



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS

MASTER INTERUNIVERSITARIO EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

TRABAJO FIN DE MASTER

Sostenibilidad de tratamientos de residuos mineros asociada al riesgo

Sustainability of mining tailings treatments associated with risk

Autor: Miren Josu Álvarez Amigo
Director: Rocio Luiña Fernández

Fecha: julio 2017



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Rocío Luiña Fernández por su colaboración y dedicación, por su paciencia y ayuda en todo momento en el desarrollo de este proyecto.

Al Área de Proyectos de Ingeniería de la Escuela de Minas, Energía y Materiales de Oviedo por todo el apoyo y ayuda recibida para la realización de este Trabajo Fin de Máster.

A mi familia, amigos y compañeros de clase por todo su apoyo en los momentos de flaqueza.



RESUMEN

La situación actual de sobreexplotación y contaminación del planeta, hace necesario tomar conciencia de la necesidad de nuevos métodos de extracción y gestión de recursos minerales. El aumento de la población mundial y de las necesidades de la misma, han provocado un auge de explotaciones mineras que conllevan un elevado número de residuos que tratar y almacenar. Tanto las explotaciones mineras como la gestión de sus residuos deben buscar la sostenibilidad y la mejora continua. Existen en la actualidad diferentes herramientas de análisis de sostenibilidad, como es el Análisis del Ciclo de Vida, que evalúa todo el proceso (desde la cuna hasta la tumba), la Huella de Carbono y la Huella hídrica, sin embargo, no está contemplado en ninguna ni el riesgo que entraña el manejo de estos residuos mineros ni las catástrofes medioambientales y para la salud humana que pueden llegar a provocar (un factor a tener en cuenta si el fin es obtener una gestión de residuos sostenible). Existen varios tipos de relaves mineros, dependiendo de su porcentaje en peso de agua: convencionales, espesados y filtrados (paste). Se desarrolla en este documento, el análisis de riesgos de dichos escenarios, mediante un análisis modal de fallos y efectos (AMFE), y se establecen las conclusiones del análisis tras realizar una comparación de los resultados. Este análisis de riesgos abarca todas las etapas del proceso de gestión de residuos, comenzando a la salida del proceso de separación, siguiendo por el transporte y finalizando en el depósito de almacenamiento.



ABSTRACT

The current situation of overexploitation and pollution of the planet makes it necessary to be aware of the need for new methods of extraction and management of mineral resources. The increase of the world population and the consumerism of the same, have caused a boom of mining exploitations that carry a high number of residues that to treat and to store. Both mining operations and the management of their waste must seek sustainability and continuous improvement. There are different tools for sustainability analysis, such as the Life Cycle Assessment, which evaluates the whole process (from the cradle to the grave), the Carbon Footprint and the Water Footprint, however, is not contemplated in Neither the risk involved in the management of these mineral residues nor the environmental and human health catastrophes they may cause (a factor to be taken into account if the aim is to achieve sustainable waste management). There are several types of mining tailings, depending on their weight percentage of water: conventional, thickened and filtered (paste). In this document, the risk assessment of these scenarios is developed through a modal analysis of failures and effects (AMFE), and the conclusions of the analysis are established after a comparison of the results. This risk assessment covers all stages of the waste management process, starting at the end of the separation process, following the transport and ending at the storage tank.



ÍNDICE

1	Introducción.....	12
2	Principales impactos de la actividad minera y su riesgo asociado.....	14
2.1	<i>Uso del suelo</i>	<i>14</i>
2.2	<i>Consumo de agua.....</i>	<i>15</i>
2.3	<i>Almacenamiento de relaves.....</i>	<i>17</i>
2.4	<i>Emisiones al aire.....</i>	<i>18</i>
2.5	<i>Fallos.....</i>	<i>18</i>
3	Sistemas de tratamiento, deposición y almacenamiento de relaves mineros.....	21
3.1	<i>Producción de relaves.....</i>	<i>22</i>
3.2	<i>Características de los relaves</i>	<i>24</i>
3.3	<i>Técnicas de almacenamiento.....</i>	<i>25</i>
3.3.1	<i>Estructuras superficiales</i>	<i>25</i>
3.3.2	<i>Almacenamiento de relaves en pozo.....</i>	<i>31</i>
3.3.3	<i>Relaves como relleno de trabajos subterráneos.....</i>	<i>32</i>
3.3.4	<i>Desecho en alta mar – Descarga en ríos, lagos y mares.</i>	<i>33</i>
3.4	<i>Métodos de deposición de relaves</i>	<i>33</i>
3.4.1	<i>Subaérea.....</i>	<i>34</i>
3.4.2	<i>Subacuosa.....</i>	<i>35</i>
3.4.3	<i>Tipos de descarga dependiendo del número de drenajes o puntos de descarga... </i>	<i>35</i>
3.5	<i>Tipos de relaves.....</i>	<i>37</i>
3.5.1	<i>Disposición de residuos convencionales</i>	<i>39</i>
3.5.2	<i>Disposición de relaves espesados</i>	<i>40</i>
3.5.3	<i>Apilamiento en seco (relaves filtrados).....</i>	<i>42</i>
3.5.4	<i>Co- deposición.....</i>	<i>45</i>
3.6	<i>Técnicas de manejo.....</i>	<i>47</i>



3.6.1	Lodos	48
3.6.2	Torta húmeda (relaves filtrados).....	49
4	El análisis de riesgo como indicador de sostenibilidad	51
4.1.1	Modos de fallos y análisis de efectos	51
4.1.2	Limitaciones.....	55
5	Escenarios planteados	56
5.1	<i>Escenario 1: Relaves convencionales en etapas de operación y cierre.</i>	<i>56</i>
5.1.1	Transporte y bombeo por tubería.....	57
5.1.2	Presa	57
5.2	<i>Escenario 2: Relaves espesados (paste) en las etapas de operación y cierre.....</i>	<i>58</i>
5.2.1	Espesador	58
5.2.2	Transporte y bombeo por tubería.....	61
5.2.3	Presa	61
5.3	<i>Escenario 3: Relaves filtrados en las etapas de operación y cierre</i>	<i>62</i>
5.3.1	Espesador	62
5.3.2	Filtro	62
5.3.3	Transporte en camión	65
5.3.4	Apilamiento en seco	66
7.	Metodología de evaluación de riesgos para residuos convencionales, espesados y filtrados	68
7.2.	<i>Evaluación de riesgos en minería</i>	<i>70</i>
7.3.	<i>Objetivo y definición del alcance</i>	<i>71</i>
7.3.1.	Etapa 1: Identificación de los modos de fallo significativos.....	73
7.3.2.	Etapa 2: Evaluación de la probabilidad de cada modelo de fallo.....	81
7.3.3.	Etapa 3: Evaluación de la gravedad de los efectos de cada modelo de fallo.....	81
7.3.4.	Etapa 4: Evaluación del nivel de confianza de cada modelo de fallo.....	82



7.3.5.	Limitaciones.....	83
7.4.	<i>Resultados</i>	84
7.4.1.	Matriz de riesgos.....	84
7.4.2.	Matriz de riesgos para impactos ambientales.....	87
7.4.3.	Matriz de riesgos para la salud pública.....	88
7.4.4.	Comparación de escenarios.....	89
8.	Conclusiones	97
9.	Anexos	99
9.1.	<i>Tablas de resultados</i>	99
9.1.1.	Escenario 1 Fallos de transporte en la etapa de operación.....	99
9.1.2.	Escenario 1 Fallos de la presa en la etapa de operación.....	103
9.1.3.	Escenario 1: Fallos de la presa en la etapa de clausura.....	113
9.1.4.	Escenario 2 Fallos de transporte en la etapa de operación.....	126
9.1.5.	Escenario 2: Fallos de la presa en la etapa de operación.....	129
9.1.6.	Escenario 2: Fallos de la presa en la etapa de clausura.....	142
9.1.7.	Escenario 2: Fallos del espesador en la etapa de operación.....	155
9.1.8.	Escenario 3: Fallos de transporte en la etapa de operación.....	159
9.1.9.	Escenario 3: Fallos de la presa en la etapa de operación.....	162
9.1.10.	Escenario 3 Fallos de la presa en la etapa de clausura.....	175
9.1.11.	Escenario 3: Fallos del espesador en la etapa de operación.....	188
9.1.12.	Escenario 3: Fallos del filtrado en la etapa de operación.....	193
9.1.13.	Escenario 3: Fallos de transporte en la etapa de traslado en camión.....	195
10.	Referencias bibliográficas	197



Índice de ilustraciones

Figura 1: Rotura de una presa de relaves de Cataguases (Brasil)	19
Figura 2: Histórico de accidentes en presas de relaves	19
Figura 3: Diagrama de flujo generalizado para reciclaje de relaves, adaptado de (Edraki et al., 2014)	23
Figura 4: Configuración de dique de anillo (disposición en tres celdas) en Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, Australia Occidental.....	26
Figura 5: Vertedero de relaves de Cross Valley en Highland Valley Copper, BC, Canadá (Cortesía de Teck)	27
Figura 6: Método agudas arriba de construcción de terraplenes (© Jon Engels)	28
Figura 7: Método de construcción de terraplenes aguas abajo.....	29
Figura 8: Método de construcción de terraplenes de línea central.....	30
Figura 9: Típico almacenamiento en pozo	31
Figura 10: Deposición en río, río Jaba, Isla Bougainville, Papua Nueva Guinea (Geoff pickup)..	33
Figura 11: Métodos de deposición de relaves	34
Figura 12: Descarga subaérea de relaves (izquierda) y corrientes trenzadas poco profundas de baja velocidad en una playa de relaves (derecha) (Jon Engels)	35
Figura 13: Deposición subacuosa de relaves convencionales (@Jon Engels)	35
Figura 14: Varios puntos de descarga en la mina de oro de Jundee, Australia (Jon Engels)	36
Figura 15: Punto único de descarga en la mina de Glebe, Inglaterra (@Jon Engels).....	36
Figura 16: Espesador de alta densidad de relaves (Paste Thick Associates, 2013).....	41
Figura 17: Relaves espesados (Paste Thick Associates, 2013)	41
Figura 18: Apilamiento en seco de relaves mediante cinta transportadora en La Coipa, Chile... 43	
Figura 19: Apilamiento de relaves en seco utilizando transporte mediante camión (Jon Engels)	44
Figura 20: Tendencias en el uso de relaves deshidratados en la minería (Davies, 2011).....	47
Figura 21: Pilas secas, relaves filtrados transportados mediante cinta transportadora y compactados mediante topadora, (Australian Government, 2016).....	49



Figura 22: Tipos de relaves y sus transportes (adaptado de Davies and Rice (2004)).	50
Figura 23: Depósito de relaves convencionales (Wennberg, 2010)	56
Figura 24: Descripción esquemática del proceso de relaves espesados con el espesador localizado cerca del área de deposición (Wennberg, 2010)	58
Figura 25: Espesador de alta densidad, EIMCO (Bedell et al. 2002)	60
Figura 26: Fluido típico de un espesador de alta densidad (Bedell et al.2002)	60
Figura 27: Descripción esquemática del sistema de filtrado de relaves mineros	62
Figura 28: Ejemplo de una planta de filtrado	63
Figura 29: Filtro prensa (Advanced Mineral Processing S.L.)	63
Figura 30: Partes de un filtro prensa	65
Figura 31: Consistencia de los relaves filtrados (RET, 2007)	65
Figura 32: Tipos de procesos de tratamiento de relaves mineros (OUTOTEC)	67
Figura 33: Derrame en el monte Polley, Canadá	69
Figura 34: Elementos clave de los sistemas de gestión de colas adaptado de (RET, 2007)	72
Figura 35: Mega camión volcado en la mina Veladero-Barrick Gold	80



Índice de tablas

<i>Tabla 1: Requisitos típicos en los equipos de bombeo de relaves para diferentes consistencias de los mismos, (Australian Government, 2016)</i>	<i>48</i>
Tabla 2: Probabilidad de evento (Eng and Shaw).....	53
Tabla 3: Severidad de los efectos (Eng and Saw)	54
Tabla 4: Nivel de confianza (Eng and Saw).....	54
Tabla 5: Probabilidad del evento (Eng,2009)	81
Tabla 6: Severidad de los efectos (Eng and Saw)	82
Tabla 7: Niveles de confianza (Eng and Saw)	83
Tabla 8: Descripción de los modos de fallo	84



Índice de graficos

Gráfico 1: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación	90
Gráfico 2: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en el transporte.....	90
Gráfico 3: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en la presa en la etapa de operación	91
Gráfico 4: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en la presa en la etapa de operación.....	92
Gráfico 5: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos a fallos en la presa en la etapa de operación	92
Gráfico 6: Severidad de los riesgos para la seguridad pública debidos a fallos en la presa en la etapa de post-cierre	93
Gráfico 7: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos al espesador en la etapa de operación	93
Gráfico 8: Severidad de los riesgos para la seguridad pública por fallos en el espesador durante la etapa de operación.....	94
Gráfico 9: Severidad de los riesgos de efectos ambientales y para la seguridad pública por fallos en el equipo de filtrado en la etapa de operación.....	94
Gráfico 10: Severidad de los riesgos ambientales y para la seguridad pública debidos a fallos en el transporte por camión	95
Gráfico 11: Distribución del número de riesgos con efectos ambientales para las diferentes severidades	96
Gráfico 12: Distribución del número de riesgos con efecto en la seguridad pública para las diferentes severidades.....	96
Gráfico 13: Distribución total de los riesgos por escenario	96



1 Introducción

Las explotaciones mineras conllevan un elevado número de residuos que deben tratarse y almacenarse, este volumen de relaves generados en las minas puede ser casi igual al volumen de materia prima procesada, es decir, una mina que produce 200.000 toneladas de mineral de cobre por día producirá prácticamente el mismo tonelaje de relaves al día (MMSD, 2002).

Estos volúmenes ingentes de residuos, junto con características peligrosas de los mismos, en algunos casos, generan impactos irreversibles que convierten el manejo de relaves mineros en una cuestión crucial. La composición físico-química de los relaves supone grandes de desafíos adicionales para lograr paisajes física y químicamente estables que no presenten riesgos como el drenaje ácido de las minas. La falta de manejo de los relaves puede resultar costosa, con graves e irreversibles consecuencias, incluso a veces catastróficas (Adiansyah et al., 2015).

El proceso de gestión de residuos comienza con el tratamiento del mineral extraído de la mina para separar los mismos de la mena, a continuación tiene lugar su transporte hasta el depósito de almacenamiento y posteriormente su clausura.

Como referencia para determinar la estrategia adecuada de gestión de los relaves mineros deben utilizarse los componentes del desarrollo sostenible, incluidos el agua, la energía, los costos, la tecnología y el impacto ambiental (Adiansyah et al., 2015). En la búsqueda del desarrollo sostenible, un parámetro de especial importancia es la gestión de estos residuos, teniendo en cuenta, además de factores como el gasto de energía y el agua, el riesgo de catástrofes humanas y medioambientales que pueden ocasionar los procesos de tratamiento y almacenamiento.

Atendiendo a las severas y, a veces, irreversibles consecuencias económicas, sociales y ambientales ocasionadas por una mala gestión de los relaves, es imprescindible utilizar metodologías para el manejo de residuos mineros (Adiansyah et al., 2015).



A lo largo de todos los estudios de sostenibilidad realizados en la industria minera, se ha puesto mucho énfasis en la extracción de minerales asignándole la mayor parte de las cargas ambientales, mientras que las fases de manejo de sus residuos han pasado desapercibidas (Durucan et al., 2006). Además, los residuos sólidos se consideran directamente como una emisión al medio ambiente y no se tiene en cuenta su proceso de gestión como residuos. Sin embargo, la Directiva 2006/21 / CE de la UE obliga no sólo a la correcta gestión del vertedero, sino también a garantizar una seguridad en la fase de clausura (Kulczycka, 2008). De hecho, la tendencia actual es considerar la gestión de residuos sólidos como un proceso independiente.

Existe, por lo tanto, una nueva conciencia social que añade al gran reto del mundo contemporáneo de lograr un aumento de la eficiencia en sus actividades, realizarlo siempre con el mínimo impacto ambiental. Es decir, se persigue lograr un desarrollo sostenible a la vez que una gestión eficaz de los impactos ambientales, llegando éstos a convertirse en los objetivos clave para la acción política a nivel mundial y local.

El siguiente documento analiza y compara los riesgos de tres escenarios de transporte y almacenamientos de residuos mineros, evaluando todo el proceso desde su separación en las plantas de tratamiento hasta su depósito. Los tres escenarios evaluados corresponden a tres tipos de tratamientos: relaves convencionales, espesados y filtrados, que se almacenan en estructuras superficiales.

La herramienta específica utilizada para realizar esta evaluación es el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE), cuya metodología se detalla a lo largo de este documento.



2 Principales impactos de la actividad minera y su riesgo asociado

Habitualmente, los impactos medioambientales del sector de la minería se refieren a las operaciones de extracción y explotación minera, planteando dos tipos de preocupaciones ambientales: el agotamiento de los recursos no renovables y el daño al medio ambiente. Este último incluye la contaminación del aire, del suelo y del agua, además de la generación de ruido. Todo ello se traduce en un impacto negativo en los hábitats naturales, un impacto visual en el paisaje y efectos sobre la disponibilidad de agua subterráneas (OECD, 2012).

En el camino de lograr una minería cada vez más sostenible es necesario centrarse en aquellos impactos significativos, que pueden ser modificados para conseguir evitar impactos ambientales globales, ya que el agotamiento de recursos no puede evitarse.

Existen también impactos que se producen durante el tratamiento y la gestión de los residuos, que no son valorados, las graves catástrofes que se han producido a lo largo de la historia, y también recientemente, muestran la necesidad de ampliar el horizonte de estudio a los riesgos de impactos humanos y ambientales existentes en el tratamiento de residuos mineros. En este apartado, se analizarán los impactos que pueden producirse en los procesos de gestión y almacenamiento de relaves.

2.1 Uso del suelo

El uso del suelo es un factor a tener en cuenta, no solo durante la fase de operación, si no también durante la de cierre. La superficie de suelo utilizada en ambas fases aumenta o disminuye dependiendo del tipo de relave utilizado. Los relaves convencionales necesitan de un depósito de mayor capacidad que los espesados y los filtrados, sin embargo su instalación de bombeo es menor.

Entre los impactos potenciales en la gestión de relaves mineros, el deterioro de las potencialidad de uso del terreno es una de las principales preocupaciones para (Ripley and Redmann, 1995) (Jolliet et al., 2004). El uso superficial del terreno para actividades antropogénicas es reconocido como una amenaza potencial para especies y ecosistemas.



En los depósitos de relaves filtrados, la ausencia de un estanque de relaves, un escurrimiento muy bajo (si es que existe) de la masa de relaves insaturados y el alto grado general de integridad estructural permiten que las pilas secas presenten un cierre comparativamente sencillo y previsible en comparación con los embalses convencionales (Davies, 2011)

En el futuro, a medida que las regulaciones ambientales aprieten y la industria minera se someta a una creciente presión para ser más sostenible, los beneficios de la eliminación de residuos secos, incluyendo paste y apilado en pilas secas, probablemente superarán los inconvenientes (Yilmaz, 2011).

2.2 Consumo de agua

El uso del agua ha estado creciendo a más del doble de la tasa de aumento de la población en el siglo pasado, y, aunque no existe una escasez mundial del agua como tal, un creciente número de regiones están crónicamente escasas de agua. Para el año 2025, 1 800 millones de personas estarán viviendo en países o regiones con escasez absoluta de agua, y las dos terceras partes de la población mundial podrían estar bajo condiciones de estrés. La situación se verá agravada con el rápido crecimiento de las zonas urbanas, donde hay una fuerte presión sobre los recursos hídricos. La mayoría de los países en el Cercano Oriente y Norte de África sufren de aguda escasez de agua, al igual que países como México, Pakistán, Sudáfrica, y grandes partes de China y la India (Ministerio de España).

Por ejemplo, en Chile, el precio futuro del cobre y el crecimiento de las mineras que lo producen pueden depender de un recurso preciado y escaso: el agua. Extraer el metal industrial exige enormes volúmenes de agua para controlar el polvo y separar el cobre de la tierra. No obstante, una sequía que ya lleva siete años en Chile, el mayor productor mundial del metal rojo, está obligando a las grandes mineras a reducir la producción. Los problemas de producción relacionados con el agua son una de las razones por la que algunos analistas estiman que es probable que los precios del cobre no retrocedan mucho después de caer casi 20% en lo que va del año. En el largo plazo, señalan, la cotización del metal podría ascender en la medida en que la producción no acompañe el crecimiento de la demanda. Anglo American PLC ha indicado que la escasez de agua podría reducir en 18 mil toneladas su producción anual en la mina Los Bronces, en la Región de Atacama, en el norte de Chile, que alberga al desierto más árido del mundo (Minería Chilena, 2015).



Es probablemente el impacto más significativo. Las minas reducen el nivel local del agua e incluso el nivel regional. Pueden causar la sequía de los afluentes y reducir el nivel del agua en acuíferos o pozos cercanos, esto último podría tener consecuencias como, tener que perforar y profundizar los pozos o bombear agua hacia la superficie para las personas afectadas, suponiendo un coste extra. Además, esta reducción del nivel del agua afecta a especies animales y vegetales, privándoles o reduciéndoles su acceso al agua, y aunque, cuando finalizan las actividades mineras el agotamiento de los recursos hídricos también se acaba, el tiempo necesario, para que el nivel del agua vuelva a unos niveles cercanos a los iniciales, es muy grande.

Por otra parte, el agua puede ser contaminada por los residuos y productos resultantes de la explotación minera y el tratamiento de los minerales extraídos. Además, las infraestructuras y equipos que forman parte de las operaciones mineras y del procesamiento, producen residuos contaminantes, en mayor o menor medida, como pueden ser lodos con aceites, restos de combustibles y sustancias químicas o metálicas, etc. (Moran, 2001). Esta contaminación afecta a las aguas superficiales y subterráneas perjudicando la calidad y la cantidad del abastecimiento de agua a las poblaciones cercanas, y destruyendo flora y fauna acuática, perjudicando también a actividades económicas como la pesca. Hay que resaltar que una vez que estas aguas son contaminadas, la contaminación se extiende al suelo perjudicando labores como la agricultura y la ganadería, dañando también el ecosistema terrestre.

Se puede afirmar, por tanto, que la contaminación sobre el agua puede llegar a dañar directa e indirectamente ecosistemas terrestres y acuáticos, además también puede tener una influencia negativa sobre la economía y los aspectos sociales de las poblaciones próximas a la zona donde se ha producido la contaminación. Mediante la rotura de la roca y el uso de explosivos se generan ácidos y aumentan las concentraciones de nitrato, amoníaco, y otras sustancias químicas, provocando un incremento de la eutrofización y la contaminación del agua, contaminando el agua durante décadas, incluso cientos de años. En general la roca residual se acumula en la superficie, suele tener altas concentraciones de sulfuros, metales tóxicos, y si no se lleva a cabo una gestión activa y segura, estos contaminantes se pueden filtrar y contaminar aguas superficiales y subterráneas.



En la fase de tratamiento del mineral se emplean sustancias químicas sobre el mineral extraído de la mina, los residuos resultantes de estos procesos tienen elevadas concentraciones de sustancias químicas que deben ser tratadas y gestionadas eficazmente para evitar la contaminación del medio ambiente. Antes los relaves, generalmente eran vertidos al mar, ríos o canales, con notables efectos sobre el medio ambiente cuando los relaves tenían altas concentraciones de sustancias contaminantes y también debido a su elevada alcalinidad. Actualmente se almacenan en depósitos sellados que son bastante seguros, aunque sigue existiendo la posibilidad de filtraciones que provoquen contaminación del agua, y a su vez de suelos y especies animales y vegetales. Los depósitos de relaves, pilas de sedimentos, equipos de bombeo y áreas de revegetación necesitan un mantenimiento, aun habiendo finalizado la actividad minera. Esto se realiza para prevenir deterioros y consecuentemente filtraciones que provoquen contaminación, además del plan de restauración del área ocupada por la actividad minera, también se lleva a cabo un mantenimiento de los depósitos de residuos y en algunos países se realizan tratamientos para mejorar la calidad del agua durante mucho tiempo.

En países con actividad tectónica los tanques o depósitos de relaves deben ser construidos llevando a cabo un estudio detallado y el mantenimiento debe ser más estricto (Moran, 2001).

2.3 Almacenamiento de relaves

Uno de los principales problemas es la gran cantidad de residuos generados que requieren ser almacenados, suponiendo así el segundo mayor impacto de la actividad minera (Kulczycka, 2008). Esta cantidad tenderá a aumentar puesto que cada vez se explotan yacimientos con menores leyes por lo que el volumen de residuos es creciente, incluso para una producción constante. Las normas medioambientales son cada vez más restrictivas estableciendo limitaciones a las formas en que son tratados. Se requieren grandes extensiones y el almacenaje por largos periodos de tiempo se transforma en un problema medioambiental relevante (Reid et al., 2009). Parte de los residuos son contaminantes, pero incluso los inertes como los procedentes de la minería del hierro representan un problema creciente. Para dar idea de las cantidades se calcula que en las minas de hierro de Minas Gerais (Brasil) se genera una tonelada de residuos por cada tonelada de mineral, y esta cifra se considera menor que el promedio mundial.



La opción más evidente para reducir estos impactos sería a través de la disminución de la cantidad de residuos producidos. Sin embargo, su consecución requeriría de una inversión significativa (en caso de ser posible), lo que no sería factible al final de la vida del proceso minero, por lo tanto las nuevas tecnologías para la gestión de residuos se han orientado en el relleno y valorización de residuos (Kulczycka, 2008).

Por otra parte, existen varios autores que presentan y evalúan distintas formas de almacenamiento con el fin de ahorrar agua y tierra o simplemente para evitar fugas y contaminación del agua (Gunson et al., 2012) (Reid et al., 2009).

2.4 Emisiones al aire

Se debe a los contaminantes transportados mediante el aire, que se mueven durante las actividades mineras y construcción de infraestructuras relacionadas con dicha actividad. El transporte de contaminantes en el aire tiene lugar durante las diferentes etapas del ciclo de vida de una mina, pero sobre todo durante las etapas de exploración, desarrollo y operación o explotación (Oyarzun et al., 2011).

Las principales fuentes de contaminación en el tratamiento de los relaves mineros son las emisiones de polvo, que tienen lugar durante el transporte y la deposición de los relaves filtrados. También, una vez depositados pueden producir polvaredas y causar impactos ambientales y a la salud pública.

2.5. Fallos

Una de las razones de que se produzcan impactos sobre la salud pública, a causa de los procesos de tratamiento de relaves, es que, debido a la cantidad, concentración, características físicas, químicas o infecciosas, las sustancias peligrosas pueden: (1) causar o contribuir al aumento de mortalidad o al aumento de enfermedades severas o discapacitantes; (2) representar un riesgo presente o potencial para la salud humana o al ambiente si no son tratados, almacenados, transportados, dispuestos o manejados adecuadamente.



Una mala disposición o manejo de los relaves mineros puede causar importantes impactos en la sociedad tanto en la etapa de operación de la mina como tras el cierre, entre otros, una mala gestión de los residuos puede conllevar afecciones de salud pública a los residentes de la zona por diversos motivos (contaminación de aguas, de suelos, polvo...), inundaciones y pérdidas materiales e incluso pérdidas humanas.

A partir de los años 70 se comienzan a considerar conocidos todos los factores técnicos para la construcción de balsas de relaves. El incremento de producción de las minas hace que aparezcan embalses de más de 100 metros de altura. Pero los fallos siguen sucediendo. En este tipo de instalaciones, los accidentes pueden ocurrir y los efectos medioambientales pueden ser gigantescos.



Figura 1: Rotura de una presa de relaves de Cataguases (Brasil)

Las balsas de relaves se construyen en un periodo de tiempo largo, en etapas sucesivas y es necesario mantenerlos tras la clausura. Es difícil realizar un mantenimiento constante ya que se considera un gasto que no produce nada. Se estima el riesgo de fallo en el 0,1% a partir de datos de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD). Además, muchos incidentes no se comunican, por lo que las cifras pueden ser mayores.

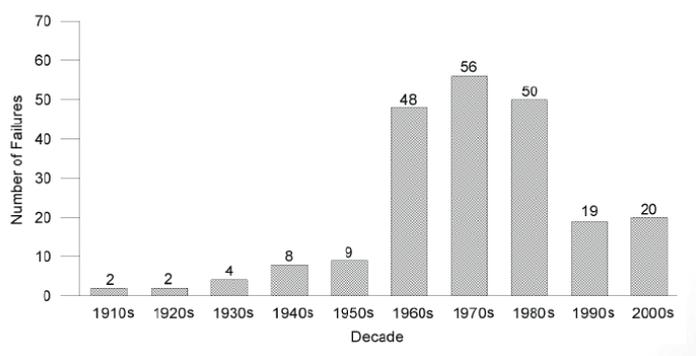


Figura 2: Histórico de accidentes en presas de relaves



El número de fallos en la actualidad es muy bajo si se compara con la década de los 60, pero aún se dan unos 20 accidentes por década.

El efecto del cambio climático también se hace notar, pues los fallos debidos a lluvias inusuales han pasado del 25% antes del 2000 al 40% a partir del año 2000. Los efectos sísmicos prácticamente han desaparecido.

Se han establecido muchas bases de datos para registrar los fallos de las presas de todo el mundo. En 1994, la Comisión de Grandes Presas de Estados Unidos (USCOLD) desarrolló una base de datos sobre los incidentes relacionados con las presas entre 1913 y 1989, incluyendo 185 casos. El ICOLD y la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU (EPA) han agregado más casos recientemente. A partir dicha base de datos, se puede concluir que entre 1970 y 2000, ha habido aproximadamente de 2 a 5 incidentes por fallos en presas de magnitud “importante” por año. Durante ningún año hubo menos de dos eventos - 1970-1999, inclusive (Davies et al., 2000). Esto demuestra que los derrames de relaves de mina no son realmente raros y pueden ocurrir en muchos continentes (Robinsky, 1999).

Estos fallos en las presas pueden darse por motivos diversos, por ejemplo, el caso de la mina de Ok Tedi en Nueva Guinea, constituye uno de los ejemplos de falta de estudio de impacto ambiental (EIA) y de negligencia gubernamental y empresarial. Esta se encuentra cerca de las cabeceras del río Ok Tedi, en el distrito Norte de la Provincia Occidental de Papua, Nueva Guinea, una región de alta precipitación y alta actividad sísmica. Los temblores sísmicos son comunes en la zona, sin embargo, el Gobierno dio el visto bueno para que siguieran las operaciones sin ningún tipo de presas, debido a que la compañía alegó que era demasiado caro su reconstrucción. Desde esa fecha hasta la actualidad, han descargado al río 80 millones de toneladas de residuos sólidos y se desconoce el volumen de los efluentes líquidos. Los problemas de contaminación debido a una mala gestión ambiental han causado grandes daños ambientales y sociales, a las 50 000 personas que viven en las 120 aldeas aguas abajo de la mina (Rodríguez et al., 2009).

Un caso concreto es el colapso de la presa de relaves en la mina Samarco, en el estado de Minas Gerais, Brasil, en noviembre de 2015. Este evento catastrófico tuvo como consecuencia la pérdida de vidas y cientos de hogares a medida que los desechos se extendieron al río Doce, comunidades y sistemas naturales. La presa de relaves había estado en marcha desde 1977 y, hasta el momento en que se derrumbó, no se consideró un riesgo significativo para la población local (Kemp et al., 2016).



3 Sistemas de tratamiento, deposición y almacenamiento de relaves mineros.

La minería es una actividad muy importante para el desarrollo de la sociedad, pero al mismo tiempo, la explotación de los recursos minerales ha adquirido mala reputación debido a los impactos negativos asociados con la contaminación y los fracasos estructurales (Dold, 2008). El principal problema ambiental al que se enfrenta la industria minera deriva de los relaves, debido al volumen generado y los contaminantes asociados con los mismos.

Los relaves son desechos de procesamiento de minas que consisten en rocas molidas y efluentes de procesos, que incluyen diferentes metales, minerales, productos químicos y agua de proceso. Por lo general, los relaves y el agua de proceso son descargados a un área de almacenamiento final conocida como almacenamiento de relaves (Engels, J., 2017a).

La industria minera debe afrontar un aumento constante en la producción de residuos. Esto implica la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para su gestión con el fin de reducir su volumen. Además, al ser un residuo con alto contenido de agua, su reducción implicaría considerables ahorros de la misma. Factores como la ubicación de los relaves, el uso de la tierra, su estabilidad física y el impacto en el sistema hidrológico son relevantes para obtener la aprobación del entorno para operar.

La eficiencia del uso del agua se puede mejorar significativamente mediante el espesamiento de los relaves, ya que el exceso de líquido del espesador se mantiene dentro del circuito de la planta y por lo tanto no está expuesto a pérdidas de evaporación y/o fuga (Bóhm et al., 2005). Este concepto fue introducido por el Dr. Eli Robinsky en 1968 con el fin de reducir el impacto ambiental negativo que puede estar asociado con el enfoque más convencional o tradicional de la eliminación de relaves de minas.

Debido a los problemas causados por el consumo excesivo de agua en la actividad minera y el volumen resultante de relaves generados, se han desarrollado diferentes técnicas de gestión de relaves, como el espesamiento y el filtrado, que optimizan el uso del agua, haciendo el proceso más sostenible. Además, como consecuencia de la reducción de agua, la ocupación de la tierra y el riesgo de fracaso se reducen también.



Entre las diferentes técnicas de almacenamiento de relaves, la más común es el almacenamiento convencional. La instalación principal del embalse convencional es un terraplén para retener los relaves y el agua (Engels, J., 2017b). El colapso de estos terraplenes conlleva daños catastróficos al medio ambiente y la seguridad pública, causando incluso la pérdida de vidas humanas, tanto durante las fases de operación como en las fases de cierre posteriores (ENPI, E., 2011).

3.1 Producción de relaves

Las actividades extractivas comprenden una serie de pasos secuenciales, cuyo objetivo final es obtener el material deseado. Sin embargo, los procesos necesarios para su uso generan una gran cantidad de residuos que plantean un riesgo para el medio ambiente, no sólo por sus características y por la demanda de agua, sino también por el gran volumen generado (Rodríguez et al., 2006).

Existen cinco tipos diferentes de materiales en una mina y cada uno de ellos se gestiona de manera diferente (Pebble, 2005):

1. Cobertera: se compone de tierra, grava y otros materiales sueltos que cubren la superficie de la mina. A menudo se utiliza como material de construcción durante el desarrollo de la mina o puede almacenarse en grandes pilas para ser utilizado, cuando la explotación finalice, como relleno para restaurar las condiciones naturales.
2. Mena: mineral que presenta interés económico en un yacimiento.
3. Ganga: es el mineral que no presenta interés económico en un yacimiento, aquella parte de la mena que no puede ser desechada en la mina. Es separada de la mena mediante procesos de concentración. Material estéril o inútil que acompaña al mineral que se explota.

Por lo tanto, una vez extraído el mineral, se obtienen dos productos diferenciados:

4. Concentrado mineral: es una mezcla de agua y roca finamente molida que contiene generalmente cerca de 80 a 90 por ciento de los minerales económicos presentes en el mineral.
5. Los relaves: son una mezcla del agua y de la roca finamente molida que se obtiene tras retirar el concentrado mineral (ganga) (Pebble, 2005).



Los procesos de separación habitualmente incorporan una etapa de flotación por espuma en la que la ganga se separa del mineral mediante la adición de floculantes al agua.

La flotación se ha convertido en el método de extracción más competitivo, ya que proporciona una buena separación de mineral-ganga, con un costo de energía muy rentable. Sin embargo, este proceso incrementa significativamente el consumo de agua, generando una cantidad significativa de relaves (Gurdeep S., 2005).

Los cinco tipos básicos de reactivos utilizados en la recuperación de la flotación por espuma incluyen colectores, espumas, depresores, activadores y modificadores. Los reactivos dosificados en pequeñas cantidades se consumen, se conservan en el proceso o se descargan con los relaves. Por lo tanto, el diseño de una instalación de almacenamiento de relaves debe optimizarse para evitar la intemperie y la movilización de contaminantes (Engels, J., 2017c).

Se muestra a continuación un proceso de flujo generalizado para el reciclaje de relaves modificado de (Edraki et al., 2014):

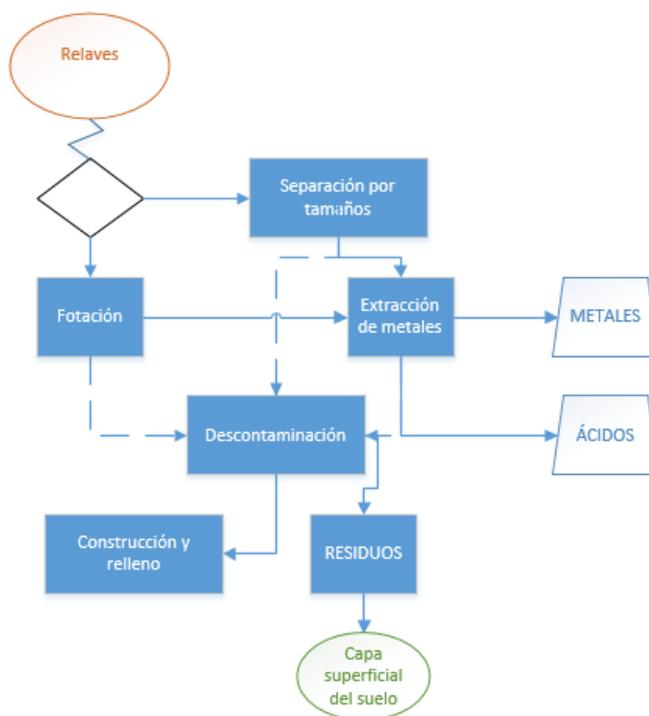


Figura 3: Diagrama de flujo generalizado para reciclaje de relaves, adaptado de (Edraki et al., 2014)



3.2 Características de los relaves

Las características de los relaves son muy variables y dependen de la mineralogía del mineral junto con los procesos físicos y químicos utilizados para extraer el producto económico. (Ritcey, 1989) informó que incluso los relaves del mismo tipo pueden poseer una mineralogía diferente y por lo tanto tendrán diferentes características físicas y químicas. Una vez determinadas las características probables de los relaves a partir de ensayos de laboratorio y de plantas piloto, se pueden identificar los requisitos de diseño necesarios para mitigar el impacto ambiental y determinar el rendimiento operativo óptimo.

Los dos parámetros de diseño más importantes que influyen en el balance hídrico de un proyecto minero son:

- La liberación de agua de los relaves una vez descargada en una instalación
- El volumen disponible para el bombeo de retorno a la planta de procesamiento

La liberación del agua depende de las propiedades físicas de los relaves depositados que pueden estimarse sometiéndolos a pruebas de laboratorio con diferentes concentraciones de sólidos. Un correcto manejo de la cantidad de agua en los relaves es necesario para evitar la descarga de grandes cantidades a un área de almacenamiento (por ejemplo, técnicas de apilado en paste y seco) además de para minimizar las pérdidas por filtración y evaporación.

Para ayudar a determinar los requisitos de diseño de una instalación de almacenamiento de relaves, es preciso establecer las siguientes características de los mismos (EC, 2004).

1. Composición química (incluyendo aquellos cambios en la química que tienen lugar durante el procesamiento de minerales) y su capacidad para oxidar y movilizar metales.
2. Composición física y estabilidad (carga estática y sísmica).
3. Comportamiento bajo presión y tasas de consolidación.
4. Estabilidad frente a la erosión (viento y agua).
5. Tiempo de sedimentación, tiempo de secado y comportamiento de densificación después de la deposición.
6. Posibilidad de formación de corteza en la parte superior de los relaves.



Las características de ingeniería de los relaves son en la mayoría de los casos, influenciadas por el grado de espesamiento y el método de deposición. Por lo tanto, es esencial que se identifiquen las características físicas y los parámetros materiales (por ejemplo, los ángulos de pendiente de la playa, la segregación del tamaño de las partículas y la recuperación de agua) que pueden ocurrir como resultado de técnicas de deposición variadas. Esto es particularmente cierto cuando se considera la eliminación de relaves de alta densidad y sus competidores asociados de transporte y deposición.

Una vez que se determinan los posibles parámetros específicos del sitio (por ejemplo, medioambiental, social, geotécnico, costo), las características de los relaves y su comportamiento al depositarse, puede comenzarse el proceso de selección del método de almacenamiento adecuado.

Los tipos de relaves se clasifican del siguiente modo según el porcentaje en peso de sólidos que contengan:

- Relaves convencionales
- Relaves espesados
- Paste
- Relaves filtrados

3.3 Técnicas de almacenamiento

Los relaves son un producto de desecho que no proporcionan ganancia financiera a un operador de minerales en un momento en particular. No es sorprendente que se almacenen de la manera más rentable posible para cumplir con las regulaciones y los factores específicos del sitio (Engels, J., 2017a).

3.3.1 Estructuras superficiales

La disposición de una instalación de almacenamiento de relaves superficiales depende tanto de las formas naturales de la tierra como de las características artificiales (Ritcey, 1989). Los tres tipos principales de disposición para los embalses de lodos según Vick, 1990 y Norman and Raforth, 1998 son:



- Diques de anillo (paddocks o celdas)
- Embalses del valle
- En el pozo

Idealmente, las depresiones topográficas son más ventajosas para el almacenamiento de relaves, ya que el volumen de material de relleno requerido y las alturas de terraplén subsiguientes se reducen.

3.3.1.1 "Ring Dykes"

La configuración de dique de anillo (también conocido como paddock o celda) no depende de depresiones topográficas como es el caso con los embalses del valle. Este tipo de disposición de embalses es flexible en cuanto a los propósitos de selección de ubicación y generalmente puede situarse relativamente cerca de la planta de procesamiento (Ritcey, 1989).

Los terraplenes para un depósito de dique de anillo requieren grandes volúmenes de material para su construcción, el tamaño de los mismos lleva relación con el volumen de almacenamiento producido. La diferencia fundamental con los otros tipos de depósitos es la necesidad de cubrir con terraplenes todo el perímetro, lo que se traduce en ese aumento significativo de materiales. La principal ventaja de esta disposición es que el escurrimiento superficial no puede inundar el área de almacenamiento de relaves (EPA, 1994) haciendo que el agua contenida dentro del proceso sea enteramente proceso o precipitación derivada.



Figura 4: Configuración de dique de anillo (disposición en tres celdas) en Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, Australia Occidental



3.3.1.2 Embalse en valle

Normalmente se utiliza la topografía natural para la construcción de almacenamientos de relaves mineros (EC, 2004). El diseño del valle cruzado es similar al diseño de un depósito de almacenamiento de agua convencional en el que un terraplén se coloca a través del valle para represar una zona de drenaje (Vick, 1990). Idealmente, este tipo de embalses debería estar ubicado en la cabecera de la cuenca de drenaje para minimizar la inundación de aguas superficiales. Las zanjas de desviación, los vertederos o las presas de agua aguas arriba pueden ser esenciales para desviar y/o capturar los flujos máximos de las inundaciones.



Figura 5: Vertedero de relaves de Cross Valley en Highland Valley Copper, BC, Canadá (Cortesía de Teck)

3.3.1.3 Diseño de terraplenes levantados

El diseño del terraplén levantado es la técnica de construcción más común utilizada en las instalaciones de almacenamiento de relaves. Los tres diseños principales son las estructuras aguas abajo, aguas arriba y eje central, que designan la dirección en la que la cresta del terraplén se mueve en relación con el dique de arranque en la base de la pared del terraplén (Vick, 1990). La línea central modificada es otro método raramente utilizado, que es una combinación entre la construcción aguas arriba y la línea central.

a. Aguas arriba

El método ascendente es el costo inicial más bajo y el diseño más popular para un talud elevado de relaves en áreas sísmicas de bajo riesgo. Este bajo coste es debido a la cantidad mínima de material de relleno requerido para la construcción inicial y la elevación subsiguiente, que se completa normalmente con la fracción gruesa de los relaves.



La construcción de un terraplén diseñado aguas arriba comienza con una base de dique de arranque permeable (drenaje libre). Los relaves suelen ser descargados desde la parte superior de la cresta de la presa, creando una playa que se convierte en la base para futuros levantamientos de terraplenes (Vick, 1990).

No es sorprendente que el método ascendente sea el diseño más común en cuanto a fallos se refiere, causando enormes consecuencias ambientales en todo el mundo (ICOLD and UNEP, 2001).

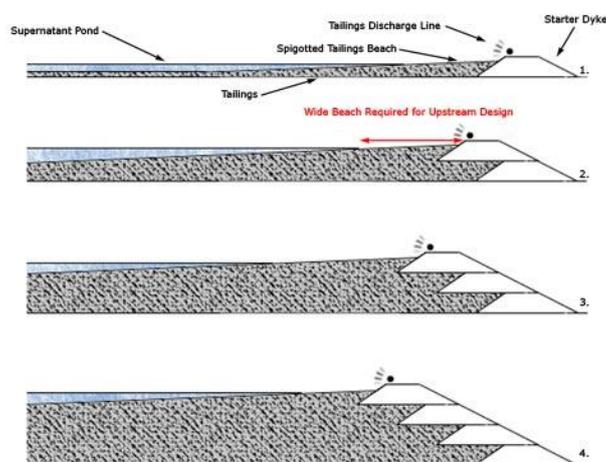


Figura 6: Método aguas arriba de construcción de terraplenes (@ Jon Engels)

Los terraplenes aguas arriba son adecuados para áreas donde el clima es árido, donde no requieren almacenarse grandes cantidades de agua y la acumulación rápida de agua es improbable (por ejemplo, inundación e inundación de agua aguas arriba). Esto ayuda a promover playas anchas y prevenir desviaciones frecuentes del nivel del agua que pueden alterar dramáticamente la geometría del estanque, el francobordo y la superficie freática dentro del área de embalse. Los terraplenes aguas arriba no son adecuados para áreas de actividad sísmica, ya que el riesgo de licuefacción aumenta como resultado del potencial de carga dinámica por los terremotos. En algunos países, como Chile, no se permite la construcción de terraplenes aguas arriba por este motivo.



Las velocidades de elevación de los terraplenes aguas arriba tienen que ser controladas para evitar presiones de poro incrementadas que pueden reducir la resistencia al corte del material de relleno (Jakubick et al., 2003). Estas tasas excesivas de aumento han sido un factor desencadenante de la licuefacción estática en muchos casos, dando lugar a muchos fallos de vertidos de relaves en almacenamientos de aguas arriba (Davies, M. P. and E. McRoberts, 2002).

b. Aguas abajo

El diseño aguas abajo fue desarrollado para reducir los riesgos asociados con el diseño aguas arriba, en particular cuando se somete a carga dinámica como resultado del temblor de terremotos (ICOLD and UNEP, 2001). La instalación de núcleos impermeables y zonas de drenaje también puede permitir que el embalse contenga un volumen sustancial de agua directamente contra la cara aguas arriba del terraplén, sin poner en peligro la estabilidad.

El diseño del terraplén aguas abajo comienza con un dique de arranque impermeable, a diferencia del diseño aguas arriba que tiene un dique de arranque permeable. Esto cambia la línea central de la parte superior de la presa aguas abajo a medida que se elevan progresivamente las etapas de terraplén (Vick, 1990). Una ventaja del diseño aguas abajo es que las secciones elevadas pueden estar diseñadas para ser de porosidad variable para afrontar cualquier problema con la superficie freática del terraplén. Esto puede ser particularmente útil cuando una planta de procesamiento ha hecho cambios para aumentar la eficiencia y por lo tanto alterar las características de relaves. Esto puede resultar en el bombeo de más agua a la instalación de relaves o alterar las características de drenaje de los relaves recién depositados.

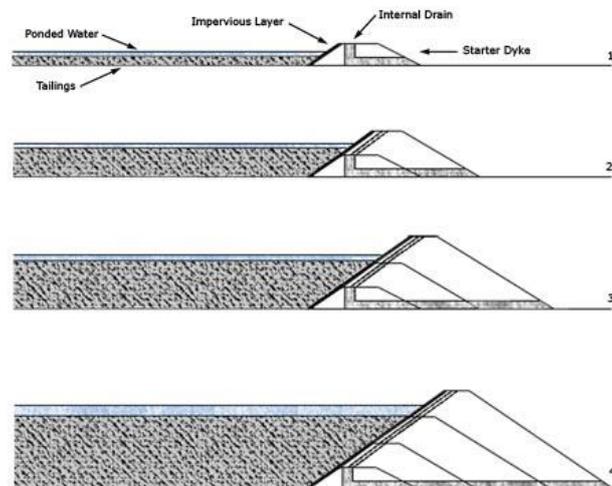


Figura 7: Método de construcción de terraplenes aguas abajo



El diseño aguas abajo es muy versátil para una serie de parámetros de diseño específicos del sitio y se comporta de manera similar a las presas de retención de agua. Su principal ventaja es que puede tener alturas sin restricciones, debido a que cada levantamiento es estructuralmente independiente de los relaves. La principal desventaja es el coste de levantar el terraplén, ya que se requieren grandes volúmenes de relleno, que aumentan exponencialmente a medida que aumenta la altura del terraplén, y que posteriormente se necesita un área grande alrededor de la presa y que el pie de presa se desplaza a medida que se aumentan los aumentos. Esto puede causar problemas donde no se ha tenido en cuenta el espacio limitado antes de la construcción, o si la línea de propiedad y las utilidades están muy cerca. Aunque un terraplén aguas abajo puede teóricamente no tener un límite de altura, la altura final de la presa está determinada por la restricción del avance del pie de presa (Vick, 1990).

c. Linea central

El método de la línea central es realmente un punto intermedio entre los diseños aguas arriba y aguas abajo (Benckert, A. and Eurenus, J., 2001). Es más estable que el método aguas arriba pero no requiere tanto material de construcción como el diseño aguas abajo. Al igual que el método aguas arriba, los relaves son generalmente descargados por espigas de la cresta del terraplén para formar una playa detrás de la pared de la presa. Cuando se requiere una elevación posterior, el material se coloca tanto en los relaves como en el terraplén existente. La cresta del terraplén se eleva verticalmente y no se mueve en relación con las direcciones aguas arriba y aguas abajo de aumentos subsiguientes, de ahí el término, diseño de línea central.

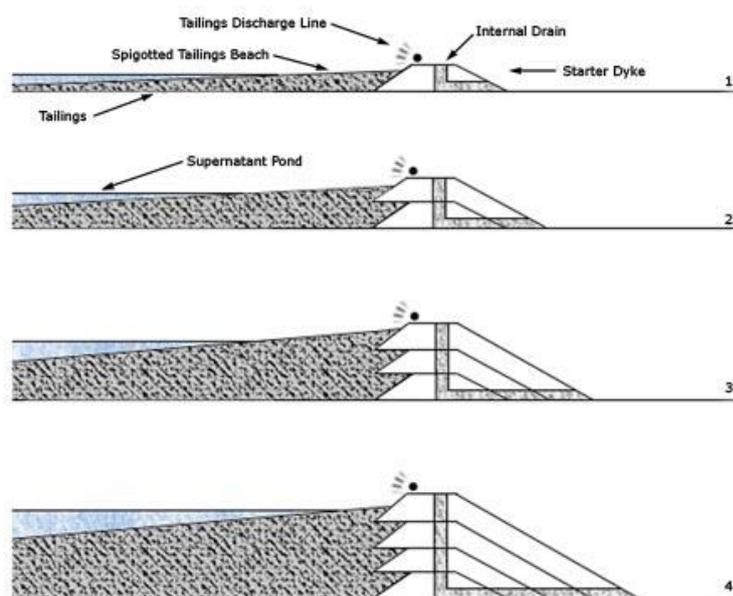


Figura 8: Método de construcción de terraplenes de línea central



El diseño incorpora las zonas internas de drenaje que se encuentran de manera similar en el método aguas abajo. Por lo tanto, el agua libre puede invadir zonas más cerca de la cresta de la presa que el método aguas arriba sin la preocupación de aumentar la superficie freática y causar un potencial riesgo de fallo. Sin embargo, una presa de la línea central no puede ser utilizada como una gran instalación de retención de agua debido a que los subsiguientes levantamientos fueron construidos parcialmente de relaves consolidados. Es necesario instalar un sistema de decantación adecuado para evitar que el agua libre sumerja la playa alrededor de la cresta de la presa.

En muchos casos, el diseño de la línea central es un buen compromiso entre el riesgo sísmico y los costos asociados con la construcción (EC, 2004).

d. Línea central modificada

La línea central modificada es un punto medio entre el método de aguas arriba y de la línea central para reducir el volumen de material de construcción colocado en la cubierta aguas abajo del terraplén. El ángulo del avance de la cresta aguas arriba sobre los relaves se calcula durante la fase de diseño después de la estabilidad y de los análisis de filtración.

3.3.2 Almacenamiento de relaves en pozo

El almacenamiento de relaves en pozo, como su nombre indica, es simplemente el proceso de rellenar minas abandonadas de superficie abierta con relaves. Este método es muy atractivo para un operador de la mina, ya que los vacíos pueden ser llenados a una fracción de los costes asociados con el diseño, construcción y operación de una instalación convencional, espesada, de paste o de pila seca. Otra ventaja del almacenamiento en pozo es que los relaves no requieren muros de contención, por lo que se eliminan los riesgos asociados con la inestabilidad del terraplén (EPA, 1994).



Figura 9: Típico almacenamiento en pozo



3.3.3 Relaves como relleno de trabajos subterráneos

Los relaves se pueden almacenar por debajo de la tierra en huecos elaborados previamente. Los relaves se mezclan generalmente con un aglutinante, usualmente cemento, y luego se bombean al subsuelo para llenar huecos y ayudar a sostener una mina subterránea.

Hay cuatro tipos de relleno utilizados:

1. El relleno por pasta es similar a la deposición en pasta superficial. Los relaves se deshidratan a generalmente hasta obtener una composición de un 65% de sólidos (en peso) y se bombean al subsuelo, generalmente mediante bombas de desplazamiento positivo.
2. El relleno hidráulico de arena se utiliza cuando los relaves han sido ciclados para producir limos y fracciones de arena separados. Los lodos se disponen debido a su pobre permeabilidad y se almacenan generalmente en una instalación de almacenamiento superficial. Las arenas son bombeadas hidráulicamente por el subsuelo en los huecos y se pueden mezclar con aglutinantes si es necesario. A medida que las arenas se asientan y se consolidan, el exceso de agua se purga o se pierde por infiltración.
3. El relleno cementado consiste en relaves y residuos de roca depositados en huecos subterráneos. Se utiliza cuando se requiere almacenamiento de roca residual y los espacios vacíos en exceso necesitan llenado. Los relaves mezclados con cemento se pueden verter sobre la roca residual para llenar y unir los huecos. Esto es útil cuando se requieren volúmenes bajos de suspensión de cemento (implicaciones de costo) para unir el relleno.
4. El relleno de roca seca es desecho de roca, arenas superficiales, gravas o relaves secos. El relleno se deja caer por una subida, o se inclina en un tablero abierto por un basculador de carga o mediante camiones volquete. El relleno de roca seca es más adecuado para el método de corte y relleno.



3.3.4 Desecho en alta mar – Descarga en ríos, lagos y mares.

La eliminación de residuos en alta mar es la descarga de relaves a ríos, lagos y mares. La eliminación submarina de relaves (STD, por sus siglas en inglés) es quizás la técnica más común de eliminación en alta mar e implica la descarga de los relaves en aguas profundas al mar (Moore, P. et al., 2002). La evacuación en alta mar puede utilizarse cuando las técnicas terrestres no son posibles debido al terreno, alta actividad sísmica, alta precipitación y disponibilidad de la tierra (Coumans, C., 2002). Las STD se practican principalmente en muchas minas en la región del Pacífico Occidental donde estos factores del sitio están presentes y el terreno escarpado e inestable crea altos riesgos para el desarrollo de estructuras de retención convencionales.



Figura 10: Deposición en río, río Jaba, Isla Bougainville, Papua Nueva Guinea (Geoff pickup)

La descarga en ríos o mares crea grandes deudas medioambientales y costos asociados con remediaciones y reclamaciones (Jakubick et al., 2003). También ha generado una oposición sustancial que ha contribuido a la percepción pública negativa de la industria minera, perjudicando así su reputación.

3.4 Métodos de deposición de relaves

Los relaves se pueden descargar utilizando técnicas subacuáticas (por debajo del agua) o subaeriales (por encima de la línea de agua, en el suelo o en la playa de relaves) (DPI, 2003). La elección entre estos métodos puede afectar drásticamente la forma en que los relaves depositan y se asientan dentro del embalse. Las propias características de los relaves también pueden influir en el comportamiento de los relaves después de su descarga. El grado de esta segregación depende esencialmente del intervalo de tamaño de partícula de los relaves y de la densidad de pulpa de la suspensión (Vick, 1990).



Robinsky, E. I., 2000 informó que a medida que aumenta el espesor de los relaves, hay menos lechada para transportar la fracción gruesa y los relaves empiezan a apilarse más cerca del punto de descarga, aumentando la pendiente de la playa de relaves. Un espesamiento adicional da como resultado finalmente una suspensión no segregada debido a la alta densidad de pulpa de los relaves de deposición. Cuando esta etapa se alcanza, los huecos en la fracción gruesa de la suspensión se llenan con los finos dando como resultado una mezcla homogénea. Esta es una característica común asociada con los relaves de paste.

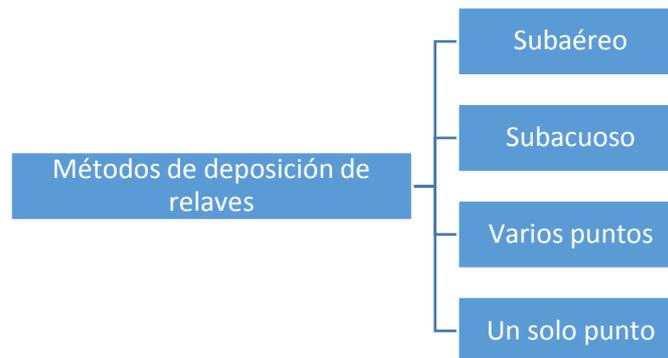


Figura 11: Métodos de deposición de relaves

3.4.1 Subaérea

Para la utilización de este tipo de deposición es necesario un emplazamiento subterráneo o de tierra, consiste en la colocación de los relaves húmedos, o espesados, en un depósito de contención de superficie construido previamente.

La deposición subaérea es más común que la subacuática, ya que puede formar una playa suavemente inclinada sobre el agua hacia el estanque sobrenadante. A medida que los relaves descargan en esta playa forman corrientes trenzadas poco profundas de baja velocidad que permiten que los relaves se asienten y segregen (DME, 1999). La deposición subaérea se practica generalmente en instalaciones de relaves que tienen múltiples puntos de descarga. Esto permite que la deposición de relaves se haga rotando entre diferentes ubicaciones alrededor de la instalación, de este modo se permite que los relaves recién depositados fluyan, se sequen y se consoliden, mientras que se puede continuar descargando relaves en otras zonas de la instalación. La frecuencia de rotación del punto de descarga y el número de zonas de deposición dependen del clima, la tasa de producción de relaves, las características de secado de relaves y la forma de la instalación de relaves (Gipson, A. H., Jr, 1998).



Figura 12: Descarga subaérea de relaves (izquierda) y corrientes trenzadas poco profundas de baja velocidad en una playa de relaves (derecha) (Jon Engels)

3.4.2 Subacuosa

La deposición subacuática es particularmente adecuada para relaves que contienen sulfuros que son propensos a oxidarse, movilizar metales y producir ácido (Tremblay, 1998). El depositar permanentemente los relaves bajo el agua se produce una restricción del oxígeno evitando la oxidación y minimizando los problemas ambientales asociados con el drenaje ácido de las minas. Con esto en mente, la deposición de relaves a cuerpos de agua naturales es atractiva, pero las consecuencias ambientales generales reales de esta técnica no se entienden completamente.



Figura 13: Deposición subacuosa de relaves convencionales (@Jon Engels)

3.4.3 Tipos de descarga dependiendo del número de drenajes o puntos de descarga

3.4.3.1 "Spigots" o varios puntos

La descarga a través de varios grifos o caños, se utiliza usualmente en los relaves y consiste en un conjunto de chorros o drenajes alrededor del perímetro del depósito para formar capas de relaves (U.S. Environmental Protection Agency, 1994). Normalmente, este sistema de descarga es el más utilizado, permite secar antes de la estratificación, distribuir los relaves de manera más uniforme, controlar el espesor de las capas de relaves que se forman y los límites del almacenamiento, así como posibles desbordamientos.

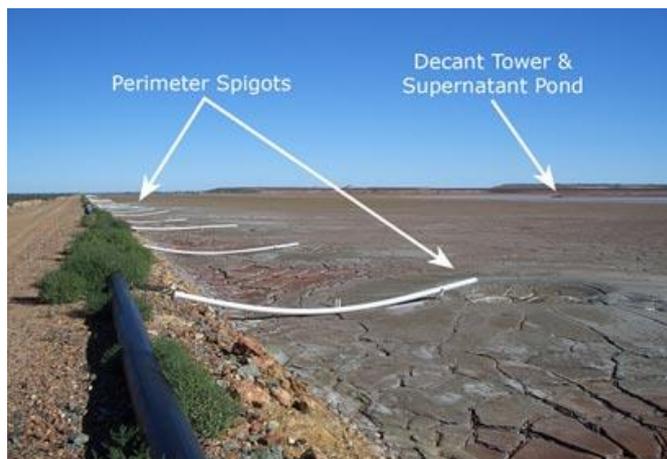


Figura 14: Varios puntos de descarga en la mina de oro de Jundee, Australia (Jon Engels)

3.4.3.2 Punto único

La descarga de un solo punto requiere un movimiento irregular de las líneas de descarga. Vick, 1990 informa que los deltas se forman normalmente o un solo depósito de playa de relaves dentro del embalse. Esto significa que el estanque de sobrenadante está restringido a una cierta zona del embalse, que puede estar contra una de las paredes de terraplén que resulta en extremos altos y bajos del embalse. El extremo inferior del embalse recogerá los sedimentos aumentando la posibilidad de erosión por filtración (Ritcey, 1989).

Este tipo de deposición no es adecuado cuando el estanque y/o los sedimentos deben mantenerse alejados de un terraplén (EPA, 1994).



Figura 15: Punto único de descarga en la mina de Glebe, Inglaterra (@Jon Engels)



La deposición de un solo punto permite colocar los relaves en capas bastante gruesas haciendo que permanezcan saturados durante años si no se secan antes de depositar capas nuevas (Norman and Raforth, 1998). Este método de deposición es adecuado para embalses de tipo valle (aguas abajo y algunos diseños de terraplén de línea central) donde el estanque sobrenadante puede forzarse a residir contra una cara de valle (es decir, contra la ladera alejada de los terraplenes de retención).

Para el almacenamiento convencional, los relaves son generalmente descargados mediante espigas situadas a lo largo del terraplén o terraplenes de la instalación. Para el almacenamiento espesado y en paste en la superficie, los relaves se descargan generalmente desde una ubicación central, ya sea a través de elevadores o de fuentes puntuales que se elevan durante la vida útil de la instalación. La deposición en seco de los relaves se realiza normalmente mediante un apilador de transporte radial o por camión (Davies and Rice, 2001).

3.5 Tipos de relaves

Los riesgos dominantes relacionados con las minas, para la salud pública o el medio ambiente, provienen de las instalaciones de almacenamiento de relaves (Envec, E.S.I., 2005). Esto se refleja en el alto nivel de preocupación de la comunidad por su cierre, desmantelamiento, rehabilitación y postratamiento. Los contaminantes pueden ser movilizados desde estas instalaciones a través de una serie de mecanismos, incluyendo el transporte aéreo (los residuos de polvo pueden contener metales pesados y compuestos tóxicos), movimientos masivos de relaves en forma líquida o semi-líquida y transporte acuático como sólidos en suspensión y materiales disueltos (Lacy and Barnes, 2006).

Todas las operaciones mineras son finitas; Incluso las operaciones muy grandes que se puede esperar razonablemente que permanezcan en producción durante muchas décadas. Sin embargo, se espera que las instalaciones de almacenamiento de relaves construidas por las compañías durante estas operaciones permanezcan en su lugar durante un período de tiempo casi infinito después del cese de las operaciones (Jewell and Fourie, 2006). Por lo tanto, el diseño de cierre de cualquier depósito de relaves sobre el suelo debe abordar los aspectos de estabilidad, seguridad y estética a largo plazo de la estructura, mientras se evalúan los potenciales usos posteriores del depósito de almacenamiento (Jewell and Fourie, 2006).



El principal objetivo del cierre, desmantelamiento y rehabilitación de las instalaciones de almacenamiento de relaves es dejar las instalaciones seguras, estables y que no contaminen, con poca necesidad de mantenimiento. En algunos casos, será posible aumentar el valor de las tierras minadas, para crear un paisaje modificado que ofrezca valor recreativo, comercial o natural que pueda ser disfrutado en el futuro (RET, 2007).

Los siguientes objetivos deben ser considerados al planificar el relieve final de la instalación de almacenamiento de relaves (RET, 2007):

- Contener/encapsular los relaves para evitar su escape al ambiente.
- Minimizar la filtración de agua contaminada desde la instalación de almacenamiento de relaves a las aguas superficiales y subterráneas.
- Proporcionar una cubierta de superficie estabilizada para prevenir la erosión de la instalación de almacenamiento de relaves
- Diseñar el relieve final para minimizar el mantenimiento posterior al cierre.

Los relaves descubiertos pueden presentar riesgos para la salud humana y los impactos sociales y ambientales, particularmente si los relaves son propensos a la generación de polvo, la escorrentía de lluvia se permite formar un estanque directamente sobre los relaves o la superficie de relaves permanece blanda. Los posibles sistemas de recubrimientos de relaves, en orden aproximado de creciente complejidad técnica y costo, son según Williams, 2005 y RET, 2006:

- Vegetación directa de los relaves.
- Una fina capa de grava colocada directamente sobre la superficie de relaves para mitigar el polvo.
- Una cubierta de vegetación, monocapa, destinada a eliminar la escorrentía de la lluvia en un clima húmedo.
- Un cobertizo de vegetación, que no derrame, para minimizar la percolación a través de la liberación de las precipitaciones estacionales almacenadas por evapotranspiración durante la estación seca.
- Una capa de rotura capilar, cubierta por un medio de crecimiento vegetativo que no derrama, dirigido a controlar la captación de sales en el medio de crecimiento para sostener la vegetación, para su aplicación en un clima seco.
- Combinaciones de lo anterior.



La forma de relieve final, el sistema de cubierta de relaves y sus impactos dependen mucho de los diferentes métodos de eliminación de residuos.

El espesamiento de los relaves en la planta de procesamiento antes de su eliminación permite que el agua de proceso se recicle directamente a la planta, reduciendo las pérdidas de agua y reduciendo la demanda de agua cruda de la planta. Existe una amplia gama de tecnologías de espesamiento (Australian Government, 2016).

3.5.1 Disposición de residuos convencionales

Como material de desecho, los relaves se retiran de la planta de procesamiento para su eliminación a través de una tubería. El problema de la eliminación se refiere tanto a los materiales sólidos como a los líquidos que los acompañan.

En la mayoría de las operaciones, estos desechos se transportan como suspensión a una instalación de almacenamiento de relaves, un área de represado donde se retiene la fracción sólida, y a menudo una parte de la fracción líquida es devuelta al proceso de concentración para su reutilización (Böhm et al., 2005).

La instalación de almacenamiento de relaves se encuentra en un hueco o valle natural. En muchos casos, se construye un terraplén de relaves o una barrera de roca y otros materiales naturales en el extremo inferior del valle para contener el material de relaves (Pebble, 2005).

La liberación de agua de los relaves una vez descargados en una instalación y el volumen disponible para el bombeo de retorno a la planta de procesamiento es un parámetro de diseño importante que influye en el balance hídrico de un proyecto minero. Esta liberación depende de las propiedades físicas de los relaves depositados y puede estimarse mediante pruebas de laboratorio de los relaves a diferentes concentraciones de sólidos (Engels, J., 2017b).

Las instalaciones de relaves son construidas en dependencia temporal de la producción de residuos y la calidad de los mismos. Normalmente la construcción tarda décadas en terminarse. Las instalaciones de relaves deben almacenar residuos en su interior durante periodos geológicos. Por lo tanto, se debe garantizar la fiabilidad de toda la construcción y un impacto compatible con el medio ambiente durante la rehabilitación ya largo plazo (Witt and Schönhardt, 2004).



Un embalse convencional es una estructura de retención en superficie diseñada para almacenar tanto los relaves como el agua de la mina, con el objetivo de recuperar dicha agua para su uso en la planta de procesamiento según sea necesario. Existen principalmente dos tipos de embalses superficiales, una presa tipo retención de agua y un terraplén levantado que tiene muchas configuraciones (Vick, 1990). La principal diferencia es que una presa de retención de agua se construye hasta su altura total antes de realizar cualquier descarga al embalse (EPA, 1994).

3.5.2 Disposición de relaves espesados

Fue precisamente el consumo excesivo de agua durante este proceso de flotación lo que provocó el uso de tecnologías de relaves espesados y paste. Dicho espesamiento puede eliminar una cantidad significativa del agua de relaves mediante la técnica de separación por gravedad en un tanque espesante. Las partículas sólidas más densas se decantan naturalmente, acumulándose en el fondo del tanque, lo que permite eliminar una cantidad sustancial de agua a través de la parte superior (Luiña, R. et al., 2012).

Este proceso alternativo tiene la misma finalidad del método de eliminación convencional de relaves, almacenar las colas de los residuos de extracción de minerales en un estanque. Su principal ventaja es la reducción del agua en los relaves al final del proceso, minimizando su volumen, resultando en una mayor capacidad del estanque.

El proceso de espesamiento tiene cuatro etapas. La primera etapa se refiere al transporte de residuos de la planta de tratamiento al espesante. Una vez que los relaves están en el espesador se añade un floculante para mejorar la agregación de partículas sólidas, que forman conglomerados que se decantan naturalmente y se depositan en el fondo del tanque. La elección del floculante depende principalmente del porcentaje inicial de sólidos, de la concentración final deseada, del pH del proceso y del tiempo de residencia. El porcentaje de sólidos en la entrada es usualmente hasta 35%, alcanzando niveles de producción de 70%. Después del tiempo de residencia, los rellenos espesados son descargados a través del fondo y el agua limpia se extrae de la parte superior (Wesh Tech Engineering, Inc., 2011). Así, para lograr una producción más sostenible, esta agua se recicla a la planta de tratamiento.



Figura 16: Espesador de alta densidad de relaves (Paste Thick Associates, 2013)

La tercera etapa se refiere al bombeo de relaves espesados en el estanque de almacenamiento. Debido a la alta densidad del paste, este paso de transporte es costoso y requiere bombas de alta potencia (bombas centrífugas o de desplazamiento positivo).

La cuarta etapa es el vertido de líquido en la balsa. Este vertido se determina por el tipo de embalse seleccionado, eligiendo el más apropiado dependiendo del terreno, la cantidad total a depositar, las condiciones meteorológicas (precipitación, evapotranspiración y velocidad del viento) y la geología y sismicidad de la ubicación.



Figura 17: Relaves espesados (Paste Thick Associates, 2013)

Algunas de las ventajas del uso de relaves espesados o de pasta incluyen (RET, 2007):

- Mejorar la recuperación de agua y procesos químicos en la planta de procesamiento
- Minimizar el volumen de almacenamiento
- Reducir la filtración
- La producción de un relieve más estable.

Estas son consideraciones clave para el desarrollo sostenible y reflejan las expectativas de la comunidad (RET, 2007).



Pero también existen algunas desventajas de los relaves de paste, que interrumpen la amplia aplicación de este método (Engels, J., 2017c):

- Normalmente se requieren bombas de desplazamiento positivo costosas para su descarga (algunos fabricantes tienen plazos de entrega altos). Sin embargo, las bombas centrífugas pueden bombear el paste dependiendo de las propiedades reológicas de los relaves (principalmente el límite de elasticidad).
- Elevados costes operativos asociados con el espesamiento y el transporte de la pasta en comparación con otros métodos (incluso la filtración).
- Alto riesgo de no lograr la pasta de los espesantes de pasta instalados. Generalmente, requieren altos niveles de gestión diaria para mantener alturas de lecho consistentes y, por lo tanto, sólidos resultados de sólidos. Algunos espesantes de pasta actualmente instalados no alcanzan la concentración de sólidos diseñada y, por lo tanto, crean problemas cuando no se pueden alcanzar las pendientes de la playa de diseño de la instalación de almacenamiento. Esto presenta desafíos operacionales para este tipo de instalaciones de mantenimiento,
- Los métodos de almacenamiento espesado y convencional de alta velocidad son más probados en comparación con los de paste.

Como lo indican las investigaciones anteriores, el almacenamiento de relaves espesados tiene muchas ventajas en comparación con las instalaciones convencionales, podría reducir los riesgos de los desastres ecológicos y se ha probado con éxito en varias minas, pero también tiene muchas desventajas, tiene un alto coste operacional y requiere un alto nivel de infraestructuras tecnológicas y, desde una perspectiva global, la pasta es relativamente poco probada en comparación con otros métodos de eliminación de relaves superficiales (Engels, J., 2017c).

3.5.3 Apilamiento en seco (relaves filtrados)

La desecación de relaves a grados más altos que la pasta produce una torta filtrada húmeda (saturada) y seca (insaturada) que ya no puede ser transportada por tubería debido a su bajo contenido de humedad. Estos residuos filtrados son normalmente transportados por cinta transportadora o camión, depositados, esparcidos y compactados para formar un depósito de colas no saturadas (Davies and Rice, 2001). Este tipo de almacenamiento de relaves produce un depósito estable, que generalmente no requiere un sistema de retención y se denomina "pila seca".



Un contenido de humedad típico de menos del 20% se logra utilizando una combinación de cintas, tambores, placas de presión apiladas horizontal y vertical y sistemas de filtración al vacío (Davies and Martin, 2002a).



Figura 18: Apilamiento en seco de relaves mediante cinta transportadora en La Coipa, Chile

(Courtesy Anglo American/Debswana)

3.5.3.1 Ventajas y desventajas

Al igual que con los relaves espesados y de paste, el proceso de deshidratación mecánica en comparación con la deposición de lechada convencional aumenta los costes. La producción de torta húmeda y seca aumenta aún más este coste, especialmente si se requieren altos rendimientos. Sin embargo, algunas de las muchas ventajas de usar el apilamiento en seco de relaves son:

- Puede utilizarse en áreas donde la conservación del agua es crítica y cualquier pérdida de agua puede poner en peligro el rendimiento de la planta.
- Se eliminan los riesgos de fallos catastróficos y el agotamiento de los rellenos asociados con las instalaciones de almacenamiento convencionales si la instalación funciona según lo previsto.
- El apilado en seco es adecuado para áreas de alta actividad sísmica, ya que se evita la construcción de terraplenes de retención.
- Es adecuado cuando hay material de construcción limitado disponible para desarrollar un contenedor de retención convencional.
- Es posible una rehabilitación progresiva, repartiendo el costo del cierre durante un período de tiempo más largo en comparación con las instalaciones de almacenamiento convencionales.



- Se pueden lograr mayores tasas de aumento debido al alto estado denso de los relaves colocados cuando se compara con los relaves depositados convencionalmente. El acceso por equipo mecánico para proporcionar la extensión y la compactación es también ventajoso.
- Para climas fríos, el apilado en seco previene la congelación de tuberías y los problemas de escarchado con los embalses convencionales.
- La contaminación del agua subterránea por filtración es prácticamente eliminada.
- Los relaves filtrados permiten una mejor recuperación de metales disueltos y productos químicos de proceso (por ejemplo, oro y cianuro).

Las instalaciones de pilas secas también son más fáciles de cerrar y rehabilitar, requieren una menor huella comparada con otras opciones de almacenamiento de relaves superficiales (es decir, mayor densidad), pueden ser utilizadas en ambientes agresivos (por ejemplo, terreno ondulado y empinado) y generar mejores percepciones del regulador y del público de relaves almacenamiento (Davies and Rice, 2001).



Figura 19: Apilamiento de relaves en seco utilizando transporte mediante camión (Jon Engels)

Algunas de las desventajas de la apilación de relaves en pilas secas son las siguientes:

- Los altos costes de capital y operación asociados con la moderna tecnología de filtración (energía, mantenimiento) que hacen que otras opciones de almacenamiento de relaves sean más económicas de desarrollar.
- Sólo se adapta a operaciones de bajo rendimiento (actualmente alrededor de 20.000 tpd) debido a los costes de equipo ya la gestión operativa de una gran planta de filtración.



- Sistemas de desviación aguas arriba necesarios para evitar la inundación de la instalación de pila seca.
- La gestión del contorno de la superficie necesaria para evitar la acumulación y la eliminación fácil de las aguas superficiales (es decir, eventos de precipitación) para evitar la acumulación y erosión de la pila a través de canales de flujo de escorrentía canalizados.
- No hay opción para almacenar agua dentro de una instalación de pila seca. Una instalación de relaves convencional, diseñada para almacenar agua, puede proporcionar una operación de minería con un amortiguador (por ejemplo, almacenamiento de aguas pluviales) para mantener las operaciones durante los meses secos del año.
- La oxidación de los sulfuros en los relaves puede crear altas concentraciones (pero bajo volumen) de agua de infiltración. Puede no ser práctico para algunos tipos de mineral. Se requieren pruebas geoquímicas detalladas.
- La generación de polvo es un problema común en los climas áridos y puede ocurrir con relativa rapidez después de la eliminación de los relaves debido al bajo contenido de humedad del material colocado.
- Una instalación en pila seca en un entorno de alta precipitación puede crear problemas diarios de gestión para la viabilidad de los equipos de transporte y compactación. Las fluctuaciones estacionales son una consideración importante en el diseño de una instalación de pila seca.

Sin embargo, cabe señalar que la economía asociada con la implementación de sistemas de filtración de relaves ha disminuido rápidamente en los últimos 5 años. Esto se debe principalmente al aumento de la capacidad de los sistemas de filtración modernos (por ejemplo, el aumento del área de filtración de las correas de filtración horizontales) y la optimización operativa.

3.5.4 Co-deposición

La co-disposición es la mezcla de residuos mineros finos y gruesos para producir un único flujo de residuos (Davies and Martin, 2002a). La mezcla de los residuos finos y gruesos reduce el espacio vacío asociado primariamente a los flujos de residuos gruesos al tiempo que aumenta simultáneamente la resistencia de los finos. La resistencia y la rápida estabilización de los residuos de co-eliminación permiten un acceso temprano a los relaves para la rehabilitación y reducen el riesgo y las consecuencias de la carga estática y dinámica (DPI, 2003).



El almacenamiento de co-desechos, como la pila seca, generalmente no requiere taludes de retención, lo que elimina el riesgo de rotura del terraplén y el transporte de relaves fuera de la zona de almacenamiento (Leduc and Smith, 2003). Otra ventaja es que la co-eliminación puede reducir significativamente la generación de ácido asociado con los residuos de minas gruesas que contienen sulfuros. La corriente de residuos finos (relaves) es mucho menos permeable al agua y al oxígeno atmosférico que los residuos de minas gruesas. La combinación de las dos corrientes de residuos aumenta la estabilidad física (alta resistencia al cizallamiento) y la estabilidad química, reduciendo así la oxidación y el potencial de AMD (Davies and Martin, 2002b).

La principal desventaja de la co-eliminación es la necesidad del control de la estrategia de deposición para optimizar la mezcla de las alimentaciones de residuos gruesos y finos. Esto es sólo realmente económico donde las dos alimentaciones pueden ser bombeadas juntas o mezcladas para el almacenamiento en el pozo (DPI, 2003).

Aunque el término general de 'co-disposición' se refiere a la mezcla de los flujos de residuos finos y gruesos, se utiliza otra terminología en la industria minera para definir el punto donde se produce la mezcla o cómo se colocan las corrientes de residuos independientes. Estos se resumen de la siguiente manera:

- Mezclado: los relaves y los residuos de roca gruesa se transportan de forma independiente y se mezclan entre sí (generalmente por medios mecánicos) dentro de una instalación de almacenamiento de desechos o como una única corriente de descarga cuando se bombea. La mezcla favorece el llenado de los huecos (mezcla) para maximizar la densidad del material.
- Colocación: consiste en el transporte de las colas y los residuos de roca gruesa de forma independiente, pero no se mezclan para formar una sola corriente de descarga. Ejemplos de ello son los residuos de roca depositados en una instalación de relaves, o las rocas usadas para crear muros interiores o muros de contención de una instalación de relaves.
- Co-deposición: es muy similar a la co-colocación, pero las corrientes de desechos generalmente se colocan en capas independientes permitiendo que los residuos depositados entren naturalmente en los huecos de la roca subyacente. Se agrega una capa adicional de roca y el proceso continúa.



La inyección de relaves en vertederos de basura a través de taladros es otro método de co-disposición de relaves.

En la siguiente figura se muestra un resumen del número de diferentes tipos de instalaciones a escala global. Davies, 2011 indica que la eliminación de relaves filtrados representa aproximadamente el 35% del método utilizado en las instalaciones de relaves.

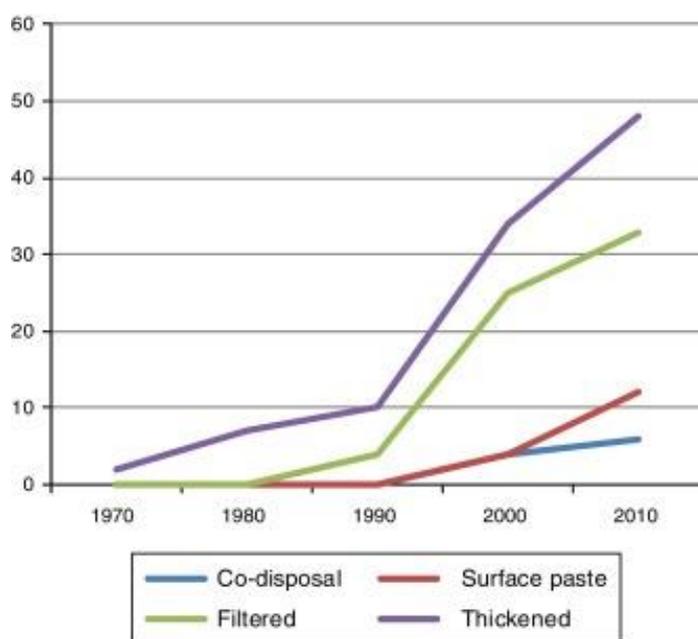


Figura 20: Tendencias en el uso de relaves deshidratados en la minería (Davies, 2011)

3.6 Técnicas de manejo

Los residuos son transportados a su lugar de almacenamiento de varias formas diferentes. El más común es el transporte de lechada en una tubería desde los espesadores (normalmente ubicados en la planta de procesamiento) hasta los puntos de depósito situados dentro o alrededor de una instalación de almacenamiento de relaves superficiales. Las propiedades de los relaves, el tonelaje y la topografía del sitio dictan el tipo de sistema de transporte necesario para administrar los relaves de manera rentable y eficiente (Australian Government, 2016).

De acuerdo con Australian Government, los transportes utilizados en la actualidad dependiendo de las propiedades de los relaves son los siguientes:



3.6.1 Lodos

Sistemas de tuberías bombeadas: Transporte por tuberías mediante sistemas de bombeo centrífugos o de desplazamiento positivo.

Sistema de tubería de presión de gravitación: Cuando la instalación de almacenamiento se encuentra a una elevación más baja en comparación con la planta de procesamiento y los relaves pueden fluir sin necesidad de un sistema de bombeo. Pueden ser necesarias disipaciones de energía tales como cajas de caída o coquillas para evitar altas velocidades de flujo y el posterior desgaste en el sistema de tuberías.

Canal (launder): Un sistema de lavado abierto (o tapado) de hormigón donde los residuos fluyen gravitacionalmente con una superficie libre como una suspensión de baja densidad (relaves convencionales). Este sistema de transporte no es adecuado para relaves espesados de alta densidad debido a sus propiedades reológicas.

Cuando se bombea la suspensión de relaves, se debe considerar la reología de los mismos y las capacidades del sistema de bombeo. A mayor concentración de sólidos en la suspensión de relaves, mayor tensión de rendimiento y más difícil es el bombeo.

Tabla 1: Requisitos típicos en los equipos de bombeo de relaves para diferentes consistencias de los mismos, (Australian Government, 2016)

Consistencia de los relaves	Requerimientos de equipamiento de bombeo
Lodo	Bomba centrífuga
Espesados	Bomba centrífuga o bomba de diafragma/pistón (línea de alta presión)
Relaves de alta caída	Bomba de diafragma o pistón (línea de máxima presión)
Relaves de baja caída	Bomba de desplazamiento positivo de pistón dual (línea de alta presión)



Los requerimientos típicos de equipamiento de tuberías para las diferentes consistencias de tailings son dados en la (Australian Government, 2016). A mayor concentración de sólidos de relaves, aumenta la necesidad de potencia y presión en la línea, lo que se traduce en un aumento de costes.

Existe la necesidad de proteger el medio ambiente contra los derrames de relaves debidos a posibles fugas, roturas y a la limpieza de tapones que pueden producirse a lo largo de la tubería (Australian Government, 2016).

3.6.2 Torta húmeda (relaves filtrados)

Cinta transportadora: Se utiliza para transportar los relaves filtrados (o arenas de ciclón gruesas) como una torta húmeda (normalmente con un contenido de humedad inferior al 18%) hasta un punto de eliminación (pila seca).



Figura 21: Pilas secas, relaves filtrados transportados mediante cinta transportadora y compactados mediante topadora, (Australian Government, 2016)

Camión: El uso de camiones para el transporte del material al depósito es más viable cuando se realizan operaciones con bajo tonelaje de relaves, también resulta de utilidad cuando el terreno es difícil y no permite la construcción de una cinta transportadora.

Los sistemas de transporte, como la cinta, requieren un tonelaje mínimo por hora para ser económicos de instalar y operar, por ello, el transporte de camiones se hace más factible.

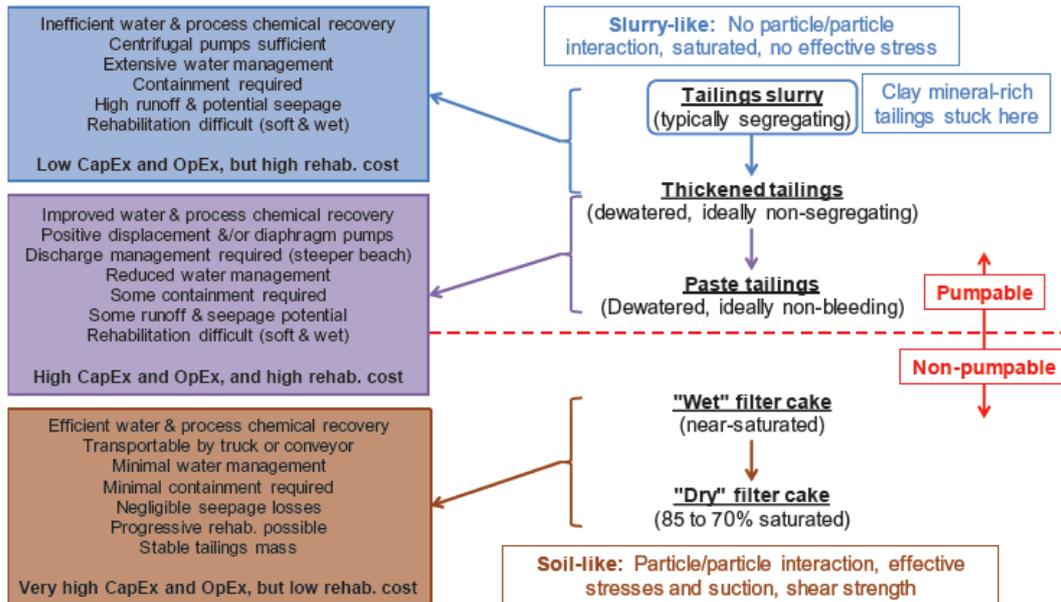


Figura 22: Tipos de relaves y sus transportes (adaptado de Davies and Rice (2004)).



4 El análisis de riesgo como indicador de sostenibilidad

A la vista de que la generación de que el almacenamiento de residuos mineros es uno de los principales impactos de la actividad minera, y a la vez, uno sobre el que se puede actuar es necesario evaluar qué técnica de manejo es la mejor utilizando como criterio de decisión la sostenibilidad ambiental. Por lo tanto, es necesario disponer de herramientas adecuadas para seleccionar la mejor opción.

El proceso de evaluación y gestión de los riesgos tiene por objeto identificar los riesgos prioritarios que requieren una reducción de la probabilidad o consecuencia, y aumentar la probabilidad y el impacto de los resultados positivos (RET, 2008). AS/NZS 4360:2004 recomienda el siguiente proceso de evaluación de riesgos (RET, 2007):

- Establecer el contexto. Geográficamente, social y ambientalmente, y decidir sobre los criterios de diseño.
- Identificar los peligros. Qué puede suceder, dónde, cuándo, cómo y por qué.
- Analizar los riesgos. Identificar los controles existentes, determinar las probabilidades y las consecuencias, y por lo tanto el nivel de riesgo.
- Evaluar los riesgos. Compararlos con los criterios de diseño, realizar análisis de sensibilidad para resaltar los riesgos clave y los insignificantes, establecer prioridades y decidir si se deben abordar los riesgos.
- Abordar los riesgos seleccionados. Identificar y evaluar opciones, preparar e implementar planes de tratamiento, y analizar y evaluar el riesgo residual.

La herramienta específica utilizada para realizar este análisis es el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE).

4.1.1 Modos de fallos y análisis de efectos

El ANFE fue una de las primeras técnicas sistemáticas utilizadas para el análisis de fallos. Fue desarrollado por ingenieros de fiabilidad en la década de 1950 para estudiar los problemas que podrían surgir a causa del mal funcionamiento de los sistemas militares. Un AMFE es a menudo el primer paso de un estudio de fiabilidad del sistema. Es principalmente un proceso cualitativo e implica revisar tantos componentes, ensambles y subsistemas como sea posible para identificar los modos de fallo, sus causas y efecto (Rausand and Høyland, 2004).



Los modos de fallo son el elemento central del AMFE. Un fallo puede ser iniciado naturalmente (por ejemplo, un terremoto que supera el diseño), iniciado por el fallo de uno de los subsistemas de ingeniería (por ejemplo, inestabilidad de una presa), o ser el resultado de un fallo operacional (una válvula que libera fluidos contaminantes). Debido al gran número de posibles modos de fallo que podrían incluirse en un AMFE, a menudo es necesario limitar las evaluaciones a aquellas que representan un riesgo significativo. Los modos de fallo también pueden ser combinaciones de eventos en los que un pequeño evento desencadenador produce una cadena de eventos que tiene consecuencias sustanciales o importantes (Eng and Shaw).

Este tipo de AMFE es un enfoque de sistema experto de arriba hacia abajo para la identificación y cuantificación de riesgos que conduce a la identificación y priorización de medidas de mitigación. Su valor y eficacia depende de contar con expertos con los conocimientos y experiencia apropiados que participen en la evaluación de los modos de fallo, la estimación del riesgo y la identificación de las medidas de mitigación apropiadas (Eng and Shaw). Las etapas que se indican a continuación son similares a las utilizadas para la evaluación general del riesgo (RET, 2007):

- Etapa 1: Identificar todos los modos de falla significativos.
- Etapa 2: Evaluar la probabilidad y los efectos (consecuencias) de cada modo de falla.
 - Impacto ambiental.
 - Seguridad pública.
- Etapa 3: Evaluar la gravedad de los efectos y el nivel de confianza de cada modo de falla.
- Etapa 4: Identificar medidas de mitigación que reduzcan los riesgos a límites tolerables.

El AMFE puede utilizarse para evaluar el potencial de fallos de las medidas operacionales y relacionadas con el cierre que podrían resultar en impactos biológicos, impactos en el uso de la tierra, impactos regulatorios, impacto de la opinión pública o imagen y impactos en la salud y la seguridad. Por lo tanto, se puede desarrollar un perfil de riesgo para cada una de estas áreas de preocupación. Una vez que se han identificado los modos de fallo y las medidas de mayor riesgo, es posible considerar la mitigación o diseños alternativos para reducir los riesgos. Por lo tanto, los ANFE son una parte esencial de cualquier programa de reducción de riesgo y responsabilidad (Eng and Shaw).



- Etapa 1: Identificación de todos los modos de fallo significativos. Los modos de fallo de esta investigación se basan en el Boletín 121 (Comisión Internacional de Grandes Emisiones y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente 2001) de la Comisión Internacional sobre Grandes Presas (ICOLD), y en expertos en geotecnia, hidrología, Requisitos aplicables a los sistemas de ingeniería y naturales y sus alrededores, y diseño y operaciones de minería.
- Etapa 2: Evaluación de la probabilidad y los efectos (consecuencias) de cada uno de los modos de fallo. La probabilidad de que el modo de fallo conduzca al efecto se ha clasificado utilizando un sistema de cinco clases, que va desde "no probable" a "esperado".

Tabla 2: Probabilidad de evento (Eng and Shaw)

Probabilidad	Como porcentaje	Como número estadístico
Improbable (I)	<0.01%	<1:10,000
Baja (B)	0.01%-0.1%	1:10,000 -1: 1,000
Moderada (M)	0.1-1%	1:1,000-1:100
Alta (A)	1-10%	1:100-1:10
Esperada (E)	>10%	>1:10

- Etapa 3: Evaluación de la gravedad de los efectos y el nivel de confianza de cada modo de fallo. La evaluación de los efectos (o consecuencias) de los modos de fallo específicos se basa en las evaluaciones o análisis de las respuestas de los sistemas después del fallo. Estos efectos pueden tener consecuencias físicas, biológicas o de salud y de seguridad. Cada efecto se evaluará por separado en dos áreas de preocupación: impactos ambientales y seguridad pública. El ranking de las consecuencias, o severidad, también se clasifica utilizando un sistema de cinco categorías. Los investigadores anteriores han establecido la clasificación de tal modo que va de consecuencias "insignificantes" a "extremas" para que sean efectivas e intuitivas. Los intervalos de severidad para cada una de las categorías se describen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Nuevamente, se sugieren las clasificaciones que se han encontrado útiles en el pasado, pero podrían modificarse para adaptarse mejor al sitio o plan evaluado en ese momento (Eng and Shaw).



Tabla 3: Severidad de los efectos (Eng and Saw)

Severidad	Impacto ambiental	Seguridad pública
Extrema (E)	Impacto catastrófico en el hábitat (grande e irreversible)	Se esperan fatalidades o muertes múltiples
Alta (H)	Impacto irreversible significativo en el hábitat o en grandes	Lesiones graves o discapacidad probable: o algún potencial de fatalidad
Moderada (M)	Impacto reversible en el hábitat	Pérdida de tiempo o lesión probable: o algún potencial de lesiones graves, o pequeño riesgo de fatalidades
Baja (L)	Impacto menor en el hábitat	Se requieren primero auxilios. Pequeño riesgo de lesiones graves
Insignificante (N)	Impacto no apreciable	Sin preocupación

- Etapa 4: identificación de medidas de mitigación que reduzcan los riesgos a límites tolerables. Existe una incertidumbre en cuanto a la probabilidad de fracaso y la consecuencia basada en una serie de factores, incluyendo falta de datos, falta de comprensión del sistema, condiciones de operación futuras inciertas o mantenimiento incierto. Por lo tanto, la confianza en las estimaciones de riesgo puede variar de baja a alta (Eng and Shaw). Según Robertson GeoConsultants Inc (Strachan and Caldwell, 2010), tres sistemas de clasificación por intervalo de confianza baja, media y alta en las clasificaciones de riesgo suelen ser adecuados y apropiados. En los casos en que existe poca confianza en un valor de evaluación de alto riesgo, esto indica claramente la necesidad de seguir evaluando el riesgo a fin de obtener una predicción más fiable tanto del riesgo como de las medidas de mitigación para reducir dicho riesgo (Eng and Shaw). En esta investigación, utilizaremos la clasificación de los tres intervalos.

Tabla 4: Nivel de confianza (Eng and Saw)

Nivel de confianza	Descripción
Bajo (L)	No existe confianza en la estimación o la capacidad de control durante las operaciones o tras el cierre
Medio (M)	Existe cierta confianza en la estimación o la capacidad de control durante las operaciones o tras el cierre. Análisis de niveles conceptuales
Alto (H)	Existe confianza elevada en la estimación o capacidad de control durante las operaciones o el cierre; Análisis detallado siguiendo un alto nivel de atención



4.1.2 Limitaciones

Dado que existen muchos riesgos diferentes, sólo se tendrán en cuenta los más comunes e importantes bajo consideraciones de expertos.

Dado que el AMFE depende efectivamente de los miembros del comité que examina los fallos del producto, está limitado por su experiencia de fracasos anteriores o conocimiento general de los mecanismos y modos de falla.

La evaluación del riesgo es específica del sitio establecido. Como tal, los riesgos son altamente dependientes de la ubicación del sitio, la geografía, el clima, la regulación, la categoría de relaves y otros parámetros. El estudio sólo podría centrarse en los riesgos y consideraciones más comunes, por lo que, para cada caso específico, se necesita un estudio de campo detallado para evaluar los riesgos de manera más completa.



5 Escenarios planteados

Las balsas de relaves se construyen durante un periodo de tiempo largo, en etapas sucesivas, y es necesario mantenerlos tras la clausura. Es difícil realizar un mantenimiento constante ya que se considera un gasto que no produce nada. Se estima el riesgo de fallo en el 0,1% a partir de datos de ICOLD.

Para resolver los problemas del acumulo continuo de residuos, hay un interés creciente en el tratamiento y procesado de relaves para disminuir el tamaño de las balsas de almacenamiento necesarias, así como los potenciales riesgos que conllevan. Sin embargo, el espesado de lodos requiere de importantes instalaciones y de un fuerte consumo energético, por lo que la alternativa de utilizar esta técnica se presenta como una comparación desde el punto de vista de la sostenibilidad entre ocupación de vertedero y uso de electricidad.

Para decidir qué técnica de gestión de relaves es la más adecuada desde una perspectiva de sostenibilidad ambiental se describirán tres escenarios en los cuales se obtienen relaves con diferentes grados de humedad. A continuación, se realiza la selección de un conjunto de indicadores ambientales que permitan abordar el análisis de forma holística y tomar una decisión convenientemente informada y fundamentada.

5.1 Escenario 1: Relaves convencionales en etapas de operación y cierre.

En los relaves convencionales la lechada se descarga con una cantidad considerable de agua de proceso en un estanque de sedimentación. En general, las pendientes están por debajo del 0,5% en el área de eliminación, posteriormente se envía el agua del proceso a un segundo estanque (estanque de clarificación), desde donde se puede devolver al proceso. La concentración de sólidos está a menudo muy por debajo del 20% en volumen (50% en masa) con un alto potencial de segregación después de la deposición, es decir, se produce una clasificación hidráulica de partículas en el estanque de sedimentación (Wennberg, 2010).

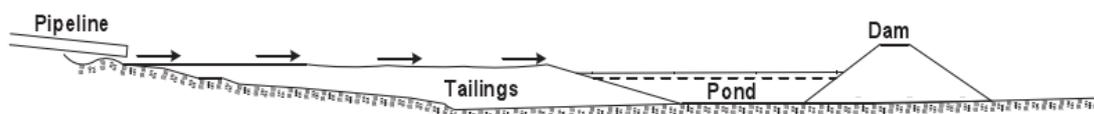


Figura 23: Depósito de relaves convencionales (Wennberg, 2010)



5.1.1 Transporte y bombeo por tubería

Los lodos de baja concentración son transportados a las instalaciones de eliminación de relaves a través de tuberías. Para un funcionamiento seguro y económico y para establecer una concentración óptima de sólidos, los relaves se deshidratan antes del transporte de lechada o, en algunos casos, se añade agua fresca. El transporte de residuos se logra a través de tuberías, utilizando diferentes tipos de bombas de lodos. Al final de la tubería, la mezcla de relaves y agua transportada se carga en el estanque de relaves o en la serie de estanques. Estos depósitos están diseñados y construidos por métodos convencionales de construcción de presas. En la mayoría de los casos, es necesario recuperar el agua sobrenadante transparente de las superficies de los estanques para mantener el equilibrio del agua en un estado estable y para prevenir fallos de la presa como los causados por el rebosamiento. El agua de retorno es bombeada de vuelta a la planta a través de tuberías (Bóhm et al., 2005).

5.1.2 Presa

Los mayores riesgos de los relaves convencionales se dan en la fase de operación y después de la fase de cierre provienen de la presa. Existen principalmente dos tipos de embalses superficiales, una represa tipo retención de agua y un terraplén levantado que tiene muchas configuraciones (Vick and Planning, 1983). El diseño del terraplén levantado es la técnica de construcción más común utilizada en las instalaciones de almacenamiento de relaves. Los tres diseños principales son las estructuras aguas abajo, aguas arriba y eje central, que designan la dirección en la que la cresta del terraplén se mueve en relación con el dique de arranque en la base de la pared del terraplén (Vick and Planning, 1983). El método ascendente es el costo inicial más bajo y el diseño más popular para un talud elevado de relaves en áreas sísmicas de bajo riesgo. Una de las razones de esto es principalmente debido a la cantidad mínima de material de relleno requerido para la construcción inicial y posterior subida, que normalmente consiste enteramente de la fracción gruesa de los relaves (Engels, J., 2017c). La construcción de un terraplén diseñado aguas arriba comienza con una base de dique de arranque permeable (drenaje libre). Los relaves se descargan generalmente de la tapa de la cresta de la presa que crea una playa que se convierte en la fundación para los aumentos futuros del terraplén (Vick and Planning, 1983).

No es sorprendente que el método ascendente sea el diseño más común de fallos, causando enormes consecuencias ambientales en todo el mundo (ICOLD and UNEP, 2001). Durante y después de la operación, se aplicará un sistema de cobertura vegetal directa.



5.2 Escenario 2: Relaves espesados (paste) en las etapas de operación y cierre

Los sistemas de espesado de relaves consisten en un ciclo convencional con una etapa de espesamiento antes del almacenamiento. Esta etapa se lleva a cabo con un espesante que produce un subflujo altamente concentrado. El espesador puede colocarse cerca del concentrador o en el área de eliminación. En terreno plano, los relaves espesados son descargados desde una rampa artificial o una torre que forma una cresta o cono. Puede ser favorable situar el espesador cerca de la zona de eliminación cuando la deposición tiene lugar a lo largo de un lado de una colina o en un valle (Wennberg, 2010).

Con una ubicación elevada del espesador cerca de la zona de desecho, sólo se requiere inicialmente un bombeo a corta distancia de lechada espesada. Con un sistema de relaves más espesados, hasta el 90% del agua puede ser reciclado directamente del desbordamiento del espesante, dejando la concentración de sólidos en volumen por lo general por encima del 60%, logrando así propiedades de paste: una pendiente conceptualmente igual al 2%, no segregación y virtualmente sin agua (Wennberg, 2010).

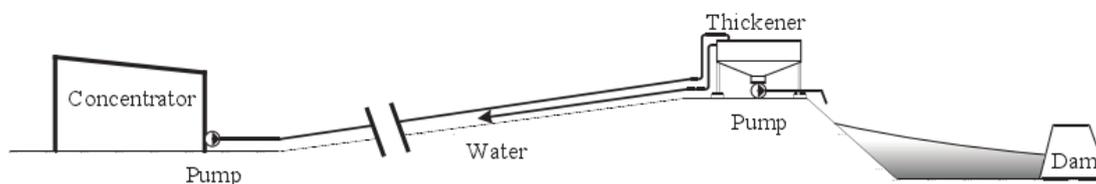


Figura 24: Descripción esquemática del proceso de relaves espesados con el espesador localizado cerca del área de deposición (Wennberg, 2010)

5.2.1 Espesador

Los relaves obtenidos en las operaciones de concentración, se descargan como suspensión diluida al espesante para la recuperación de agua en exceso. Las partículas finas no deben perderse durante la operación de deshidratación, por lo que un espesador convencional por gravedad se convierte en el equipo de elección para la primera etapa de deshidratación. Si más de una cantidad suficiente de partículas finas están presentes en la corriente de relaves, parte de la corriente puede ser procesada con un hidrociclón y el desborde descartado, eliminando así parte del agua y aumentando las velocidades de espesamiento y filtración. Esto se llama clasificación parcial (Brachebusch, 1994).



Los factores clave que afectan al engrosamiento y clarificación de una corriente de alimentación (Bedell et al., 2002) son:

- Relación peso sólido-líquido en la alimentación.
- Tamaño y forma de los sólidos en partículas.
- Diferencias de gravedad específica entre sólidos y líquidos.
- Presencia de floculante.
- Viscosidad.
- Temperatura de la corriente de alimentación.
- Método de aplicación floculante.
- Características de humectación de partículas.
- Método de alimentación / arreglo.
- Tiempo y velocidad de rastrillo.
- Viento y evaporación.

Los reactivos más frecuentemente utilizados en el proceso de espesamiento son (Bedell et al., 2002):

- Floculantes: polímeros sintéticos o naturales de alto peso molecular que ayudan a mejorar las tasas de sedimentación de la mayoría de los sólidos suspendidos. Son generalmente compuestos a base de poliacrilamida fabricados en formas aniónicas, no iónicas y catiónicas.
- Coagulantes: los minerales naturales tales como alumbre, cal, sales férricas, etc., que son eficaces para romper la estabilidad de las suspensiones de coloides. Son menos eficaces que los floculantes.

Componentes comunes de los espesantes (Bedell et al., 2002):

- Tanque
- Alimentación.
- Sistema de extracción de rebosadero y rebosadero.
- Rastrillo.
- Conducir.
- Estructura de soporte.



Los espesantes de "paste" de densidad ultra alta producen subconjuntos de consistencia de pasta según la figura siguiente:

- Maximización de la eficiencia del flujo de floculación.
- Uso de sistemas de dilución de alimentación (E-Duc System o AUTODIL).
- Usar un tanque profundo para compresión.
- Con un cono de 30-45 °.
- Utilizando un sistema de rastrillo especialmente diseñado.
- Utilizar principios de adelgazamiento por cizallamiento.
- Utilizar un alto grado de instrumentación.

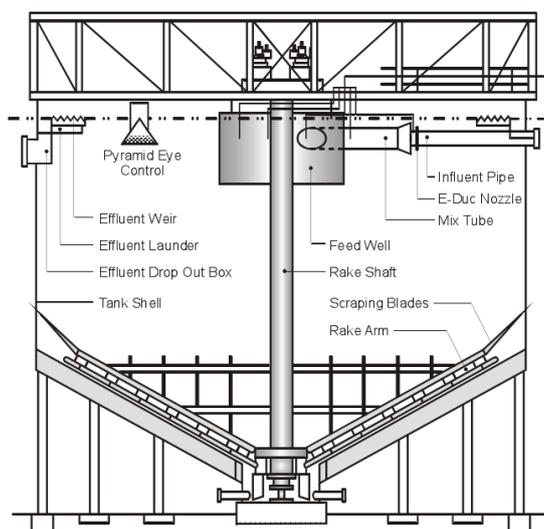


Figura 25: Espesador de alta densidad, EIMCO (Bedell et al. 2002)

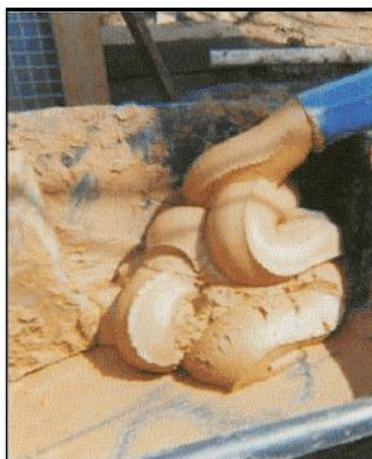


Figura 26: Fluido típico de un espesador de alta densidad (Bedell et al.2002)



5.2.2 Transporte y bombeo por tubería

La lechada de relaves se espesa en la planta de procesamiento antes de que el paste o los relaves espesados sean transportados a la zona de eliminación. El desbordamiento del agua del espesador se mantiene dentro del circuito de la planta. En cuanto a la gestión del agua, es más fácil diseñar y operar este sistema que los sistemas convencionales, ya que el agua del proceso es devuelta dentro de la planta. No es necesario bombear el agua desde largas distancias, permitiendo el uso de una sola estación de bombeo.

El bombeo es el método más común de transporte de relaves de alta concentración. El sistema de transporte hidráulico comprende varios componentes interrelacionados, por lo que, si alguno de estos componentes está mal diseñado, el sistema no funcionará en el punto óptimo (Jewell and Fourie, 2006).

5.2.3 Presa

Las áreas de eliminación de relaves pueden consistir en valles o terrenos planos en algún lugar cercano a la planta de procesamiento. Para formar un depósito de relaves en pendiente en un valle, los relaves espesados serían descargados en la cabeza del valle o a lo largo de una de las colinas laterales. La lechada pesada fluiría abajo del valle hasta encontrarse una cuesta más plana que la suya, o alternativamente, hasta que sea parada por una pequeña presa. En un terreno plano, los relaves espesados serían descargados de una rampa o torre artificial, resultando en una cresta o cono de relaves. Sólo se requiere un dique de bajo perímetro para recoger la precipitación directa y una pequeña cantidad de agua de proceso extruida a un estanque, idealmente ubicado más allá de los límites del depósito de relaves.

Debido al proceso de espesamiento, este estanque recibiría sólo un tercio de la cantidad de agua de proceso que fluye en sistemas convencionales (Robinsky, 1999).

Durante y después de la operación, se aplicará un sistema de cobertura vegetal directa.



5.3 Escenario 3: Relaves filtrados en las etapas de operación y cierre

En este escenario las colas se espesan convencionalmente y después se filtran para formar una torta húmeda. Este material se vuelve pulpa en condiciones muy controladas para preparar con precisión la pasta de consistencia correcta. El reciente desarrollo del equipo ha permitido preparar el relave filtrado en un proceso de una etapa (Deschamps et al., 2011). Los espesantes retienen los relaves durante más tiempo y son más altos, lo que permite la deshidratación adicional asociada con la compresión de los relaves.

La preparación consistente de los relaves de este tipo de equipo depende de las características de los mismos y se requieren ensayos (Edraki et al., 2014).

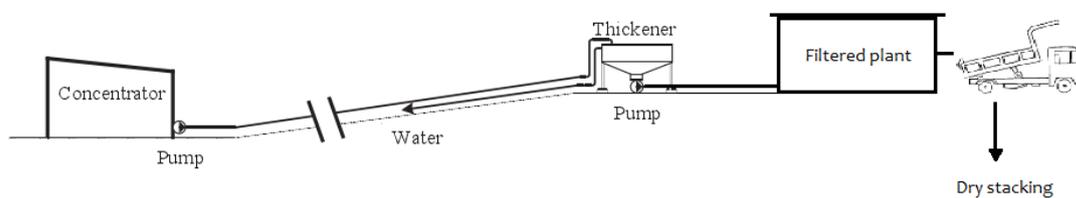


Figura 27: Descripción esquemática del sistema de filtrado de relaves mineros

5.3.1 Espesador

El espesador es el mismo que el empleado en el escenario anterior, con lo que no se detallará de nuevo el equipo.

5.3.2 Filtro

Los relaves filtrados se utilizan típicamente para obtener la torta seca. Este material tiene suficiente humedad para permitir que la mayoría de los espacios de los poros estén llenos de agua, pero no tanto como para impedir una compactación óptima del material.

La filtración puede realizarse mediante presión o fuerza de vacío. Los tambores, las placas apiladas horizontal y verticalmente y las correas horizontales son las configuraciones más comunes de la planta de filtración. La filtración a presión puede llevarse a cabo en un espectro mucho más amplio de materiales, aunque la filtración de la correa de vacío es probablemente la más lógica para operaciones a gran escala. La siguiente figura muestra una prensa de filtro típica.



Figura 28: Ejemplo de una planta de filtrado

Es importante considerar la naturaleza del material de relaves para obtener una buena filtración. No sólo es importante la gradación de los relaves, sino también la mineralogía. En particular, altos porcentajes de minerales de arcilla $<74 \mu\text{m}$ tienden a contraindicar la filtración eficaz. Además, sustancias tales como betún residual (por ejemplo, relaves de arenas bituminosas) pueden crear dificultades especiales para una planta de filtración (RET, 2007).

Se describen a continuación el funcionamiento y las características del filtro prensa seleccionado para este escenario (Advanced Mineral Processing S.L.).



Figura 29: Filtro prensa (Advanced Mineral Processing S.L.)



Los filtros prensa están indicados para la deshidratación de pulpas con finos o arcillas, previamente sedimentadas en tanque-espesador, procedentes del lavado de áridos y minerales. En el proceso de filtración se recupera la mayor parte de la fase líquida contenida en los sólidos concentrados que descarga el espesador, obteniéndose una torta de fácil manipulación y almacenamiento, con una mínima humedad, con lo que se da una solución final al vertido de cualquier efluente originado en los procesos de minería.

La especificación del filtro prensa idóneo para un determinado proceso, conlleva la realización de ensayos de filtración a nivel de laboratorio o en planta piloto a fin de establecer la superficie filtrante, y en consecuencia el tamaño y número de placas que debe incorporar el filtro, que normalmente se dimensiona con un cierto margen en previsión de que se requiera una ampliación futura de placas, susceptible de realizar con una mínima inversión.

La alimentación de pulpa al filtro se realiza mediante el empleo de una bomba centrífuga o de pistón/membrana, controlada por un sensor de presión, con el filtro cerrado, hasta concluir el llenado del filtro a la presión requerida y en el periodo de tiempo más corto. Posteriormente, se cierra la válvula de alimentación al filtro y comienza el soplado del núcleo del filtro mediante aire a presión. Otra válvula de aire provoca la aireación de telas para facilitar el despegue de las tortas que se han formado. Finalmente, se inicia la apertura del paquete filtrante dando comienzo la descarga de tortas.

Un mecanismo (opcional) de sacudida de placas entra en funcionamiento después de la apertura del paquete filtrante durante un ciclo de duración variable. El filtro puede incorporar placas de membrana cuando la naturaleza de los sólidos a deshidratar requiere de una etapa de escurrido adicional además de la de filtración.



Un sistema automático de lavado de telas (opcional), consistente en un bastidor sobre carro móvil instalado en la viga superior del filtro, que incorpora unos tubos rociadores a alta presión rodeando a la placa, permite realizar una limpieza rápida y efectiva de la tela después de la descarga de tortas.

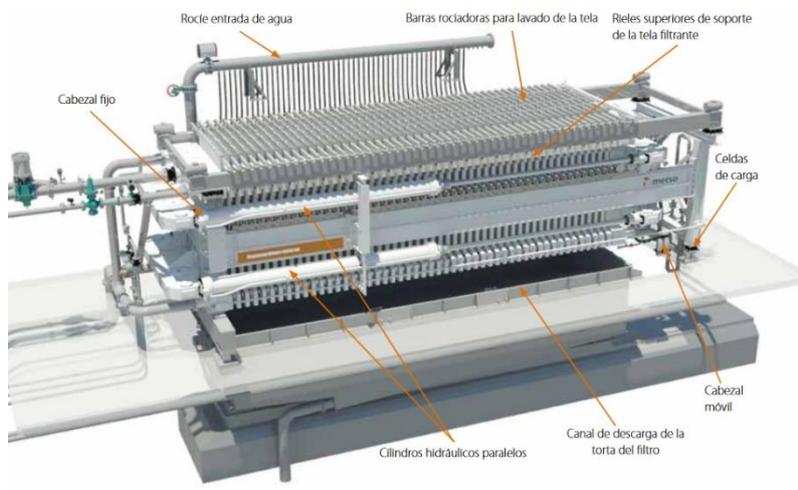


Figura 30: Partes de un filtro prensa

5.3.3 Transporte en camión

La consistencia de estos relaves filtrados es potencialmente transportable por camión o por cinta transportadora. Para los relaves dados, cualquiera de estas técnicas puede producir una torta de contenido de humedad o porcentaje de sólidos similar, pero las mayores presiones aplicadas en el proceso de filtración crearán una "estructura" que hace que la torta de filtración sea más transportable y manejable (RET, 2007).



Figura 31: Consistencia de los relaves filtrados (RET, 2007)



5.3.4 Apilamiento en seco

El verdadero apilamiento en seco requiere que los rellenos flocculados sean filtrados, usualmente bajo presión o posiblemente bajo vacío (Davies, 2011), para producir un producto que sea transportable y apilable usando técnicas de transporte y eliminación de material "seco". El término "apilamiento en seco" se utiliza a veces mal cuando se hace referencia a técnicas de eliminación de espeso y/o pasta que no mueven los relaves en estado seco.

Los tambores, las placas apiladas horizontal y verticalmente y las correas horizontales son los métodos de filtración por presión más comunes. Tanto la gradación de los relaves como su mineralogía son determinantes importantes en el diseño de la filtración. En particular, altas proporciones de minerales arcillosos tienden a limitar la filtración eficaz, al igual que algunos minerales residuales, como el betún en las colas de arenas bituminosas. Es importante anticipar los cambios mineralógicos y de molienda que podrían ocurrir durante la vida de la mina a medida que la operación minera se mueve a través de un cuerpo de mineral variable (RET, 2007).

Los rellenos filtrados son transportables por camión o cinta transportadora y luego pueden colocarse, esparcirse y compactarse para formar una pila seca, no saturada, densa y estable, en algunos casos, tales como relaves geoquímicamente benignos, que no requieren presas para la retención ni depósito de relaves asociados.

La filtración y el apilamiento de relaves se consideran típicamente en regiones muy áridas donde la conservación del agua es crucial, sobre todo en las regiones desérticas de Chile y Perú, pero también en Australia Occidental, el suroeste de Estados Unidos y partes áridas de Sudamérica, partes de África, y las regiones árticas de Canadá y Rusia, donde el manejo de relaves es muy difícil en el invierno helado.



La filtración mejora la recuperación de los reactivos del proceso, y el apilado en seco proporciona una estabilidad sísmica mejorada sobre los métodos de deposición en relaves húmedos. El apilamiento en seco también permite superar topografías de emplazamiento complicadas y las condiciones de cimentación, o sitios muy limitados, que hacen que las presas de relaves convencionales sean muy difíciles de construir. El apilamiento en seco también facilita la rehabilitación, incluida la rehabilitación progresiva, reduciendo así los riesgos y responsabilidades de cierre. Los dos factores claves para la filtración y el apilamiento en seco de los relaves han sido hasta la fecha la recuperación del escaso agua de proceso y las difíciles condiciones de topografía y cimentación (RET, 2007).

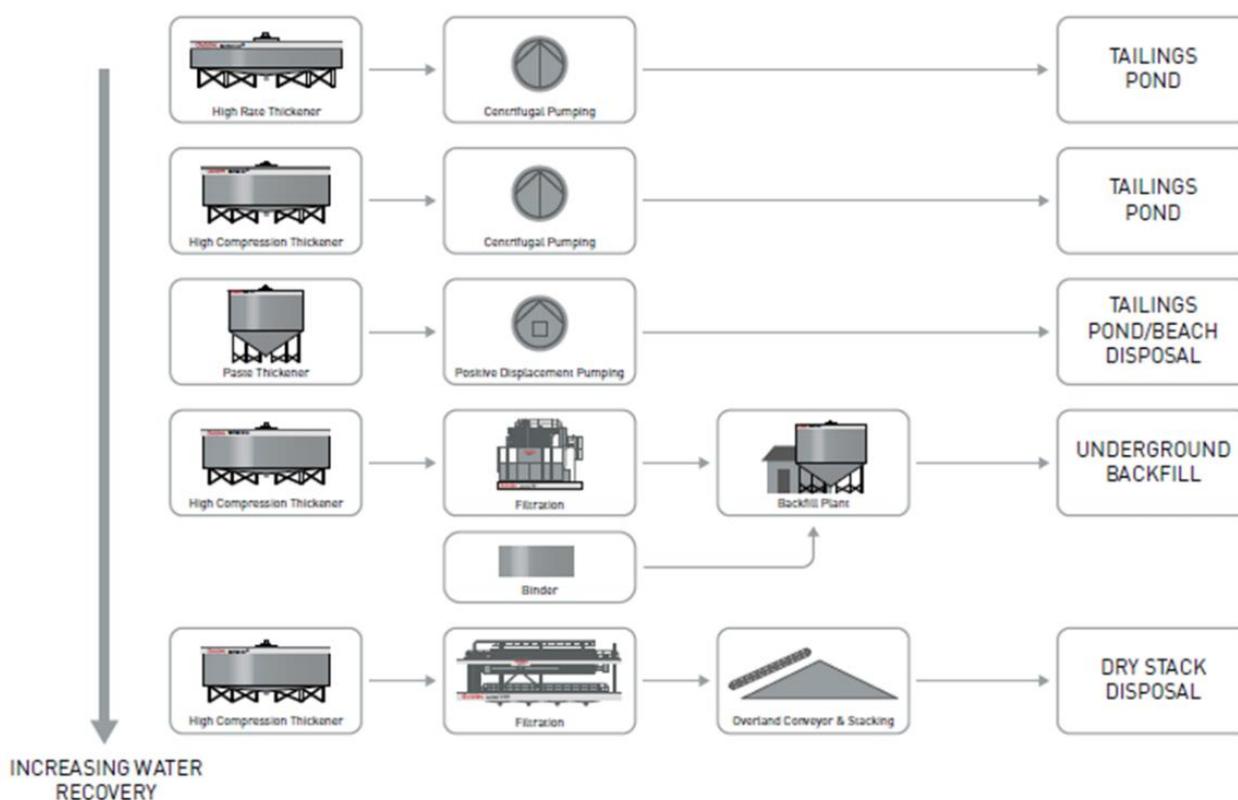


Figura 32: Tipos de procesos de tratamiento de relaves mineros (OUTOTEC)



7. Metodología de evaluación de riesgos para residuos convencionales, espesados y filtrados

La explotación de los recursos minerales es una actividad muy importante para el desarrollo de la sociedad, pero al mismo tiempo, la minería ha adquirido una mala reputación debido a los impactos negativos asociados con la contaminación y los fallos estructurales (Dold, 2008). El principal problema ambiental al que se enfrenta la industria minera deriva de los relaves, debido al volumen generado y los contaminantes asociados con los mismos.

Entre las diferentes técnicas de almacenamiento de relaves, la más común es el almacenamiento convencional. La parte principal de los embalses convencionales consiste en un terraplén para retener los relaves y el agua (Engels, J., 2013). El fallo de estos terraplenes es la razón principal de los daños catastróficos producidos al medio ambiente y a la salud pública, e incluso de la pérdida de vidas durante la etapa de operación y en la fase de cierre (ENPI, E., 2011).



Imagen 1: Derrame contaminante en Aznalcóllar, España (Aguilar et al., 2000)

Estos incidentes han elevado la preocupación pública sobre los impactos ambientales y para la salud pública de la industria minera. Los requisitos mundiales para el desarrollo sostenible también instan a la industria minera a conocer el reto de la sostenibilidad, que presenta una variedad de riesgos (y oportunidades) para la industria de los minerales (RET, 2008).

Una solución posible para reducir la incidencia de estos fallos es la aplicación de una estrategia de manejo de eliminación o espesamiento de relaves. Se han realizado múltiples análisis de estos sistemas, desde el punto de vista ambiental y económico, utilizando la evaluación del ciclo de vida y el análisis de costes.



Debido a la importancia demostrada por los acontecimientos de fallos de presas registrados en las bases de datos, es evidente que los beneficios del espesamiento de relaves mineros, vinculados a la reducción del riesgo, deben tenerse en cuenta durante los procesos de toma de decisiones. Evaluar los riesgos también ayudará a calificar la viabilidad de un sistema de relaves más espeso.

El análisis de riesgos facilita la cuantificación de las opciones, la probabilidad, las consecuencias y los costes del fallo. La calificación de "riesgo" se obtiene a partir del producto cualitativo de la probabilidad y la consecuencia (RET, 2007).



Figura 33: Derrame en el monte Polley, Canadá

Se dispone de una serie de metodologías desde enfoques cualitativos, semicuantitativos a cuantitativos (RET, 2008). La guía de gestión de riesgos de seguridad y salud de la industria de minerales describe las siguientes técnicas de evaluación de riesgos (RET, 2008):

- Evaluación informal del riesgo (IRA).
- Seguridad laboral /análisis de riesgos (JSA / JHA).
- Análisis de la barrera de energía (EBA).
- Análisis preliminar de peligros /análisis de riesgos / evaluación y control de riesgos en el lugar de trabajo (PHA / HAZAN / WRAC); Riesgo y operabilidad (HAZOP).
- Análisis del árbol de fallos (FTA).
- Modos de fallo, análisis de efectos y criticidad (FMECA).



En el presente trabajo, se ha realizado una comparación general entre el paste (relaves espesados), los relaves filtrados y el almacenamiento convencional de relaves en términos de riesgo, utilizando un AMFE basado en una clasificación de probabilidad y consecuencias en una evaluación semicuantitativa del riesgo. Todos los riesgos para las etapas desde la planta de concentración se consideran para cada escenario, en dos categorías diferentes: medio ambiente y seguridad pública.

La tecnología de relaves espesados y filtrados tiene más riesgos clasificados de bajo a moderado que los relaves convencionales y tiene menos riesgos de clasificarse como moderados a altos. Estos resultados pueden utilizarse como indicación de la sostenibilidad de la eliminación de residuos de paste, espesado y filtrado en términos de riesgos. Aunque el objetivo del estudio es hacer una comparación general no aplicada a ninguna mina específica, también puede usarse como una metodología o plantilla para una evaluación de riesgos para cualquier instalación existente.

7.2. Evaluación de riesgos en minería

Existen muchos estudios sobre la metodología de evaluación de riesgos aplicada a la industria minera, como el manual del Gobierno Australiano, "Evaluación y gestión de riesgos", que tiene como objetivo identificar las cuestiones clave que afectan al desarrollo sostenible y proporcionar información y estudios de casos, para ilustrar una base más sostenible para la industria minera (RET, 2008). El ENPI también desarrolló en 2011 la "Metodología para la Evaluación de Riesgos Ambientales y Sanitarios de Emplazamientos de Eliminación de Residuos Mineros". El objetivo de este estudio fue encontrar soluciones que identificaran y trataran los riesgos de forma sostenible, proporcionando una orientación general sobre la realización de la evaluación de riesgos para relaves y emplazamientos similares (ENPI, E., 2011).

Existen muchos estudios de casos sobre la evaluación del riesgo en las presas de colas mineras, como el sistema de evaluación de riesgos desarrollado por Xin, que se basa en el análisis de probabilidades de fallos de presas y en la evaluación de consecuencias (Xin et al., 2011). Por ejemplo, Eng y Shaw desarrollaron una metodología de gestión de riesgos para grandes estructuras geotécnicas en las minas. El estudio de Xenidis identifica los riesgos específicos asociados con los desechos de carbonatos y determina las medidas correctivas requeridas, combinando las técnicas de caracterización geoquímica disponibles y las herramientas de evaluación de riesgos (Xenidis et al., 2003a).



Las referencias citadas demuestran la fiabilidad de las metodologías y su aplicación; Sin embargo, la mayoría se centran en un solo caso, que suele ser el fracaso de la instalación de almacenamiento de relaves durante la fase operativa, y no contienen información sobre las etapas posteriores al cierre. Existen pocas referencias que comparen los diferentes métodos de eliminación de relaves a través de todas las etapas del ciclo de vida mediante la evaluación de riesgos y ninguno se centra en la tecnología del paste o del filtrado.

En el presente documento, se describe y aplica una metodología de evaluación de riesgos AMFE en tres escenarios diferentes: instalaciones de almacenamiento de relaves convencionales, espesados y filtrados.

7.3. Objetivo y definición del alcance

En este estudio, se realizarán las evaluaciones de riesgos de los depósitos de relaves convencionales, espesados y filtrados, las cuales se compararán en términos de sostenibilidad, para ello se seguirá un método general que servirá de base para futuras aplicaciones específicas.

El análisis modal de efectos y fallos será la metodología utilizada, desarrollada y descrita para dos etapas del proceso:

- Etapa de operación (EO), incluye las operaciones actuales hasta el final de la vida útil de la mina y se refiere a un período de 30 años (Doka, 2008).
- Etapa de post-cierre (EPC), se refiere al período de 100 años posterior a la implementación del plan de cierre (Doka, 2008).

La Figura 34 muestra los elementos clave de los sistemas de gestión de relaves mineros durante el ciclo de vida de una instalación de almacenamiento de relaves.

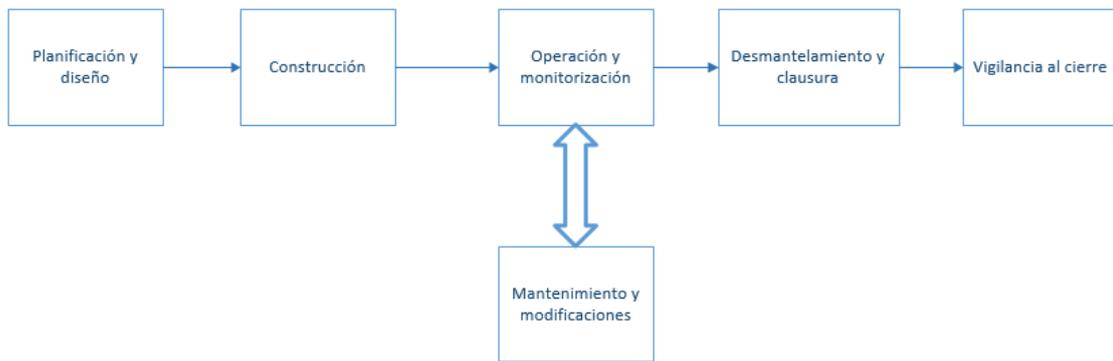


Figura 34: Elementos clave de los sistemas de gestión de colas adaptado de (RET, 2007)

Entre estas etapas, la de post-cierre es la que puede ocasionar los problemas ambientales más notables y producir los mayores riesgos para la sostenibilidad, por lo que las etapas de operación y post-cierre serán el enfoque principal de este estudio.

Se analizarán una serie de fallos, incluyendo los producidos por sistemas naturales y de ingeniería, teniendo en cuenta sus causas y posibles efectos sobre la sostenibilidad.

Los escenarios a tener en cuenta son los siguientes:

- Escenario 1: consiste en una instalación de relaves convencionales en las etapas de operación y post-cierre. La suspensión de relaves se descarga con una cantidad considerable de agua (proveniente del proceso de flotación) en un estanque de sedimentación con una concentración de sólidos del 35 wt-%.
- Escenario 2: consiste en una instalación de relaves espesados (paste) en las etapas de operación y post-cierre. La suspensión de relaves es espesada del 35 wt-% al 70 wt-% antes de ser descargada en un estanque.
- Escenario 3: consiste en una instalación de relaves filtrados (secos) en las etapas de operación y post- clausura. Los relaves de paste se filtran hasta el 88 wt-% y posteriormente se descargan en un apilamiento en seco.



7.3.1. Etapa 1: Identificación de los modos de fallo significativos

Los modos de fallo de esta investigación se basan en el Boletín 121 (2001) de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) y en expertos en geotecnia, hidrología e impactos ambientales; se tienen en cuenta también los requisitos reglamentarios aplicables a la ingeniería y a los sistemas naturales y sus alrededores, y aquellos que conciernen al diseño y las operaciones en minería.

7.3.1.1. *Fallos de transporte y bombeo en las tuberías*

Las siguientes categorías generales se han utilizado para desarrollar los modos de fallo detallados durante el funcionamiento y las etapas posteriores al cierre.

7.3.1.1.1. Taponamiento de tuberías

El taponamiento de una tubería podrá causar la interrupción del sistema y producir roturas, tanto en la propia tubería como en las bombas. Esta rotura puede conducir al derrame de relaves, afectando al sistema de drenaje y contaminando el agua y el suelo debajo del punto de rotura. La probabilidad de que la tubería se obstruya aumentará con la densidad de relaves. Puede ser causado por una o más de las siguientes razones:

- (i) objeto desconocido
- (ii) baja potencia de bombeo
- (iii) sobrepresión
- (iv) degradación de los relaves debido a la meteorización física y química
- (v) formación de precipitados

7.3.1.1.2. Rotura de la tubería

La rotura de la tubería causará la interrupción del sistema y puede dar lugar a derrames de relaves. Esto afecta al sistema de drenaje y puede contaminar el agua y el suelo, por debajo o cerca de la zona de rotura. Puede ser causada por una o más de las siguientes razones:

- (i) corrosión
- (ii) fatiga
- (iii) erosión interna del tubo
- (iv) alta presión
- (v) comienzo del bombeo con la válvula cerrada



- (vi) taponamiento de tuberías
- (vii) cambio en las propiedades reológicas

7.3.1.1.3. Rotura de la bomba

La rotura de la bomba causará la interrupción del sistema y puede dar lugar a derrames de relaves. Afecta al sistema de drenaje y puede contaminar el agua y el suelo por debajo o cerca del punto de rotura. La explosión de la bomba puede incluso causar lesiones humanas o muertes. Puede ser causada por una o más de las siguientes razones:

- (i) baja potencia en el arranque
- (ii) potencia insuficiente en funcionamiento
- (iii) comienzo del bombeo con una tubería taponada
- (iv) comienzo del bombeo con una válvula cerrada
- (v) mala selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas)
- (vi) cambio en las propiedades reológicas
- (vii) erosión de la bomba



Imagen 2: Fallo en una tubería y posterior erosión en una cara aguas abajo (Engels, 2004)

7.3.1.2. **Fallo del estanque/presa (durante las etapas de operación y cierre)**

7.3.1.2.1. Licuefacción de la presa

El fallo de un embalse de relaves debido a la licuefacción es invariablemente catastrófico y probablemente, el principal contribuyente a las percepciones públicas negativas de las instalaciones de almacenamiento de relaves. La licuefacción es un fenómeno en el que una masa de tierra pierde un gran porcentaje de su resistencia al cizallamiento cuando se somete a una carga monótona, cíclica o de choque, y fluye de manera semejante a un líquido hasta que las tensiones de cizallamiento, que actúan sobre la masa, son tan bajas como la resistencia al cizallamiento reducida (Sladen et al., 1985).



La licuefacción puede ocurrir bajo condiciones de carga transitoria (es decir, sísmica) o estática.

Puede darse debido a una o a una combinación de las siguientes causas:

- (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves y/o cimientos
- (ii) mala estimación de diseño contra terremotos
- (iii) superación del diseño contra terremotos por un terremoto
- (iv) utilización de propiedades de resistencia al corte no precisas en el análisis de estabilidad
- (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento
- (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves
- (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa

7.3.1.2.2. Hundimiento o fallo del pie de presa

El hundimiento suele ser causado por una falta de estabilidad de la pendiente, que es definida como la resistencia de la superficie inclinada al fallo por deslizamiento o colapso (Kliche, 1999). El fallo del pie de presa es un tipo especial de fallo en la pendiente, desencadenado por la erosión de la zona inferior de la presa (pie). Ambos fenómenos pueden conducir a un fallo de la presa.

El hundimiento o fallo del pie de presa puede desencadenar un efecto de licuefacción en la presa. Los relaves de la cara expuesta (superficial) pueden sufrir erosión o ser transportados por el agua de lluvia, contaminando así la zona cercana. Estos fenómenos pueden darse debido a una o a una combinación de las siguientes causas:

- (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves
- (ii) utilización de propiedades imprecisas, de resistencia al corte, en los cálculos de estabilidad; esto desencadena sísmicamente la pérdida de resistencia en los relaves que no cumplen el criterio de densidad de diseño

7.3.1.2.3. Fallo en la cara expuesta de los relaves

La cara expuesta de los relaves puede sufrir erosión debido a la lluvia o el viento, y conducir a la contaminación del agua y del polvo. También pueden crearse estructuras “gully”, que, si no se reparan, pueden causar la ruptura de la presa debido a la erosión masiva del barranco.



Imagen 3: Desprendimiento de un terraplén de relaves causado por una superficie con alto nivel freático (Engels, 2004)



Imagen 4: Erosión en la cara aguas abajo de un terraplén de relaves debida a una extensa canalización del agua (Engels, 2004).

7.3.1.2.4. Desbordamiento

El desbordamiento tiene lugar cuando el agua libre en un embalse se eleva por encima de la cresta del terraplén y fluye por la cara aguas abajo. Esto puede ocasionar la erosión de la cara aumentando el riesgo de fallo del terraplén (Engels, 2004). El desbordamiento puede ocurrir debido a una o una combinación de las siguientes causas:

- (i) error en el cálculo del agua libre que puede almacenarse en la balsa
- (ii) fallo en el sistema de decantación o existencia de un flujo de salida de decantación insuficiente, que provocan un aumento de la cantidad de agua libre
- (iii) puntos de descarga inadecuados que mueven el agua estancada más cerca de un terraplén y pueden hacer inútil una torre de decantación
- (iv) puntos de desague monitoreados incorrectamente que ocasionan un desbordamiento de los relaves.
- (v) una reducción de la cara libre como resultado del hundimiento de la cresta de la presa
- (vi) escorrentía de lluvias



- (vii) fallo del sistema de drenaje
- (viii) fallo del desague
- (ix) fallo del sistema de derivación

7.3.1.2.5. Infiltración

El vertido por lixiviado es prácticamente inevitable en cualquier instalación de este tipo. El gradiente hidráulico conduce la filtración de las sustancias de la presa al subsuelo, produciendo así su descarga al ambiente. La infiltración puede darse debido a uno o una combinación de los siguientes puntos:

- (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves
- (ii) fallo de la tubería de drenaje (no taponado con hormigón)
- (iii) degradación del revestimiento y fallo eventual (drenaje taponado con hormigón)
- (iv) rotura del sistema estanco

7.3.1.2.6. Generación de polvo

El polvo generado en la superficie de las instalaciones de almacenamiento de relaves puede ser un riesgo para la salud pública y causar impactos ambientales producidos por partículas y contaminantes en el aire. Puede ser una preocupación clave para las comunidades vecinas, e incluso para los trabajadores de las minas y sus familias. Es probable que los relaves arenosos desagregados causen problemas de polvo durante períodos de viento fuerte. La generación de polvo puede darse por una o varias de las razones siguientes:

- (i) erosión del terraplén
- (ii) erosión de los estanques de disposición final
- (iii) viento fuerte



Imagen 5: Emisiones de polvo (RET, 2007)



7.3.1.3. Fallos en el espesador

7.3.1.3.1. Fallo de operación

El fallo de la operación del espesador conducirá a la parada de los rastrillos y provocará que los rellenos de flujo inferior no cumplan las propiedades reológicas requeridas. También existe el peligro de que se produzca un tapón de desbordamiento.

7.3.1.3.2. Taponamiento en la salida por flujo insuficiente

El taponamiento de la salida de flujo inferior puede conducir a la superación o rotura del espesador, contaminando por lo tanto el agua y el suelo del área cercana. Puede ser causado por una o varias de las razones siguientes:

- (i) taponamiento de las últimas etapas de bombeo
- (ii) cuerpo desconocido en el espesante
- (iii) mala caracterización de los residuos (propiedades reológicas)
- (iv) cambio de las propiedades reológicas en los relaves de alimentación

7.3.1.3.3. Desbordamiento

El desbordamiento del espesador puede conducir a la contaminación del suelo adyacente, aguas superficiales y subterráneas. Puede ser causado por una o varias de las razones siguientes:

- (i) lluvia (en espesador abierto)
- (ii) fallo del sistema de recolección del vertedero
- (iii) rebose debido a taponamiento de salida
- (iv) excesivo flujo de alimentación

7.3.1.3.4. Atascamiento o rotura de los rastrillos

Los rastrillos del espesador tienen dos efectos principales en la eficiencia global del proceso. En primer lugar, proporcionan vías preferentes de agua para expulsar los sólidos, que de otro modo quedarían atrapados, sin resuspender sólidos asentados. En segundo lugar, ayudan a la evacuación de los sólidos, moviendo los mismos al flujo inferior (Jewell and Fourie, 2006). El fallo de los rastrillos puede provocar la interrupción del funcionamiento del espesador y también puede provocar una obstrucción del flujo, contaminando el agua y el suelo cercanos. Puede ser causada por una o varias de las razones siguientes:



- (i) mala caracterización de relaves (propiedades reológicas)
- (ii) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación
- (iii) baja potencia debido a un mal diseño del motor

7.3.1.4. Fallos en el filtro

7.3.1.4.1. Fallo de operación

El fallo de funcionamiento del filtro conducirá al bloqueo del mismo y provocará que los relaves no cumplan las propiedades reológicas requeridas. También existe peligro de que se produzca un taponamiento.

7.3.1.4.2. Taponamiento en la salida por flujo insuficiente

La obstrucción de la entrada o salida del flujo puede conducir a la rotura del filtro. Puede ser causada por una o varias de las razones siguientes:

- (i) taponamiento de las últimas etapas de bombeo
- (ii) cuerpo desconocido en el filtro
- (iii) mala caracterización de los residuos (propiedades reológicas)
- (iv) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación

7.3.1.4.3. Placas de membranas

La parada o rotura de las placas que continenen las membranas puede ocasionar la rotura o atascamiento del filtro. Esto puede ocasionar derrames contaminando así el suelo cercano al equipo. Puede ser causada por una o varis de las razones siguientes:

- (i) mala caracterización de los residuos (propiedades reológicas)
- (ii) cambio en las propiedades reológicas de los relaves en la alimentación
- (iii) baja potencia debido a un mal diseño del motor
- (iv) mal dimensionamiento del número y tamaño de las placas



7.3.1.5. Fallos en el transporte

7.3.1.5.1. Generación de polvo

Los métodos de manipulación para materiales a granel, tales como el transporte hasta el sepósito, pueden constituir considerables fuentes de polvo. El polvo se puede generar por una o varias de las razones siguientes:

- (i) transporte por camion
- (ii) viento fuerte
- (iii) mala cobertura del material en el camión

7.3.1.5.2. Accidentes de tráfico

Los accidentes de tráfico pueden conducir a la contaminación de los suelos adyacentes, aguas superficiales y subterráneas y pueden causar daños humanos y materiales. Estos accidentes pueden ser causados por uno o varios de los siguientes motivos:

- (i) colisión
- (i) errores de conducción
- (ii) fallo mecánico
- (iii) actores ambientales que perjudiquen la conducción



Figura 35: Mega camión volcado en la mina Veladero-Barrick Gold



7.3.2. Etapa 2: Evaluación de la probabilidad de cada modelo de fallo

La probabilidad de que el modo de fallo conduzca al efecto se ha clasificado utilizando un sistema de 5 clases, que van desde "No probable" hasta "Esperado".

Tabla 5: Probabilidad del evento (Eng, 2009)

Probabilidad	Como porcentaje	Como número estadístico
Improbable (NL)	< 0,01%	<1:10000
Baja (L)	0,01-0,1 %	1:10000 a 1:1000
Moderada (M)	0,1-1 %	1:1000 a 1:100
Alta (H)	1-10 %	1:100 a 1:10
Esperada (E)	>10%	>1:10

7.3.3. Etapa 3: Evaluación de la gravedad de los efectos de cada modelo de fallo

La evaluación de los efectos (o consecuencias) de los modos de fallo específicos se basa en las evaluaciones o análisis de las respuestas de los sistemas después de un fallo. Estos efectos pueden tener consecuencias físicas, biológicas o de salud y seguridad. Cada efecto se evaluará por separado en dos áreas: Impactos ambientales y seguridad pública.

El ranking de las consecuencias, o severidad, también se clasifica utilizando un sistema de 5 clases. Los investigadores anteriores han clasificado las consecuencias "insignificantes" a "extremas" para ser efectivas e intuitivas. Los intervalos de clase para cada una de las categorías se describen en la Tabla 6. Nuevamente, se sugieren las clasificaciones que se han encontrado útiles en el pasado, pero podrían adaptarse para adaptarse mejor al sitio o plan evaluado en ese momento (Eng and Shaw).



Tabla 6: Severidad de los efectos (Eng and Saw)

Severidad	Impacto ambiental	Seguridad pública
Extrema (E)	Impacto catastrófico en el hábitat (grande e irreversible)	Se esperan fatalidades o muertes múltiples
Alta (H)	Impacto irreversible significativo en el hábitat o en grandes	Lesiones graves o discapacidad probable: o algún potencial de fatalidad
Moderada (M)	Impacto reversible en el hábitat	Pérdida de tiempo o lesión probable: o algún potencial de lesiones graves, o pequeño riesgo de fatalidades
Baja (L)	Impacto menor en el hábitat	Se requieren primero auxilios. Pequeño riesgo de lesiones graves
Insignificante (N)	Impacto no apreciable	Sin preocupación

7.3.4. Etapa 4: Evaluación del nivel de confianza de cada modelo de fallo

Existe una incertidumbre en cuanto a la probabilidad de fracaso y a las estimaciones de las consecuencias basada en varios factores, entre los que se incluyen: falta de datos, falta de entendimiento del sistema, condiciones de funcionamiento futuras inciertas o mantenimiento incierto y el desarrollo regional después del cierre. Por lo tanto, la confianza en las estimaciones de riesgo puede variar desde baja hasta alta (Eng and Shaw). De acuerdo con las investigaciones de Robertson GeoConsultants Inc, el sistema de clasificación adecuado y apropiado consiste en el establecimiento de tres intervalos de confianza: baja, media y alta en las clasificaciones de riesgo. En los casos en los que existe poca confianza para un valor de evaluación de alto riesgo, es necesario seguir evaluando el riesgo a fin de obtener una predicción más fiable, tanto del riesgo como de las medidas de mitigación para reducir dicho riesgo (Eng and Shaw). En esta investigación, se utilizará dicha clasificación.



Tabla 7: Niveles de confianza (Eng and Saw)

Nivel de confianza	Descripción
Bajo (L)	No existe confianza en la estimación o la capacidad de control durante las operaciones o tras el cierre
Medio (M)	Existe cierta confianza en la estimación o la capacidad de control durante las operaciones o tras el cierre. Análisis de niveles conceptuales
Alto (H)	Existe confianza elevada en la estimación o capacidad de control durante las operaciones o el cierre; Análisis detallado siguiendo un alto nivel de atención

7.3.5. Limitaciones

- Dado que existen un gran número de riesgos diferentes, que pueden tener lugar durante las etapas de operación y de post-cierre en el proceso de relaves, en este estudio solo serán considerados los riesgos más comunes e importantes bajo las consideraciones de expertos.
- Como el paste y el filtrado son dos métodos de eliminación de residuos novedosos y en desarrollo, aún no se utilizan ampliamente en todo el mundo, por lo que hay fallos, accidentes y datos limitados utilizables en el estudio, debido a esto podrían no estar considerándose todos los riesgos existentes en esta evaluación.
- Dado que el AMFE depende efectivamente de los miembros del comité que examina los fallos del producto, está limitado por su experiencia de fallos anteriores o por el conocimiento general de los mecanismos y modos de fallo.
- La evaluación del riesgo de los relaves es muy específica del lugar, los riesgos son altamente dependientes de la ubicación del sitio, la geografía, el clima, la regulación, la categoría de relaves y otros parámetros. El estudio sólo podrá centrarse en los riesgos y consideraciones más comunes, por lo que, para cada caso específico, se necesita un estudio de campo detallado para evaluar los riesgos de manera más completa.



7.4. Resultados

Los resultados obtenidos en el AMFE se muestran a continuación, proporcionando una evaluación completa para cada modo de fallo. Se resume la lista de modos de fallo y se evalúan las probabilidades y la gravedad de las consecuencias para cada uno de ellos, entre dos categorías: Impacto ambiental y seguridad pública. El código de color en estas tablas indica los diversos riesgos que plantean una combinación de la probabilidad y las consecuencias del modo de fallo si se produce. Los colores naranjas a rojo indican modos de fallo de alto riesgo, mientras que los colores azules indican modos de fallo de bajo a muy bajo riesgo; el verde indica que el modo de fallo tiene un riesgo moderado.

7.4.1. Matriz de riesgos

A continuación se muestra la Matriz de Riesgos para Impactos Ambientales y de Seguridad Pública. Cada modo de fallo se expresa con ID. La descripción simple de cada modo de fallo es:

Tabla 8: Descripción de los modos de fallo

ID	Descripción de los modos de fallo
1.1	Taponamiento de la tubería
2.1	Rotura de la tubería
3.1	Rotura de la bomba con derrame de relaves
3.2	Rotura de la bomba con explosión
4.1	Liquefacción o hundimiento de la presa
4.2	Liquefacción de la presa — Licuefacción y flujo de la presa en corta distancia
4.3	Liquefacción de la presa — Liquefacción y flujo de la presa en larga distancia



5.1	Hundimiento del pie de presa- Hundimiento de la presa
5.2	Hundimiento del pie de presa — Licuefacción y flujo de la presa en corta distancia
5.3	Hundimiento del pie de presa — Liquefacción y flujo de la presa en larga distancia
6.1	Fallos en la cara expuesta de los relaves
7.1	Desbordamiento — Hundimiento de la presa
7.2	Desbordamiento — Licuefacción y flujo de la presa en corta distancia
7.3	Desbordamiento — Liquefacción y flujo de la presa en larga distancia
8	Filtración
9	Generación de polvo
10	Fallo de operación del espesador
11	Taponado a la salida por bajo flujo
12	Propiedades reológicas inadecuadas
13	Desbordamiento
14	Rotura o atascamiento de los rastrillos
15	Fallo de operación del filtro
16	Taponamiento en la salida por bajo flujo
17	Membranas del filtro



18	Generación de polvo
19	Accidentes de tráfico



7.4.2. Matriz de riesgos para impactos ambientales

		PROBABILIDAD				
		IMPROBABLE	BAJA	MODERADA	ALTA	ESPERADA
SEVERIDAD DE LOS EFECTOS	EXTREMA	E4.3, E5.3, E7.3, F4.3, F5.3, F7.3,	C7.3	B4.3, B5.3, B7.3, C4.3, C5.3,		
	ALTA			B4.2, B5.2, C4.2, C5.2,		
	MODERADA	C6.1, E7.1, E7.2, F6.1,	E6.1, E8.1, F8.1,	B4.1, B5.1, B6.1, B7.1, B7.2, B8.1, C4.1, C8.1	I9.1	
	BAJA	A3.2, E4.1, E4.2, E5.2, F4.1, F4.2, F5.1, F7.1, F7.2, I4.1, I4.2, I4.3, I5.1, I5.2, I5.3, I6.1, I7.1, I7.2, I7.3, I8.1, J6.1,	A1.1, A2.1, A3.1, C7.1, C7.2, D3.2, E5.1, F5.2, G10.1, G12.1, G13.1, H3.2, K10, K12, K13, K14, L15, L17,	C5.1, D1.1, D2.1, D3.1, G11.1, H1.1, H2.1, H3.1, K11,	B9.1, C9.1, E9.1, F9.1, J9.1,	
	INSIGNIFICANTE	J4.1, J4.2, J4.3, J5.1, J5.2, J5.3, J7.1, J7.2, J7.3, J8.1,	L16, M19,		M18,	



7.4.3. Matriz de riesgos para la salud pública

		PROBABILIDAD				
		IMPROBLABLE	BAJA	MODERADA	ALTA	ESPERADA
SEVERIDAD DE LOS EFECTOS	EXTREMA	E4.3, E5.3, E7.3, F4.3, F5.3, F7.3,	C7.3,	B4.3, B5.3, B7.3, C4.3, C5.3		
	ALTA	E5.2,		B5.2, B4.2,		
	BAJA	E7.1,	C5.1, C7.1, E8.1, M19,	B4.1, B5.1, B8.1, C4.2,	I9.1, M18,	
	MODERADA	A3.2, E4.1, E4.2, E7.1, E7.2, F4.1, F4.2, F5.1, F5.2, I4.1, I4.2, I4.3, I5.1, I5.2, I5.3, I6.1, I7.1, I7.2, I7.3, I8.1, J6.1,	A3.2, D3.2, E5.1, E6.1, F8.1, H3.2,	B6.1, B7.1, B7.2, C4.1, C8.1, F8.1,		
	INSIGNIFICANTE	C6.1, F6.1, F7.1, F7.1, F7.2, J4.1, J4.2, J4.3, J5.1, J5.2, J5.3, J7.1, J7.2, J7.3, J8.1	A1.1, A2.1, A3.1, C7.1, C7.2, G10, K10, K12, K13, K14, L15, L16, L17,	C5.2, D1.1, D2.1, D3.1, G11, G12, G13, G14, K11, H1.1, H2.1, H3.1,	B9.1, C9.1, E9.1, F9.1, J9.1,	



7.4.4. Comparación de escenarios

Para la comparación de escenarios, a cada riesgo obtenido en la evaluación se le otorga una ponderación, partiendo del valor 1 para el azul más oscuro (riesgo más insignificante) hasta el valor 9 para el rojo (riesgo más severo), quedando la matriz de riesgos del siguiente modo:

5	6	7	8	9
4	5	6	7	8
3	4	5	6	7
2	3	4	5	6
1	2	3	4	5

Todos los modos de fallo se expresan con un indicador (numérico) especificado en la Tabla 8. El Gráfico 1 muestra la comparación entre los riesgos de impactos ambientales producidos por fallos en el transporte y bombeo por tuberías, durante la fase de operación en los tres escenarios de relaves. Como puede verse en el gráfico, el paste y el filtrado tienen un mayor riesgo de efectos ambientales que los relaves húmedos convencionales para todos los fallos aquí considerados. Para estos tres escenarios, los riesgos de efectos ambientales debidos a la rotura de la bomba son menores que para el resto de fallos.

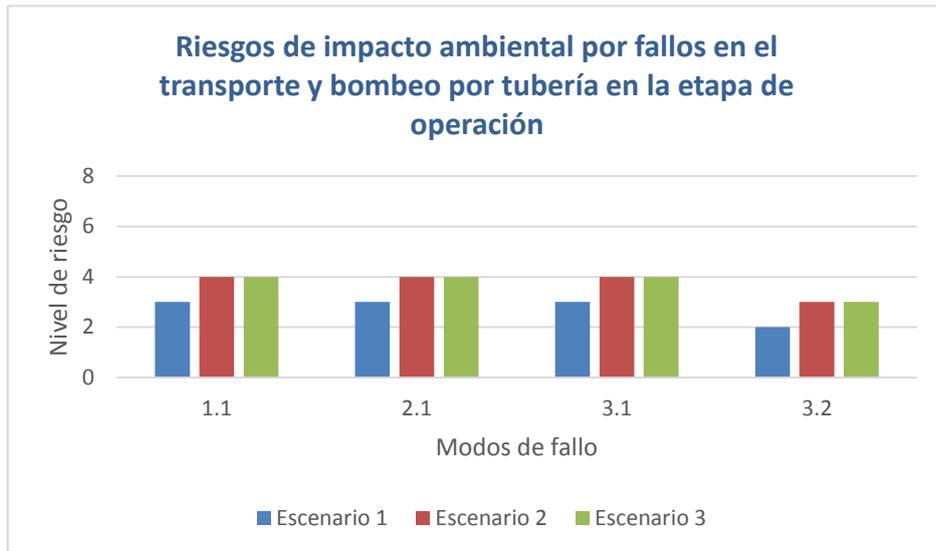


Gráfico 1: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación

Gráfico 2 muestra el riesgo de los posibles efectos en la seguridad pública debidos a los fallos en el transporte y el bombeo por tubería, de los escenarios 1, 2 y 3, en la etapa de operación. Como se observa, los relaves convencionales tienen menor riesgo de efectos de seguridad pública que los otros dos escenarios en todos los modos de fallo estudiados.

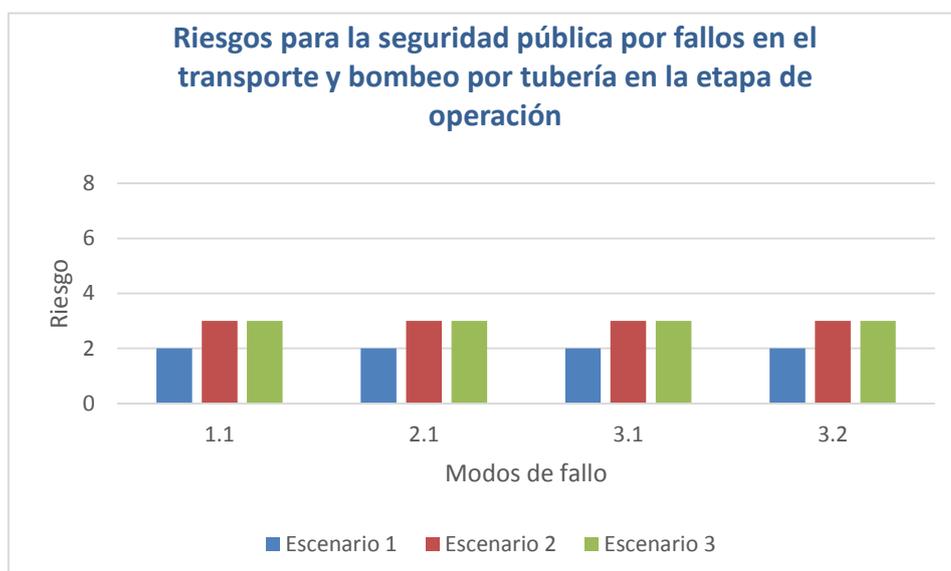


Gráfico 2: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación



El Gráfico 3 muestra los riesgos de impacto ambiental que pueden darse debido a los posibles fallos en las presas de los tres escenarios durante la etapa de operación. Como se muestra a continuación, los relaves convencionales tienen un mayor riesgo de efectos ambientales para todos los modos de fallo, que los relaves espesados o filtrados, excepto para la generación de polvo, en el que ambos tienen un riesgo similar.

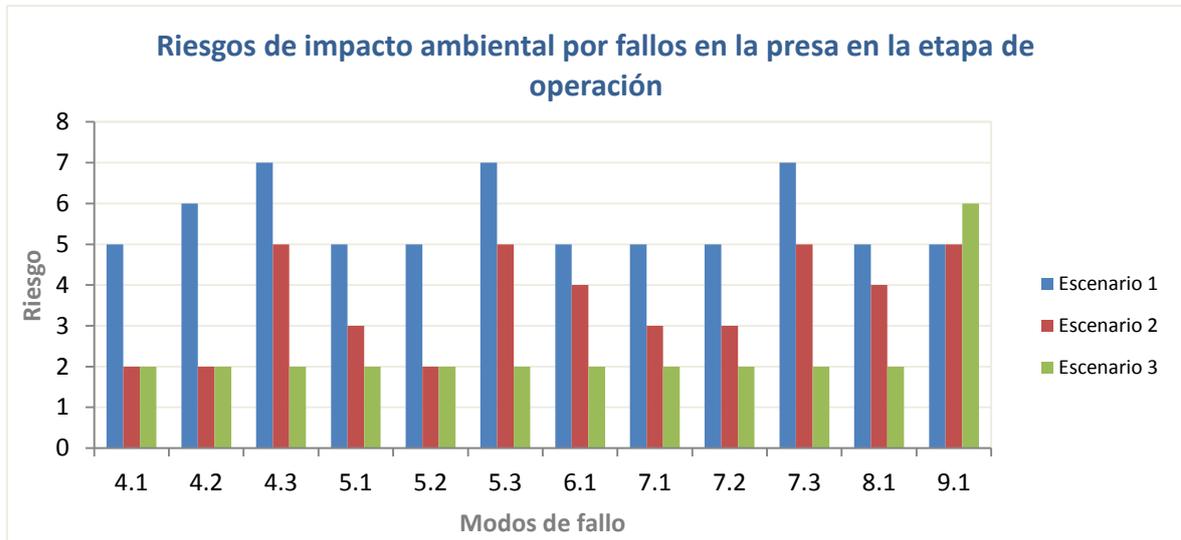


Gráfico 3: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en la presa en la etapa de operación

El Gráfico 4 muestra el riesgo de los efectos, producidos por los fallos en la presa, para la seguridad pública durante la etapa de operación en los tres casos de estudio. Los relaves convencionales tienen un riesgo mayor de efectos en la seguridad pública por fallos de la presa que los otros dos escenarios para todos los fallos excepto la generación de polvo, en los cuales los escenarios 1 y 2 tienen un riesgo similar de los efectos de seguridad pública.

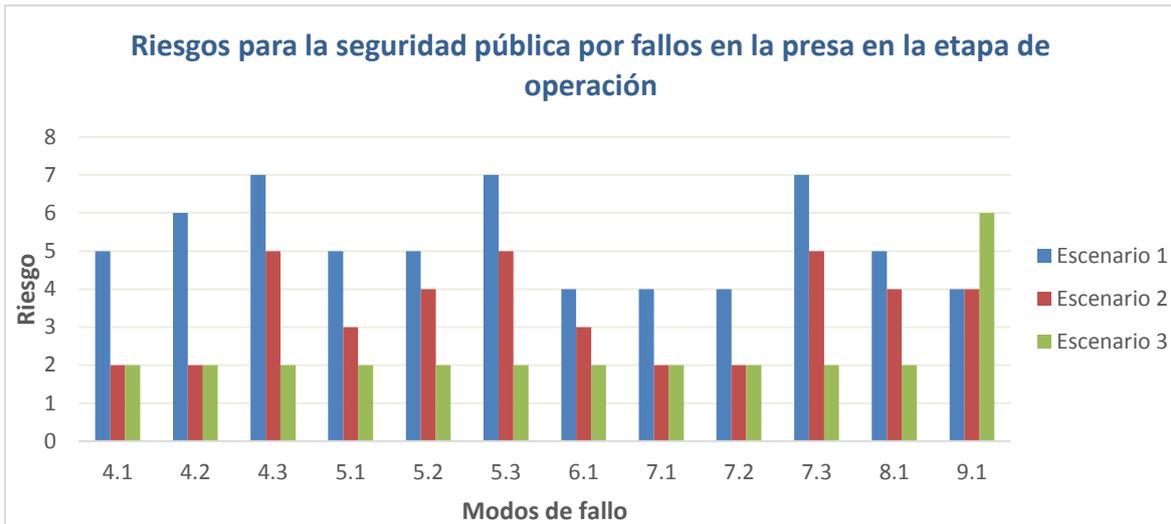


Gráfico 4: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en la presa en la etapa de operación

El Gráfico 5 muestra los riesgos de impacto ambiental, que pueden darse debido a los posibles fallos en las presas de los tres escenarios, durante la etapa de post-cierre. Como puede observarse, los relaves convencionales tienen un mayor riesgo de efectos ambientales para todos los modos de fallo que los relaves espesados o filtrados, excepto para la generación de polvo, en el que ambos tienen un riesgo similar.

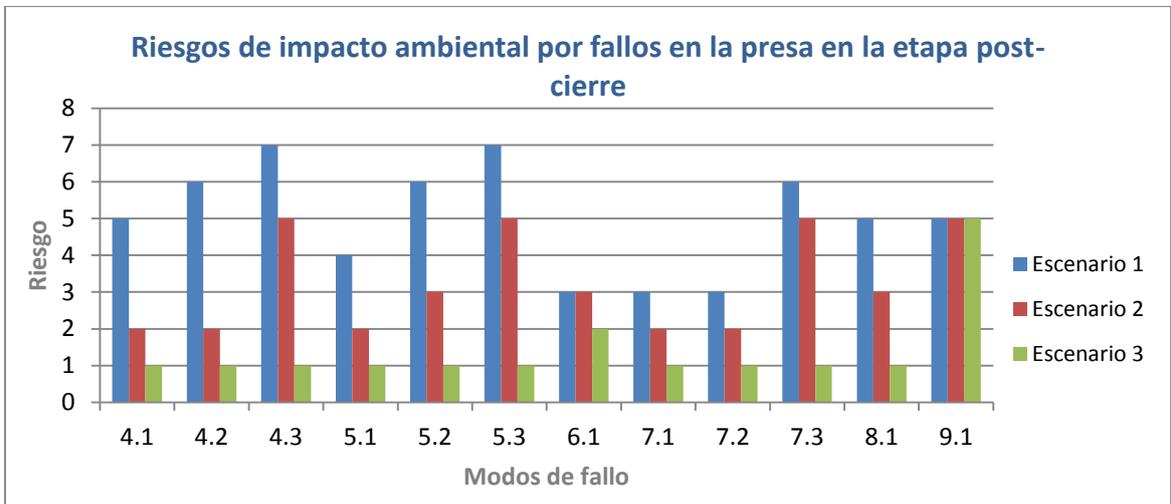


Gráfico 5: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos a fallos en la presa en la etapa de operación

El Gráfico 6 muestra los riesgos para la seguridad pública, que pueden darse debido a los posibles fallos en las presas de los tres escenarios, durante la etapa de post-cierre. Como puede observarse, los relaves convencionales tienen un mayor riesgo de efectos ambientales para todos los modos de fallo que los relaves espesados o filtrados, excepto para la generación de polvo, en el que ambos tienen un riesgo similar.

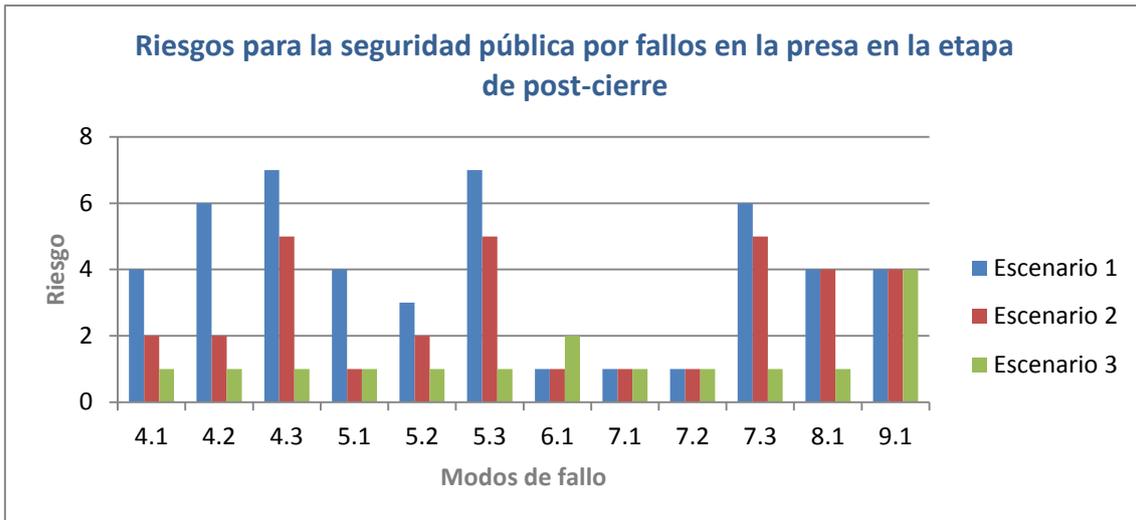


Gráfico 6: Severidad de los riesgos para la seguridad pública debidos a fallos en la presa en la etapa de post-cierre

El Gráfico 7 muestra los riesgos de impacto ambiental para el espesador en los escenarios 2 y 3, durante la etapa de operación. Debido a que el proceso es el mismo en ambos escenarios, los riesgos y sus severidades son iguales. Para el caso de los relaves convencionales (escenario 1) no existe este proceso, por lo que no es posible realizar una comparación (Xenidis et al., 2003b).

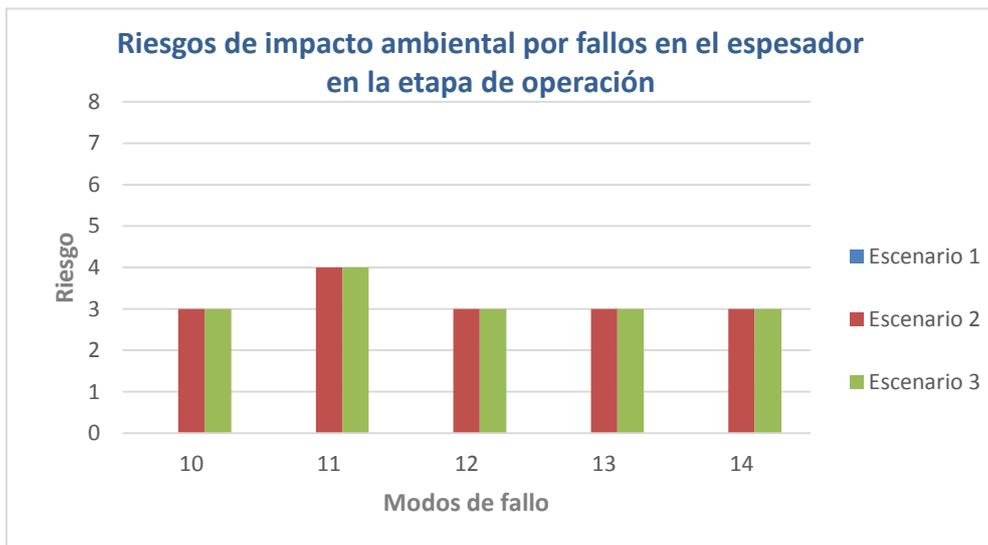


Gráfico 7: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos al espesador en la etapa de operación



El Gráfico 8 muestra los riesgos para la seguridad pública en el espesador, en los escenarios 2 y 3, durante la etapa de operación. Debido a que el proceso es el mismo en ambos escenarios, los riesgos y sus severidades son iguales. Para el caso de los relaves convencionales (escenario 1) no existe este proceso, por lo que no es posible realizar una comparación (Xenidis et al., 2003b).

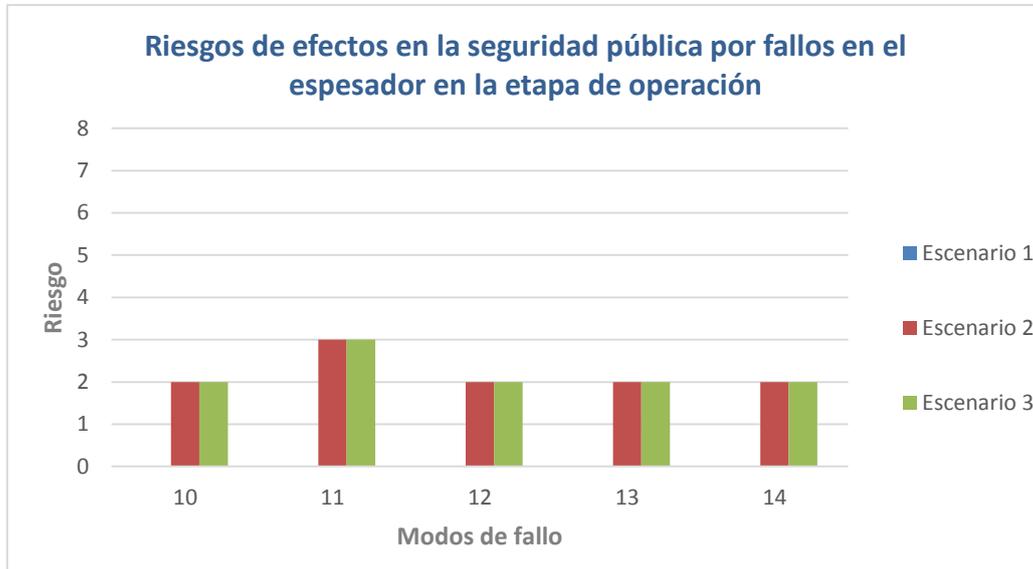


Gráfico 8: Severidad de los riesgos para la seguridad pública por fallos en el espesador durante la etapa de operación

El gráfico 9 muestra el riesgo de efectos ambientales y efectos en la seguridad pública en el filtro durante la etapa de operación. El filtrado tiene un riesgo relativamente bajo para los efectos tanto ambientales como de seguridad pública. En los relaves convencionales y en los espesados no hay proceso de filtración, por lo que no es posible hacer la comparación.

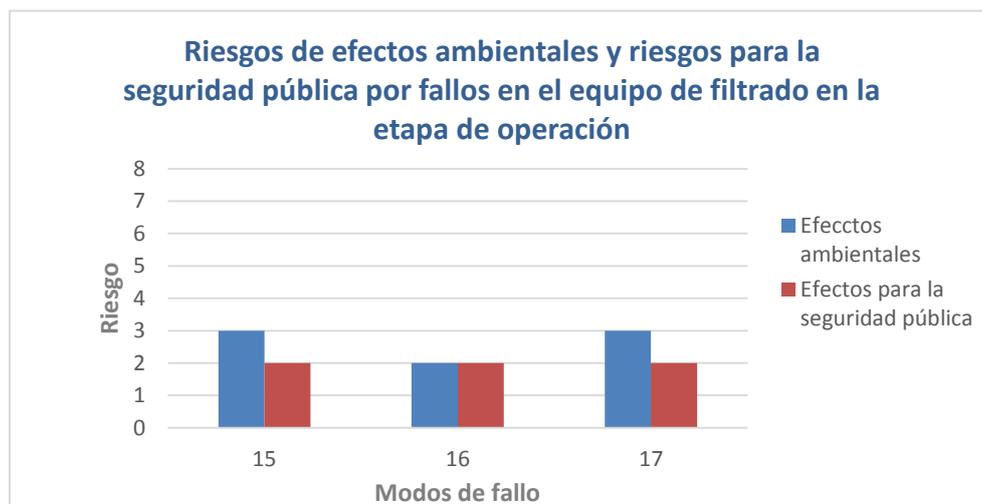


Gráfico 9: Severidad de los riesgos de efectos ambientales y para la seguridad pública por fallos en el equipo de filtrado en la etapa de operación.



El Gráfico 10 muestra el riesgo de efectos ambientales y efectos de seguridad pública para el transporte durante la etapa de operación. El transporte tiene un riesgo relativamente bajo de efectos ambientales y alto y medio riesgo para efectos de seguridad pública. En los sistemas de relaves convencionales y en sistemas de relaves espesados no hay transporte por camión, por lo que no es posible hacer una comparación

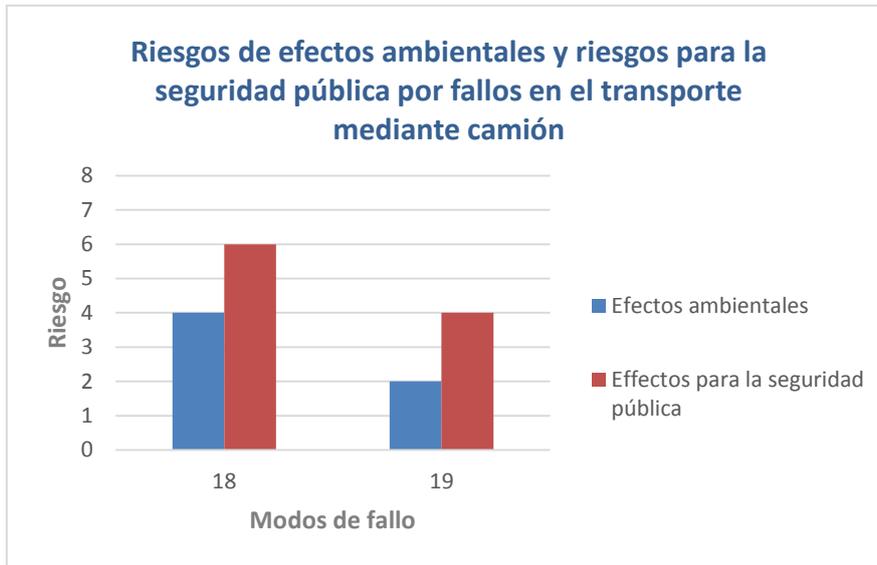


Gráfico 10: Severidad de los riesgos ambientales y para la seguridad pública debidos a fallos en el transporte por camión

El Gráfico 11 y el Gráfico 12 muestran la distribución del riesgo de los efectos ambientales y de la seguridad pública para todos los escenarios. Se muestra el número de fallos en cada categoría de riesgo utilizada en la matriz. El riesgo está etiquetado de 1 a 9, comienza bajo riesgo de 1 a 4, riesgo medio para 5, alto riesgo de 6 a 9. Se observa con claridad que la mayoría de los fracasos de los sistemas de colas de relaves tienen niveles de riesgo bajos a medios. Los relaves húmedos convencionales tienen niveles de riesgo medio superior. Por otro lado, los sistemas de colas filtradas tienen niveles de riesgo bajos a medios.

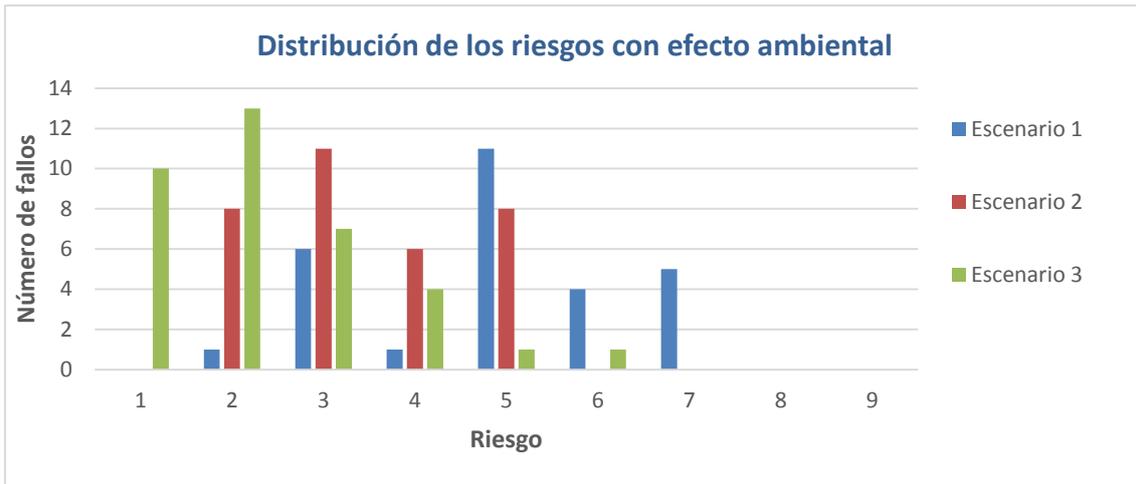


Gráfico 11: Distribución del número de riesgos con efectos ambientales para las diferentes severidades

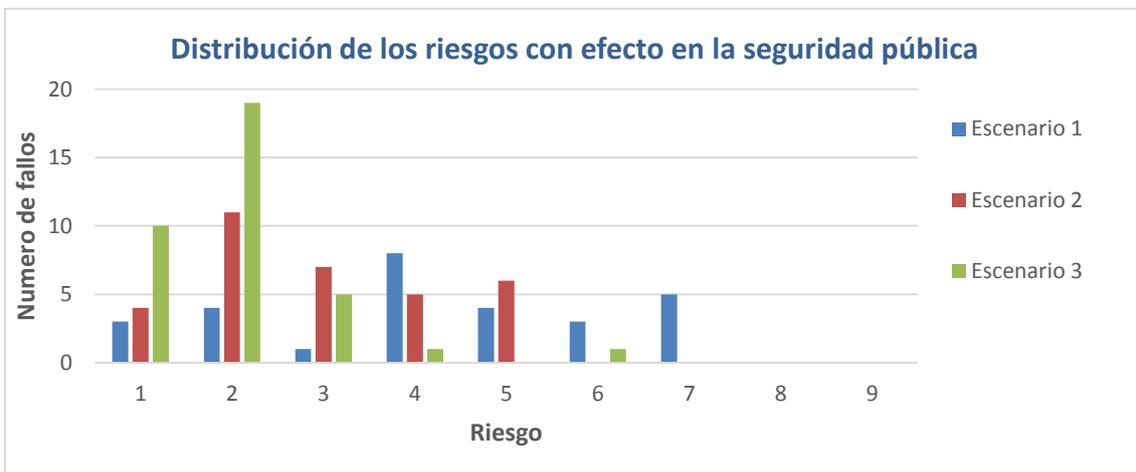


Gráfico 12: Distribución del número de riesgos con efecto en la seguridad pública para las diferentes severidades

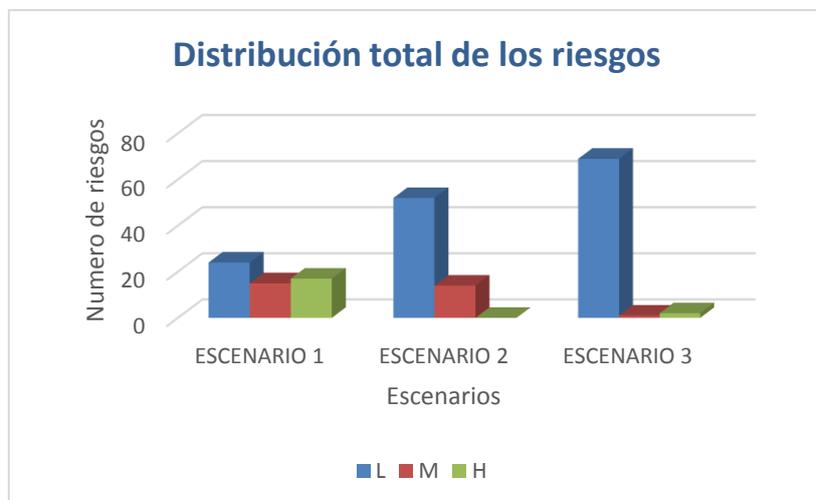


Gráfico 13: Distribución total de los riesgos por escenario

8. Conclusiones

El principal problema de las operaciones mineras, en relación a los relaves, proviene de los fallos que se dan en las instalaciones de tratamiento, transporte y almacenamiento de los mismos. Las principales diferencias entre los riesgos de los relaves convencionales, los relaves espesados y los relaves filtrados obtenidas en esta evaluación de riesgos son:

- Los relaves filtrados tienen bajo riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por fallos del espesador en la etapa de operación.
- Los relaves filtrados tienen bajo riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por fallos del equipo de filtrado en la etapa de operación.
- Los relaves filtrados tienen un mayor riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por fallos de transporte en la etapa de operación.
- Los relaves filtrados tienen un mayor riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por fallos de transporte mediante camión en la etapa final.
- Los relaves de paste tienen bajo riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por fallos del espesador en la etapa de operación.
- Los relaves de paste tienen un mayor riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por los fallos de transporte en la etapa de operación.
- Los relaves húmedos convencionales tienen un mayor riesgo de producir efectos ambientales y de seguridad pública por fallos de la presa, excepto la generación de polvo en las etapas de operación y cierre.
- Los tres escenarios tienen un riesgo similar de efectos ambientales y de seguridad pública por la generación de polvo en las fases de operación y cierre.

Como se aprecia en los resultados, el número de fallos en los tres escenarios es elevado, sin embargo, debe destacarse que en los relaves convencionales aparecen claramente un porcentaje de fallos graves más elevado que en los relaves espesados y filtrados, en los que la mayoría de los fallos son leves, con lo que parecen la opción menos sostenible de tratamiento y almacenamiento de relaves en cuanto al riesgo.

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

Se puede concluir que pese a que los relaves filtrados parecen una opción más sostenible que los convencionales y el paste, aunque presentan mayores riesgos de fallos en el transporte y el espesamiento en la etapa de operación, tienen un riesgo mucho menor de daños ambientales y de seguridad pública, también en el post-cierre. La presa es la única instalación que permanece después del cierre de la mina, por lo que es la principal fuente de impactos para el medio ambiente y la seguridad pública durante un largo período de tiempo. Este estudio, que considera los impactos de los relaves 100 años después del cierre, demostró cualitativamente que los relaves filtrados son más sostenibles.

9. Anexos

9.1. Tablas de resultados

9.1.1. Escenario 1 Fallos de transporte en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos en el transporte y bombeo por tubería					
A1	Taponamiento de la tubería					
A1.1	Tubo taponado por una o más razones siguientes: (i) objeto desconocido; (ii) baja potencia de bombeo; (iii) sobrepresión; (iv) degradación de los relaves debido a la meteorización física y química; (v) formación de precipitados (vi) migración de	Interrupción del sistema con alto riesgo de daño a la bomba con derrame de relaves, por lo tanto, afecta al sistema de drenaje y	L	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos en el transporte y bombeo por tubería					
	relaves al drenaje debido a una filtración inadecuada	contamina el agua y el suelo, no hay fatalidades				
A2	Rotura de la tubería					
A2.1	Ruptura de la tubería debido a una o más de las razones siguientes: (i) corrosión; (ii) fatiga; (iii) erosión interna del tubo; (iv) alta presión; (v) comienzo del bombeo con la válvula cerrada; (vi) taponamiento de tuberías; (vii) cambio en las propiedades reológicas	Derrames de relaves, que afectan el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes, sin fatalidades.	L	L	L	N
A3	Rotura de la bomba					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos en el transporte y bombeo por tubería					
A3.1	Ruptura de la bomba debido a una o más de las siguientes razones: (i) baja potencia en el arranque; (ii) insuficiencia de potencia en funcionamiento; (iii) comienzo del bombeo con la tubería taponada; (iv) comienzo del bombeo con una válvula cerrada; (v) mala selección de la bomba o mala caracterización de los relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba	Derrames de relaves, que afectan el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes, sin fatalidades.	L	L	L	N
A3.2	Ruptura de la bomba debido a una o más de las siguientes razones: (i) baja potencia al arrancar; (ii) insuficiencia de potencia en funcionamiento; (iii) comienzo de bombeo con la tubería taponada; (iv) comienzo del bombeo con una	Explosión de la bomba, que conduce a derrames de relaves con impacto en el sistema de drenaje y contaminan el agua y el	NL	L	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos en el transporte y bombeo por tubería					
	válvula cerrada; (v) mala selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba	suelo adyacentes. Posibles muertes.				

9.1.2. Escenario 1 Fallos de la presa en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
B4	Licuefacción de la presa					
B4.1	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) diseño contra terremotos superado por terremoto; (iv) análisis de estabilidad realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	M	L	M	M

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

	capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa / relaves					
B4.2	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del terremoto de diseño; (iii) terremoto excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de las capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa / relaves	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a una corta distancia. Contaminación de suelos cercanos y cursos de agua por los materiales de la presa, debido a la caída de relaves. Posible daño humano a las personas cercanas o dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.	M	L	H	H
B4.3	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i)	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen	M	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

	niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (lii) Diseño contra terremotos superado por terremoto; (iv) análisis de estabilidad realizados con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de las capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa o los relaves	sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles fatalidades				
B5	Hundimiento o rotura del pie de presa					
B5.1	Hundimientos o fallos en el pie de la presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) pérdida de fuerza provocada	Desplome de la presa sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	M	M	M	M

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

	sísmicamente dentro de los relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o una corriente formada en el dique de la presa					
B5.2	Hundimientos o fallos en el pie de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de los relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o una corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción sobre la presa, que fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y de los cursos de agua por los materiales de la presa, y del agua adyacente y del suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano a las personas cercanas o dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.	M	M	H	H

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

B5.3	Hundimientos o fallos en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de los relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o una corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la presa, lo que conduce a un fallo catastrófico. La presa y los relaves fluyen sobre un área, contaminando suelos, cursos de agua y aguas subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.	M	L	E	E
B6	Fallo de la cara expuesta de los relaves					
B6.1	El fracaso de los relaves expuestos se debe a una o más de las siguientes razones: (i) caída durante terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (iii) erosión debida a la tubería en la cara externa de relaves	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos, que causan la contaminación del agua y el levantamiento de polvo, sin muertes.	M	L	M	L

B7	Desbordamiento					
B7.1	<p>Desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca del terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) causan erosión debido a una espiga de cresta de terraplén monitoreada incorrectamente; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje;</p>	<p>Pared de contención que falla debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.</p>	M	L	M	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

	(viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
B7.2	El desbordamiento es causado por una o más de las siguientes razones: (i) un error de cálculo del agua libre que se puede almacenar en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca del terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) causan erosión debido a una espiga de cresta de terraplén monitoreada incorrectamente; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje;	Formación del barranco, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía y a la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	M	L	M	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

	(viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
B7.3	El desbordamiento es causado por una o más de las siguientes razones: (i) un error de cálculo del agua libre que se puede almacenar en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca del terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) causan erosión debido a una espiga de cresta de terraplén monitoreada incorrectamente; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje;	El desbordamiento por erosión provoca una pendiente o fallo en el dedo del pie que deriva en un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la presa. Insuficiencia catastrófica: La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua y agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.	M	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

	(viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
B8	Filtración y lixiviación					
B8.1	Derrame de lixiviado causado por una o más de las siguientes razones: (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves; (ii) fallo de la tubería de drenaje (no taponado por hormigón); (iii) degradación del revestimiento y eventual falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes	M	M	M	M
B9	Generación de polvo					
B9.1	Polvo contaminado generado por una o más de las siguientes razones: (i) erosión del terraplén; (ii) erosión de los estanques de disposición final; (iii)	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin fatalidades.	H	H	L	N

9.1.3. Escenario 1: Fallos de la presa en la etapa de clausura

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
C4	Liquiefacción de la balsa					
C4.1	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura	Presa que se desploma sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	M	L	M	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
C4.2	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabiliza realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a una corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y del agua adyacente y del suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o	M	L	H	H

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	crecimiento; (vi) presión excesiva en las capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
C4.3	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizados con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos (ambos fluyen sobre una amplia área), produce la contaminación de suelos, cursos de agua y de agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes	M	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
C5	Hundimiento o fallo del pie de presa					
C5.1	Hundimientos o fallas en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de	Presa que se desploma sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	L	M	M	M

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	agua y/o una corriente formada en el dique de la presa					
C5.2	Hundimientos o fallos en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (ii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iii) la erosión inducida por un estanque de agua y/o una corriente formada en el dique de la presa	<p>El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción sobre la presa, que fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a corta distancia.</p> <p>Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y del agua adyacente y del suelo debido a la caída de relaves.</p> <p>Posible daño humano de las personas cercanas o dentro de la presa,</p>	M	M	H	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
		dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
C5.3	Fallas o fallas en los dedos de los pies causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (lii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la represa, lo que conduce a un fallo catastrófico. La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes	M	L	E	E
C6	Fallo por exposición de la cara libre					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
C6.1	El fracaso de los relaves expuestos se debe a una o más de las siguientes razones: (i) caída durante el terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (lii) erosión o tubería de la cara externa de relaves	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos, que causan la contaminación del agua y el soplado de polvo, sin muertes.	NL	L	M	N
C7	Deasbordamiento					
C7.1	Superposición causada por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (li) fallo de decantación o flujo de salida de	Pared de contención que cae debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	L	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	<p>decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (lii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (Iv) una espiga de cresta de terraplén no es monitoreada correctamente y los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan causando erosión; V) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (Vi) escurrimiento de lluvia; (Vii) fallo del sistema de drenaje; (Viii) fallo del vertedero; (Ix) evitar el fallo del sistema.</p>					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
C7.2	Superposición causada por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) una espiga de cresta de terraplén no es monitoreada correctamente y los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan causando erosión; V) una reducción del	Gully, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía ya la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	L	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (Vi) escurrimiento de lluvia; (Vii) fallo del sistema de drenaje; (Viii) fallo del vertedero; (Ix) fallo del sistema de derivación					
C7.3	Superposición causada por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (Ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (Iii) un espigado inadecuado que mueve el agua	La erosión de desbordamiento provoca una pendiente o falla en el dedo del pie que deriva en un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la presa. Insuficiencia catastrófica: La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en	L	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (Iv) una espiga de cresta de terraplén no es monitoreada correctamente y los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan causando erosión; V) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (Vi) escurrimiento de lluvia; (Vii) fallo del sistema de drenaje; (Viii) fallo del vertedero; (Ix) fallo del sistema de derivación	caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes				

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
C8	Infiltración y lixiviación					
C8.1	Derrame de lixiviado causado por una o más de las siguientes razones: (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves; (ii) fallo de la tubería de drenaje (no taponado por hormigón); (iii) degradación del revestimiento y eventual falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes	M	M	M	L
C9	Generación de polvo					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
C9.1	Polvo contaminado generado por una o más de las siguientes razones: (i) erosión del terraplén; (ii) transporte por camión; (iii) erosión de los estanques de disposición final; (iv) viento fuerte; (v) erosión de la cara expuesta de los relaves	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin fatalidades.	H	H	L	N

9.1.4. Escenario 2 Fallos de transporte en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte y bombeo en la tubería					
D1	Taponamiento de la tubería					
D1.1	Tubo taponado por una o más razones siguientes: (i) objeto desconocido; (ii) baja potencia de bombeo; (iii) sobrepresión; (iv) degradación de los relaves debido a la meteorización física y química; (v) formación de precipitados (vi) migración de relaves al drenaje debido a una filtración inadecuada	Interrupción del sistema con alto riesgo de daño a la bomba, con derrame de relaves, por lo tanto, causan problemas en el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo, sin fatalidades	M	L	L	N
D2	Rotura de la tubería					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte y bombeo en la tubería					
D2.1	Ruptura de la pila debido a una o más de las razones siguientes: (i) corrosión; (ii) fatiga; (iii) erosión interna del tubo; (iv) alta presión; (v) comienzo del bombeo con la válvula cerrada; (vi) taponamiento de tuberías; (vii) cambio en las propiedades reológicas	Derrames de relaves, que afectan el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes, sin fatalidades.	M	L	L	N
D3	Rotura de la bomba					
D3.1	Ruptura de la bomba debido a una o más de las siguientes razones: (i) baja potencia al arrancar; (ii) insuficiencia de potencia en funcionamiento; (iii) comienzo del bombeo con una tubería taponada; (iv) comienzo del bombeo con una válvula cerrada; (v) mala	Derrames de relaves, que afectan el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes, sin fatalidades.	M	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte y bombeo en la tubería					
	selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba					
D3.2	Ruptura de la bomba debido a una o más de las siguientes razones: (i) baja potencia al arrancar; (ii) insuficiencia de potencia en funcionamiento; (iii) el bombeo comienza con tubería taponada; (iv) el bombeo comienza con una válvula cerrada; (v) mala selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba	Explosión de la bomba, que conduce a derrames de relaves con impacto en el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes. Posibles muertes.	L	L	L	L

9.1.5. Escenario 2: Fallos de la presa en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
E4	Licuefacción de la presa					
E4.1	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) utilización en los análisis de estabilidad propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
E4.2	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) propiedades de resistencia al corte inexactas utilizadas en el análisis de estabilidad; (v) velocidad excesiva en las operaciones de	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren derrames a una corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y del agua adyacente y del suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o	NL	L	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
E4.3	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) utilización en los análisis de estabilidad propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles fatalidades	NL	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
E5	Hundimiento o rotura del pie de presa					
E5.1	Hundimientos o fallos en el pie de presa causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	L	M	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
E5.2	Hundimiento o fallos en los dedos de los pies causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción sobre la presa, que fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y de agua adyacente y el suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.	NL	M	L	H

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
E5.3	Hundimientos o fallos en los dedos de los pies causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la represa, lo que conduce a un fallo catastrófico. La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.	NL	L	E	E
E6	Fallo de la cara expuesta de los relaves					
E6.1	El fracaso de los relaves expuestos se debe a una o más de las siguientes	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos, que causan la	L	L	M	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	razones: (i) caída durante el terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (lii) erosión o tubería de la cara externa de relaves	contaminación del agua y el soplado de polvo, sin muertes.				
E7	Desbordamiento					
E7.1	Desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua	Pared de contención que cae debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	M	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplen causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
E7.2	El desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) un error de cálculo del agua libre que se puede almacenar en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplén causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente; (v) una reducción del francobordo como	Formación del barranco, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía ya la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	NL	L	M	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
E7.3	El desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) un error de cálculo del agua libre que se puede almacenar en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua	La erosión de desbordamiento provoca una pendiente o fallo en el pie de presa que deriva en un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la presa. Insuficiencia catastrófica: La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos	NL	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplen causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación	de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.				
E8	Filtración y lixiviación					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
E8.1	Derrame de lixiviado causado por una o más de las siguientes razones: (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves; (ii) fallo de la tubería de drenaje (no taponado por hormigón); (iii) degradación del revestimiento y eventual falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes	L	M	M	M
E9	Generación de polvo					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
E9.1	Polvo contaminado generado por una o más de las siguientes razones: (i) erosión del terraplén; (iii) erosión de los estanques de disposición final; (iv) viento fuerte; (v) erosión de la cara expuesta de los relaves	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin fatalidades.	H	H	L	N

9.1.6. Escenario 2: Fallos de la presa en la etapa de clausura

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
F4	Liquefacción de la balsa					
F4.1	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizados con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
F4.2	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a una corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y de agua adyacente y el suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o	NL	L	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
F4.3	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizados utilizando propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes	NL	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
F5	Hundimiento o fallo del pie de presa					
F5.1	Hundimientos o fallos en los dedos de los pies causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	M	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa					
F5.2	Hundimientos o fallos en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción sobre la presa, que fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y de agua adyacente y el suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o dentro de la	NL	M	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
		presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
F5.3	Hundimientos o fallos en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la represa, lo que conduce a un fallo catastrófico. La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes	NL	L	E	E

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
F6	Fallo por exposición de la cara libre					
F6.1	El fracaso de los relaves expuestos se debe a una o más de las siguientes razones: (i) caída durante el terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (iii) erosión o tubería de la cara externa de relaves	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos causan la contaminación del agua y el levantamiento de polvo, sin muertes.	NL	L	M	N
F7	Deasbordamiento					
F7.1	Superposición causada por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede	Pared de contención que cae debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible	NL	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplén causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje;	daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.				

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	(viii) fallo del vertedero; (ix) evitar el fallo del sistema.					
F7.2	Desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre)	Gully, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía ya la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	NL	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	sobrepasan el terraplen causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					

F7.3	<p>Desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplén causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del</p>	<p>La erosión de desbordamiento provoca una pendiente o fallo en el pie de presa que deriva en un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la presa. Insuficiencia catastrófica: La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes</p>	NL	L	E	E
------	--	---	----	---	---	---

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
F8	Infiltración y lixiviación					
F8.1	Derrame de lixiviado causado por una o más de las siguientes razones: (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves; (ii) fallo de la tubería de drenaje (no taponado por hormigón); (iii) degradación del revestimiento y	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes	L	M	L	M

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	eventual falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético					
F9	Generación de polvo					
F9.1	Polvo contaminado generado por una o más de las siguientes razones: (i) erosión del terraplén; (ii) erosión de los estanques de disposición final; (iii) viento fuerte; (v) erosión de la cara expuesta de los relaves	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin fatalidades.	H	H	L	N

9.1.7. Escenario 2: Fallos del espesador en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
G10	Fallo de operación					
G10.1	Falla en la operación causada por una o más de las siguientes razones: (i) parada de la electricidad; (ii) error del brazo del rastrillo	Este fallo se debe a que la pendiente diseñada de playa no se pudo llevar a cabo, por lo tanto, causa erosión y polvo, no hay fatalidades.	L	L	L	N
G11	Taponamiento de la salida del flujo interior					
G11.1	El taponamiento de la salida de flujo inferior causado por una o más razones siguientes: (i) taponamiento de las últimas etapas de	Este fallo conduce a la rotura del espesador, y también al desbordamiento,	M	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
	bombeo; (ii) cuerpo desconocido en el espesante; (iii) caracterización de malos residuos (propiedades reológicas); (iv) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación	por lo tanto, causa la contaminación del agua y el suelo de la zona cercana, sin muertes.				
G12	Propiedades reológicas inadecuadas					
G12.1	Propiedades reológicas inadecuadas de los relaves causadas por una o más de las siguientes razones: (i) mal diseño del espesador (dimensiones) o mala caracterización de los relaves (propiedades reológicas) (ii) cambios en las propiedades reológicas de la alimentación de los relaves; (iii) fallos en el sistema de	Esta fallo conduce a la rotura de la bomba, al derrame de relaves que contaminan el agua y el suelo del aera cercana, sin fatalidades.	L	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
	dilución de la alimentación; (iv) floculante/aglutinante inadecuado					
G13	Desbordamiento					
G13.1	Desbordamiento causado por una o más de las razones siguientes: (i) lluvia (en el espesante abierto); (ii) fallo del sistema de recolección del vertedero; (iii) taponamiento de salida de rebosadero (taponamiento de salida de relaves espeso); (iv) alto flujo de alimentación	Esta fallo conduce a la contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, no hay fatalidades.	L	L	L	N
G14	Rotura o atascamiento de los rastrillos					
G14	Rakes de atascos o rotura causados por una o más de las siguientes razones: (i) mala caracterización de relaves (propiedades	Esta fallo conduce a la interrupción del espesante, es posible causar la	L	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
	reológicas); (ii) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación; (iii) baja potencia debido a un mal diseño del motor	obstrucción del flujo inferior, y contamina así el agua y el suelo cercanos, ninguna fatalidad.				

9.1.8. Escenario 3: Fallos de transporte en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte y bombeo en la tubería					
H1	Taponamiento de la tubería					
H1.1	Tubo taponado por una o más razones siguientes: (i) objeto desconocido; (ii) baja potencia de bombeo; (iii) sobrepresión; (iv) degradación de los relaves debido a la meteorización física y química; (v) formación de precipitados (vi) migración de relaves al drenaje debido a una filtración inadecuada	Interrupción del sistema con alto riesgo de daño a la bomba, con derrame de relaves, por lo tanto, causan problemas en el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo, sin fatalidades	M	L	L	N
H2	Rotura de la tubería					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte y bombeo en la tubería					
H2.1	Ruptura de la pila debido a una o más de las razones siguientes: (i) corrosión; (ii) fatiga; (iii) erosión interna del tubo; (iv) alta presión; (v) comienzo del bombeo con la válvula cerrada; (vi) taponamiento de tuberías; (vii) cambio en las propiedades reológicas	Derrames de relaves, que afectan el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes, sin fatalidades.	M	L	L	N
H3	Rotura de la bomba					
H3.1	Ruptura de la bomba debido a una o más de las siguientes razones: (i) baja potencia al arrancar; (ii) insuficiencia de potencia en funcionamiento; (iii) comienzo del bombeo con una tubería taponada; (iv) comienzo del bombeo con una válvula cerrada; (v) mala	Derrames de relaves, que afectan el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes, sin fatalidades.	M	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte y bombeo en la tubería					
	selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba					
H3.2	Ruptura de la bomba debido a una o más de las siguientes razones: (i) baja potencia al arrancar; (ii) insuficiencia de potencia en funcionamiento; (iii) el bombeo comienza con tubería taponada; (iv) el bombeo comienza con una válvula cerrada; (v) mala selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba	Explosión de la bomba, que conduce a derrames de relaves con impacto en el sistema de drenaje y contaminan el agua y el suelo adyacentes. Posibles muertes.	L	L	L	L

9.1.9. Escenario 3: Fallos de la presa en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
I4	Licuefacción de la presa					
I4.1	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) utilización en los análisis de estabilidad propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves;	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	(vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
14.2	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) propiedades de resistencia al corte inexactas utilizadas en el análisis de estabilidad; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren derrames a una corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y del agua adyacente y del suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	o dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
14.3	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y / o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) utilización en los análisis de estabilidad propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves;	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles fatalidades	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	(vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
15	Hundimiento o rotura del pie de presa					
15.1	Hundimientos o fallos en el pie de presa causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
15.2	Hundimiento o fallos en los dedos de los pies causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o corriente formada en el dique de la presa	<p>El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción sobre la presa, que fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y de agua adyacente y el suelo debido a la caída de relaves.</p> <p>Posible daño humano de las personas cercanas o dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.</p>	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
15.3	Hundimientos o fallos en los dedos de los pies causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua y/o corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la represa, lo que conduce a un fallo catastrófico. La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.	NL	N	L	L
16	Fallo de la cara expuesta de los relaves					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
16.1	El fracaso de los relaves expuestos se debe a una o más de las siguientes razones: (i) caída durante el terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (iii) erosión o tubería de la cara externa de relaves	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos, que causan la contaminación del agua y el soplado de polvo, sin muertes.	NL	N	L	L
17	Desbordamiento					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
17.1	Desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplén causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del	Pared de contención que cae debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
17.2	El desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) un error de cálculo del agua libre que se puede almacenar en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada	Formación del barranco, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía ya la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplén causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
17.3	El desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) un error de cálculo del agua libre que se puede almacenar en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplen causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como	La erosión de desbordamiento provoca una pendiente o fallo en el pie de presa que deriva en un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la presa. Insuficiencia catastrófica: La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					
18	Filtración y lixiviación					
18.1	Derrame de lixiviado causado por una o más de las siguientes razones: (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves; (ii) fallo de la tubería de drenaje (no taponado por hormigón); (iii) degradación del revestimiento y eventual	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes	NL	N	L	L

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallo de la presa o balsa					
	falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético					
19	Generación de polvo					
19.1	Polvo contaminado generado por una o más de las siguientes razones: (i) erosión del terraplén; (iii) erosión de los estanques de disposición final; (iv) viento fuerte; (v) erosión de la cara expuesta de los relaves	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin fatalidades.	H	M	M	M

9.1.10. Escenario 3 Fallos de la presa en la etapa de clausura

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
J4	Dam liquefaction/slope failure					
J4.1	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizados con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
J4.2	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a una corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y de agua adyacente y el suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o dentro de la presa, dependiendo de	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	la altura de la presa, posibles muertes.				
J4.3	Licuefacción de la presa causada por una o más de las siguientes razones: (i) niveles freáticos elevados en los relaves y/o cimientos o niveles freáticos colgantes; (ii) mala estimación del diseño contra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizados utilizando propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento; (vi)	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
J5	Hundimiento o fallo del pie de presa					
J5.1	Hundimientos o fallos en los dedos de los pies causadas por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa					
J5.2	Hundimientos o fallos en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción sobre la presa, que fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a corta distancia. Contaminación de los suelos cercanos y los cursos de agua por los materiales de la presa, y de agua adyacente y el suelo debido a la caída de relaves. Posible daño humano de las personas cercanas o	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
		dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
J5.3	Hundimientos o fallos en el pie de presa causados por una o más de las siguientes razones: (i) elevación de los niveles freáticos en los relaves; (iii) la pérdida de fuerza provocada sísmicamente dentro de relaves que no cumplen con el criterio de densidad de diseño (iv) la erosión inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	El fallo de la presa desencadena un efecto de licuefacción tanto en los relaves como en la represa, lo que conduce a un fallo catastrófico. La presa y los relaves fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
J6	Fallo por exposición de la cara libre					
J6.1	El fracaso de los relaves expuestos se debe a una o más de las siguientes razones: (i) caída durante el terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (iii) erosión o tubería de la cara externa de relaves	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos causan la contaminación del agua y el levantamiento de polvo, sin muertes.	NL	L	L	L
J7	Deasbordamiento					
J7.1	Superposición causada por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede	Pared de contención que cae debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplen causando erosión debido a una espiga de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del	daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.				

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) evitar el fallo del sistema.					
J7.2	Desbordamiento causado por una o más de las siguientes razones: (i) error de cálculo del agua libre que puede almacenarse en el embalse; (ii) fallo de decantación o flujo de salida de decantación insuficiente que provoca un aumento en el agua libre; (iii) un espigado inadecuado que mueve el agua estancada más cerca de un terraplén y podría hacer inútil una torre de decantación; (iv) los relaves (en lugar del agua libre) sobrepasan el terraplén causando erosión debido a una espiga	Gully, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía ya la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	NL	L	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	de cresta de terraplén incorrectamente monitoreada; (v) una reducción del francobordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de lluvia; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

J7.3	<p>Overtopping caused by one or more following reasons: (i) a miscalculation of the free water that can be stored in the impoundment; (ii) decant failure or insufficient decanting outflow which causes a rise in the free water; (iii) inadequate spigoting which moves the ponded water closer to an embankment and could render a decant tower useless; (iv) an embankment crest spigot is not monitored correctly and the tailings (rather than the free water) overtop causing erosion; (v) a reduction in the freeboard as a result of subsidence of the dam crest; (vi) rainfall runoff; (vii) drainage system failure; (viii) spillway failure; (ix) bypass system failure</p>	<p>The overtopping erosion triggers a slope or toe failure which derives in a liquefaction effect on both, tailings and dam. Catastrophic failure: Dam and tailings flow over a broad area, contaminating soils, water courses, underground water in case of infiltration. High risk of human damage due to the broad area of flow, possible fatalities.</p>	NL	L	N	N
J8	Seepage and leaching					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
J8.1	Seepage of leachate caused by one or more following reasons: (i) leaching of residual metals within the tailings; (ii) drainage pipe failure (not plugged by concrete); (iii) liner degradation and eventual failure (drain plugged with concrete); (iv) watertight system breakage	Contamination of near soil, water courses or underground water sources. Possible human damage due to aquifer contamination, no fatalities.	NL	L	N	N
J9	Dust generation					
J9.1	Contaminated dust generated by one or more following reasons: (i) erosion of embankment; (ii) transportation by truck; (iii) erosion of the final disposal	Dust generation which will impact neighbouring communities and vegetation, no fatalities.	H	M	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de la presa o balsa					
	ponds; (iv) high wind; (v) erosion of exposed tailings face					

9.1.11. Escenario 3: Fallos del espesador en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
K10	Fallo de operación					
K10.1	Falla en la operación causada por una o más de las siguientes razones: (i) parate de la electricidad; (ii) error del brazo del rastrillo	Este fallo se debe a que la pendiente diseñada de playa no se pudo llevar a cabo, por lo tanto, causa erosión y polvo, no hay fatalidades.	L	L	L	N
K11	Taponamiento de la salida del flujo inferior					
K11.1	El taponamiento de la salida de flujo inferior causado por una o más razones siguientes: (i)	Este fallo conduce a la rotura del espesador, y	M	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
	taponamiento de las últimas etapas de bombeo; (ii) cuerpo desconocido en el espesante; (iii) caracterización de malos residuos (propiedades reológicas); (iv) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación	también al desbordamiento, por lo tanto, causa la contaminación del agua y el suelo de la zona cercana, sin muertes.				
K12	Propiedades reológicas inadecuadas					
K12.1	Propiedades reológicas inadecuadas de los relaves causadas por una o más de las siguientes razones: (i) mal diseño del espesador (dimensiones) o mala caracterización de los relaves (propiedades reológicas) (ii) cambios en las propiedades reológicas de la alimentación	Esta fallo conduce a la rotura de la bomba, al derrame de relaves que contaminan el agua y el suelo del aera cercana, sin fatalidades.	L	L	L	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
	de los relaves; (iii) fallos en el sistema de dilución de la alimentación; (iv) floculante/aglutinante inadecuado					
K13	Desbordamiento					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
K13.1	Desbordamiento causado por una o más de las razones siguientes: (i) lluvia (en el espesante abierto); (ii) fallo del sistema de recolección del vertedero; (iii) taponamiento de salida de rebosadero (taponamiento de salida de relaves espeso); (iv) alto flujo de alimentación	Esta fallo conduce a la contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, no hay fatalidades.	L	L	L	N
K14	Rotura o atascamiento de los rastrillos					

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos del espesador					
K14.1	Rakes de atascos o rotura causados por una o más de las siguientes razones: (i) mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (ii) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación; (iii) baja potencia debido a un mal diseño del motor	Esta fallo conduce a la interrupción del espesante, es posible causar la obstrucción del flujo inferior, y contamina así el agua y el suelo cercanos, ninguna fatalidad.	L	L	L	N

9.1.12. Escenario 3: Fallos del filtrado en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	Filtered failures					
L15	Fallo de operación					
L15	Fallos en la operación causados por una o más de las siguientes razones: (i) parada de la electricidad; (ii) error de las placas o membranas del filtro	Este fallo lleva a la playa de la playa diseñado no se pudo lograr, por lo tanto, la erosión y el polvo, no hay fatalidades.	L	L	L	N
L16	Underflow exit plugging					
L16	El taponamiento de la entrada de subflujo es causado por una o más razones siguientes: (i) taponamiento de las últimas etapas de bombeo; (ii) cuerpo desconocido en el filtrado; (iii)	Este fallo conduce a la rotura de las tuberías filtradas, y también el problema de la superación, por lo tanto,	L	M	N	N

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	caracterización de malos residuos (propiedades reológicas); (lv) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación	causa la contaminación del suelo de la zona cercana, sin muertes.				
L17	Fallo en las membranas del filtro					
L17	El fallo de las membranas del filtro puede producirse por una o más de las siguientes razones: (i) mala caracterización de los residuos (propiedades reológicas); (ii) cambio en las propiedades reológicas de los relaves en la alimentación; (iii) baja potencia debido a un mal diseño del motor (iv) mal dimensionamiento del número y tamaño de las placas	Esta fallo conduce a la interrupción del filtro, es posible causar la obstrucción del flujo inferior, contaminando así el agua y el suelo cercanos, sin fatalidades.	L	L	L	N

9.1.13. Escenario 3: Fallos de transporte en la etapa de traslado en camión

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte					
M18	Generación de polvo					
M18	Polvo generado por una o más de las razones siguientes: (i) transporte por camión; (ii) viento fuerte; (iii) una mala cobertura material	Fallos que conducen a la generación de polvo, que afectará a las comunidades vecinas y la vegetación, sin fatalidades.	H	M	N	M
M19	Accidentes de tráfico					
M19	Los fallos por accidentes de tráfico pueden darse por una o más de las siguientes causas: (i) colisión (ii) errores de	Estos fallos conducen a la generación de polvo que afectará a las comunidades	L	L	N	M

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIDENCIA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	Fallos de transporte					
	conducción (iii) fallos mecánicos (iv) factores de conducción ambiental	vecinas y la vegetación, sin muertes.				

10. Referencias bibliográficas

Adiansyah, J.S., Rosano, M., Vink, S., and Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *J. Clean. Prod.* *108*, 1050–1062.

Advanced Mineral Processing S.L. Lavado de arenas, Minería, Áridos, Ingeniería de procesos, Medio Ambiente, Procesos Industriales, Tratamiento de Residuos | Advanced Mineral Processing.

A.M.C. Portes, and T. Espósito (2013). Performance analysis for filtered iron ore tailings disposal. (Brazil), p.

Australian Government (2016). Tailings Management. Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry.

Bedell, D., Slottee, S., Parker, K., and Henderson, L. (2002). Thickening process: A guide. *Paste Thick. Tailings UniPrint Univ West. Aust. Perth West. Aust.* 49–79.

Benckert, A., and Eurenus, J. (2001). Tailings dam constructions - Seminar on safe tailings dam constructions. Gallivare, Swedish Mining Association, Natur Vards Verket, European Commission pp. 30-36. p.

Bóhm, J., Debreczeni, Á., Faitli, J., Gombkötő, I., and László, T. (2005). Tailings Management Facilities Water Management and the Use of Thickened Tailings.

Brachebusch, F.W. (1994). Basics of paste backfill system. *Min. Eng.* *10*, 175–1.

Carrere, R. (2004). Minería, Impactos Sociales y Ambientales.

Coumans, C. (2002). Submarine Tailings Disposal - STD Toolkit, MiningWatch Canada, Ottawa and Project Underground, Berkeley, CA, USA:: 16.

Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings: the fundamentals.

Davies, M., and Martin, T. (2002a). Static liquefaction of tailings—fundamentals and case histories.

Davies, M., and Martin, T. (2002b). Static liquefaction of tailings—fundamentals and case histories.

Davies, M.P., and Rice, S. (2001). An alternative to conventional tailings management—“dry stack” filtered tailings. *Proceeding Tailings Mine Waste’01* 411–420.

Davies, M., Martin, T., and Lighthall, P. (2000). Mine tailings dams: when things go wrong. *Tailings Dams* 261–273.

Davies, M. P., and E. McRoberts (2002). “Static Liquefaction of Tailings- Fundamentals and Case Histories.” *Amec Earth and Environmental* 23.

Deschamps, T., Benzaazoua, M., Bussière, B., and Aubertin, M. (2011). Laboratory study of surface paste disposal for sulfidic tailings: Physical model testing. *Miner. Eng.* *24*, 794–806.

DME (1999). Guidelines on the Safe Design and Operating Standards for Tailings Storage, Department of Minerals and Energy, Western Australia.

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

- Doka, G. (2008). Life Cycle Inventory data of mining waste: Emissions from sulfidic tailings disposal.
- Dold, B. (2008). Sustainability in metal mining: from exploration, over processing to mine waste management. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7, 275–285.
- DPI (2003). Management of Tailings Storage Facilities - Environmental Guidelines, Department of Primary Industries, Victoria - Minerals & Petroleum Division:.63.
- Durucan, S., Korre, A., and Munoz-Melendez, G. (2006). Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. *J. Clean. Prod.* 14, 1057–1070.
- EC (2004). Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. European Commission, Edificio EXPO, Seville, Spain:.563.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D.M., and Moran, C.J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches. *J. Clean. Prod.* 84, 411–420.
- ELAW (2010). Guía para evaluar EIAs de Proyectos Mineros.
- Eng, A.M.R.P., and Shaw, S. RISK MANAGEMENT FOR MAJOR GEOTECHNICAL STRUCTURES ON MINES.
- Eng, A.M.R.P., and Shaw, S. RISK MANAGEMENT FOR MAJOR GEOTECHNICAL STRUCTURES ON MINES.
- Engels, J. (2004). Risk Reduction Actions for Substandard or Impaired Tailings Facilities.
- Engels, J. (2013). Conventional impoundment storage - the current techniques, University of Leeds.
- Engels, J. (2017a). What Are Tailings? - Their nature and production.
- Engels, J. (2017b). Conventional Impoundment Storage - The current techniques.
- Engels, J. (2017c). Surface Paste Tailings Disposal.
- ENPI The European Neighbourhood Instrument.
- ENPI, E. (2011). ENPI, E. (2011). Waste governance- ENPI East, Methodology for the environmental & health risk assessment of mine tailings disposal sites. Kyiv, Eptisa led Consortium. Eur. Neighb. Partnersh. Instrum. East. Reg. ENPI East 2011 Waste Gov.
- Envec, E.S.I. (2005). Mining for Closure: Policies and Guidelines for Sustainable Mining Practice and Closure of Mines. S. E. Europe, UNEP, UNDP, OSCE and NATO.
- EPA (1994). Technical Report - Design and Evaluation of Tailings Dams, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington:.63.
- Gipson, A. H., Jr (1998). Tailings disposal - The last 10 years and future trends. Fort Collins, Colorado, 26-29th January 1998 A. A. Balkema.ISBN: 905410922X.pp. 127-135.

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

Gunson, A.J., Klein, B., Veiga, M., and Dunbar, S. (2012). Reducing mine water requirements. *J. Clean. Prod.* 21, 71–82.

Gundeep S. (2005). A Newsletter of the ENVIS Centre on Environmental Problems of Mining Area. *Minervis*. ENVIS newsletter on environmental problems mining. *March*.

ICOLD International Commission on Large Dams. ICOLD CIGB > Home.

ICOLD and UNEP (2001). International Commission on Large Dams (ICOLD) & United Nations Environmental Programme (UNEP) 2001, Bulletin 121: tailings dams - risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences, Paris.

Jakubick, A.T., McKenna, G., and Robertson, A. (2003). Stabilization of tailings deposits: International experience. In *Mining and the Environment Conference*, Sudbury, p.

Jewell, R.J., and Fourie, A.B. (2006). *Paste and thickened tailings: A guide* (Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia).

Joliet, O., Müller-Wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, R., Itsubo, N., Peña, C., Pennington, D., and Potting, J. (2004). The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. *Int. J. Life Cycle Assess.* 9, 394–404.

Kemp, D., Worden, S., and Owen, J.R. (2016). Differentiated social risk: Rebound dynamics and sustainability performance in mining. *Resour. Policy* 50, 19–26.

Kizil, M.S., and Muller, B. (2011). A numerical approach for pre-feasibility analysis of tailings disposal options. In *35th APCOM Symposium*, (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy), pp. 455–463.

Kliche, C. (1999). *Rock slope stability*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc SME U. S.

Kulczycka, J. (2008). *LCA for Minimisation of environmental Impact of Wastes from Zinc and Lead Industry*. *Pol. Acad. Sci. Miner. Energy Econ. Res. Inst. Pol.*

Lacy, H.W.B., and Barnes, K.L. (2006). Tailings storage facilities: Decommissioning planning is vital for successful closure. In *Proceedings, First International Seminar On Mine Closure*, pp. 139–148.

Leduc, M., and Smith, M.E. (2003). *Tailings Co Disposal-Innovation for Cost Saving and Liability Reduction*. *Lat. Am. Min. Rec.*

Lesage, P., Reid, C., Margni, M., Aubertin, M., and Deschênes, L. (2008). Use of LCA in the mining industry and research challenges. *CIRAIG Éc. Polytech. Montr. Qué. Ind. NSERC Polytech.-UQAT Chair Environ. Mine Wastes Manag. Éc. Polytech. Montr. Qué.*

Luiña, R., Ortega, F., Martínez, G., and Pecharromán, D (2012). Assessment of thickening tailings as a tool for environmental improvement.

Martin, V., McMullen, J., and Aubertin, M. (2005). Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Mining and the Environment*, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada, pp. 56–71.

Minería Chilena (2015). *El futuro del precio del cobre, atado a la escasez de agua*.

Sostenibilidad de tratamientos de relaves mineros asociada al riesgo

- MMSD (2002). MMSD, 2002. Mining for the Future Appendix a: Large Volume Waste Working Paper. International Institute for Environment and Development, London, UK.
- Moore, P., Pelletier C., and et al (2002). The Environmental Impact of Submarine Tailings Disposal at the Island Valley Copper Mine on Vancouver Island: A Case History in Environmental Policy.; 2002.:. 12.
- Moran, R. (2001). Aproximaciones al costo económico de impactos ambientales en la minería. *Rev. Ambiente Desarro.* 17.
- Norman, D.K., and Raforth, R.L. (1998). Innovations and trends in reclamation of metal-mine tailings in Washington. *Wash. Geol.* 26, 29–42.
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Saarivuori, E., Wessman-Jääskeläinen, H., and Haque, N. (2016). Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *J. Clean. Prod.* 135, 1098–1116.
- OECD (2012). Sustainable development, green growth and quality employment Realizing the potential for mutually reinforcing policies. (París).
- Oyarzun, R., Higuera, P., and Lillo, J. (2011). Minería ambiental: una introducción a los impactos y su remediación. (Ediciones GEMM-Aula2punto.net).
- Pebble (2005). Pebble Project. Background. Tailings and tailings management.
- Rausand, M., and Høyland, A. (2004). System reliability theory: models, statistical methods, and applications (John Wiley & Sons).
- Reid, C., Becaert, V., Aubertin, M., Rosenbaum, R.K., and Deschênes, L. (2009). Life cycle assessment of mine tailings management in Canada. *J. Clean. Prod.* 17, 471–479.
- RET (2006). Mine Rehabilitation. Canberra Australia Government, Commonwealth of Australia.
- RET (2007). Tailings management. Canberra Australia Government, Commonwealth of Australia.
- RET (2008). Risk assessment and management. Canberra Australia Government, Commonwealth of Australia.
- Ripley, E.A., and Redmann, R.E. (1995). Environmental effects of mining (CRC Press).
- Ritcey, G.M. (1989). Tailings management: problems and solutions in the mining industry.
- Robinsky, E.I. (1999). Tailings dam failures need not be disasters: the thickened tailings disposal (TTD) system. *CIM Bull.* 92, 140–142.
- Robinsky, E. I. (2000). Sustainable development in disposal of tailings. *Tailings and Mine Waste 00.* Colorado, USA, A.A. Balkema, Rotterdam: pp. 39-48.
- Rodríguez, R., García-Cortés, Á., and Fernández, R.R. (2006). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente (IGME).

- Rodriguez, R., Luciano Oldecop, Rogelio Linares, and Victoria Salvadó (2009). Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales. *Rev. Inst. Investig.* 12.
- Sladen, J.A., D'hollander, R.D., and Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Can. Geotech. J.* 22, 564–578.
- Strachan, C., and Caldwell, J. (2010). New directions in tailings management. *Tailings Mine Waste'10 Vail Colo. USA* 41–48.
- Tremblay, G. (1998). Subaqueous Tailings Disposal: Results of the MEND program-Case studies on tailings management (ICME, United Nations Environment Programme (UNEP)).
- U.S. Environmental Protection Agency (1994). Technical report. Design and evaluation of tailings dams.
- Vick, S.G. (1990). Planning, design, and analysis of tailings dams (BiTech).
- Vick, S.G., and Planning, D. (1983). *Analysis of Tailings Dams* (Wiley, New York).
- Wennberg, T. (2010). Transporting highly concentrated slurries with centrifugal pumps the thickened minerals tailings example (Luleå tekniska universitet,).
- Wesh Tech Engineering, Inc. (2011). Equipment: Item A, One (1) 40 m dia x 8 m sidewall hidensity paste thickener; Item B, One (1) 40 m dia anchor channel tank.
- Williams, D.J. (2005). Placing soil covers on soft mine tailings. *Elsevier Geo-Eng. Book Ser.* 3, 491–512.
- Witt, K.J., and Schönhardt, M. (2004). Tailings management facilities—risks and reliability. *Rep. Eur. RTD Proj.*
- Xenidis, A., Papassiopi, N., and Komnitsas, K. (2003a). Carbonate-rich mining tailings in Lavrion: risk assessment and proposed rehabilitation schemes. *Adv. Environ. Res.* 7, 479–494.
- Xenidis, A., Papassiopi, N., and Komnitsas, K. (2003b). Carbonate-rich mining tailings in Lavrion: risk assessment and proposed rehabilitation schemes. *Adv. Environ. Res.* 7, 479–494.
- Xin, Z., Xiaohu, X., and Kaili, X. (2011). Study on the risk assessment of the tailings dam break. *Procedia Eng.* 26, 2261–2269.
- Yilmaz, E. (2011). Advances in reducing large volumes of environmentally harmful mine waste rocks and tailings. *Gospod. Surowcami Miner.* 27, 89–112.