremoto de 10.000 años o el TMC. Según el EGGRIM, las presas de relaves cerradas en todas las categorías de consecuencias deberían poder resistir la inundación de 10.000 años y el terremoto de 10.000 años (ICMM-UNEP-PRI, 2020). Este requisito se aplica incluso a las presas de relaves de Baja consecuencia, para las cuales una

falla no resultaría en pérdida de vidas, “efectos mínimos e interrupción ligera de las actividades económicas y medios de subsistencia ... ningún efecto medible sobre la salud humana ... ninguna alteración del patrimonio, o los bienes comunitarios, culturales o recreativos” (ICMM-UNEP-PRI, 2020). ANCOLD (2012) es aún más estricto al exigir que una presa de relaves cerrada sea capaz de resistir el TMC indefinidamente. Por otro lado, La Seguridad Ante Todo es cualitativamente diferente al requerir monitoreo, inspección y mantenimiento hasta que no haya modos de falla creíbles, es decir, hasta que la falla se vuelva físicamente imposible. De acuerdo con La Seguridad Ante Todo, “A tailings facility is safely closed when deposition of tailings has ceased and all closure activities have been completed so that the facility requires only routine monitoring, inspection and maintenance in perpetuity or until there are no credible failure modes ... Currently, there is no technology to ensure that an active tailings facility can be closed in such a way so as to withstand the PMF or MCE indefinitely without perpetual monitoring, inspection, and maintenance ... Given that operating companies will not exist long enough to accomplish perpetual monitoring, inspection, maintenance, and review, the operating company’s ability to eventually eliminate all credible failure modes must be a key consideration during the permitting process [Se considera que una obra de relaves está cerrada cuando ha cesado el depósito de relaves y se han completado todas las actividades de cierre, de manera que las instalaciones requieren solamente monitoreo de rutina, inspección y mantenimiento perpetuo o hasta que ya no existan modos creíbles de falla ... Actualmente, no existe tecnología adecuada para garantizar que instalaciones activas de relaves puedan cerrarse de modo para resistir la IMP o TMC de forma indefinida sin monitoreo, inspección y mantenimiento perpetuo ... En vista de que las empresas operadoras no permanecerán lo suficiente para lograr el monitoreo, la inspección, el mantenimiento y la revisión perpetua, la capacidad de las empresas operadoras para eliminar eventualmente todos los modos creíbles de falla debe ser una consideración clave durante el proceso de concesión de permisos” (Morrill et al., 2022). .

## D. Factor de Seguridad

Un análisis de estabilidad determina la tendencia de una presa o cualquier estructura de tierra a fallar por deslizamiento (o corte o hundimiento). Los parámetros de entrada para un análisis de estabilidad son las densidades y los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) de todos los

materiales que componen la presa de relaves, el depósito de relaves y la cimentación, así como la geometría de la estructura y las presiones de agua intersticial, incluida la posición del nivel freático dentro de la estructura. Un análisis de estabilidad produce un factor de seguridad FS, que es la relación entre la resistencia al corte de la presa y el esfuerzo cortante que actúa sobre la presa, de modo que  $FS = 1,00$  indica una presa al borde de la falla (Fell et al., 2015). En el método computacional de equilibrio límite, se supone que la falla ocurre cuando un bloque rígido se desliza sobre otro y se calcula el factor de seguridad promedio a lo largo de todas las posibles superficies de falla. Algunos paquetes de software asumen que las superficies de falla deben ser circulares, pero esta suposición no es necesaria. La superficie de falla con el valor más bajo del factor de seguridad se considera como la superficie de falla crítica a lo largo de la cual es más probable que ocurra la falla y su valor para el factor de seguridad se considera como el factor de seguridad de la presa. Un análisis de estabilidad estática evalúa la tendencia de una presa a fallar deslizándose por su propio peso sin perturbaciones externas, como un terremoto. La respuesta de una presa a un terremoto se simula mediante un análisis pseudoestático en el que el terremoto se reemplaza con una fuerza horizontal igual a la aceleración sísmica de diseño multiplicada por la masa de la presa multiplicada por un coeficiente sísmico (el cual representa la reducción en la aceleración que ocurre cuando las ondas sísmicas interactúan con materiales más blandos que el lecho rocoso).

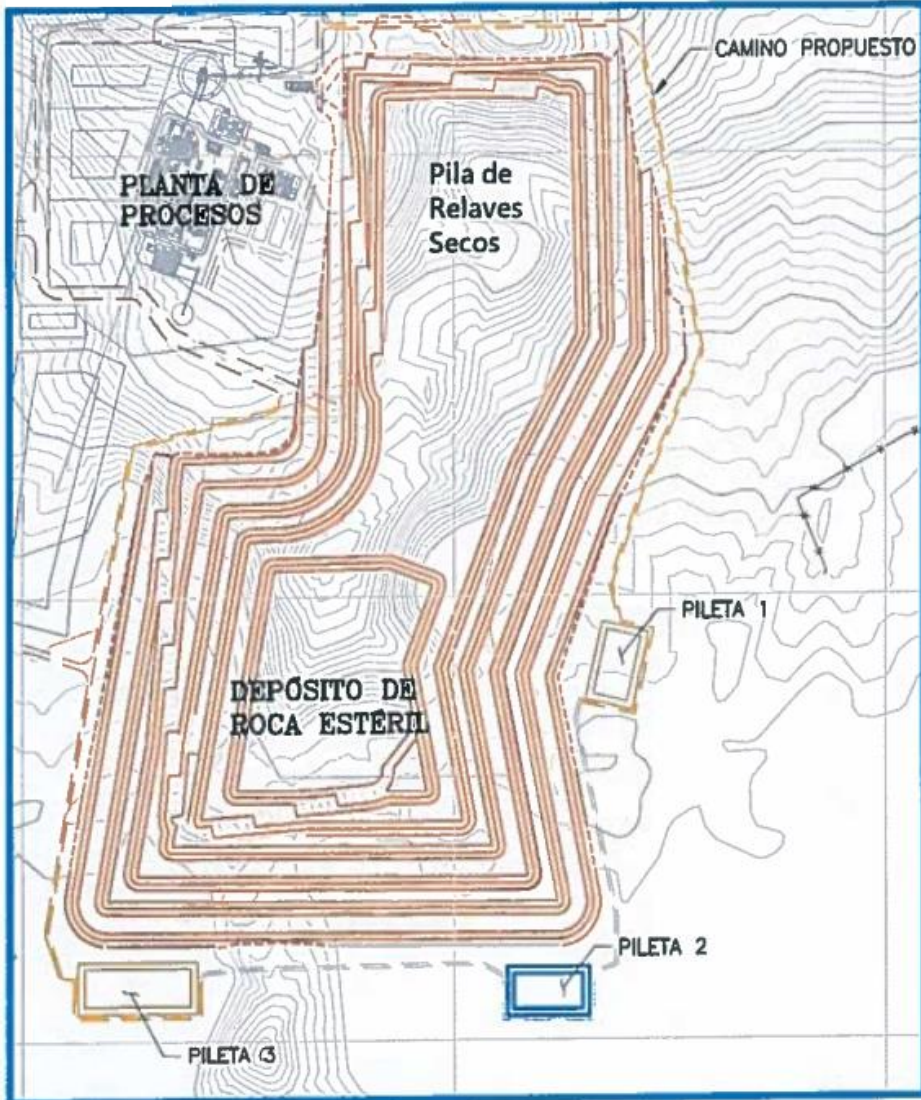
Es importante señalar que un análisis de estabilidad no es lo mismo que un análisis de riesgos ni una evaluación de riesgos (Vick, 2002; Morrison y Byler, 2022). Un análisis de riesgo considera todos los posibles modos de falla de la presa, no solo la falla por deslizamiento. Por ejemplo, como se mencionó anteriormente, una instalación de almacenamiento de relaves filtrados podría fallar por erosión del terraplén exterior o falla de la cimentación. Un análisis de estabilidad no evalúa los modos de falla anteriores, ni evalúa las circunstancias bajo las cuales los relaves sufrirán licuefacción. Un análisis de estabilidad también considera que una presa de relaves es sólo un objeto físico, mientras que un análisis de riesgo tiene en cuenta los factores humanos de cómo se diseña, construye, opera y mantiene la presa.

Muchos reglamentos y documentos de orientación en Canadá, EE. UU. y gran parte del resto del mundo han establecido  $FS = 1,5$  como el factor de seguridad estático mínimo para una presa de retención de agua o presa de relaves (USACE, 2003; USBR, 2011; Canadian Dam Association, 2013, 2019; Fell et al., 2015; Ministry of Energy and Mines (British Columbia) [Ministerio de Energía y Minas (Columbia Británica)], 2016). Muchos reglamentos y documentos de orientación requieren  $FS = 1,0$  para la estabilidad pseudoestática y  $FS = 1,2$  para la estabilidad estática posterior al terremoto (Canadian Dam Association, 2013, 2019; Ministry

of Energy and Mines (British Columbia), 2016), lo que significa que una presa de relaves debe ser marginalmente estable en respuesta al sismo de diseño y debe retener alguna medida de resistencia a un mayor deslizamiento después de que el sismo haya terminado. Los reglamentos brasileños exigen  $FS = 1,1$  para la estabilidad pseudoestática (ABNT, 2017; ANM, 2017), al igual que La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves. De acuerdo con Morrill et al. (2022), “Para la operación y cierre de una presa de relaves, un FS estático de 1.5 (en condiciones no sísmicas) y un FS pseudoestático de 1.1 (en respuesta al diseño antisísmico que establece que aún ante la aceleración sísmica más fuerte teóricamente posible, la presa tendría una resistencia de 10 % más de la fuerza de corte necesaria para evitar una falla) actualmente se consideran factores ‘conservadores’”.

No se puede enfatizar demasiado que el factor de seguridad no es una medición real, sino el resultado de un modelo, que depende de una amplia gama de suposiciones y mediciones, todas las cuales tienen varios grados de incertidumbre. En particular, los parámetros de resistencia al corte y las presiones intersticiales pueden variar mucho espacialmente, aunque sólo se pueden medir en un número limitado de ubicaciones. Por esta razón, muchos documentos de orientación (p. ej., ICMM, 2021) critican la dependencia excesiva del factor de seguridad como medida de riesgo y, en especial, critican los programas de mejora de la seguridad de las presas cuyo único objetivo es aumentar el factor de seguridad.

## Ubicación de Piletas del Botadero Este y Relaves Secos



Fuente: New Fields, 2021

Ilustración 9: Una sola instalación de almacenamiento de residuos mineros en la mina Cerro Blanco almacenaría 54,7 toneladas de relaves filtrados (llamados relaves “secos” en la figura arriba) y 145 toneladas de roca estéril.

La pila de relaves filtrados estaría en el extremo norte, mientras que el botadero de roca estéril estaría en el extremo sur, y también se usaría roca estéril para construir una presa alrededor de la pila de relaves filtrados (ver secciones transversales en Figs. 11a-c). Figura de Elevar Resources (2021).

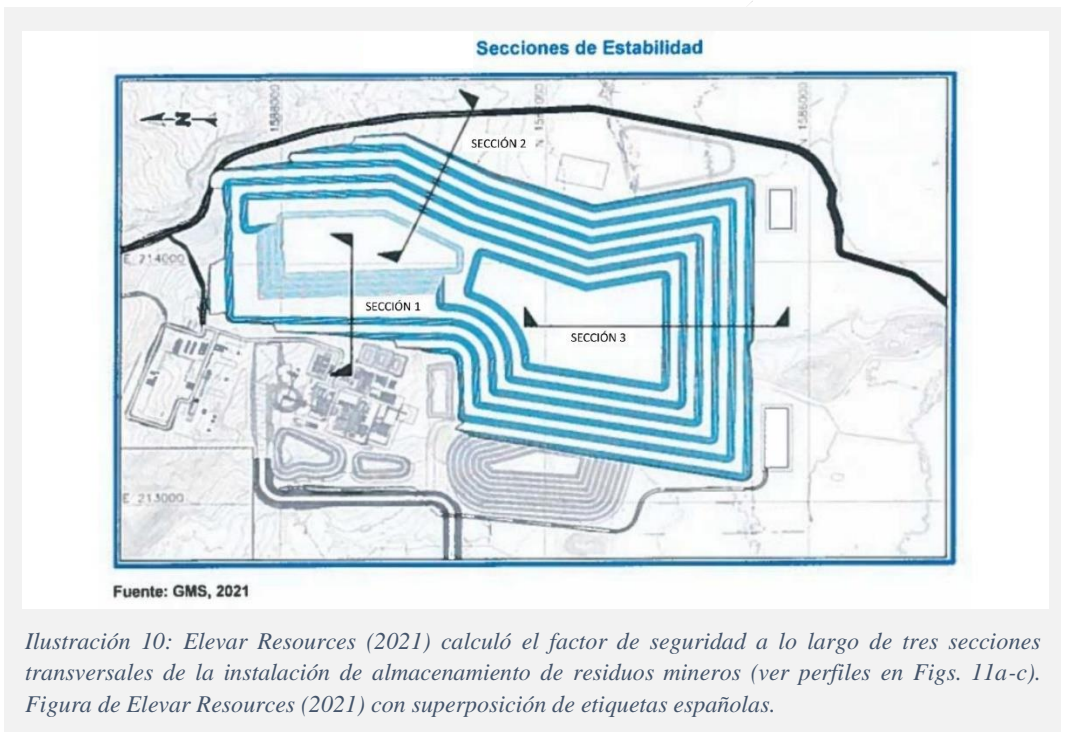
# IV. INSTALACIÓN DE ALMACENAMIENTO DE RELAVES FILTRADOS EN MINA CERRO BLANCO

La única instalación de almacenamiento de residuos mineros en la mina propuesta Cerro Blanco almacenaría relaves filtrados en el extremo norte y roca estéril en el extremo sur (ver Fig. 9). También habría un muro de roca estéril que rodea los relaves filtrados (ver Figs. 9, 10 y 11 a-c). Elevar Resources (2021) determinó que la roca estéril sería una generadora de ácido potencial (GAP), mientras que los relaves filtrados serían no generadores de ácido (NGA). La posibilidad de drenaje ácido de mina desde la roca estéril se abordaría mediante la separación de los relaves y la roca estéril, limitando el contacto entre la roca estéril y las aguas pluviales (aunque sería imposible limitar la precipitación sobre la roca estéril), y mezclando la roca estéril roca con caliza (Elevar Resources, 2021). De acuerdo con G Mining Services (2022), “no liner is included in the DSTF [Dry Stack Tailings Facility] design” [no se incluye revestimiento en el diseño de PRS [Pila de Relaves Secos]. Ni Elevar Resources (2021) ni G Mining Services (2022) mencionan la posibilidad de un revestimiento debajo de la roca estéril.

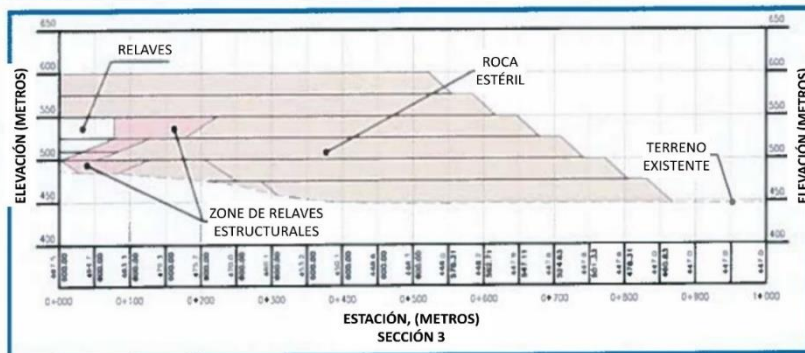
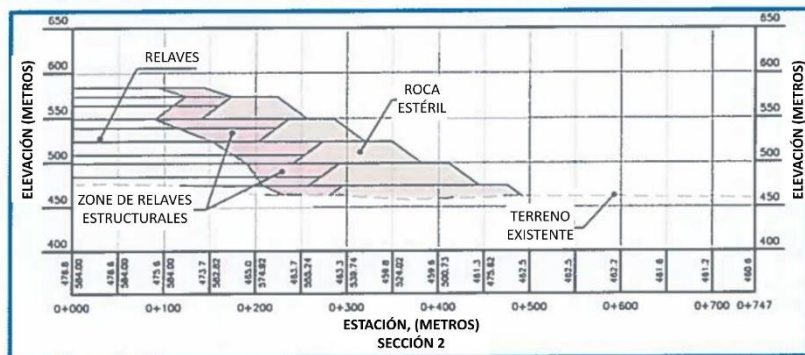
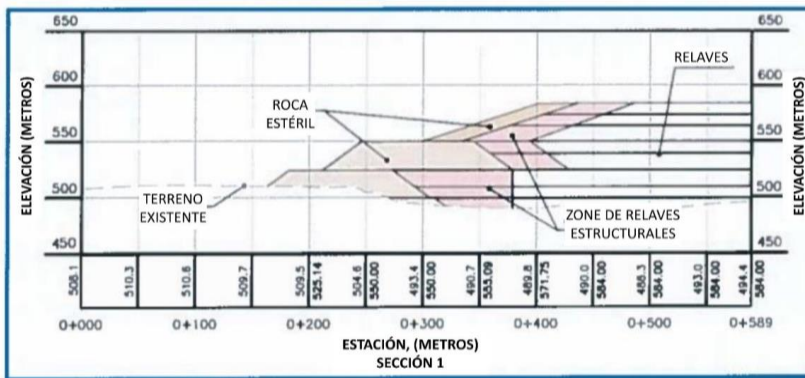
Hay algunas inconsistencias en la discusión del drenaje ácido de mina entre Elevar Resources (2021) y G Mining Services (2022). Elevar Resources (2021) afirma que la adición de piedra caliza a la roca estéril es la solución, mientras que G Mining Services (2022) ve la adición de caliza como sólo una de muchas posibilidades. De acuerdo con Elevar Resources (2021), “Con base en estos factores, se ha seleccionado agregar caliza como la forma más apropiada para controlar el drenaje ácido en Cerro Blanco”. Sin embargo, según G Mining Services (2022), “*Based on the results of chemical characterization of waste rock for the open pit, there is reasonable likelihood that a portion of the waste rock*



*will produce low pH, metal-bearing seepage that could affect receiving water quality. Potential mitigation measures will be evaluated and include addition of limestone to increase the neutralizing capacity of waste rock, as well as special handling of PAG rock to the extent feasible to limit oxidation of sulphide minerals”* [Con base en los resultados de la caracterización química de la roca estéril para el tajo abierto, existe una probabilidad razonable de que una porción de la roca estéril produzca una filtración de bajo pH que contenga metales que podría afectar la calidad del agua receptora. Se evaluarán las posibles medidas de mitigación e incluirán la adición de caliza para aumentar la capacidad de neutralización de la roca estéril, así como el manejo especial de la roca GAP en la medida de lo posible para limitar la oxidación de los minerales de sulfuro].



La instalación de almacenamiento de residuos mineros incluiría un sistema de canales que desviaría las aguas pluviales alrededor de la instalación con el almacenamiento de las aguas pluviales en tres piletas (ver Fig. 12). En este caso, el sistema de gestión de aguas pluviales tiene el doble propósito de limitar la rehidratación de los relaves y limitar la oxidación de los minerales generadores de ácido en la roca estéril.

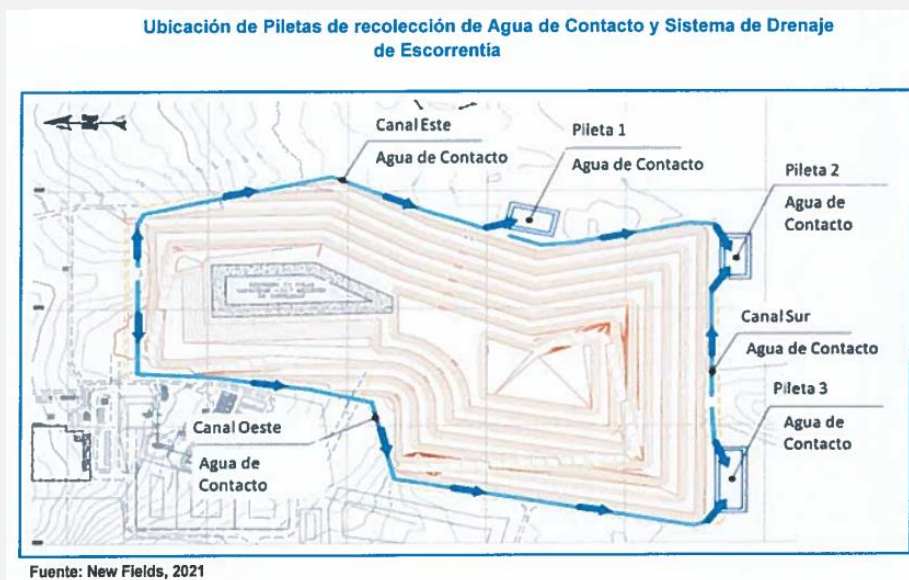


Fuente: GMS, 2021

Ilustración 11 a -c: La roca estéril actuaría como presa para la zona estructural, mientras que la zona estructural actuaría como presa para la zona no estructural (comparar con Fig. 7).

Las presas se construirían utilizando el método aguas arriba en el que la presa se coloca sobre el material que la presa está confinando. La ventaja del método aguas arriba es su bajo costo porque requiere una cantidad mínima de material de construcción. La desventaja es que, si los relaves subyacentes se licuan, la presa puede fallar al deslizarse sobre o caer dentro de los relaves licuados. Por esa razón, el método de construcción aguas arriba está prohibido en Brasil, Chile, Ecuador y Perú. En general, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados sería demasiado empinada, demasiado sueltamente empaquetada y demasiado húmeda en comparación con las normas de la industria minera. La inclinación del talud exterior de los relaves sería de 1V: 3H (1 m vertical por 3 m horizontales), la densidad seca de relaves sería de 1,5 toneladas por metro cúbico y el contenido de agua geotécnico sería del 15 al 20 %, en comparación con las normas de la industria minera de 1V: 3,5H, 1,9-2,6 toneladas por metro cúbico y 12-14 %, respectivamente. Ver la ubicación de la sección transversal en Fig. 10. Figura de Elevar Resources (2021) con superposición de etiquetas españolas.

La infraestructura de aguas pluviales sería diseñada para acomodar el agua de una tormenta de 100 años con una duración de 24 horas. Sobre esa base, en cualquier año dado, habría un 1 % de probabilidad de un desbordamiento descontrolado de agua de contacto (agua que entró en contacto con relaves o roca estéril). Elevar Resources (2021) informó sobre análisis de estabilidad bidimensional utilizando el método de equilibrio límite a lo largo de tres secciones transversales de la instalación de almacenamiento de residuos mineros (ver Figs. 10 y 11a-c).



*Ilustración 12: Un sistema de canales desviaría las aguas pluviales alrededor de la instalación de almacenamiento de residuos mineros con el almacenamiento de las aguas pluviales en tres piletas. La infraestructura de aguas pluviales se diseñaría para acomodar el agua de una tormenta de 100 años con una duración de 24 horas. Sobre esa base, en cualquier año dado, habría un 1 % de probabilidad de un desbordamiento descontrolado de agua de contacto (agua que entró en contacto con relaves o roca estéril). Es muy importante que no se haya considerado la inundación de diseño, es decir, el período de retorno de la tormenta que provocará el colapso de la instalación de almacenamiento de residuos mineros. Notar que la flecha norte apunta hacia la izquierda en la figura. Figura de Elevar Resources (2021)*

Para el análisis de estabilidad bajo la condición pseudoestática (carga en respuesta al terremoto de diseño), se eligió un terremoto de diseño con un período de retorno en el rango de 475-1000 años (correspondiente a la probabilidad de excedencia anual en el rango de 0,1-0,21 %). En respuesta al terremoto de diseño,

los factores de seguridad fueron iguales a 1,0 a lo largo de la Sección 3 (principalmente en el botadero de roca estéril del sur) y menores a 1,0 en las Secciones 1 y 2 (principalmente a través de la pila de relaves filtrados con una presa de roca estéril) (ver Figs. 10, 11a-c y 13). En otras palabras, Elevar Resources (2021) predijo que el botadero de roca estéril estará al borde de la falla en respuesta al terremoto de diseño, mientras que la pila de relaves filtrados definitivamente fallará. Dado que Elevar Resources (2021) no indica los valores reales de los factores de seguridad menores a 1,0 (ver Fig. 13), se desconoce el terremoto por el cual colapsará la pila de relaves filtrados, aunque será menor y ocurrirá más frecuentemente que el terremoto de diseño. Un procedimiento más significativo habría sido reducir la aceleración sísmica impuesta hasta que el factor de seguridad fuera igual o superior a 1,0 a lo largo de todas las secciones transversales, lo que habría indicado el límite sísmico real. Para las tres secciones transversales (ver Figs. 10 y 11a-c), Elevar Resources (2021) informó factores de seguridad de 2,2, 2,0 y 1,8 bajo carga estática (ver Fig. 13), que son considerablemente mayores que el factor de seguridad mínimo típico de 1,5. Se proporcionará más información sobre la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco en la sección Resultados.

## V. METODOLOGÍA

Con base en las secciones anteriores, el objetivo de este informe se puede subdividir en las siguientes preguntas con respecto a la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina propuesta Cerro Blanco:

- 1) ¿Ha habido un análisis adecuado de las consecuencias de la falla de la instalación de relaves?
- 2) ¿Ha habido una elección correcta para la inundación de diseño?
- 3) ¿Ha habido una elección correcta para el terremoto de diseño?
- 4) ¿La propuesta incluye un método de construcción apropiado para este tipo de instalaciones?
- 5) ¿Existe un plan adecuado para la prevención de la licuefacción?
- 6) ¿Se han realizado correctamente los análisis de estabilidad estática y pseudoestática?

7) ¿Está la propuesta suficientemente fundamentada en la tecnología actualmente disponible?

**Resumen de los Factores Calculados de Seguridad**

Sección	Escenario de Carga	Factor de Seguridad
<b>1 (Depósito de Relaves - DSTF)</b>	Estático	2.2
	Pseudoestático	<1.0
	Post-terremoto	1.2
<b>2 (Depósito de Relaves - DSTF)</b>	Estático	2.0
	Pseudoestático	<1.0
	Post-terremoto	1.3
<b>3 (Depósito de roca estéril - WRSF)</b>	Estático	1.8
	Pseudoestático	1.0

Fuente: GMS, 2021

*Ilustración 13: Para las tres secciones transversales (ver Figs. 10 y 11a-c), Elevar Resources (2021) calculó factores de seguridad de 2,2, 2,0 y 1,8 en condiciones estáticas, y factores de seguridad menores o iguales a 1,0 en condiciones pseudoestáticas (correspondiente a la carga sísmica en respuesta al terremoto de diseño). La figura arriba indica que el factor de seguridad será inferior a 1,0 para las Secciones 1 y 2 (la pila de relaves filtrados; ver Figs. 9 y 10), pero no indica el valor real calculado para el factor de seguridad. Por lo tanto, se desconoce el terremoto por el cual colapsará la pila de relaves filtrados, aunque será menor que el terremoto de diseño, el cual tiene un período de retorno de 475 años (correspondiente a una probabilidad de excedencia anual de 0,21 %). El procedimiento correcto habría sido reducir la aceleración sísmica impuesta hasta que el factor de seguridad fuera igual o mayor a 1,0 a lo largo de todas las secciones transversales, lo que habría indicado el límite sísmico real. Los factores de seguridad estáticos superan el factor de seguridad estático mínimo típico de 1,5. Sin embargo, el cálculo de los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos sólo usó parámetros geotécnicos supuestos sin mediciones reales (ver Fig. 15). Además, Elevar Resources (2021) asumió sin justificación que ninguna superficie de falla podría atravesar la cimentación. La deficiencia más importante es que Elevar Resources (2021) asumió que no habría nivel freático dentro de la pila de relaves filtrados. En otras palabras, se asumió que todos los relaves estarían no saturados. Sin embargo, debido a la consolidación de los relaves por el peso de los relaves suprayacentes (lo que reduce el tamaño de los poros), es muy común que los niveles freáticos se eleven entre un tercio y la mitad de la altura de la pila de relaves filtrados (ver Fig. 16). Figura de Elevar Resources (2021).*

En general, todas las preguntas se abordaron mediante la comparación de la información en el EIS (Elevar Resources, 2021) y el Informe Técnico NI 43-101 (G Mining Services, 2022) con reglamentos internacionales y documentos de orientación ampliamente reconocidos, así como las mejores prácticas actuales en la industria minera.

Las consecuencias de la falla se abordaron utilizando el modelo estadístico más reciente de fallas pasadas de presas de relaves (Larrauri y Lall, 2018). El modelo estadístico predice la escorrentía inicial de relaves después de la falla de

la presa. La escorrentía inicial es la distancia cubierta por los relaves debido a la liberación de energía potencial gravitacional a medida que los relaves caen del depósito de relaves. Después del cese de la escorrentía inicial, los procesos fluviales normales podrían transportar los relaves aguas abajo indefinidamente hasta que los relaves lleguen a un lago importante o al océano. Cuando la escorrentía inicial llega a un río importante, como sucedería en la falla de la presa de relaves de la mina Cerro Blanco, puede ser difícil separar la escorrentía inicial de los procesos fluviales normales posteriores. Por ejemplo, la falla de la presa de relaves en la mina Samarco en Minas Gerais, Brasil, derramó relaves en el río Doce, por lo que la escorrentía inicial se extendió 637 kilómetros hasta el Océano Atlántico (Larrauri y Lall, 2018).

Según (Larrauri y Lall, 2018), el mejor predictor de la escorrentía inicial de relaves liberados es el factor de presa  $H_f$ , definido como

$$H_f = H(V_F/V_T) V_F \quad (1)$$

donde  $H$  es la altura de la presa (metros),  $V_T$  es el volumen total de relaves y agua encerrados (millones de metros cúbicos) y  $V_F$  es el volumen del derrame (millones de metros cúbicos). Las predicciones más probables para el volumen del derrame y la escorrentía inicial  $D_{max}$  (kilómetros) son entonces

$$V_F = 0.332 \times V_T^{0.95} \quad (2)$$

$$D_{max} = 3.04 \times H_f^{0.545} \quad (3)$$

Cabe señalar que las Ecs. (2) - (3) expresan las consecuencias más probables de la falla de la presa. En particular, la consecuencia más probable es que la falla de la presa resultará en la liberación de aproximadamente un tercio de los relaves almacenados (ver Ec. (2)). Sin embargo, el peor escenario es que la falla de la presa resultará en la liberación del 100 % de los relaves almacenados, para lo cual hay ejemplos (Larrauri y Lall, 2018). Por lo tanto, la escorrentía del peor escenario ( $V_F = V_T$ ) debe calcularse utilizando la Ec. (3) con

$$H_f = H V_F \quad (4)$$

Como se discutió en la subsección Tecnología de Relaves Filtrados, la principal limitación en la construcción de instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados en la actualidad es la gestión del impacto de la precipitación. Por lo tanto, la base de la tecnología actual se evaluó trazando los parámetros de altura, volumen de almacenamiento de relaves y tasa de producción de relaves

para las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados existentes en función de la precipitación media anual. El límite tecnológico actual estaba constreñido por una línea recta que conectaba los parámetros en los extremos inferior y superior de la precipitación media anual. Se obtuvieron alturas, volúmenes de almacenamiento y precipitación media anual para 74 instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados en el Proyecto Global del Portal de las Presas de Relaves (Franks et al., 2021; GRID-Arendal, 2022). La altura y el volumen de almacenamiento de la instalación fallada en la mina Pau Branco fueron obtenidos de la ANM (2022). Las tasas de producción de relaves y la precipitación media anual se obtuvieron para 22 instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados de Klohn Crippen Berger (2017). Se obtuvieron tasas de producción de relaves para 12 instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados de Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022) con superposición de 11 instalaciones con las disponibles en Klohn Crippen Berger (2017). Para las instalaciones superpuestas, se utilizaron las tasas de producción de relaves más recientes de Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022). La precipitación media anual se determinó a partir de Fick y Hijmans (2017) para todos los lugares para los que no figuraba en Klohn Crippen Berger (2017), Franks et al. (2021) ni la ANM (2022). Dado que una compilación actualizada de las tasas de producción de relaves en las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados no está disponible en ningún otro lugar, esta información se proporciona en la Tabla 1.

*Tabla 1: Instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados con tasas conocidas de producción de relaves.*

		(mm)		
		2017 <sup>2</sup>	2022 <sup>3</sup>	
Alamo Dorado	México	4000	3500	800
Bellekeno	Canadá	188		280
Catalina Huanca	Perú	2000	1850	854
Cerro Lindo	Perú	6480	5000	200
Efeñçukuru	Turquía	700	1500	740
El Indio	Chile		3000	12
El Peñon	Chile	4200	3500	50
El Sauzal	México	5770	5300	800
El Toqui	Chile	1725		1480
Éléonore	Canadá	4000		720
Escobal	Guatemala	1528		1689
Gold Road	EE. UU.	500		261
Greens Creek	EE. UU.	750	1500	1450
Karara	Australia	35000	50000	310
La Coipa	Chile	18000	20000	9
Mantos Blancos	Chile	12000	12000	50
Marlin	Guatemala	6000		1136
Meliadine	Canadá	5000		412
Minto	Canadá	3800		250
Pogo	EE. UU.	1360	2500	356
Raglan	Canadá	3520		520
San Dimas	México	2500		87
Skorpion Zinc	Namibia	5040		20

<sup>1</sup>Datos de Klohn Crippen Berger (2017), Fick y Hijmans (2017), y Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022), <sup>2</sup>Datos de Klohn Crippen Berger (2017), <sup>3</sup>Datos de Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022)

# VI. RESULTADOS

## A. Adecuación del Análisis de las Consecuencias de la Falla de Presa

La única discusión de las consecuencias de la falla de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en el EIA (Elevar Resources, 2021) o el Informe Técnico (G Mining Services, 2022) es la declaración en el EIS que “los criterios de diseño aplicados por eventos sísmicos se basan en la clasificación de amenaza de presas (Tabla 2-1) y en los lineamientos de la Asociación Canadiense de Presas (CDA, por sus siglas en inglés). Para una clasificación de amenaza significativa, la recomendada aceleración sísmica para diseño [es] para el evento sísmico extremo del periodo de 475 años y 1,000 años”. La Tabla 2-1 en Elevar Resources (2021) no incluye ninguna información sobre las consecuencias de la falla. De hecho, no se justifica la elección de la categoría de consecuencia de falla Significativa en ninguna parte del EIA (Elevar Resources, 2021). Como posible impacto del proyecto, el EIA enumera “riesgo de deslizamiento de materiales durante sismos, fuertes lluvias o mal acomodamiento de materiales” (Elevar Resources, 2021). El EIA (Elevar Resources, 2021) continúa que dicho deslizamiento será prevenido por “desarrollo de estudios geotécnicos para la evaluación del terreno respecto a su estabilidad y condición geotécnica” y “Implementación de sistema de acelerógrafos para el monitoreo de parámetros geológicos, geotécnicos y estructurales. Desarrollar evaluaciones periódicas respecto a la estabilidad estructural y seguridad de la instalación”.

Dado que las consecuencias de la falla de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados no se analizan de manera seria en ninguno de los documentos disponibles, aquí se proporcionará una evaluación preliminar. Para revisión, de acuerdo con las directrices de la Canadian Dam Association (2013, 2019), la clasificación Significativa implica sólo una población temporal en riesgo, “ninguna pérdida o deterioro significativo del hábitat de peces o vida silvestre”, “pérdida de hábitat marginal únicamente”, “restauración o compensación en especie muy posible” y “pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte de uso poco frecuente” (Canadian Dam Association, 2013). Por lo tanto, se preguntará si los criterios anteriores son apropiados o si el contexto social y ambiental de la instalación de almacenamiento



de relaves filtrados en la mina propuesta Cerro Blanco debería merecer una categoría de consecuencia más severa.

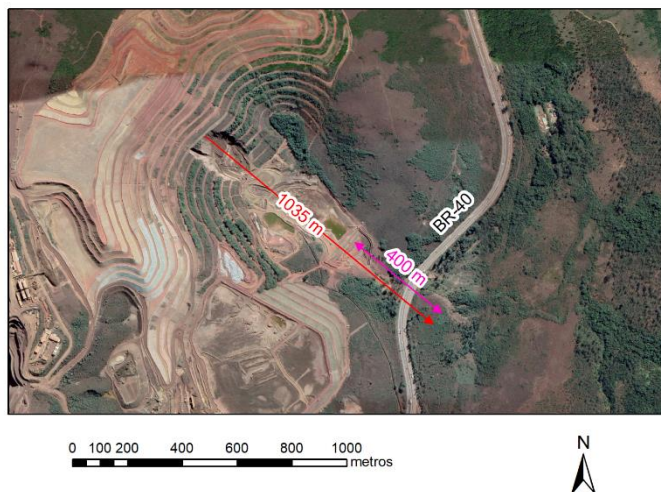
El primer paso es considerar si habrá una población permanente en riesgo en caso de falla de la instalación de relaves. Como se mencionó anteriormente, incluso sin licuefacción, un deslizamiento de una pila de relaves filtrados puede extenderse aproximadamente diez veces la altura de la pila (Klohn Crippen Berger, 2017). Tal afirmación ahora se puede probar con base en el deslizamiento desde la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco en Brasil el 8 de enero de 2022 (ver Fig. 8). El deslizamiento de tierra no causó fatalidades, pero enterró la Carretera BR-40 (ver Figs. 14a-b; Angelo, 2022; Morrill, 2022; Petley, 2022). Basado en videos de drones (Observatório da Mineração [Observatorio Minero], 2022) y un ancho de carretera de 27 metros medido desde Google Earth, el deslizamiento se extendió por 104 metros más allá del borde más alejado de la carretera (ver Fig. 14a). Por lo tanto, el deslizamiento se extendió por 1035 metros más allá de la escarpa del deslizamiento, incluidos 400 metros más allá del pie de la pila de relaves filtrados (ver Fig. 14b). Dado que la pila de relaves filtrados tenía 48 metros de altura (ANM, 2022), la estimación de Klohn Crippen Berger (2017) es bastante razonable, ya sea que se base en la distancia desde el inicio del deslizamiento o la distancia desde el pie de la pila de relaves filtrados.

El pueblo de Trapiche Vargas, con cientos de viviendas, está ubicado a solo 395 metros de pendiente abajo desde el borde de la instalación de almacenamiento de relaves filtrada propuesta (ver Fig. 3). Dado que un deslizamiento desde la instalación de almacenamiento de relaves filtrados podría extenderse por 1750 metros (diez veces la altura de la pila de 175 metros) incluso sin licuefacción, todo el pueblo podría quedar enterrada fácilmente por una falla en la instalación de relaves. Dado que se perderán potencialmente más de 100 vidas en caso de falla de la instalación de relaves, la categoría de consecuencia debe ser Extrema de acuerdo con las directrices de la Canadian Dam Association (2013, 2019) o el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (ICMM-UNEP-PRI, 2020). El potencial de peligro debe ser Alto de acuerdo con las directrices de las agencias reguladoras de los EE. UU., las cuales no reconocen ninguna consecuencia más extrema que la pérdida de una sola vida (USACE, 1991, 2014; FEMA, 2013). G Mining Services (2022) sí menciona que “The Cerro Blanco Gold Project is situated in proximity to a number of communities” [El Proyecto de Oro Cerro Blanco está situado en las proximidades de varias comunidades]. Sin embargo, no discute el significado de esa observación, excepto para señalar que “there is a potential risk of socio-political opposition in the local communities” [existe un riesgo potencial de oposición sociopolítica en las comunidades locales].



Ilustración 14a: Basado en el ancho de la carretera de 27 metros, el deslizamiento en la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco en Brasil el 8 de enero de 2022 (ver Fig. 8), se extendió por 104 metros más allá de la Carretera BR-40. El ancho de la carretera se midió a partir de una imagen de Google Earth del 29 de junio de 2022 (ver Fig. 14b). Imagen fija a las 0:38 del video del dron (Observatório da Mineração [Observatorio Minero], 2022).

Ilustración 14b: El deslizamiento en la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco en Brasil el 8 de enero de 2022 (ver Fig. 8), se extendió por 1035 metros más allá de la escarpa de deslizamiento, incluidos 400 metros más allá del pie de la pila de relaves filtrados. Con base en la altura de la pila de relaves filtrados de 48 metros (ANM, 2022), la observación anterior es consistente con la afirmación de Klohn Crippen Berger (2017) de que, para las instalaciones de almacenamiento de relaves



filtrados, “la falla, si ocurre, probablemente sería un deslizamiento local y las consecuencias estarían restringidas al área local (o la distancia equivalente a aproximadamente 10 veces la altura)”. El fondo es una imagen de Google Earth del 29 de junio de 2022.

Aunque ya se ha establecido la categoría de consecuencia de falla correcta de Extremo, un segundo paso útil es considerar la posibilidad del desarrollo del comportamiento del flujo después de mezclar los relaves derramados con los cuerpos de agua río abajo. Un deslizamiento de sólo 103 metros introducirá los relaves derramados en la quebrada El Marial (ver Fig. 3). Hay muchos otros puntos de entrada a cuerpos de agua río abajo dentro de cientos de metros de la pila de relaves filtrados en la quebrada El Marial, la quebrada San Francisco o la quebrada Tempisque (ver Fig. 3). Desde cualquiera de estas quebradas, los relaves derramados fluirán al río Tancushapa y luego al río Ostúa, desde donde fluirán a El Salvador con su depósito final en el Lago de Guija (ver Figs. 2-3). Insertando  $H = 175$  metros y  $VF = 36,5$  millones de metros cúbicos en las Ecs. (1)-(4) produce un volumen de derrame más probable de  $VF = 10,1$  millones de metros cúbicos, una escorrentía más probable de 80 kilómetros y una escorrentía del peor escenario de 178 kilómetros. Dado que la distancia prevista supera con creces la distancia al Lago de Guija de 16,3 kilómetros (ver Fig. 2), se debe esperar que los relaves derramados lleguen al Lago de Guija durante el evento de falla inicial.

No ha habido muchas mediciones de las velocidades de los deslizamientos de flujo de relaves, pero han oscilado entre 20 y 160 kilómetros por hora (Jeyapalan, 1981). Según Petley (2019), el deslizamiento de flujo de relaves luego de la reciente falla de presa en la mina Córrego do Feijão en Brasil en 2019 se aceleró a 120 kilómetros por hora y luego se desaceleró a 66 kilómetros por hora. Con base en la estimación mínima de 20 kilómetros por hora, la inundación de relaves llegará al río Ostúa en un máximo de 12 minutos (después de un recorrido de 4,0 kilómetros), a la frontera con El Salvador en un máximo de 31,5 minutos (después de un recorrido de 10,5 kilómetros) y al Lago de Guija en un máximo de 49 minutos (después de un recorrido de 16,3 kilómetros) (ver Fig. 2). A una distancia de 395 metros, el pueblo de Trapiche Vargas (ver Fig. 3) quedará enterrado en poco más de un minuto. De la misma manera, los relaves derramados ingresarán a uno de los cuerpos de agua vecinos en menos de un minuto (ver Fig. 3).

## **B. Adecuación de la Inundación de Diseño**

Se ha mencionado que la instalación de almacenamiento de residuos mineros incluiría un sistema de canales y piletas de almacenamiento que serían diseñadas para acomodar las aguas pluviales de una tormenta de 24 horas con un período de retorno de 100 años (ver Fig. 12). Sin embargo, no existe una verdadera

“inundación de diseño” porque no se tiene en cuenta la inundación ni el evento de precipitación en particular que podría causar el colapso de la pila de relaves filtrados, a pesar de que Elevar Resources (2021) identificó un “riesgo de deslizamiento de materiales durante ... fuertes lluvias”. Debería ser obvio que la elección de la inundación de 100 años como la inundación de diseño debería ser lamentablemente inadecuada. Dado que la falla de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco resultará en la pérdida probable de vidas humanas, debe diseñarse para resistir la Inundación Máxima Probable (IMP) según las directrices de las agencias gubernamentales de EE. UU. (USACE, 1991, 2014; FEMA, 2013) y La Seguridad Anté Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves (Morrill et al., 2022). Dado que se esperaría una pérdida de más de 100 vidas, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados debería estar en la categoría de consecuencia Extrema de la Canadian Dam Association y debería diseñarse una vez más para resistir la IMP (Canadian Dam Association, 2019). Dado que habría una pérdida potencial de más de 100 vidas, la presa de relaves debe diseñarse para resistir la inundación de 10.000 años, de acuerdo con los estándares menos protectores de ICM-UNEP-PRI (2020).

En este punto, es apropiado comenzar a discutir los criterios de seguridad más estrictos que se establecen en el Informe Técnico para inversores (G Mining Services (2022)). A diferencia del EIS (Elevar Resources, 2021), el Informe Técnico establece la IMP como el “flood handling requirement” [requisito de manejo de inundaciones] (G Mining Services, 2022). De acuerdo con G Mining Services (2022), “Given the proximity of the site to two water courses - Quebrada Tempisque and Rio Tancushapa - a floodplain analysis was performed for the 100-year flood and probable maximum flood (PMF) events, calculated on the probable maximum precipitation (PMP) depth of 450 mm. Two flood protection berms were considered to divert the water in case of a flood event. Optimized culvert sizing will be performed in the detailed engineering phase” [Dada la proximidad del sitio a dos cursos de agua, quebrada Tempisque y río Tancushapa, se realizó un análisis de planicies de inundación para los eventos de inundación de 100 años y de inundación máxima probable (IMP), calculado sobre la profundidad de precipitación máxima probable (PMP) de 450 mm. Se consideraron dos bermas de protección contra inundaciones para desviar el agua en caso de un evento de inundación. El dimensionamiento optimizado de la alcantarilla se realizará en la fase de ingeniería de detalle]. Sin embargo, G Mining Services (2022) aún no considera el posible impacto de fuertes lluvias directamente sobre la pila de relaves filtrados, que fue la causa probable de la falla de la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco (ver Figs. 8 y 14a- b) (Morrill, 2022; Petley, 2022). Según Petley (2022), “[the failure of the filtered tailings stack

at the Pau Branco mine] was probably a rotational landslide that fluidised into a flow” [[la falla de la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco] probablemente fue un deslizamiento de tierra rotacional que se fluidificó en un flujo]. Notar que el uso de la frase “se fluidificó” implica que la licuefacción realmente ocurrió.

## C. Adecuación del Terremoto de Diseño

El EIS (Elevar Resources, 2021) determinó que el terremoto de diseño estaría en algún lugar entre el terremoto de 475 años y el terremoto de 1000 años. De acuerdo con Elevar Resources (2021), “La Sismicidad regional se resume por el estudio realizado por Terrapro (2020) para evaluar las condiciones sísmicas en el área del proyecto ... Para una clasificación de amenaza significativa, la recomendada aceleración sísmica para diseño para el evento sísmico extremo del periodo de 475 años y 1,000 años. La reciente SHA [Evaluación del Peligro Sísmico] indica que el pico de aceleración máximo para el evento de los 475 años es 0.40g y para el evento de los 1,000 años es aproximadamente 0.5g. Sobre esta base, las evaluaciones de estabilidad consideró un pico de aceleración máximo de 0.45g”. En otras palabras, la aceleración sísmica de diseño está a mitad de camino entre la aceleración máxima del terreno para el terremoto de 475 años y la aceleración máxima del terreno para el terremoto de 1000 años. No se puede suponer que la aceleración de diseño de 0,45 g corresponde a un período de retorno de 737,5 años (promedio de 475 años y 1000 años), ya que la aceleración máxima del terreno no es una función lineal del período de retorno. Ya se ha señalado en la sección Instalación de Almacenamiento de Relaves Filtrados en la Mina Cerro Blanco que las pilas de relaves filtrados en realidad serán inestables a la aceleración sísmica de diseño ( $FS < 1.0$ ; ver Fig. 13), por lo que se desconoce el límite sísmico real.

Al igual que con la inundación de diseño, debería ser obvio que la elección de un terremoto en algún lugar entre el terremoto de 475 años y el terremoto de 1000 años como terremoto de diseño debería ser lamentablemente inadecuada. Dado que la falla de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco resultará en la pérdida probable de vidas humanas, debe diseñarse para resistir el Terremoto Máximo Creíble (MCE) con base en los estándares de las agencias gubernamentales de EE. UU. (FEMA, 2005; USACE, 2014, 2016) y La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves. (Morrill et al., 2022). Dado que habría una pérdida

esperada de más de 100 vidas, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados debe estar en la categoría de consecuencia Extrema de la Canadian Dam Association y debe ser diseñada para resistir el terremoto de 10.000 años o el MCE (Canadian Dam Association, 2019). Dado que habría una pérdida potencial de más de 100 vidas, la presa de relaves debe diseñarse para soportar el terremoto de 10.000 años de acuerdo con los estándares posiblemente menos protectores de ICMM-UNEP-PRI (2020).

La contradicción más notoria entre el EIS (Elevar Resources, 2021) y el Informe Técnico (G Mining Services, 2022) es la diferencia entre los terremotos de diseño. Según G Mining Services (2022), la “Seismicity / Earthquake Load” [Carga de Sismicidad / Terremoto] es el “4,750- to 10,000-year return period” [período de retorno de 4750 a 10.000 años]. Si bien el Informe Técnico (G Mining Services, 2022) fue escrito después del EIA (Elevar Resources, 2021), no debe entenderse como una mejora de los criterios de seguridad en el EIA. El Informe Técnico (G Mining Services, 2022) no incluye su propio análisis de estabilidad ni ninguna información sobre cómo se podría lograr la estabilidad en respuesta al terremoto de 10.000 años. Sobre esa base, el terremoto de diseño en el Informe Técnico (G Mining Services, 2022) debe considerarse poco más que una “promesa de campaña”.

La subsección Diseño de Inundaciones y Diseño de Terremotos discutió los criterios de seguridad más estrictos que deben aplicarse durante el período indefinido de cierre de la instalación de almacenamiento de relaves. Por el contrario, ni el EIS (Elevar Resources, 2021) ni el Informe Técnico (G Mining Services, 2022) abordan ningún inundaciones de diseño ni terremotos de diseño más estrictos que deben aplicarse durante el período de cierre. Por supuesto, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados está destinada a permanecer permanentemente en el mismo lugar sin transferencia de relaves a un tajo abierto agotado u otra ubicación relativamente más segura. Cabe señalar que, si la inundación de diseño tuviera un período de retorno de 100 años (probabilidad de excedencia anual del 1 %), la probabilidad de falla por fuertes lluvias sería del 45,3 % en el transcurso de dos generaciones (60 años). Si el terremoto de diseño tuviera un período de retorno de 475 años, la probabilidad de falla por carga sísmica sería del 11,9 % en el mismo período de tiempo. Utilizando los mismos períodos de retorno, las probabilidades de falla serían del 95,1 % y 46,8% debido a fuertes lluvias o un fuerte terremoto, respectivamente, en el transcurso de diez generaciones (300 años). Aun así, es difícil ver cómo la instalación de almacenamiento de relaves filtrados podría continuar resistiendo su inundación de diseño de inundación y terremoto de diseño indefinidamente sin monitoreo, inspección y mantenimiento perpetuos, para los cuales ciertamente no hay ningún plan. Sobre la base anterior, aunque la intención puede ser que la instalación de

almacenamiento de relaves filtrados permanezca en el mismo lugar de forma permanente, la realidad es que la instalación de almacenamiento de relaves filtrados permanecerá en el mismo lugar hasta que falle, después de lo cual los relaves permanecerán permanentemente en Lago de Guija, después del entierro con relaves de todo lo que se encuentra entre el sitio de la mina y el Lago de Guija.

## **D. Adecuación de la Separación entre la Instalación de Relaves y las Comunidades**

No se puede enfatizar demasiado que el diseño de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados para resistir la IMP y el TMC no resolvería el problema de la vulnerabilidad de las comunidades vecinas (ver Fig. 3). El diseño para la IMP y el TMC no garantiza que la falla sea imposible debido a que existe una incertidumbre considerable en las magnitudes de la IMP y del TMC, así como en los parámetros geotécnicos de los materiales que componen la instalación de almacenamiento de residuos mineros. En el caso de la IMP, existe una incertidumbre considerable sobre su verdadera magnitud a la luz del cambio climático, especialmente considerando su carácter destinado como estructura permanente. Por las razones anteriores, muchos reglamentos y documentos de orientación especifican una separación mínima entre las instalaciones de almacenamiento de relaves y las comunidades.

Tras el desastre de la presa de relaves en la mina Córrego do Feijão en Brasil en enero de 2019, el estado brasileño de Minas Gerais introdujo el concepto legislativo de “zona de auto-rescate”, dentro de la cual no es posible ningún rescate desde el exterior. De acuerdo con la Assembleia Legislativa de Minas Gerais [Asamblea Legislativa de Minas Gerais], 2019, “Para os fins do disposto nesta lei, considera-se zona de autossalvamento a porção do vale a jusante da barragem em que não haja tempo suficiente para uma intervenção da autoridade competente em situação de emergência. § 2º – Para a delimitação da extensão da zona de autossalvamento, será considerada a maior entre as duas seguintes distâncias a partir da barragem: I – 10km (dez quilômetros) ao longo do curso do vale; II – a porção do vale passível de ser atingida pela onda de inundação num prazo de trinta minutos. § 3º – A critério do órgão ou da entidade competente do Sisema [Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos], a distância a que se refere o inciso I do § 2º poderá ser majorada para até 25km (vinte e cinco quilômetros), observados a densidade e a localização das áreas habitadas e os dados sobre os patrimônios natural e cultural da região [Para los propósitos de

esta ley, una zona de auto-rescate significará la porción del valle aguas abajo de la presa donde no hay tiempo suficiente para la intervención de la autoridad competente en una situación de emergencia. Para la delimitación de la extensión de la zona de auto-rescate, se considerará la mayor distancia entre las siguientes dos distancias desde la presa: I - 10 km (diez kilómetros) a lo largo del curso del valle; II - la porción del valle que probablemente sea golpeada por la ola de inundación en treinta minutos. A discreción del organismo o entidad competente de Sisema [Sistema Estatal de Medio Ambiente y Recursos Hídricos], la distancia mencionada en el ítem I puede incrementarse hasta 25 km (veinticinco kilómetros), observando la densidad y la ubicación de las áreas habitadas y los datos sobre el patrimonio natural y cultural de la región]. El acto legislativo brasileño estipuló entonces que nadie debería tener que vivir en una zona de auto-rescate. Según la legislación, “Fica vedada a concessão de licença ambiental para construção, instalação, ampliação ou alteamento de barragem em cujos estudos de cenários de rupturas seja identificada comunidade na zona de autossalvamento” [Se prohíbe la concesión de una licencia ambiental para la construcción, instalación, expansión o elevación de la presa en cuyos estudios de escenarios de rupturas sea identificada comunidad en la zona de auto-rescate] (Assembleia Legislativa de Minas Gerai, 2019).

Al año siguiente, Ecuador hizo lo mismo con un reglamento similar. Según Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (Ecuador) (2020a), “Se prohíbe el diseño y construcción de depósitos de relave en los casos que se identifique una zona poblada ubicada aguas abajo del mismo que pudiera ser afectada por la onda de inundación, la cual queda limitada por la mayor de las dos distancias: • A diez (10) kilómetros de distancia aguas abajo del pie de la presa a lo largo del curso del valle, o; • La porción de territorio que sea alcanzada por la onda de inundación en un plazo de 30 minutos”. Aunque no se indica, la velocidad mínima de inundación de relaves de 20 kilómetros por hora es la base aparente para la correspondencia entre 10 kilómetros y 30 minutos. En el mismo año, incluso China estipuló que no se podría construir una instalación de relaves donde haya una comunidad dentro de un kilómetro en cualquier dirección (Zhang y Daly, 2019; Zhang y Singh, 2020).

La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves (Morrill et al., 2022) dio la bienvenida a los reglamentos existentes, al mismo tiempo que enfatizó su insuficiencia. De acuerdo con Morrill et al. (2022), “Aunque estos límites geográficos y temporales son un avance, tampoco son garantía de evacuación segura en todos los escenarios. En ese sentido, la distancia mínima entre las comunidades y las nuevas presas debe definirse según cada caso. Esta distancia se debe calcular con base en el tiempo que tomaría evacuar a la comunidad entera con el apoyo de un equipo de rescate, así como el tiempo que



tomaría una inundación de relaves en alcanzar a la comunidad, con un margen de seguridad dentro del cálculo. El tiempo que tomaría una inundación de relaves en alcanzar una comunidad se debe calcular con base en un estudio de falla de la presa realizada para cada instalación de disposición de relaves”. Cabe recordar que el único estudio de ruptura de presa (o análisis de consecuencias de falla) para la instalación de relaves en la mina Cerro Blanco se encuentra en este informe. A la luz de La Seguridad Ante Todo, la ubicación de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados tan cerca de los cuerpos de agua también es muy problemática. De acuerdo con Morrill et al. (2022), “Para la ubicación y la seguridad de las instalaciones de relaves, se debe considerar el impacto a las vidas humanas en caso de una falla, así como los impactos ambientales y económicos ... No se debe construir instalaciones de relaves en un lugar donde una falla tendría un impacto material en el suministro público de agua o hábitats críticos, ni cerca de recursos ecológicos protegidos. Adicionalmente, los relaves nunca deben verterse a cuerpos de agua como ríos, quebradas, océanos, etc.”

## **E. Adecuación del Método de Construcción**

Según el diseño, la roca estéril actuaría como presa para la zona estructural, mientras que la zona estructural actuaría como presa para la zona no estructural (comparar Figs. 11a-c con Fig. 7). Las presas se construirían utilizando el método aguas arriba en el que la presa se coloca encima del material que la presa está confinando. La ventaja del método aguas arriba es su bajo costo porque requiere una cantidad mínima de material de construcción. La desventaja es que si los relaves subyacentes se licuan, la presa podría fallar al deslizarse sobre o caer dentro de los relaves licuados, incluso si la presa mantiene temporalmente su integridad estructural. Por esa razón, el método de construcción aguas arriba está prohibido en Brasil (ANM, 2019), Chile (Ministerio de Minería (Chile), 2007), Ecuador (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (Ecuador), 2020b), y Perú (Sistema Nacional de Información Ambiental (Perú), 2014).

La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves (Morrill et al., 2022) ha aclarado que la prohibición del método de construcción aguas arriba debe aplicarse incluso si la presa de relaves es la zona estructural de una pila de relaves filtrados. De acuerdo con Morrill et al. (2022), “La zona estructural de una pila de relaves filtrados no debe construirse encima de relaves filtrados sin compactar o levemente compactados. De ser así, constituye una presa aguas arriba y debe prohibirse”. Morrill et al. (2022) aclaró

además que “los lineamientos de La Seguridad Ante Todo se aplican a: ... Instalaciones de relaves filtrados (con o sin agregados de mena rechazada o desperdicios de piedra) ... Zonas estructurales (estructuras de contención) de las instalaciones de disposición de relaves, incluyendo las zonas estructurales de instalaciones de relaves filtrados”.

En general, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados sería demasiado empinada, demasiado sueltamente empaquetada y demasiado húmeda en comparación con los estándares de la industria minera. G Mining Services (2022) establece que “the ultimate height of the current design is 175 m and maximum slope of material stacked on the embankment is 3:1 [3 meters horizontal for 1 meter vertical]” [la altura máxima del diseño actual es de 175 m y la inclinación máxima del material apilado en el terraplén es de 3:1 [3 metros horizontales por 1 metro vertical]]. Elevar Resources (2021) es algo menos conservador al afirmar que 3H: 1V (3 metros horizontales por 1 metro vertical) no será la máxima, sino la inclinación típica del terraplén. De acuerdo con Elevar Resources (2021), “Los relaves contenidos mantendrán una pendiente general de 3H: 1V detrás de la capa exterior de roca estéril”. Por el contrario, Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022) afirman que, para las pilas de relaves filtrados, la inclinación global (incluidas las terrazas) no debe ser mayor a 3,5H: 1V. Cabe señalar que sólo la roca estéril, pero no los relaves filtrados, se apilarían en terrazas (ver Figs. 11a-c).

G Mining Services (2022) supone una densidad seca promedio de 1,50 toneladas por metro cúbico. Para relaves sólidos con una gravedad específica de 2,52 (G Mining Services, 2022), una densidad seca de 1,50 toneladas por metro cúbico corresponde a densidades húmedas de 1,725 y 1,8 toneladas por metro cúbico para contenidos de agua geotécnicos de 15 % y 20 %, respectivamente. Dichas densidades húmedas corresponden a pesos unitarios húmedos de 16,9 y 17,7 kilonewtons por metro cúbico, respectivamente, los cuales son consistentes con los pesos unitarios húmedos de 16,8 y 17,6 kilonewtons por metro cúbico que asumió Elevar Resources (2021) para relaves no estructurales y relaves estructurales, respectivamente (ver Fig. 15). En otras palabras, Elevar Resources (2021) también asumió una densidad seca cercana a 1,50 toneladas por metro cúbico para los relaves estructurales y no estructurales, pero con mayor contenido de agua geotécnico en los relaves no estructurales.

Con base en lo anterior, tanto Elevar Resources (2021) como G Mining Services (2022) esperan lograr un grado muy ligero de compactación para los relaves filtrados. Por el contrario, los estándares de la industria minera exigen densidades secas de relaves filtrados en el rango de 1,9 a 2,6 toneladas por metro cúbico con 2,0 toneladas por metro cúbico como densidad seca típica (Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes, 2022). A modo de comparación, las instalaciones

de almacenamiento de relaves convencionales en las que se descarga hidráulicamente una mezcla de relaves y agua en la instalación sin compactación suelen alcanzar densidades secas de 1,3 toneladas por metro cúbico (Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes, 2022). Teniendo en cuenta el ligero grado de compactación esperada, no está claro cómo se logrará la prevención de la licuefacción, como se analiza en la siguiente subsección. Finalmente, aunque el contenido de agua geotécnico esperado de los relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería de 15 al 20 %, los estándares de la industria minera exigen contenidos de agua geotécnicos óptimos (para una compactación máxima) en el rango de 12 a 14 % (Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes, 2022).

## **F. Adecuación del Plan de Prevención de Licuefacción**

En la actualidad, no existe un plan para la prevención de la licuefacción. La tecnología de relaves filtrados reduce la probabilidad de licuefacción, pero no la hace imposible. La licuefacción aún puede ocurrir si los relaves filtrados no se compactaron lo suficiente, si los poros se vuelven a saturar a través de la precipitación y la consolidación de los relaves, y si hay un desencadenante de la licuefacción, como un terremoto. De hecho, como se mencionó anteriormente, Petley (2022) ha propuesto que la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco experimentó licuefacción en respuesta a fuertes lluvias. El primer paso en el desarrollo de un plan sería investigar si los relaves tuvieran las propiedades, como la distribución del tamaño de las partículas, las cuales los harían susceptibles a la licuefacción. Sin embargo, el Informe Técnico (G Mining Services, 2022) ha declarado que, incluso este primer paso se dejará para el futuro. De acuerdo con G Mining Services (2022), “If needed, additional work in areas with liquefaction potential will be undertaken to better understand whether the material would be susceptible to liquefaction or display a cyclic softening behaviour” [Si es necesario, se realizará trabajo adicional en áreas con potencial de licuefacción para comprender mejor si el material fuera susceptible a la licuefacción o mostrara un comportamiento de ablandamiento cíclico]. No hay otra mención de licuefacción ni en G Mining Services (2022) ni en Elevar Resources (2021).

Muchos documentos de orientación de la industria han enfatizado que un plan para la prevención de la licuefacción debe ser parte del diseño inicial y no puede desarrollarse más adelante. Por contexto, casi todos los proyectos mineros y otros proyectos de ingeniería a gran escala desde la década de 1960 se han desarrollado

utilizando el Método Observacional (ANCOLD, 2012). Según el Método Observacional, no todas las acciones se pueden planificar con antelación. En cambio, a medida que avanza el proyecto, se realizarán observaciones y, dependiendo de los resultados de esas observaciones, se realizarán selecciones a partir de un conjunto de acciones planificadas previamente. De acuerdo con ICMM-UNEP-PRI (2020), “El elemento clave del Método Observacional es la evaluación proactiva, en la etapa de diseño, de toda posible situación desfavorable que el programa de monitoreo pudiera descubrir, y el desarrollo de un plan de acción o medida de mitigación para reducir el riesgo, en caso que se encontrara tal situación desfavorable.”

Ahora se entiende bien que el uso del Método Observacional no puede evitar fallas debido a la licuefacción. Según el libro de texto *Soil Liquefaction: A Critical State Approach* [Licuefacción del Suelo: Un Enfoque de Estado Crítico], “Liquefaction is an intrinsically brittle process and the observational method must not be used. If liquefaction is a potential problem, it must be engineered away” [La licuefacción es un proceso intrínsecamente frágil y no se debe utilizar el método de observación. Si la licuefacción es un problema potencial, debe eliminarse por ingeniería]. En otras palabras, dado que la licuefacción puede desarrollarse rápidamente y sin previo aviso ni precursores (un proceso frágil), no se puede esperar a las observaciones para llevar a cabo las acciones mitigadoras apropiadas. En cambio, el diseño original debe hacer que la falla por licuefacción sea casi imposible] (Jefferies y Been, 2016). Además, el Requisito 7.2 del Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera exige que las empresas mineras “Diseñar, implementar y operar un sistema completo e integrado de monitoreo para la ingeniería que sea adecuado para verificar los supuestos de diseño y monitorear los modos creíbles de falla. Para los modos creíbles de falla de comportamiento no frágil se implementará el método observacional. Los mecanismos de falla frágiles se abordan mediante criterios de diseño conservadores” (negrita añadida) (ICMM-UNEP-PRI, 2020).

## **G. Adecuación del Análisis de Estabilidad Estática y Pseudoestática**

Aunque el análisis de estabilidad ha demostrado que la pila de relaves filtrada será inestable ( $FS < 1,0$ ) en respuesta al terremoto de diseño, los factores de seguridad estáticos de 2,2, 2,0 y 1,8 para las Secciones 1, 2 y 3 (ver Figs. 10 y 13) superan con creces el factor de seguridad estático mínimo típico de 1,5.

### Propiedades de Materiales Utilizados en la Evaluación de Estabilidad

Material	Peso de Unidad Húmeda (kN/m <sup>3</sup> )	Estabilidad Estática – Fuerza Drenada		Estabilidad Pseudoestática – Fuerza Sin Drenar	
		(deg)	(kPa)	(deg)	(kPa)
<b>Relaves Estructurales</b>	17.6	34	0	23	0
<b>Relaves No Estructurales</b>	16.8	27	0	18	0
<b>Roca Estéril</b>	20	Leps (1970) – envolvente de resistencia no lineal de límite inferior			
<b>Suelo base</b>	19	32	0	25.5	0
<b>Roca base</b>	22	Envolvente de Falla Hoek-Brown			

Fuente: GMS, 2021

*Ilustración 15: Las propiedades geotécnicas que se usaron en el cálculo del factor de seguridad fueron todas suposiciones sin mediciones reales. Figura de Elevar Resources (2021).*

Cabe señalar que las instalaciones de relaves con factores de seguridad superiores a 2,0 no son realmente más estables que las instalaciones con factores de seguridad en el rango más típico de 1,5-2,0. De acuerdo con Silva et al. (2010), “The flattening of the curves [for annual probability of failure] near factor of safety (FS) = 2 reflects the diminishing returns obtained from overbuilding a constructed facility ... increasing the safety factor well beyond the typical values used for earth structures provides little benefit with respect to the corresponding probability of failure. Discontinuities, weak zones, wet zones, high or low permeability zones, and other features that can elude a geotechnical investigation control the level of safety for grossly oversized facilities” [El aplanamiento de las curvas [para la probabilidad de falla anual] cerca del factor de seguridad (FS) = 2 refleja los rendimientos decrecientes obtenidos al construir en exceso una instalación construida ... aumentar el factor de seguridad mucho más allá de los valores típicos utilizados para las estructuras de tierra proporciona pocos beneficios con respecto a la probabilidad de falla correspondiente. Las discontinuidades, las zonas débiles, las zonas húmedas, las zonas de alta o baja permeabilidad y otras características que pueden eludir una investigación geotécnica controlan el nivel de seguridad de las instalaciones gravemente sobrediseñadas].

Una percepción del origen de los factores de seguridad estáticos muy altos (ver Fig. 13) radica en la observación de que todos los parámetros de entrada eran suposiciones y ninguno se midió realmente en relaves reales (ver Fig. 15). En realidad, Elevar Resources (2021) enfatizó el predominio de las suposiciones sobre las mediciones. Por ejemplo, según Elevar Resources, “Se asumió que la resistencia al corte de los relaves no estructurales era un 20 por ciento menor que la de los relaves estructurales en consideración de un material de densidad más

baja y el desarrollo potencial de presiones de poro moderadas durante la condición de carga sísmica pseudoestática ... La resistencia al corte del suelo de cimentación se modeló con una resistencia a la fricción asumida de 32 grados para condiciones de carga estática y se asumió una reducción de la resistencia del 20 por ciento para condiciones de carga pseudoestáticas y posteriores al terremoto.” Aunque, por supuesto, la producción de relaves a gran escala no ocurrirá antes del comienzo de las operaciones mineras, lo más común es llevar a cabo un proyecto piloto, de modo que se disponga de una pequeña muestra de relaves para medir los parámetros de densidad y resistencia al corte. Una alternativa menos confiable sería basar el análisis de estabilidad en las propiedades geotécnicas de los relaves de yacimientos de mena cercanos u otros yacimientos de mena que se cree que tienen propiedades similares.

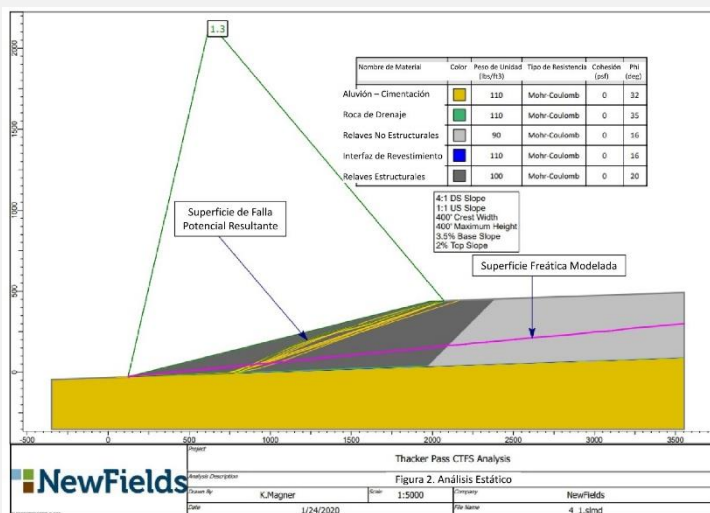
El software utilizado para el cálculo del factor de seguridad normalmente considera el factor de seguridad a lo largo de todas las posibles superficies de falla y selecciona el valor más bajo como el factor de seguridad para la instalación de relaves. Sin embargo, Elevar Resources (2021) excluyó deliberadamente de la consideración cualquier superficie de falla que pasaría a través de la cimentación. Cabe señalar que el deslizamiento a lo largo de una superficie que pasó por la base causaría el colapso de toda la instalación. De acuerdo con Elevar Resources (2021), “Únicamente condiciones de carga estática y pseudoestática fueron evaluadas para la sección 3 a través del depósito de roca estéril, ya que no se espera pérdida de fuerza en los materiales de cimentación de la instalación”. La suposición anterior no estaba justificada y, al menos para completar, habría sido sencillo incluir las superficies de falla que pasan a través de la cimentación como un valor alternativo para el factor de seguridad. Elevar Resources (2021) continuó, “El modelo de subsuperficie debajo del depósito de roca estéril consideró una capa de suelo nativo superficial sobre 8 a 12 metros sobrepuesto a roca competente. Se asumió que se removerán durante la preparación del sitio aquellos materiales no adecuados cerca de la superficie”. Por lo tanto, la correcta identificación y eliminación de materiales de cimentación débiles parece ser una preocupación fundamental para garantizar la estabilidad de la instalación de almacenamiento de residuos mineros.

La suposición más notoria en el análisis de estabilidad fue la suposición de la que no habría nivel freático dentro de la pila de relaves filtrados. En otras palabras, se supuso que todos los relaves filtrados estarían no saturados. Según Elevar Resources (2021), “Con base en la reciente investigación, se asumió que el nivel del acuífero superior se encuentra a 15 metros de la superficie. En el depósito de relaves no se encontró evidencia de acuífero y por ello no fue incluido en los modelos. Se asumieron condiciones de no saturación a saturación parcial en los relaves y roca estéril y de esa manera los modelos no consideraron un desarrollo

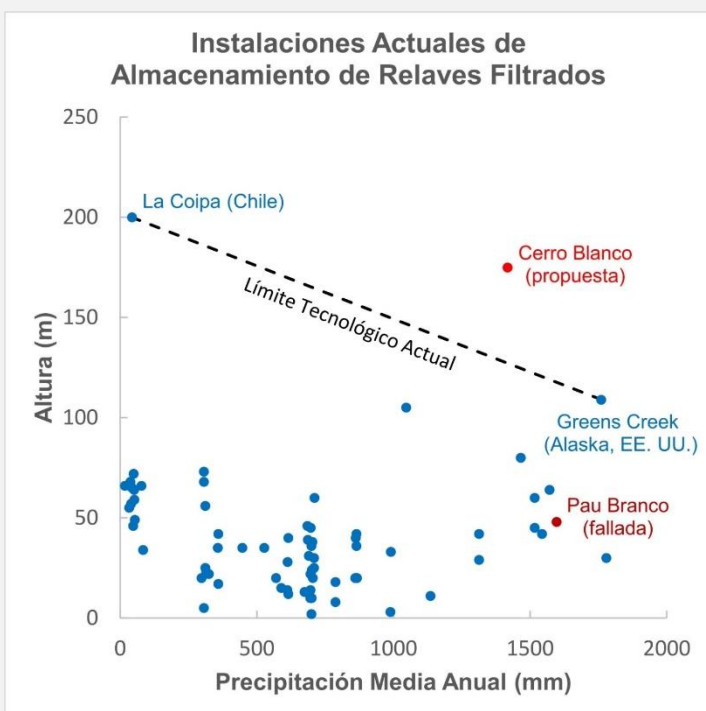
de presión de poro significativa con estos materiales”. La frase “en el depósito de relaves no se encontró evidencia de acuífero” no tiene sentido porque el depósito de relaves aún no existe.

La justificación por Elevar Resources (2021) muestra un malentendido conceptual significativo de las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados. La profundidad del agua subterránea es completamente irrelevante en términos de si habrá o no un nivel freático dentro de una instalación de almacenamiento de relaves filtrados. Los niveles freáticos dentro de las pilas de relaves filtradas no surgen de la filtración ascendente del agua subterránea, sino de una combinación de consolidación de relaves (que reduce el tamaño de los poros) y la precipitación en la pila. Ya se ha mencionado que es común que los niveles freáticos dentro de las pilas de relaves filtrados se eleven a un tercio a la mitad de la altura de la pila. De hecho, es común que los análisis de estabilidad supongan que el nivel freático será la mitad de la altura de la pila (ver Fig. 16). Como ejemplo, en su análisis de estabilidad de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina de litio propuesta Thacker Pass, NewFields (2021) asumió una altura del nivel freático de la mitad de la altura de la pila de relaves filtrados incluso en el clima árido del norte de Nevada, EE. UU., con una precipitación media anual en el sitio de la mina de 310 mm (ver Fig. 16).

*Ilustración 16: Para el cálculo del factor de seguridad, Elevar Resources (2021) asumió que no habría nivel freático dentro de la pila de relaves filtrados. En otras palabras, se asumió que todos los relaves estarían no saturados. Sin embargo, debido a la consolidación de los relaves por el peso de los relaves suprayacentes (lo que reduce el tamaño*



*de los poros), es común que los niveles freáticos se eleven entre un tercio y la mitad de la altura de la pila de relaves filtrados. Como ejemplo, la figura arriba muestra una altura del nivel freático asumida de la mitad de la altura de la pila de relaves filtrados para la mina de litio Thacker Pass propuesta en el clima árido del norte de Nevada, EE. UU. (precipitación media anual en el sitio de la mina de 310 mm). Figura de NewFields (2021) con superposición de etiquetas españolas.*



*Ilustración 17a: Actualmente, la principal limitación en el tamaño de las pilas de relaves filtrados es el impacto de la precipitación. Por lo tanto, el límite tecnológico actual está constreñido por una línea que conecta la pila de relaves filtrados La Coipa en Chile con una altura de 200 metros y una precipitación media anual de 42,9 mm y la pila de relaves filtrados Greens Creek en Alaska (EE. UU.) con una altura de 109 metros y precipitación media anual de 1760,2 mm. Sobre esa base, con una precipitación media anual de 1417 mm (Elevar Resources, 2021) y una altura planificada de 175 metros (G Mining Services, 2022), la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería 48 metros más alta que el límite tecnológico actual.*

*La construcción dentro del límite tecnológico no es garantía de éxito, ya que la falla de la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco (ver Fig. 8), con una altura de 48 metros y una precipitación media anual de 1597 mm, estaba bien dentro del límite tecnológico actual. Los datos sobre pilas de relaves filtrados existentes de Franks et al. (2021) y la ANM (2022). Precipitación media anual de Fick y Hijmans (2017).*



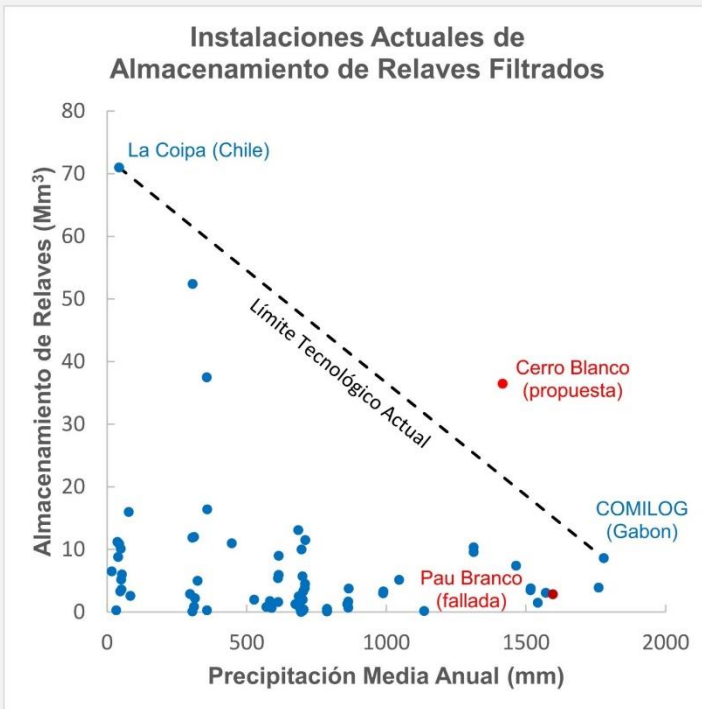


Ilustración 17b: Actualmente, la principal limitación en el tamaño de las pilas de relaves filtrados es el impacto de la precipitación. Por lo tanto, el límite tecnológico actual está constreñido por una línea que conecta la pila de relaves filtrados La Coipa en Chile con un volumen de almacenamiento de relaves de 71 millones de metros cúbicos y una precipitación media anual de 42,9 mm y la pila de relaves filtrados COMILOG en Gabón con un volumen de almacenamiento de relaves de 8,6 millones de metros cúbicos y precipitación media anual de 1779,1 mm. Sobre esa base, con una precipitación media anual de 1417 mm y un almacenamiento de relaves planificado de 36,5 millones de metros cúbicos (Elevar Resources, 2021), la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco almacenaría 21,6 millones de metros cúbicos más que el límite tecnológico actual. La construcción dentro del límite tecnológico no es garantía de éxito, ya que la falla de la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco (ver Fig. 8), con un volumen de almacenamiento de relaves de 2,85 millones de metros cúbicos y una precipitación media anual de 1597 mm, estaba bien dentro del límite tecnológico actual. Los datos sobre pilas de relaves filtrados existentes de Franks et al. (2021) y la ANM (2022). Precipitación media anual de Fick y Hijmans (2017).

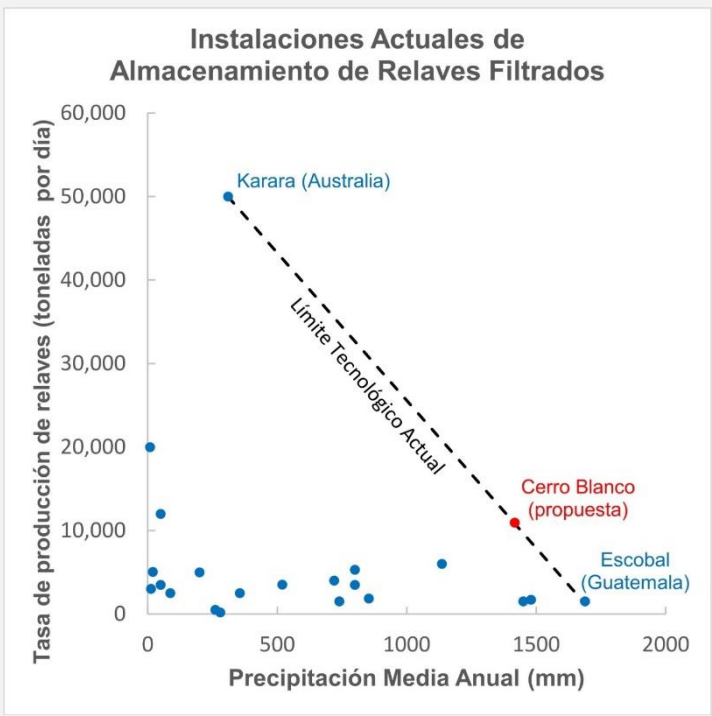


Ilustración 17c: Actualmente, la principal limitación en el tamaño de las pilas de relaves filtrados es el impacto de la precipitación. Por lo tanto, el límite tecnológico actual está constreñido por una línea que conecta la pila de relaves filtrados Karara en Australia con una tasa de producción de relaves de 50.000 toneladas por día y una precipitación media anual de 310 mm y la pila de relaves filtrados Escobal en Guatemala con una tasa de producción de relaves de 1528 toneladas por día y precipitación media anual de 1689 mm. Sobre esa base, con una precipitación media anual de 1417 mm (Elevar Resources, 2021) y tasa de producción de relaves planificada de 10.960 toneladas por día (G Mining Services, 2022), la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco estaría casi exactamente en el límite tecnológico actual. Los datos sobre pilas de relaves filtrados existentes de Klohn Crippen Berger (2017) y Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022). Precipitación media anual de Klohn Crippen Berger (2017, Fick y Hijmans (2017) y Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes (2022).

## H. Adecuación de la Base en la Tecnología Actual

El límite tecnológico actual en la altura de las pilas de relaves filtrados está constreñido por una línea que conecta la pila de relaves filtrados La Coipa en Chile con una altura de 200 metros y una precipitación media anual de 42,9 mm y la pila de relaves filtrados Greens Creek en Alaska (EE. UU.) con una altura de 109 metros y una precipitación media anual de 1760,2 mm (ver Fig. 17a). Cabe señalar que la construcción dentro del límite tecnológico no es garantía de éxito, ya que la fallada pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco (ver Figs. 8 y 14a-b), con una altura de 48 metros y una precipitación media anual de 1597 mm, estaba dentro del límite tecnológico actual en altura (ver Fig. 17a). Con base en la envoltura exterior (línea recta) en Fig. 17a, con una precipitación media anual de 1417 mm (Elevar Resources, 2021) y una altura planificada de 175 metros (G Mining Services, 2022), la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería 48 metros más alta que el límite tecnológico actual, o 138 % del límite tecnológico actual.

El límite tecnológico actual sobre el volumen de almacenamiento de pilas de relaves filtrados está constreñido por una línea que conecta la pila de relaves filtrados La Coipa en Chile con un volumen de almacenamiento de relaves de 71 millones de metros cúbicos y una precipitación media anual de 42,9 mm y la pila de relaves filtrados COMILOG en Gabón con un volumen de almacenamiento de relaves de 8,6 millones de metros cúbicos y una precipitación media anual de 1779,1 mm (ver Fig. 17b). Como arriba, la construcción dentro del límite tecnológico no es garantía de éxito, ya que la fallada pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco (ver Figs. 8 y 14a-b), con un volumen de almacenamiento de relaves de 2,85 millones de metros cúbicos y precipitación media anual de 1597 mm, estaba dentro del límite tecnológico actual en volumen de almacenamiento (ver Fig. 17b). Con base en la envoltura exterior (línea recta) en Fig. 17b, con una precipitación media anual de 1417 mm (Elevar Resources, 2021) y un volumen planificado de almacenamiento de relaves de 36,5 millones de metros cúbicos (G Mining Services, 2022), la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco almacenaría 21,6 millones de metros cúbicos más que el límite tecnológico actual, o 245 % del límite tecnológico actual.

El límite tecnológico actual en la tasa de producción de relaves de las pilas de relaves filtrados está constreñido por una línea que conecta la pila de relaves filtrados Karara en Australia con una tasa de producción de relaves de 50.000 toneladas por día y una precipitación media anual de 310 mm y la pila de relaves filtrados Escobal en Guatemala con una tasa de producción de relaves de 1528 toneladas por día y una precipitación media anual de 1689 mm (ver Fig. 17c). Con

base en la envoltura exterior (línea recta) en Fig. 17c, con una precipitación media anual de 1417 mm (Elevar Resources, 2021) y una tasa de producción de relaves planificada de 10.960 toneladas por día (G Mining Services, 2022), la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco estaría casi exactamente en el límite tecnológico actual (ver Fig. 17c). En resumen, la pila de relaves filtrados en la mina propuesta Cerro Blanco superaría con creces los límites tecnológicos actuales en altura y volumen de almacenamiento de relaves, pero no en cuanto a la tasa de producción de relaves.

## VII. DISCUSIÓN

No se puede negar que el diseño de la instalación de almacenamiento de residuos mineros en la mina propuesta Cerro Blanco es muy creativo. Aunque nunca se mencionó ni en el EIA (Elevar Resources, 2021) ni en el Informe Técnico (G Mining Services, 2022), el diseño es esencialmente un intento admirable de minimizar la huella que ocupan los residuos de mina al deshidratar los relaves y almacenar los relaves filtrados y la roca estéril en una sola instalación. La motivación para el uso de la tecnología de relaves filtrados ciertamente no es la reducción en el consumo de agua, ya que la alta precipitación y la necesidad de bombear agua subterránea fuera del tajo abierto requerirán la descarga de aguas residuales de mina en exceso en el río Ostúa (Elevar Resources, 2021); G Servicios Mineros, 2022). También es poco probable que la motivación sea la prevención de la licuefacción, ya que aún no se ha prestado atención a este tema, como se analiza en la subsección Adecuación del Plan para Prevención de Licuefacción.

Si bien la creatividad generalmente se considera un esfuerzo humano positivo, la creatividad no es un bien absoluto. De hecho, existe otro concepto de “Creatividad Imprudente”, la cual es perjudicial para el bienestar humano (Emerman, 2021a-c, 2022a-b). Por ejemplo, una propuesta para reemplazar inmediatamente todos los carros en Ciudad de Guatemala con vehículos sin conductor sería un tipo de Creatividad Imprudente. Un concepto relacionado se llama “Euforia de Diseño”, la cual incluso se ha aplicado a la falla de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Pau Branco (Riskope, 2022). Con relación al plan de almacenamiento de residuos mineros en la mina Pau

Branco, Riskope (2022) escribió, “Technological innovation provoked generalized blindness. The mine even won the Brazilian Environmental Award in 2017. However, any slope, anywhere and in any material has potential stability and drainage issues that one should carefully consider” [La innovación tecnológica provocó una ceguera generalizada. La mina incluso ganó el Premio Ambiental Brasileño en 2017. Sin embargo, cualquier talud, en cualquier lugar y en cualquier material, tiene problemas potenciales de estabilidad y de drenaje que se deben considerar cuidadosamente”.

La Creatividad Imprudente tiene una o más de las siguientes características:

1) No hay andamiaje, lo que significa que la nueva innovación no se basa en innovaciones anteriores a través de una serie de pasos intermedios con pruebas y verificación adecuadas de cada paso.

2) Una o más de las tecnologías requeridas para llevar a cabo la innovación no existe actualmente.

3) Las predicciones se basan en valores de entrada únicos o en los mejores escenarios sin considerar el rango de entradas posibles.

4) Aunque se reconocen los problemas potenciales, rápidamente se descartan como irrelevantes sin justificación.

5) No se toman las precauciones básicas que serían rutinarias para las innovaciones anteriores.

6) No hay consideración de las consecuencias de equivocarse, es decir, de las consecuencias de la falla.

El plan para la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco cumple con todas las características de Creatividad Imprudente. Esto no significa que nunca se permita ninguna versión de la instalación de relaves propuesta, pero este plan no debería permitirse en este lugar en este momento.

La primera característica se cumple porque la propuesta surge como un salto cualitativo sin pasos intermedios. Cada diseñador de instalaciones de almacenamiento de relaves y la industria minera en general necesita adquirir experiencia en la construcción y operación seguras de instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados a alturas cada vez mayores en áreas con alta precipitación. Sería tranquilizador si ya existiera una instalación de almacenamiento de relaves filtrados en operación en un clima muy húmedo (con una precipitación media anual del orden de 1500 mm) con una altura de, digamos, 140 metros (80 % de la altura planificada de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco) y un volumen de almacenamiento de relaves de, digamos, 29,2 millones de metros cúbicos (80 % del volumen planificado de almacenamiento de relaves de la instalación de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco). Sin embargo, nada parecido a ninguno de los dos existe en la actualidad (ver Figs. 17a b). La pila de relaves filtrados en la mina Greens

Creek en Alaska tiene 109 metros de altura (ver Fig. 17a), pero tiene desafíos cualitativamente diferentes con una tasa de producción de relaves de solo 1500 toneladas por día (ver Tabla 1), a diferencia de la tasa de producción de 10.960 toneladas por día que se planea para la mina Cerro Blanco. No existe una instalación de almacenamiento de relaves filtrados con más de 17 millones de metros cúbicos de relaves en un clima con más de 359 mm de lluvia anual (ver Fig. 17b). Incluso cuando surgen instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados más altas y más grandes en climas más húmedos, cada compañía minera y la industria minera en su conjunto necesitan tiempo para aprender a mantener la estabilidad de instalaciones más altas y más grandes en entornos más desafiantes. En particular, los diseñadores de cada nueva instalación de almacenamiento de relaves filtrados deben aprender de los errores de las instalaciones anteriores. En resumen, es preocupante que el Estudio de Impacto Ambiental no presente antecedentes de instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados en climas húmedos. Por supuesto, cualquier historia debe incluir un énfasis en lo que se ha aprendido de esa historia. Las lecciones de la falla de la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco serían un excelente comienzo.

La segunda característica se cumple porque no existe una tecnología para el apilamiento de relaves filtrados a una inclinación tan pronunciada, especialmente con tan altos contenidos de agua geotécnicos y ante una precipitación tan alta. Por supuesto, los taludes muy empinados son requeridas por la pequeña huella prevista, la cual parece ser la principal motivación para el uso de la tecnología de relaves filtrados. El problema se agudiza aún más debido a la intención o la expectativa de la que los relaves filtrados se compacten relativamente ligeramente. Ningún documento ha explicado por qué los relaves filtrados tendrían una densidad seca tan baja. Es posible que se suponga que las presas de roca estéril proporcionarían suficiente estabilidad para los relaves ligeramente compactados. Sin embargo, esto es problemático a la luz del uso propuesto del método de construcción aguas arriba, como se discuta más adelante.

La tercera característica se cumple porque los valores de entrada para el análisis de estabilidad son todos valores únicos (sin rangos ni incertidumbres) que se suponen en lugar de valores medidos. Un análisis más significativo habría calculado el factor de seguridad en todo el rango de valores de entrada razonables con el fin de determinar el rango de propiedades para las cuales la instalación de relaves sería inestable. Por ejemplo, aunque Elevar Resources (2021) asumió un ángulo de fricción de 34 grados (ver Fig. 15) para los relaves estructurales (un ángulo de fricción más alto implica una mayor resistencia al corte), los ángulos de fricción típicos para los relaves filtrados están en el rango de 25-35 grados (Cacciuttolo Vargas y Pérez Campomanes, 2022). En otras palabras, Elevar Resources (2021) asumió casi el mejor escenario para la resistencia al corte de los

relaves estructurales, lo que explica parcialmente los valores muy altos del factor de seguridad estático (ver Fig. 13).

La cuarta característica se cumple porque, si bien el Informe Técnico al menos reconoce la existencia del fenómeno de licuefacción, se deja como un problema a considerar más adelante. No se considera si los relaves serán susceptibles a la licuefacción ni las circunstancias bajo las cuales podría ocurrir la licuefacción. No existe un plan para prevenir el desarrollo de las circunstancias bajo las cuales podría ocurrir la licuefacción. No hay ninguna consideración en cuanto al estándar de la industria minera de que la prevención de la licuefacción debe ser inherente al diseño de la instalación de almacenamiento de relaves y no es un problema que pueda abordarse más adelante.

La quinta característica se cumple por el uso del método de construcción aguas arriba, lo cual ya es ilegal en cuatro países latinoamericanos por su susceptibilidad a fallas. El uso de roca estéril para brindar estabilidad a los relaves compactados de forma relativamente ligera se vuelve muy problemático cuando la roca estéril se coloca encima de los relaves. La característica se cumple además debido a la falta de cualquier inundación de diseño ni evento de precipitación. Aunque hay una tormenta de diseño de magnitud bastante baja para la infraestructura de aguas pluviales (tormenta de 24 horas con un período de retorno de 100 años), no se considera el evento de precipitación que podría resultar en inestabilidad de los taludes. El concepto de que las fuertes lluvias podrían causar inestabilidad en las pilas de relaves filtrados debería quedar muy claro a partir de la falla de la pila de relaves filtrados en la mina Pau Branco. El hecho de que no se considere una inundación de diseño para la pila de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco muestra una clara falta de aprendizaje de las lecciones de fallas pasadas, como se discutió anteriormente.

La sexta característica se cumple porque no se han considerado seriamente las consecuencias de la falla de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados. Sólo se ha dicho que las consecuencias serán Significativas según las directrices de la Canadian Dam Association sin justificación de ningún tipo. No se ha considerado la pérdida potencial de vidas humanas, los impactos potenciales en el hábitat acuático ni de vida silvestre, los impactos potenciales en el ganado, las pérdidas económicas potenciales, los impactos potenciales en los cuerpos de agua río abajo ni cualquier otro tipo de impacto. El análisis riguroso de las consecuencias de la falla, por improbable que sea, es una práctica estándar en las industrias de alto riesgo, como la aviación, los oleoductos y la energía nuclear. La consideración de las consecuencias de la falla debe ser el corazón de un Estudio de Impacto Ambiental. El simple hecho de que el Estudio de Impacto Ambiental de Elevar Resources (2021) no abordó las consecuencias de la falla de manera seria debería ser causa suficiente para rechazar la propuesta.

# VIII. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este informe pueden resumirse como sigue:

1) La asignación de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados a la categoría de consecuencia de falla Significativa, la cual implica sólo una población temporal en riesgo, “ninguna pérdida o deterioro significativo del hábitat de peces o vida silvestre”, “pérdida de hábitat marginal únicamente”, “restauración o compensación en especie muy posible” y “pérdidas en instalaciones recreativas, lugares de trabajo estacionales y rutas de transporte de uso poco frecuente” nunca fue justificada.

2) El borde de la pila de relaves filtrados estaría a sólo 103 metros de pendiente arriba de la quebrada El Marial, desde donde los relaves podrían fluir hacia el río Tancushapa y luego hacia el río Ostúa y hacia El Salvador con su depósito final en el Lago de Guija. El borde de la pila de relaves filtrados estaría a sólo 395 metros de pendiente arriba del pueblo de Trapiche Vargas con cientos de viviendas. Incluso sin licuefacción, los relaves podrían deslizarse diez veces la altura de la pila (1750 metros), lo que provocaría el entierro del pueblo de Trapiche Vargas en poco más de un minuto. De manera similar, incluso sin licuefacción, los relaves podrían desarrollar un comportamiento de flujo después de mezclarse con el agua en la quebrada El Marial u otro cuerpo de agua. Sobre la base anterior, la categoría de consecuencia de falla correcta es Extrema, la cual implica la pérdida de más de 100 vidas en caso de falla.

3) Con base en la asignación a la categoría de consecuencia de falla Significativa, la instalación ha sido diseñada para resistir sólo el terremoto a medio camino entre el terremoto de 475 años y el terremoto de 1000 años (correspondiente a una probabilidad de excedencia anual en el rango de 0,1-0,21 %). No se ha considerado el período de retorno de la tormenta que podría causar el colapso de la pila de relaves filtrados. Por el contrario, de acuerdo con las directrices de la Asociación Canadiense de Represas, una instalación de relaves en la categoría de consecuencia de falla Extrema debe diseñarse para resistir el terremoto de 10.000 años (correspondiente a una probabilidad de excedencia anual de 0,01 %) o el Terremoto Máximo Creíble (TMC), así como la inundación máxima probable (IMP).

4) Incluso si la instalación de almacenamiento de relaves filtrados fuera diseñada para resistir la IMP y el TMC, otras normas internacionales deberían prohibir la construcción de una instalación de relaves tan cerca de una comunidad.



5) Las presas para la instalación de relaves filtrados se construirían utilizando el método aguas arriba, en el que la zona estructural se colocaría encima de la zona no estructural, mientras que la roca estéril se colocaría encima de la zona estructural. El peligro del método aguas arriba es que, si los relaves subyacentes se licuan, la presa podría fallar al deslizarse sobre o caer dentro de los relaves licuados. Por la razón anterior, el método de construcción aguas arriba está prohibido en Brasil, Chile, Ecuador y Perú.

6) La instalación de almacenamiento de relaves filtrados sería demasiado empinada, demasiado sueltamente empaquetada y demasiado húmeda en comparación con las normas de la industria minera. La inclinación del talud exterior de los relaves sería de 1V: 3H (1 metro vertical por 3 metros horizontales), la densidad seca de relaves sería de 1,5 toneladas por metro cúbico y el contenido de agua geotécnico sería del 15 al 20 %, en comparación con las normas de la industria minera de 1V: 3,5H, 1,9-2,6 toneladas por metro cúbico y 12-14 %, respectivamente.

7) Los documentos disponibles no incluyen ninguna discusión sobre las circunstancias bajo las cuales los relaves podrían licuarse ni cualquier medio para prevenir la licuefacción.

8) El análisis de estabilidad en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) indica un factor de seguridad FS menor a 1,0 en respuesta al terremoto de diseño (periodo de retorno en el rango 475-1000 años), donde FS = 1,0 es la cúspide de falla. El EIA no establece el valor exacto del factor de seguridad calculado ni el período de retorno del terremoto para el cual la instalación de almacenamiento de relaves filtrados sería marginalmente estable. Por lo tanto, sólo se sabe que la instalación fallará en respuesta a algún terremoto que ocurrirá con más frecuencia que el terremoto de diseño.

9) Los parámetros geotécnicos que se utilizaron como datos de entrada para el análisis de estabilidad se asumieron y no se basaron en ninguna medición real.

10) Además, se asumió sin justificación que ninguna superficie de falla podría atravesar la cimentación.

11) La suposición más significativa fue que no habría nivel freático dentro de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados, por lo que todos los relaves estarían no saturados. Sin embargo, debido a la consolidación de los relaves por el peso de los relaves suprayacentes (lo que reduce el tamaño de los poros), es común que los niveles freáticos se eleven entre un tercio y la mitad de la altura de la pila de relaves filtrados.

12) En cuanto a los criterios de seguridad de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados, existen numerosas contradicciones entre la información entregada a las agencias reguladoras guatemaltecas en el EIA de

noviembre de 2021 y la información entregada a los inversionistas en el Técnico Informe NI 43-101 en abril de 2022.

13) El principal factor limitante en el tamaño de una instalación de almacenamiento de relaves filtrados es el impacto de la precipitación. Con una precipitación media anual de 1417 mm, una altura de 175 metros y un volumen de almacenamiento de relaves de 36,5 millones de metros cúbicos, la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería 48 metros más alta y almacenaría 21,6 millones de metros cúbicos más que el límite tecnológico actual.

14) La instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la mina Cerro Blanco sería la segunda más alta del mundo, el volumen de almacenamiento ocuparía el cuarto lugar en el mundo y la tasa de producción de relaves ocuparía el cuarto lugar en el mundo, con todas las instalaciones de almacenamiento de relaves filtrados más grandes existentes en climas mucho más secos.

## **IX. RECOMENDACIONES**

**La recomendación de este informe es que la propuesta para la mina de oro y plata Cerro Blanco sea rechazada con la revocación de todos los permisos existentes.**

# X. Referencias

- Acosta, M. L (8 de febrero 2020). Nicaragua: La masacre de Alal es solo la punta del Iceberg. Recuperado 12 enero 2022 <https://debatesindigenas.org/>
- Acosta, M.L. (12 de noviembre 2021). El diablo, la cooptación del Estado y de los Gobiernos Indígenas en Nicaragua. Revisado 10 marzo 2022 <https://agendaestadodederecho.com/la-cooptacion-del-estado-y-de-los-gobiernos-indigenas-en-nicaragua/>
- Applebaum, A. (2021). El ocaso de la democracia. La seducción del autoritarismo. Madrid, Debate.
- Asamblea Nacional (2016) Ley 28 Estatuto de Autonomía de las Regiones de la Costa Caribe de Nicaragua con sus reformas incorporadas. La Gaceta, Diario Oficial N°. 155 del 18 de agosto de 2016
- Ayala, M., Zapata, E. and Cortés, R. (2017). Extractivismo: expresión del sistema capitalista-colonial-patriarcal; en Ecofeminismos y ecologías políticas feministas. P.60-66 Fundación ENT / Icaría editorial.
- Cabnal, L. (2012) Feministas Siempre. Feminismos diversos: el feminismo comunitario. ACSUR. Recuperado 13 marzo 2022 <https://porunavidavivible.files.wordpress.com/2012/09/feminismos-comunitario-lorena-cabnal.pdf>
- CEJIL (2019). Resistencia Miskitu: lucha por el territorio y la vida. San José, Costa Rica.
- CIDH (16 de febrero de 2021). La CIDH amplió medidas cautelares a favor de las comunidades indígenas Mayangna de Musawas, Suniwas y Wilu del territorio Sauni As. Revisado en febrero de 2022, en <http://www.oas.org/es/CIDH/jsForm/?File=%2Fes%2Fcidh%2Fprensa%2Fcomunicados%2F2022%2F032.asp>
- CIDH (2021) Nicaragua: Concentración del poder y debilitamiento del Estado de Derecho. Revisado marzo 18 2021 [https://www.oas.org/es/cidh/informes/pdfs/2021\\_Nicaragua-ES.pdf](https://www.oas.org/es/cidh/informes/pdfs/2021_Nicaragua-ES.pdf)
- CIDH (2022). Medida Cautelar No. 505-15 Indígenas de las Comunidades Musawas, Suniwas y Wilú del Territorio Mayangna Sauni As en la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte. Resolución 9/2022. <http://www.oas.org/es/CIDH/jsForm/?File=/es/cidh/prensa/comunicados/2022/032.asp>
- Confidencial (22 enero 2022). Nuevas autoridades de Gobierno Territorial mayangna de Sauni As controladas por FSLN. Revisado 18 marzo 2022 <https://www.confidencial.com.ni/nacion/nuevas-autoridades-de-gobierno-territorial-mayangna-de-sauni-as-controladas-por-fsln/>
- Corteidh (2001) Caso de la Comunidad Mayagna (Sumo) Awas Tingni Vs. Nicaragua. Sentencia de 31 de agosto de 2001 (Fondo, Reparaciones y Costas) Recuperado

- [https://www.corteidh.or.cr/docs/casos/articulos/Seriec\\_79\\_esp.pdf](https://www.corteidh.or.cr/docs/casos/articulos/Seriec_79_esp.pdf)
- CorteIDH (2005). Caso Yatama Vs. Nicaragua. (Excepciones Preliminares, Fondo, Reparaciones y Costas). Recuperado en febrero 2022 en [https://www.corteidh.or.cr/casos\\_sentencias.cfm](https://www.corteidh.or.cr/casos_sentencias.cfm)
- Cumes, A. (2018) Un patriarcado colonial somete no solo a las mujeres. Entrevista en línea de Bárbara Barrera en Palabra Pública – Universidad de Chile. Recuperado abril 15, 2022 <https://palabrapublica.uchile.cl/2018/07/23/aura-cumes-escritora-un-patriarcado-colonial-somete-no-solo-a-las-mujeres/>
- Del Cid V. (2011). Capítulo Nicaragua, Tomo II. *Diagnóstico sobre la situación de los derechos humanos de los pueblos indígenas de América central*. Recuperado febrero 2022 en <http://oacnudh.org/wp-content/uploads/2012/10/NICARAGUA.pdf>
- Del Cid, V (2017). La cultura Mayangna, una etnografía por imágenes. Revista nicaragüense de antropología, año 1, número 1.
- Díaz-Polanco, H. (1999). Los desafíos de la autonomía en Nicaragua. Entrevista con Mirna Cunningham. Desacatos No. 1, ciudad de México, CIESAS.
- Envío Digital (No. 57 marzo 1987). Los indígenas Sumus de la Costa Atlántica. Revisado diciembre 10, 2021 en <https://www.envio.org.ni/articulo/483>
- Expediente Público (8 de septiembre 2021). Policía encubre a colonos y acusa a indígenas por masacre del 23 de agosto. Recuperado 11 marzo 2022 <https://www.expedientepublico.org.ni>
- Figueroa, D. and González, M. 2021. Violencia política en los márgenes del Estado: Autonomía comunitaria afro-indígena en la Costa Atlántica de Nicaragua, *Canadian Journal of Latin American and Caribbean Studies / Revue canadienne des études latino-américaines et caraïbes*, DOI: 10.1080/08263663.2021.1970410
- García, C. (2014). Aculturación del pueblo indígena Mixe, Oaxaca, México. ESTUDIOS HISTORICOS – CDHRPyB- Año VI - Julio 2014 - N° 12 – ISSN: 1688 – 5317. Uruguay
- Gobierno de la Nación Indígena Mayangna, (2016). ¿Qué es la Nación Mayangna? Documento interno.
- Gonda, N., Flores, S. Casolo, J. (por publicarse) When struggles for autonomy meet environmental (un)governance: Rethinking resilience through socioecological conflicts in Nicaragua.
- González M, Figueroa, Barbeyto (2006). Género, etnia, partidos políticos en las elecciones regionales de la Costa Caribe: Retos de la diversidad. BICU WANI número 43.
- GTI Sauni Arungka (23 de marzo 2022). Comunicado 03-22-03-22 Sobre el asesinato del líder indígena Salomón López Smith. <https://www.facebook.com/111624848122922/posts/122750120343728/>
- Green Climate Fund (2019) Concept Note Bio-CLIMA Nicaragua: Integrated climate action for reduced deforestation and strengthened resilience in the BOSAWÁS and Rio San Juan Biosphere Reserves. Recuperado, 15 Enero 2022 <https://www.greenclimate.fund/sites/default/files/document/21710-bio-clima-nicaragua.pdf>

- Green Climate Fund (2021). Reporte de Evaluación de cumplimiento, caso C-0006-Nicaragua. Recuperado 15 marzo 2022 <https://irm.greenclimate.fund/sites/default/files/case/c0006-nicaragua-eligibility-determination-espa-ol.pdf>
- Hooker, A. (2014). Resiliencia y trayectoria de las mujeres garifunas y afrodescendientes en Centroamérica, particularmente Guatemala. Revista CARIBE No. 14, URACCAN Bluefields, Nicaragua.
- Larson, A., y Soto, F. compiladoras (2012) Territorialidad y Gobernanza: tejiendo retos en los territorios indígenas de la RAAN Nicaragua. Instituto Nitlapan-UCA, 1ra edición, Managua.
- M. Ortega H. (1997). El régimen de autonomía en Nicaragua: contradicciones históricas y debates recientes.
- Monte, A. y Gómez, J.P. (2020). Autoritarismo, Violencia y Elites en Nicaragua. Reflexiones sobre la crisis (2018-2019). Anuario de Estudios Centroamericanos, vol. 46, Universidad de Costa Rica.
- OMCT (11 febrero 2022) Intervenciones Urgentes, Nicaragua: Riesgo inminente de ataque contra comunidades defensoras indígenas. Recuperado 23 febrero 2022 <https://www.omct.org/es/recursos/llamamientos-urgentes/nicaragua-riesgo-inminente-de-ataque-contra-comunidades-defensoras-indigenas>
- Onda Local (25 de agosto 2021). Colonos asesinan a 11 indígenas en el cerro de Kiwakumbaih, territorio Mayangna. Recuperado 23 febrero 2022 <https://ondalocalni.com/ni>
- Paredes, J. (2017) El feminismo comunitario: la creación de un pensamiento propio. CORPUS (en línea) vol. 7 No.1 publicado 30 junio 2017, consultado 14 febrero 2022 <https://journals.openedition.org/corpusarchivos/1835>
- Svampa, M. (2019). Las fronteras del neoextractivismo en América Latina. Conflictos socioambientales, giro ecoterritorial y nuevas dependencias. Primera edición, CALAS.
- Stevenhagen, R. (1998). Derecho Indígenas y Derechos Humanos en América Latina. El Colegio de México- IIDH, primera edición -México.
- The Oakland Institute (2020). Nicaragua's Failed Revolution: The Indigenous Struggle for Saneamiento. Retrieved on March 15, 2022 <https://www.oaklandinstitute.org/nicaragua-failed-revolution-indigenous-struggle-saneamiento>
- MHCP (2021). Informe de Liquidación del Presupuesto General de la República 2021. Cuadro 8 Gastos Totales Asignaciones y Subvenciones. Recuperado 10 abril 2022 <http://www.hacienda.gob.ni/documentos/presupuesto/informes/2021/Informe%20de%20Liquidacion%20del%20Presupuesto%20General%20de%20la%20Republica%202021.pdf/view>
- MHCP (2022). Proyecto de presupuesto general de Nicaragua 2022. Asignaciones y subvenciones. Recuperado 10 abril 2022 <http://www.hacienda.gob.ni/hacienda/presupuesto2022/pgr/41.EstructuraFuncionalGastoAsignacionesSubvenciones.pdf>

- UICN (2014) Bio-Protocolo de Consulta y Consentimiento libre, previo e informado (CLPI) del pueblo Mayangna Sauni Arungka, Territorio Matumbak. San José Costa Rica, 126 paginas.
- Valle, A. 2016. Manual de Derecho Internacional Público, 3a. ed. Managua 260 p.
- Van Deuren, C. 2017. Las dinámicas conflictivas en relación a la autonomía territorial en espacios geográficos multiétnicos y áreas protegidas. Un estudio sobre las experiencias de los indígenas mayangna en la Reserva de la Biosfera de Bosawás, Región Autónoma de la Costa Caribe de Nicaragua. Tesis doctoral Colegio de San Luis de Potosí, México.
- Wainwright, Joel, and Joe Bryan. 2009. "Cartography, territory, property: postcolonial reflections on indigenous counter-mapping in Nicaragua and Belize." *cultural geographies* 16 (2):153-178.
- Zapata, Y. (s.f.) Una historia diferente. Manual de educación ciudadana intercultural y autónoma. Una publicación de Fundación Ford y URACCAN.







*Sobre el autor:*

*Dr. Steven H. Emerman tiene un Bachelor of Science (B.S.) en Matemáticas de la Universidad Estatal de Ohio, un Máster (M.A.) en Geofísica de la Universidad de Princeton, y es Doctor (Ph.D.) en Geofísica por la Universidad de Cornell. Cuenta con 31 años de experiencia en la enseñanza de hidrología y geofísica, incluida la enseñanza como profesor Fulbright en Ecuador y Nepal y suma más de 70 publicaciones revisadas por expertos en estas áreas. Es propietario de Malach Consulting, empresa especializada en evaluar los impactos ambientales de la minería tanto para empresas mineras como para agencias gubernamentales y no gubernamentales.*

*El Dr. Emerman ha evaluado instalaciones de almacenamiento de relaves propuestas y existentes en Norteamérica, Sudamérica, Europa, África, Asia y Oceanía, y ha testificado sobre cuestiones relacionadas con la minería y el agua ante el Subcomité de Pueblos Indígenas de los Estados Unidos de la Cámara de Representantes de los E.E. U.U. y el Foro Permanente para las Cuestiones Indígenas de las Naciones Unidas, y la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente. El Dr. Emerman es el presidente del Subcomité de Cuerpo de Conocimientos de la Sociedad de Presas de EE. UU. y es uno de los autores de La Seguridad Ante Todo: Lineamientos para el Manejo Responsable de Relaves.*

■■■ HEINRICH BÖLL STIFTUNG

**SAN SALVADOR**

El Salvador | Costa Rica | Guatemala |  
Honduras | Nicaragua