



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN MINERÍA, OBRA CIVIL, MEDIO
AMBIENTE Y DIRECCIÓN DE PROYECTOS

TESIS DOCTORAL

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD
DE MÉTODOS DE ESPESAMIENTO DE
RESIDUOS MINEROS

AUTORA: ANA FERNÁNDEZ IGLESIAS

DIRECTORES: ROCIO LUIÑA FERNÁNDEZ

FRANCISCO ORTEGA FERNÁNDEZ

JUNIO, 2017





RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español/Otro Idioma: Evaluación de la sostenibilidad de métodos de espesamiento de residuos mineros	Inglés: Sustainability assessment of mine waste dewatering methods
2.- Autor	
Nombre: ANA FERNANDEZ IGLESIAS	DNI/Pasaporte/NIE:
Programa de Doctorado: Minería, obra civil, medio ambiente y dirección de proyectos	
Órgano responsable: EXPLOTACION Y PROSPECCION DE MINAS	

RESUMEN (en español)

La actividad minera es la base imprescindible del desarrollo del resto de la actividad industrial. Sin embargo, la sociedad la percibe como gran generadora de impacto sobre el medio natural, lo que provoca rechazo por parte del entorno. Ciertamente las explotaciones mineras son fuertes consumidoras de energía además de generar un importante impacto ambiental debido a la gran superficie de terreno que ocupan. No obstante, esta actividad se puede considerar limitada en el tiempo.

Aunque a nivel global ya está extendida la evaluación del impacto ambiental de la actividad minera, es preciso ir más allá y mantener un enfoque de desarrollo sostenible con una perspectiva de pensamiento de ciclo de vida o de cadena de producto, que valore los beneficios o perjuicios a lo largo de todo el proceso, del diseño al cierre. Este trabajo parte de la consideración de la producción de relaves como uno de los impactos más severos y trascendentes de la actividad minera y persigue determinar la solución óptima de gestión de los mismos en pro de un desarrollo sostenible que permita seguir produciendo dichas materias primas con la mínima afección al entorno. Dadas las dificultades de expresar la sostenibilidad, en este trabajo se realiza un análisis que considere las metodologías más ampliamente establecidas: Análisis de Ciclo de Vida, Huella Hídrica y Análisis de Riesgos.

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida se presenta como una herramienta de evaluación de impacto holística, capaz de atender a una gran variedad de categorías de impactos. Sin embargo, se conoce que, como modelo que es, es una simplificación de la realidad, haciéndose necesario un examen más exhaustivo. Para ello se complementa la evaluación con un estudio de las Huellas Hídrica y de Carbono, por ser indicadores sencillos, muy extendidos en la sociedad y estar muy ligados a las principales categorías de impacto.

Los enfoques anteriores se completan con un Análisis de Riesgos según la metodología AMFE que trata los aspectos concernientes al riesgo del método escogido. Para valorar las distintas alternativas se generan tres escenarios:

- Relaves fluidos.
- Relaves espesados o "paste" y, finalmente,
- Relaves secos, procedentes de filtración.

Tras la realización del ACV se comprueba que las principales categorías de impacto son el uso de la energía y su consecuente consumo de recursos fósiles y emisiones, así como



el uso del suelo, aspectos que aportan tanto al valor final que el resto del inventario llega a ser irrelevante.

Utilizando la metodología ReCiPe se determina la importancia del espacio ocupado en el caso de los relaves sin tratar, la mayor relevancia del coste energético en el caso del transporte de espesados y el ahorro de espacio e incluso energético en el caso de los filtrados.

Sobre todos ellos se realiza un análisis de sensibilidad que evidencia la importancia sobre el resultado de la valoración del uso del suelo, el tipo de energía utilizado y la ubicación de la planta de espesado.

Se valora de forma complementaria la Huella Hídrica, dado que el agua es otra pieza clave. La perspectiva de Ciclo de Vida tiene en cuenta toda el agua que se requiere a lo largo de las diferentes etapas de cada uno de los elementos del sistema, incluyendo por ejemplo el consumo necesario para la producción de energía. La influencia de la metodología utilizada se hace evidente cuando se realiza la Huella Hídrica con un enfoque completo de Análisis de Ciclo de Vida, según la norma 14046. La aplicación del enfoque de Hoekstra proporciona impactos significativamente menores en cada uno de los escenarios e incluso altera su orden de importancia.

Finalmente, se realiza un Análisis de Riesgos, ratificando la idoneidad del filtrado como opción más segura.

Por último, a partir del análisis de las tres formas de gestión se diseña un conjunto de indicadores complementarios de sostenibilidad para dar cobertura a todos los posibles impactos.

RESUMEN (en Inglés)

The mining activity is the essential basis for the development of the rest of industrial activity. However, society perceives it as a great generator of impact on the natural environment, which causes social rejection. Certainly, mining exploitations are strong consumers of energy and generate an important impact due to the large area of land they occupy. However, exploitation can be considered limited in time. More relevant are wastes, largely derived from tailings deposits, which involve a permanent risk for both the environment and human health. Recent accidents with severe consequences confirm this. Although the assessment of mining activity environmental impact is already widespread at global level, it is necessary to go further and maintain a sustainable development approach with a life cycle or product chain thinking perspective that valorizes the benefits or damages of the whole process, from design to closure.

This work is based on the consideration of tailings production as one of the most severe and transcendent impacts of mining activity and seeks to determine the optimal management solution for sustainable development that allows the production of these raw materials with the minimal impact on the environment.

To evaluate the different alternatives, three scenarios are generated:

- Tailings without dewatering.
- Thickened tailings or "paste" and, finally,
- Dry tailings, coming from filtration.



Given the difficulties of expressing sustainability, analysis includes the most widely established methodologies: Life Cycle Analysis, Water Footprint and Risk Assessment. The LCA methodology is a holistic impact assessment tool, capable of addressing a wide variety of impacts. However, it is a model, i.e. a simplification of reality, making a more exhaustive examination necessary. To this end, the evaluation is complemented by a study of the Water and Carbon Footprints, as simple indicators, globally accepted and closely linked to the main categories of impact.

LCA shows the importance of two impact categories: the use of energy and its consequent consumption of fossil resources and emissions, as well as the land use, making irrelevant the rest of the inventory.

The methodology ReCiPe determines the importance of the space occupied in the case of untreated tailings, the greater contribution of the energy cost in the case of transport of thickened tailings and the saving of space and even energy in the case of the filtrates. A sensitivity analysis confirms the importance of the soil use assessment, the type of energy used and the location of the thickening plant.

The water footprint is evaluated in a complementary way, since water is another key factor. Today, mineral processes must minimize the consumption of fresh water, especially considering that in many cases mining areas are arid. The life cycle perspective takes into account all the water required throughout the different stages of each of the elements of the system, including for example the consumption needed for the production of energy. In fact, important water consumption is necessary for energy production.

The influence of the methodology is evident when the water footprint is carried out with a full LCA approach, according to the standard 14046. The application of the Hoekstra approach provides much smaller impacts in each of the scenarios and even alters its order of importance.

The previous approaches are complemented with a Risk Analysis using FMEA, addressing the aspects not previously evaluated, concerning the risk involved in each of the forms of tailings management.

Finally, from the analysis of the three forms of management, a set of complementary sustainability indicators is designed to cover all possible impact.



ACRÓNIMOS

ACV	Análisis del ciclo de vida
AMFE	Análisis Modal de Fallos y Efectos
BOE	Boletín Oficial del Estado
EBA	Análisis de la barrera de energía
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EICV	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida
EN	Norma Europea
EO	Etapa de Operación
EPA	Agencia de Impacto Ambiental
EPC	Etapa Post-Cierre
ER	Evaluación de Riesgos
FMECA	Modos de fallo, análisis de efectos y criticidad
FTA	Análisis del árbol de fallos
GEMI	Iniciativa de Desarrollo Global Medioambiental
HAZOP	Análisis Funcional de Operatividad
HC	Huella de Carbono
HH	Huella Hídrica
ICOLD	Comisión Internacional de Grandes Presas
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
ILCD	Sistema internacional de referencia de datos de ciclo de vida
IRA	Evaluación informal del riesgo



ISO	Instituto Internacional de Organización
JSA / JHA	Seguridad laboral /análisis de riesgos
LCNPV	Valor Actual Neto del Ciclo de Vida
MMSD	Minería, Minerales y Desarrollo Sostenible
PHA	Análisis preliminar de peligros
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente
SETAC	Sociedad de Toxicología Ambiental y Química
STD	Eliminación submarina de relaves
UNE	Una Norma Española
UNEP	Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente
UNESCO	Organización Educativa, Científica y Cultural de las Naciones Unidas
US EPA	Agencia de Impacto Ambiental de Estados Unidos
WRAC	Evaluación y control de riesgos en el lugar de trabajo
USCOLD	Comisión de Grandes Presas de Estados Unidos



RESUMEN

La actividad minera es la base imprescindible del desarrollo del resto de la actividad industrial. Sin embargo, la sociedad la percibe como gran generadora de impacto sobre el medio natural, lo que provoca rechazo por parte del entorno. Ciertamente las explotaciones mineras son fuertes consumidoras de energía además de generar un importante impacto debido a la gran superficie de terreno que ocupan. No obstante, esta actividad se puede considerar limitada en el tiempo. Más relevantes son los residuos, procedentes en gran medida de depósitos de relaves, que implican un alto riesgo tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Los depósitos de relaves como han demostrado recientes accidentes con consecuencias muy lamentables.

Aunque a nivel global ya está extendida la evaluación de su impacto ambiental, es preciso ir más allá y mantener un enfoque de desarrollo sostenible con una perspectiva de pensamiento de ciclo de vida o de cadena de producto, que valore los beneficios o perjuicios a lo largo de todo el proceso, del diseño a la retirada.

Este trabajo parte de la consideración de la producción de relaves como uno de los impactos más severos y trascendentes de la actividad minera y persigue determinar la solución óptima de gestión de los mismos en pro de un desarrollo sostenible que permita seguir produciendo dichas materias primas con la mínima afección al entorno.

Dadas las dificultades de expresar la sostenibilidad en este trabajo se realiza un análisis que considere las metodologías más ampliamente establecidas: Análisis de Ciclo de Vida, Huella Hídrica y Risk Assessment.

La metodología de ACV se presenta como una herramienta de evaluación de impacto holística, capaz de atender a una gran variedad de impactos. Sin embargo, se conoce que, como modelo que es, es una simplificación de la realidad, haciéndose necesario un examen más exhaustivo. Para ello se complementa la evaluación con un estudio de las Huellas Hídrica y de Carbono, por ser indicadores sencillos, muy extendidos en la sociedad y estar muy ligados con las principales categorías de impacto.

Los enfoques anteriores se completan con un Análisis de Riesgos según la metodología AMFE que trata los aspectos no contemplados en las metodologías anteriores, los concernientes al riesgo que supone cada una de las formas de gestión de los relaves.

Para valorar las distintas alternativas se generan tres escenarios:

- Relaves en medio fluido tradicionales.
- Relaves espesados o “paste” y, finalmente,
- Relaves secos, procedentes de filtración.



Tras la realización del ACV se comprueba que las principales categorías de impacto son el uso de la energía y su consecuente consumo de recursos fósiles y emisiones, así como el uso del suelo, aspectos que aportan tanto al valor final que el resto del inventario llega a ser irrelevante.

Utilizando la metodología ReCiPe se determina la importancia del espacio ocupado en el caso de los relaves sin tratar, la mayor relevancia del coste energético en el caso del transporte de espesados y el ahorro de espacio e incluso energético en el caso de los filtrados.

Sobre todos ellos se realiza un análisis de sensibilidad que evidencia la importancia sobre el resultado de la valoración del uso del suelo, el tipo de energía utilizado y la ubicación de la planta de espesado.

Se valora de forma complementaria la huella hídrica, dado que el agua es otra pieza clave. Actualmente se priman los procesos que no requieran o minimizan el consumo de agua fresca, muy especialmente considerando que en muchas ocasiones las zonas mineras son áridas. La perspectiva de ciclo de vida tiene en cuenta toda el agua que se requiere a lo largo de las diferentes etapas de cada uno de los elementos del sistema, incluyendo por ejemplo el consumo necesario para la producción de energía. De hecho, para la producción de energía es necesario un importante consumo de agua.

La influencia de la metodología utilizada, se hace evidente cuando se realiza la huella hídrica con un enfoque completo de ACV, según la norma 14046. La aplicación del enfoque de Hoekstra proporciona impactos mucho menores en cada uno de los escenarios e incluso altera su orden de importancia.

Finalmente, se realiza un Análisis de Riesgos, ratificando la idoneidad del filtrado como opción más segura,

Por último, a partir del análisis de las tres formas de gestión se diseña un conjunto de indicadores complementarios de sostenibilidad para dar cobertura a todos los posibles impactos, determinando nuevamente la adecuación de la vía de filtrado.



ABSTRACT

The mining activity is the essential basis for the development of the rest of industrial activity. However, society perceives it as a great generator of impact on the natural environment, which causes social rejection. Certainly, mining exploitations are strong consumers of energy and generate an important impact due to the large area of land they occupy. However, exploitation can be considered limited in time. More relevant are wastes, largely derived from tailings deposits, which involve a permanent risk for both the environment and human health. The deposits of tailings as they have demonstrated recent accidents with very regrettable consequences.

Although the assessment of its environmental impact is already widespread at global level, it is necessary to go further and maintain a sustainable development approach with a life cycle or product chain thinking perspective that valorize the benefits or damages of the whole process, from design to withdrawal.

This work is based on the consideration of tailings production as one of the most severe and transcendent impacts of mining activity and seeks to determine the optimal management solution for sustainable development that allows the production of these raw materials with the minimal affection to the environment.

To evaluate the different alternatives three scenarios are generated:

- Tailings in traditional fluid medium.
- The thickened tailings or "paste" and, finally,
- Dry tailings, coming from filtration.

Given the difficulties of expressing sustainability, analysis includes the most widely established methodologies: Life Cycle Analysis, Water Footprint and Risk Assessment.

The LCA methodology is a holistic impact assessment tool, capable of addressing a wide variety of impacts. However, it is a model, i.e. a simplification of reality, making a more exhaustive examination necessary. To this end, the evaluation is complemented by a study of the Water and Carbon Footprints, as simple indicators, globally accepted and closely linked to the main categories of impact.

ACV shows the importance of two impact categories: the use of energy and its consequent consumption of fossil resources and emissions, as well as the land use, making irrelevant the rest of the inventory.

The methodology ReCiPe determines the importance of the space occupied in the case of untreated tailings, the greater contribution of the energy cost in the case of thickening transport and the saving of space and even energy in the case of the filtrates.

A sensitivity analysis confirms the importance of the soil use assessment, the type of energy used and the location of the thickening plant.



The water footprint is evaluated in a complementary way, since water is another key factor. At present, processes must minimize the consumption of fresh water, especially considering that in many cases mining areas are arid. The life cycle perspective takes into account all the water required throughout the different stages of each of the elements of the system, including for example the consumption needed for the production of energy. In fact, important water consumption is necessary for energy production.

The influence of the methodology is evident when the water footprint is carried out with a full LCA approach, according to the standard 14046. The application of the Hoekstra approach provides much smaller impacts in each of the scenarios and even alters its order of importance.

The previous approaches are complemented with a Risk Analysis using FMEA addressing the aspects not evaluated previously, concerning the risk involved in each of the forms of tailings management.

Finally, from the analysis of the three forms of management, a set of complementary sustainability indicators is designed to cover all possible impact, determining the adequacy of the filtering route.



ÍNDICE

1. Introducción	19
2. Principales impactos de la actividad minera	23
2.1 <i>Uso del suelo</i>	24
2.2 <i>Consumo de agua</i>	24
2.3 <i>Almacenamiento de relaves</i>	26
2.4 <i>Emisiones al aire</i>	27
2.5 <i>Impactos mineros sobre la sociedad</i>	27
2.6. <i>Accidentes y fallos</i>	28
3. Sistemas de tratamiento, deposición y almacenamiento de relaves mineros.	31
3.1 <i>Introducción</i>	31
3.2 <i>Producción de relaves</i>	32
3.3 <i>Características de los relaves</i>	33
3.4 <i>Técnicas de almacenamiento</i>	34
3.4.1 Estructuras superficiales.....	34
3.4.2 Relaves como relleno de trabajos subterráneos	37
3.4.3 Desecho en alta mar – Descarga en ríos, lagos y mares.....	38
3.5 <i>Métodos de construcción</i>	38
3.5.1 Aguas arriba.....	38
3.5.2 Aguas abajo	39
3.5.3 Línea central	40
3.5.4 Línea central modificada	41
3.6 <i>Métodos de deposición de relaves</i>	41
3.6.1 Tipos de deposición según el punto de descarga	42
3.6.2 Tipos de descarga según el número de puntos de descarga	43
3.7 <i>Tipos de relaves</i>	45
3.7.1 Disposición de residuos convencionales	46
3.7.2 Disposición de relaves espesados.....	46
3.7.3 Apilamiento en seco (relaves filtrados)	48
3.7.4 Co- deposición	50



Evaluación de la sostenibilidad de métodos de espesamiento de recursos mineros

3.8	<i>Técnicas de transporte</i>	52
3.8.1	Lodos	52
3.8.2	Torta húmeda (relaves filtrados)	53
4.	Indicadores de sostenibilidad	55
4.1	<i>Análisis de Ciclo de Vida</i>	55
4.1.1	Norma ISO 14040: 2006.....	56
4.1.2	Metodologías de Evaluación de Impacto	60
4.2	<i>Huella hídrica</i>	61
4.2.1	Concepto y evolución histórica.....	62
4.2.2	Huella hídrica y ciclo de vida.	62
4.2.3	Metodologías para el desarrollo de la Huella Hídrica.....	63
4.2.4	Norma ISO 14046:2014	64
4.3	<i>Huella de Carbono</i>	66
4.4	<i>Análisis de riesgos</i>	67
4.4.1	Análisis modal de fallos y efectos	68
4.4.2	Limitaciones.....	71
5.	Metodología	73
5.1	<i>Escenarios planteados</i>	74
5.1.1	Escenario 1: Relaves convencionales.....	74
5.1.2	Escenario 2: Relaves espesados (paste) en las etapas de operación y cierre.....	75
5.1.3	Escenario 3: Relaves filtrados en las etapas de operación y cierre	79
5.2	<i>Justificación de los indicadores ambientales seleccionados</i>	83
5.2.1	ACV	84
5.2.2	Huella Hídrica	85
5.2.3	Huella de Carbono	85
5.2.4	Estimación de riesgos.	86
6.	Análisis de Ciclo de Vida	88
6.1	<i>Definición de objetivo y alcance</i>	88
6.1.1	Descripción y límites del sistema.....	88
6.1.2	Unidad funcional	89
6.1.3	Metodología de evaluación de impacto	89
6.1.4	Criterios de corte	91



Evaluación de la sostenibilidad de métodos de espesamiento de recursos mineros

6.1.5	Calidad de los datos.....	91
6.1.6	Software utilizado.....	92
6.1.7	Limitaciones.....	92
6.2	<i>Inventario del análisis del ciclo de vida</i>	92
6.2.1	Escenario 1.....	93
6.2.2	Escenario 2: Paste.....	96
6.2.3	Escenario 3: Filtrados.....	99
6.3	<i>Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida</i>	102
6.3.1	Escenario 1.....	102
6.3.2	Escenario 2.....	103
6.3.3	Escenario 3.....	104
6.3.4	Comparación de escenarios.....	105
6.4	<i>Análisis de sensibilidad</i>	108
6.4.1	Tipo de energía de transporte.....	108
6.4.2	Ubicación de la planta de espesado.....	110
6.4.3	Consideraciones en cuanto a la ocupación del terreno.....	110
7.	Huellas	113
7.1	<i>Huella Hídrica</i>	113
7.1.1	Escasez Hídrica.....	114
7.1.2	ReCiPe.....	116
7.2	<i>Huella de Carbono</i>	118
8.	Metodología de evaluación de riesgos	120
8.1	<i>Evaluación de riesgos en minería</i>	122
8.2	<i>Objetivo y definición del alcance</i>	123
8.3	<i>Identificación de los modos de fallo significativos</i>	124
8.3.1	Fallos de transporte y bombeo en las tuberías.....	124
8.4	<i>Evaluación de la probabilidad de los modos de fallo</i>	131
8.5	<i>Limitaciones</i>	132
8.6	<i>Resultados</i>	133
8.7	<i>Matriz de riesgos</i>	133
8.8	<i>Comparación de escenarios</i>	136
8.8.1	Criterio univariante-.....	137



Evaluación de la sostenibilidad de métodos de espesamiento de recursos mineros

8.8.2	Intolerancia al riesgo	142
8.8.3	Riesgos ponderados.....	143
1.2.	<i>Conclusiones</i>	143
9.	Conclusiones y Líneas de Futuro	145
9.1	<i>Conclusiones</i>	145
9.2	<i>Lineas de Futuro</i>	147
10.	Referencias	149



Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de flujo generalizado para reciclaje de relaves, adaptado de (Edraki et al., 2014).....	33
Figura 2: Configuración de dique de anillo (disposición en tres celdas) en Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, Australia Occidental.....	35
Figura 3: Vertedero de relaves de Cross Valley en Highland Valley Copper, BC, Canadá (Cortesía de Teck).....	36
Figura 4: Almacenamiento en pozo.....	37
Figura 5: Deposición en río, río Jaba, Isla Bougainville, Papua Nueva Guinea (Geoff pickup).....	38
Figura 6: Método aguas arriba de construcción de terraplenes (© Jon Engels).....	39
Figura 7: Método de construcción de terraplenes aguas abajo.....	40
Figura 8: Método de construcción de terraplenes de línea central.....	41
Figura 9: Descarga subaérea de relaves (izquierda) y corrientes trenzadas poco profundas de baja velocidad en una playa de relaves (derecha) (Jon Engels).....	42
Figura 10: Deposición subacuosa de relaves convencionales (Fuente: Jon Engels).....	43
Figura 11: Varios puntos de descarga en la mina de oro de Jundee, Australia (Jon Engels).....	44
Figura 12: Punto único de descarga en la mina de Glebe, Inglaterra (Fuente: Jon Engels).....	45
Figura 13: Espesador de alta densidad de relaves (Paste Thick Associates, 2013).....	47
Figura 14: Relaves espesados (Paste Thick Associates, 2013).....	47
Figura 15: Apilamiento en seco de relaves mediante cinta transportadora en La Coipa, Chile.....	49
Figura 16: Apilamiento de relaves en seco utilizando transporte mediante camión (Fuente: Jon Engels).....	50
Figura 17: Tendencias en el uso de relaves deshidratados en la minería (Davies, 2011).....	52
Figura 18: Pilas secas, relaves filtrados transportados mediante cinta transportadora y compactados mediante topadora, (Australian Government,2016).....	53
Figura 19:Tipos de relaves y sus transportes (adaptado de Davies and Rice (2004))....	54



Figura 20: Ciclo de vida (Fuente: RENOVGAL)	56
Figura 21: Etapas en la realización de un ACV (Luiña, 2013)	57
Figura 22: Diagrama de flujo del inventario del ciclo de vida (Luiña, 2013)	59
Figura 23: Relación entre los parámetros del inventario ambiental, las categorías de impacto midpoint, y las categorías endpoint de ReCiPe (Recipe, 2009).....	61
Figura 24: Fases de la evaluación de la huella de agua (ISO 2014)	66
Figura 25: Depósito de relaves convencionales (Wennberg, 2010).....	74
Figura 26: Descripción esquemática del proceso de relaves espesados con el espesador localizado cerca del área de deposición (Wennberg, 2010)	76
Figura 27: Espesador de alta densidad, EIMCO (Bedell et al. 2002)	77
Figura 28: Fluido típico de un espesador de alta densidad (Bedell et al. 2002)	78
<i>Figura 29: Descripción esquemática del sistema de filtrado de relaves mineros.....</i>	<i>79</i>
Figura 30: Ejemplo de una planta de filtrado	80
Figura 31: Filtro prensa (Advanced Mineral Processing S.L.)	80
Figura 32: Partes de un filtro prensa	81
Figura 33: Consistencia de los relaves filtrados (RET, 2007)	82
Figura 34: Tipos de procesos de tratamiento de relaves mineros (OUTOTEC).....	83
Figura 35: Rotura de una presa de relaves de Cataguases (Brasil)	86
Figura 36: Histórico de accidentes en presas de relaves	86
Figura 37: Etapas del ciclo de vida.....	89
Figura 39: Disposición estandar de transporte de relaves convencionales (Pedro Valencia et al., 2016).....	93
Figura 40: Ciclo de proceso de relaves convencionales, adaptado de (OUTOTEC, 2014)	94
Figura 41: Instalaciones consideradas.....	95
Figura 42: Descripción esquemática de un sistema de relaves de paste (Pedro Valencia et al., 2016).....	96
Figura 43: Ciclo de proceso de relaves de paste adaptado de (OUTOTEC, 2014)	97
Figura 44: Instalaciones consideradas.....	98
Figura 45: Disposición estandar de transporte de relaves filtrados, modificado de (Pedro Valencia et al., 2016)	100



Figura 46: Diagrama del proceso de relaves filtrados, adaptado de (OUTOTEC,2014)	101
Figura 47: Instalaciones consideradas.....	101
Figura 48. EICV del tratamiento de 1000 m ³ en el escenario 1 según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).....	103
Figura 49: EICV del tratamiento de 1000 m ³ en el escenario 2 según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).....	104
Figura 50: EICV del tratamiento de 1000 m ³ en el escenario 3 según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).....	105
Figura 51: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m ³ en los tres escenarios según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).	106
Figura 52: Comparativa del EICV del depósito de 1000 m ³ de relaves en los tres escenarios según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).	107
Figura 53: Comparativa del EICV del transporte de 1000 m ³ de relaves, relaves espesados al 70% y relaves filtrados según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).	108
Figura 54: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m ³ de relaves, con diferentes tipos de mix energéticos según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).	109
Figura 55: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m ³ de relaves, ubicando la planta de espesado cerca de la planta de tratamiento (A) o cerca del depósito (B) según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).	110
Figura 56: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m ³ de relaves, bajo diferentes consideraciones en cuanto a la ocupación de suelo, según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).....	111
Figura 57: Escasez de Huella Hídrica de los 3 escenarios en dos localizaciones diferentes, expresada por Unidad Funcional.....	115
Figura 58: Huella Hídrica desde una perspectiva de ACV utilizando la metodología ReCiPe, categoría de agotamiento de agua, expresada por Unidad Funcional.	116
Figura 59: Huella Hídrica desde una perspectiva de ACV utilizando la metodología ReCiPe, todas las categorías de impacto de agua, expresada por Unidad Funcional..	117
Figura 60: Comparativa de dos metodologías para el cálculo de la Huella Hídrica.	118
Figura 61: Comparativa de la Huella de Carbono en los tres escenarios.....	119
Figura 62: Derrame contaminante en Aznalcóllar, España (Aguilar et al., 2000)	121
Figura 63: Derrame en el monte Polley, Canadá.....	122
Figura 64: Elementos clave de los sistemas de gestión de colas adaptado de (RET, 2007)	123



Figura 65: Fallo en una tubería y posterior erosión en una cara aguas abajo (Engels,2004)	125
Figura 66: Desprendimiento de un terraplén de relaves causado por una superficie con alto nivel freático (Engels, 2004)	127
Figura 67: Erosión en la cara aguas abajo de un terraplén de relaves debida a una extensa canalización del agua (Engels, 2004).....	127
Figura 68: Emisiones de polvo (RET,2007)	129
Figura 69: Dúmpster volcado en la mina Veladero-Barrick Gold	131
Figura 70: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación	138
Figura 71: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación	138
Figura 72: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en la presa en la etapa de operación	139
Figura 73: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en la presa en la etapa de operación	139
Figura 74: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos a fallos en la presa en la etapa de operación	140
Figura 75: Severidad de los riesgos para la seguridad pública debidos a fallos en la presa en la etapa de post-cierre.....	140
Figura 76: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos al espesador en la etapa de operación.....	141
Figura 77: Severidad de los riesgos para la seguridad pública por fallos en el espesador durante la etapa de operación	141
Figura 80: Distribución del número de riesgos con efectos ambientales para las diferentes severidades	142
Figura 81: Distribución del número de riesgos con efecto en la seguridad pública para las diferentes severidades	142
Figura 82: Distribución total de los riesgos por escenario	144



Índice de tablas

Tabla 1: Requisitos típicos en los equipos de bombeo de relaves para diferentes consistencias de los mismos, (Australian Government, 2016)	53
Tabla 2: Probabilidad de evento (Eng and Shaw)	69
Tabla 3: Severidad de los efectos (Eng and Saw)	70
Tabla 4: Nivel de confianza (Eng and Saw)	70
Tabla 5: Descripción de los modos de fallo	133
Tabla 8: Matriz de riesgos para impactos ambientales	135
Tabla 8: Matriz de riesgos para seguridad pública	136





1. INTRODUCCIÓN

En el camino hacia la sostenibilidad, la sociedad actual exige cada vez más a su industria la inclusión de criterios ambientales en sus decisiones, en una búsqueda permanente de la eficiencia de los sistemas productivos y el desarrollo de la tecnología con el objeto de minimizar el impacto y asegurar la disponibilidad futura de los bienes de consumo, además de potenciar su rentabilidad económica (Niemeijer and de Groot, 2008).

Existe una íntima relación entre naturaleza y sociedad que ha llevado a generar grandes debates a lo largo de las últimas décadas. Esta fuerte interdependencia implica que el desarrollo sostenible sólo se puede alcanzar cuando exista un equilibrio entre la forma de satisfacer las necesidades socioeconómicas humanas considerando las cuestiones ambientales (Bolis et al., 2017). Las empresas deben de incluir estos criterios si quieren seguir siendo competitivas, desarrollando comportamientos y políticas acordes a este objetivo.

Esta nueva conciencia social afecta directamente al gran reto del mundo contemporáneo de lograr un aumento de la eficiencia en sus actividades. 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.

La primera definición formal de sostenibilidad se publicó en 1987 por la Comisión Brundtland de las Naciones Unidas como "desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Brundtland and Mansour, 2010), definición que, a pesar de ser demasiado vaga (Rennings and Wiggering, 1997), se asume como un importante punto de inflexión político para el concepto de desarrollo sostenible (Mebratu, 1998).

Hoy en día existen más de 100 definiciones de sostenibilidad y desarrollo sostenible. La mayoría de autores coinciden en los tres pilares u objetivos del desarrollo sostenible conocidos como **Triple línea base** (TBL) o **Triple-P** (People, Planet, Profit):



- *Sostenibilidad social (people)*: se refiere a las comunidades y los trabajadores que tienen un interés en las empresas. Las cuestiones fundamentales son la seguridad, igualdad de oportunidades, justicia social, salud, educación, etc.
- *Sostenibilidad ambiental (planet)*: implica alcanzar un equilibrio entre la carga ambiental y la capacidad de la Tierra para absorber dichas cargas ambientales.
- *Sostenibilidad económica (profit)*: sostiene que todas las actividades económicas deben crear prosperidad para la empresa, para sus trabajadores y propietarios.

Las tres dimensiones están compleja e intrínsecamente interconectadas (Buxton, 2012, Cowell et al., 1999, Hilson and Murck, 2000, Humphreys, 2015, Tilton, 1996, Pimentel et al., 2016), lo que afecta muy especialmente a la actividad minera puesto que cuanto más visible son los efectos de la actividad tanto mayor es la presión social existente. Se encuentra, por lo tanto, bajo la presión de numerosas partes interesadas como gobiernos, instituciones financieras, sociedad civil, comunidades locales y otros actores (Kemp et al., 2016).

Por otra parte, a partir de la publicación del Informe Brundtland por (WCED, 1987), ha ido tomando protagonismo la idea de que mediante una correcta gestión de la cadena de suministro se puede contribuir a resolver el desafío mundial de la sostenibilidad. En la gestión de la cadena de suministro, en las empresas y en la práctica industrial, la creciente influencia de la sostenibilidad ha logrado incluso redefinir la función de las operaciones, haciendo necesaria la introducción de la protección del medio ambiente como estrategia operativa y empresarial clave (de Burgos Jiménez and Céspedes Lorente, 2001). Esta perspectiva convierte al sector de la minería en un punto clave a controlar, ya que es la base para producir la mayoría de las materias primas que se utilizan en todos los procesos productivos.

Desafortunadamente, desde un punto de vista de consumo de recursos, aspecto clave de la sostenibilidad, la minería se encuentra en el extremo negativo. Las operaciones mineras requieren un suministro suficiente y seguro de agua y energía, dos de los elementos clave de la sostenibilidad. Un fallo en el aporte de cualquiera de ellos puede suponer la interrupción de la cadena de producción y el aumento de los costes de remediación (Nguyen et al., 2014).

El agua es un recurso natural que se utiliza en numerosas actividades como el control y eliminación del polvo en la etapa de transporte, procesado de minerales, recuperación de metales, refrigeración, transporte de relaves y concentrado, y necesidades de los trabajadores.

Estas demandas de agua son satisfechas tanto por las aguas superficiales como por las fuentes subterráneas. El volumen de agua extraída por las operaciones mineras en todo el mundo fue de aproximadamente 20,1 millones de m³ diarios en 2010 (Jain R. et al., 2016) con el registro (ABS, 2016) de que sólo en Australia, la minería consumió 141 millones de m³ de agua entre 2013 y 2014.



El uso total de agua puede variar dependiendo de algunos factores, como el tamaño de la mina, los métodos de explotación y de procesamiento utilizados y las prácticas de gestión de agua empleadas. Gunson et al., (2012) proporcionaron un modelo para cuantificar los posibles impactos individuales y combinados de varias de las opciones de reducción de aguas clave discutidas anteriormente. El modelo describe el ahorro potencial de agua para un hipotético depósito de cobre de bajo grado de 50.000 toneladas por día (tpd) en una región árida. El hallazgo clave del estudio es el enorme potencial de ahorro de agua en la combinación de pre-concentración de mineral y eliminación de relaves filtrados.

En cuanto a la energía, la industria minera es considerada como uno de los cinco mayores consumidores. Esta se utiliza, no sólo para la explotación y procesamiento, sino también en servicios auxiliares como el tratamiento de agua, manejo de aguas residuales y generación de electricidad para los poblados o campamentos. Así, por ejemplo, la actividad minera supuso el 20% del consumo eléctrico total de Chile en 2013 (Simpson et al., 2014), el 20% de la electricidad total de Sudáfrica generada en 2006 (Johnson and Fourie, 2012), y el 9% de la energía neta total en Australia consumida entre 2012 y 2013 (BREE, 2014).

Esta importante demanda energética supone el consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la vez que resulta ser un componente crítico en términos económicos. El consumo de energía representa entre el 14 y el 30% de los costos totales de producción minera (Simpson et al., 2014; ABB, 2012).

En consecuencia, la mejora de la sostenibilidad global de las operaciones mineras pasa por una gestión adecuada del agua y la energía (Adiansyah et al., 2016).

Agua y energía son dos de los aspectos más relevantes pero el más penalizante a nivel social es, sin duda, la ocupación de suelo. En todas las comarcas mineras se acumulan enormes montañas de residuos que van ocupando las escasas zonas llanas disponibles. El volumen de relaves generados por 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 las características frecuentemente peligrosas de los mismos, generan impactos irreversibles que convierten el manejo de relaves mineros en una cuestión crucial. La composición físico-química de los relaves supone grandes desafíos adicionales para lograr paisajes físicos 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 económicas, sociales y ambientales, en ocasiones catastróficas (Adiansyah et al., 2015)

Desafortunadamente los tres componentes que más afectan a la sostenibilidad minera se contraponen: la disminución del espacio ocupado requiere el consumo de energía para aplicar técnicas de espesamiento o filtrado. El ahorro de esta energía conlleva un



mayor consumo de agua que permanece entre los residuos y así sucesivamente. Los componentes del desarrollo sostenible, incluidos el agua, la energía, los costos, la tecnología y el impacto ambiental, deberían utilizarse como referencia para determinar la estrategia apropiada de gestión de relaves para una mina (Adiansyah et al., 2015).

Hasta el momento no se ha hecho un estudio exhaustivo que permita encontrar la mejor combinación de los tres elementos desde un punto de vista de desarrollo sostenible, es decir valorar con una función multiobjetivo si las técnicas de espesamiento o filtrado realmente producen un beneficio sobre el entorno considerado este globalmente. Ese es precisamente la labor que se aborda en este trabajo.

Para ello, el presente trabajo se estructura en 5 capítulos. El capítulo 2 recorre los diferentes impactos que la actividad minera tiene sobre su entorno y la forma en que estos son actualmente evaluados. El capítulo 3 se centra en la problemática de los relaves, sus tipos, las formas de gestionarlos y de depositarlos. El capítulo 4 se centra en la sostenibilidad, definiéndola según diferentes criterios y presentando las metodologías más utilizadas para su medición. El capítulo 5 plantea la metodología que se seguirá, los casos planteados y los indicadores seleccionados. Los siguientes capítulos (6, 7 y 8) aplican los indicadores a los escenarios planteados, incluyendo los comentarios correspondientes a los resultados obtenidos. Por último el capítulo 9 expone las conclusiones generales y posibles líneas de futuro.



2. PRINCIPALES IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD

MINERA

La actividad minera, entendida esta como las operaciones de extracción y explotación, plantean 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).

Sin embargo, las mayores catástrofes mineras a lo largo de la historia demuestran que es necesario ampliar el horizonte de estudio de la sostenibilidad a la actividad de almacenamiento de residuos mineros a largo plazo. 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).

Los estudios de sostenibilidad realizados en la industria minera, han enfatizado 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 heho, la tendencia actual es considerar la gestión de residuos sólidos como un proceso independiente.



2.1 USO DEL SUELO

Entre los impactos potenciales en la gestión de relaves mineros, el deterioro de las potencialidades de uso del terreno es una de las principales preocupaciones (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 la mayoría de las ocasiones, los estudios realizados sobre casos reales de espesamiento de relaves no consideran la disminución del uso del terreno como una ventaja relevante, excepto en explotaciones con localizaciones muy específicas, como en algunas explotaciones en Perú, donde la orografía hace muy complicado disponer de lugares adecuados para los depósitos. Sin embargo, la reducción del terreno necesario para almacenar los relaves dependiendo de su composición en sólidos es evidente. Portes muestra en su estudio la reducción significativa de volumen que consigue el almacenamiento en seco frente a los almacenamientos de relaves convencionales (A.M.C. Portes y T. Espósito, 2013).

Además se debe tener en cuenta el largo periodo de tiempo necesario para la posible recuperación del suelo en los relaves convencionales tras el fin de vida útil de la mina (al menos 100 años), frente a la pronta recuperación de los almacenamientos de relaves espesados y filtrados (Doka, 2008). Martin et al., 2005 mostraron que para relaves con 75% en peso de sólidos, el volumen de almacenamiento requerido es de 2,2 a 3,7 veces menor que para los relaves tradicionales.

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 se vuelvan más estrictas 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), aunque, como se verá posteriormente, todo depende de la métrica utilizada.

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. En 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.

En lugares como Chile, el precio futuro del cobre y el crecimiento de las actividades mineras que lo producen está fuertemente comprometido por el agua. Extraer el metal exige enormes volúmenes para controlar el polvo y separar el cobre de la tierra pero la sequía que atraviesa el país, 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. Algunas minas han reducido en 18.000t su producción anual por este hecho (Minería Chilena, 2015).

En lugares áridos o en épocas de sequía, la minería reduce el nivel local e incluso regional del agua. Pueden causar la sequía de los afluentes y reducir el nivel del agua en acuíferos o pozos cercanos. Además, esta reducción del nivel del agua afecta a especies animales y vegetales, privándoles o reduciéndoles su acceso al agua.

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. Las infraestructuras y equipos que forman parte de las operaciones mineras y del procesamiento producen residuos contaminantes 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, y 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 acumulada en la superficie suele tener altas concentraciones de sulfuros, 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 presentan elevadas concentraciones de sustancias químicas que deben ser tratadas y gestionadas eficazmente para evitar la contaminación del medio ambiente. En el pasado los relaves, generalmente eran vertidos al mar, ríos o canales, con notables efectos sobre el medio ambiente cuando contenían altas



concentraciones de sustancias contaminantes. Actualmente se almacenan en depósitos sellados que aunque son bastante seguros, son susceptibles de filtraciones que provoquen contaminación del agua y, en consecuencia, 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, para prevenir deterioros y consecuentemente filtraciones que provoquen contaminación. Este hecho ataca a la sostenibilidad económica lo que afectará a la sostenibilidad en su conjunto como se mencionó al principio.

2.3 ALMACENAMIENTO DE RELAVES

Uno de los principales problemas mineros es la gran cantidad de residuos generados que requieren ser almacenados, lo que algunos autores señalan como 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. Las normas medioambientales son cada vez más restrictivas estableciendo limitaciones a los tratamientos aplicados. 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.

El problema es aún mayor en países con actividad tectónica, donde los tanques o depósitos de relaves deben ser construidos llevando a cabo un estudio detallado y el mantenimiento debe ser más estricto (Moran, 2001).

La opción más evidente para reducir estos impactos sería 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 hacia el relleno y valorización de residuos (Kulczycka, 2008).

Existen autores que realizan un enfoque numérico para el análisis de prefactibilidad de las opciones de eliminación de relaves teniendo en cuenta doce métodos de gestión, con el objetivo de seleccionar el mejor para evitar cualquier riesgo de daño. Para conseguir esto, es necesario analizar cualquier ubicación, operación y propiedades de relaves (Kizil and Muller, 2011).

Por otra parte, otros autores que presentan y evalúan distintas formas de almacenamiento con el fin de ahorrar agua y tierra vegetal o simplemente para evitar fugas y contaminación del agua (Gunson et al., 2012) (Reid et al., 2009). En cualquier caso, las justificaciones de una u otra aproximación son débiles por cuanto no se basan



en comparativas con indicadores que demuestren que globalmente una u otra solución es más interesante.

2.4 EMISIONES AL AIRE

Las actividades mineras y la construcción de infraestructuras ligadas a ellas producen contaminantes que son transportados por medio aéreo, especialmente en las etapas de exploración, desarrollo y operación o explotación (Oyarzun et al., 2011).

Las principales fuentes de contaminación son las emisiones gaseosas y de vapores tóxicos procedentes de la quema de combustibles, el dióxido de azufre resultante de tratamientos de metales, dióxido de carbono, metano y las partículas originadas en la excavación, voladura, transporte de material... Las partículas de polvo con mayor riesgo para la salud que son transportadas por el viento son aquellas que contienen radionucleídos, arsénico o plomo (ELAW, 2010).

Entre los diferentes impactos, destacan los siguientes (Moran, 2001):

- *Esmog*, neblina que provoca un impacto sobre la economía, principalmente por el declive del turismo.
- Difusión de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático, a la formación de la lluvia ácida y también a la formación de ozono troposférico que provoca daños en los pulmones y el sistema respiratorio.
- Presencia de sustancias ácidas en la atmósfera que corroen estructuras metálicas generando impactos sobre edificios, automóviles, ropa, vegetación y cultivos.
- Daños sobre la salud de personas y animales, tanto directa (enfermedades respiratorias, alergias...) como indirectamente (consumo de animales o cultivos contaminados).

No obstante, no se considera que las emisiones aéreas sean un problema especialmente relevante en este tipo de actividades.

2.5 IMPACTOS MINEROS SOBRE LA SOCIEDAD.

En el momento en el que comienza un proyecto minero, se inicia un aumento de la actividad económica en esa zona, tanto de la propia actividad minera como de nuevas empresas que asisten en diversas tareas al proyecto (Carrere, R., 2004). Además, en las zonas cercanas a donde se desarrolla la actividad minera se produce un aumento de población por la llegada de trabajadores de la mina y sus familias a la zona (ELAW, 2010), pero a pesar del desarrollo económico y social, existen ciertos impactos negativos:

- Desposesiones de propiedades a grupos indígenas o personas locales.
- Incremento del tráfico aumentando las posibilidades de accidentes.
- Aumento del costo de conservación y mantenimiento de la red de carreteras y de los costos del agua.
- Impacto sobre el turismo de la zona.
- Impactos en los medios de subsistencia.



- Desplazamiento humano y re-ubicación.
- Impactos de la migración de personas.
- Pérdidas de acceso al agua limpia.
- Impactos en los medios de subsistencia.
- Impactos sobre la salud pública.
- Impactos sobre los recursos estéticos y culturales.

Una de las razones de que se produzcan impactos sobre la salud pública 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.

2.6. ACCIDENTES Y FALLOS

Otro aspecto muy negativo de las actividades mineras y específicamente de los relaves son los graves accidentes que se han producido a lo largo de la historia y que, desafortunadamente, aún hoy siguen ocurriendo. Por lo tanto, este es un aspecto que no puede dejarse de lado cuando se trata de seleccionar la tecnología más sostenible de gestión de residuos en el sector.

Dado que este tipo de accidentes son debidos a roturas de presas como consecuencia de movimientos de origen plástico o hidráulico, las tecnologías de espesado de relaves han surgido en los últimos años como una técnica prometedora para evitarlos. Debido a su bajo contenido de agua, el potencial de licuefacción se reduce drásticamente en comparación con las presas convencionales, a lo cual se unen las ventajas adicionales de reducción de volumen y ausencia de agua de sangrado.

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 de 2 a 5 incidentes anuales por fallos en presas de magnitud relevante (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 se deben a motivos diversos. A modo de ejemplo, mencionar el caso de la mina de Ok Tedi en Nueva Guinea, que constituye uno de los ejemplos de falta de estudio de impacto ambiental (EIA) y de negligencia gubernamental y empresarial. La mina se encuentra en una región de alta precipitación y alta actividad sísmica. 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 efluentes líquidos. Los problemas de contaminación derivados de la 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).





3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO, DEPOSICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE RELAVES MINEROS.

3.1 INTRODUCCIÓN

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 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 almacén o balsa de relaves (Engels, J., 2017a).

El agotamiento de los recursos con la consecuente reducción de leyes supone un aumento constante en la producción de residuos, reto que la industria minera debe afrontar. 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 del suelo, su estabilidad física y el impacto en el sistema hidrológico son relevantes para obtener la aprobación del entorno para operar.

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).

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. La eficiencia en el 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.

3.2 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.
- 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.- **Relaves:** son una mezcla de agua y roca finamente molida que se obtiene tras retirar el concentrado mineral (ganga).

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):

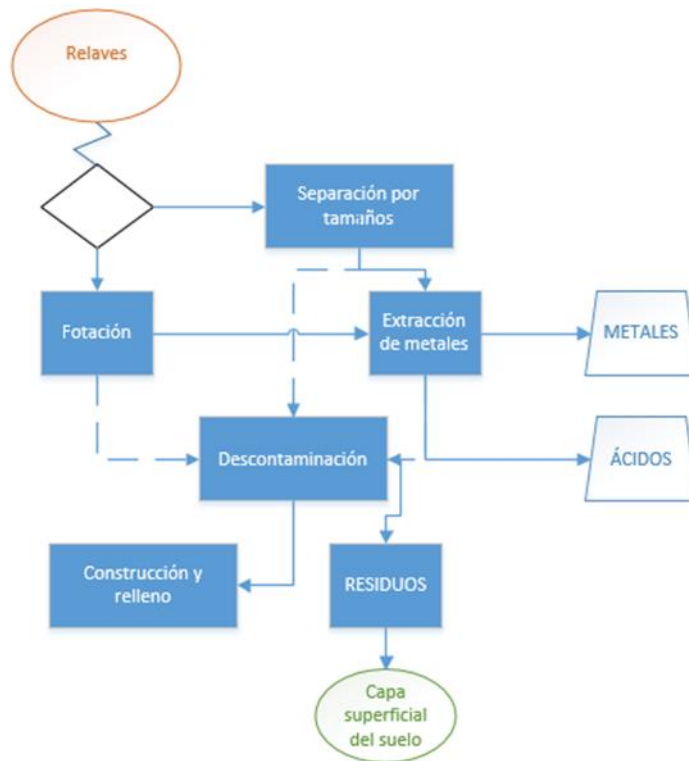


Figura 1: Diagrama de flujo generalizado para reciclaje de relaves, adaptado de (Edraki et al., 2014)

3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS RELAVES

Las características de los relaves son muy variables y dependen de la mineralogía del yacimiento junto con los procesos físicos y químicos utilizados para extraer el producto. Dado que es un proceso de formación natural y necesariamente anisótropo, incluso los relaves del mismo tipo pueden poseer una mineralogía diferente y por lo tanto tendrán diferentes características físicas y químicas (Ritcey, 1989). 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 técnicas 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 como los ángulos de pendiente de la playa, la segregación del tamaño de las partículas y la recuperación de agua.

Una vez que se determinan los posibles parámetros específicos del sitio (por ejemplo, los requisitos ambientales, sociales, geotécnicos, costes, etc), las características de los relaves y su comportamiento al depositarse, puede comenzarse el proceso de selección del método de almacenamiento adecuado.

3.4 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 en su mínimo grado las regulaciones y los factores específicos del lugar (Engels, J., 2017a).

3.4.1 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 del material (Ritcey, 1989). 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.

Los tres tipos principales de disposición para los embalses de lodos según Vick, 1990 y Norman and Raforth, 1998 son:



- 1.- Diques de anillo (*paddocks* o celdas)
- 2.- Embalses del valle
- 3.- En pozo

1.1.1.1 Diques en anillo

La configuración de dique de anillo (también conocido como *paddock* o celda) no depende de depresiones topográficas por lo que es flexible en cuanto a la selección de ubicación y generalmente puede situarse relativamente cerca de la planta de procesamiento (Ritcey, 1989).

Los terraplenes requieren grandes volúmenes de material para su construcción y su tamaño está relacionado con el volumen de almacenamiento producido. La diferencia fundamental con otros tipos de depósitos es la necesidad de cubrir con terraplenes todo el perímetro, lo que se traduce en ese aumento significativo de materiales. Su principal ventaja es que la escorrentía superficial no puede acceder el área de almacenamiento (EPA, 1994), por lo que el agua interior debe ser enteramente de proceso o precipitación interior.



Figura 2: Configuración de dique de anillo (disposición en tres celdas) en Kalgoorlie Consolidated Gold Mines, Australia Occidental

1.1.1.2 Embalse en valle

Normalmente se utiliza la topografía natural para la construcción de almacenamientos de relaves mineros (EC, 2004). El diseño en valle es similar al de un embalse 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 para minimizar la ocupación de aguas superficiales. Las zanjas de desviación, los vertederos o las presas de agua arriba son esenciales para desviar y/o capturar los flujos máximos de las inundaciones.



Figura 3: Vertedero de relaves de Cross Valley en Highland Valley Copper, BC, Canadá (Cortesía de Teck)

1.1.1.3 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).

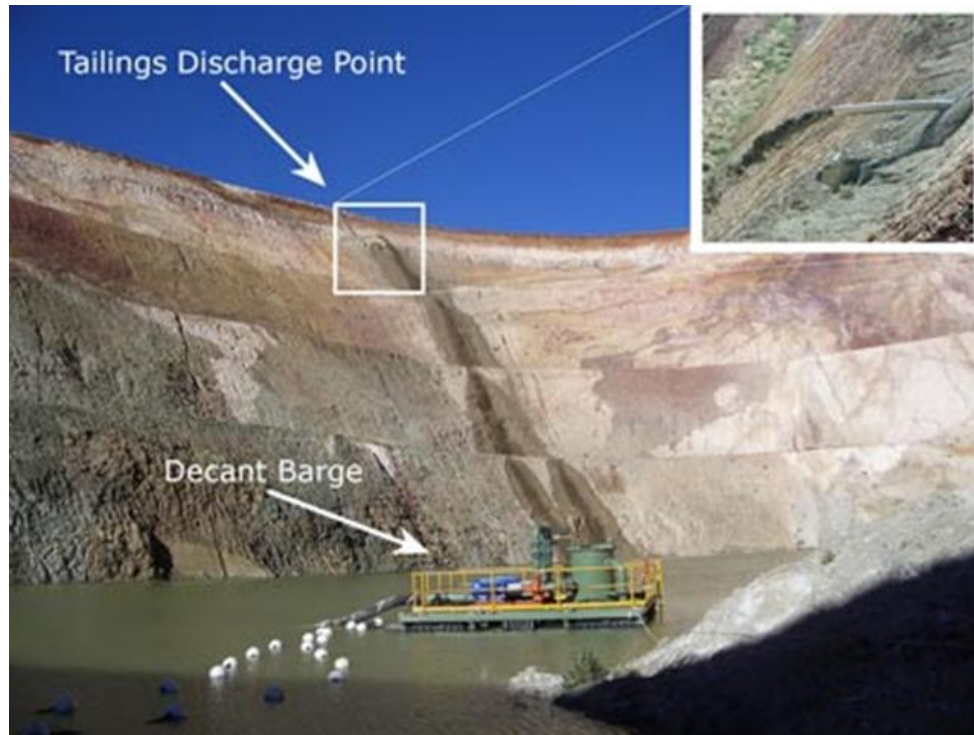


Figura 4: Almacenamiento en pozo

3.4.2 Relaves como relleno de trabajos subterráneos

Los relaves se pueden almacenar por debajo de la tierra en huecos elaborados previamente. Para ello se mezclan 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**, similar a la deposición superficial. Los relaves se deshidratan hasta obtener una composición de un 65% de sólidos (en peso) y se bombean al subsuelo, mediante bombas de desplazamiento positivo.
2. **El relleno hidráulico de arena** se utiliza cuando los relaves han sido ciclonados para producir limos y fracciones de arena separados. Los lodos, con pobre permeabilidad, se almacenan en superficie. Las arenas son bombeadas hidráulicamente por el subsuelo a 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. Es aplicablesólo cuando se requieren volúmenes bajos de cemento 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.



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

Tradicionalmente se realizó la descarga de relaves a ríos, lagos y mares. La eliminación submarina de relaves (STD) es quizás la técnica más común de eliminación en alta mar e implica la descarga de los relaves en aguas profundas (Moore, P. et al., 2002). En general se utiliza cuando las alternativas terrestres no son posibles debido al terreno, alta actividad sísmica, alta precipitación y disponibilidad de suelo (Coumans, C., 2002). Las STD se practican en muchas minas del Pacífico Occidental donde estos factores están presentes y el terreno escarpado e inestable crea altos riesgos para el desarrollo de estructuras de retención convencionales.



Figura 5: 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.

3.5 MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN

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.

3.5.1 Aguas arriba

El método ascendente es el de coste inicial más bajo y el diseño más popular para un talud elevado de relaves en áreas con 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 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).

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.

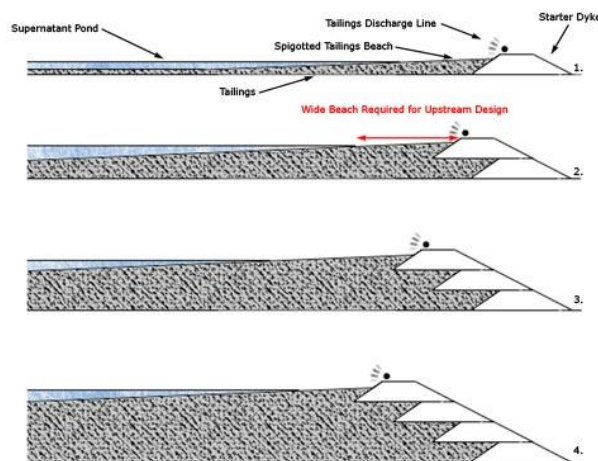


Figura 6: Método aguas arriba de construcción de terraplenes (@ Jon Engels)

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).

3.5.2 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 por 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, lo que redundaría en el bombeo de más agua a la instalación de relaves.

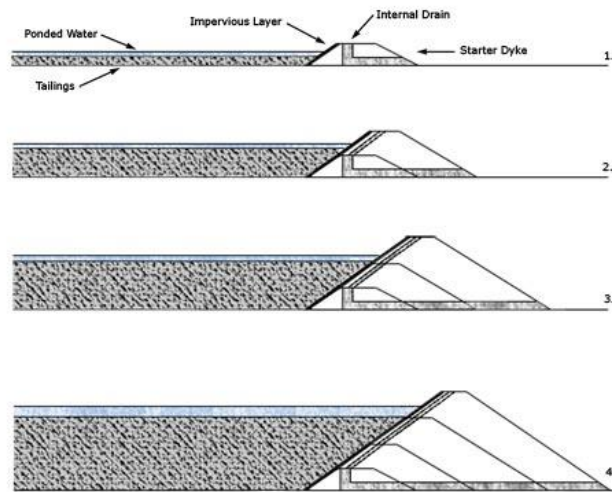


Figura 7: Método de construcción de terraplenes aguas abajo

El diseño aguas abajo es muy versátil 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, puesto que se requieren grandes volúmenes de relleno, que aumentan exponencialmente a medida que aumenta la altura del terraplén. Además se necesita un área grande alrededor de la presa y el pie de presa se desplaza a medida que se aumentan los depósitos, pudiendo causar problemas donde no se ha tenido en cuenta el espacio limitado antes de la construcción, o si la línea de propiedad o las instalaciones son cercanas. 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).

3.5.3 Línea central

El método de la línea central es 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 sobre 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 ahí el término, diseño de línea central.

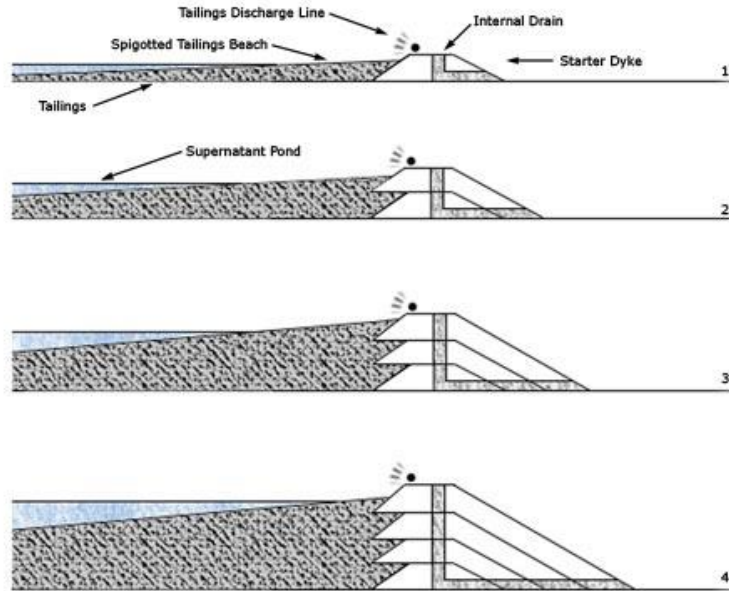


Figura 8: Método de construcción de terraplenes de línea central

El diseño incorpora las zonas internas de drenaje similares al método aguas abajo. Por lo tanto, el agua libre puede ocupar zonas cercanas a la cresta de la presa 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 se apoyan parcialmente sobre relaves consolidados.

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).

3.5.4 Línea central modificada

La línea central modificada es un intermedia 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 los análisis de estabilidad y filtración.

3.6 MÉTODOS DE DEPOSICIÓN DE RELAVES

A lo largo de toda la vida útil de la explotación se irán produciendo residuos que deberán acumularse. En general, en los métodos tradicionales, el depósito será en balsas en las que 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 concluye 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. Un espesamiento adicional da como resultado 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.

3.6.1 Tipos de deposición según el punto de descarga

En función de la ubicación del punto de descarga se distinguen dos tipos

1.- Descarga subaérea

Consiste en la deposición de los relaves, húmedos o espesados, en un depósito de contención de superficie. 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 segregan (DME, 1999). La deposición subaérea se practica generalmente en instalaciones con 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 9: Descarga subaérea de relaves (izquierda) y corrientes trenzadas poco profundas de baja velocidad en una playa de relaves (derecha) (Jon Engels)

2.- Descarga subacuática



La deposición subacuática es particularmente adecuada para relaves que contienen sulfuros que son propensos a oxidarse, movilizar metales y producir ácido (Tremblay, 1998). Al 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. No obstante, aunque la deposición de relaves a cuerpos de agua naturales es atractiva, las consecuencias ambientales reales pueden ser enormes.



Figura 10: Deposición subacuosa de relaves convencionales (Fuente: Jon Engels)

3.6.2 Tipos de descarga según el número de puntos de descarga

1.- “Spigots” o varios puntos

La descarga a través de varios caños consiste en verter a través de un conjunto de chorros o drenajes alrededor del perímetro del depósito para formar capas de relaves (U.S. Environmental Protection Agency, 1994). Es el más utilizado porque permite secar antes de la estratificación, distribuir los relaves de manera más uniforme, controlar el espesor de las capas y evitar posibles desbordamientos.

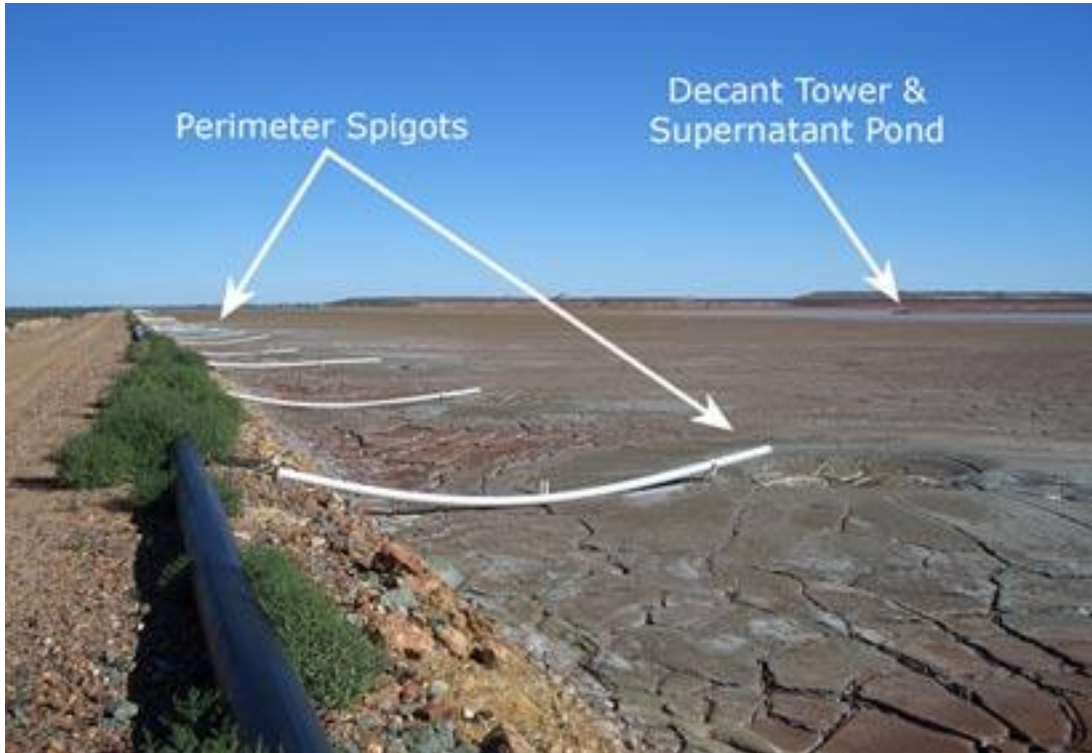


Figura 11: Varios puntos de descarga en la mina de oro de Jundee, Australia (Jon Engels)

2.- Punto único

La descarga en un solo punto requiere un movimiento irregular de las líneas de descarga. El líquido sobrenadante se mantiene en una zona restringida 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 del muro (EPA, 1994).



Figura 12: Punto único de descarga en la mina de Glebe, Inglaterra (Fuente: 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).

En general, para relaves convencionales se utiliza descarga en 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).

3.7 TIPOS DE RELAVES

Como se mencionó anteriormente desde hace años se ha planteado la necesidad de realizar acciones que disminuyan los impactos y riesgos derivados de los residuos mineros. Una de las acciones más habituales es la extracción de agua obteniendo texturas distintas. El espesamiento total o parcial 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 (Australian Government, 2016).

En función del porcentaje en peso de sólidos que conténganse distinguen:

- Relaves convencionales:



- Relaves espesados
- Paste
- Relaves filtrados

Estos niveles de espesamiento suponen cambios tanto en la morfología de los vertederos como en los métodos de transporte.

3.7.1 Disposición de residuos convencionales

Como material de desecho, los relaves fluidos 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 (Bóhm et al., 2005).

La instalación de almacenamiento de relaves se encuentra en un hueco o valle natural, tal como se indicó en el apartado anterior, retenido por un terraplén de relaves o una barrera de roca y otros materiales naturales (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 y energético de un proyecto minero. Esta liberación depende de sus propiedades físicas (Engels, J., 2017b).

Las instalaciones de relaves se van construyen al ritmo de la producción de residuos. Normalmente la construcción tarda décadas en terminarse. Las instalaciones de relaves deben almacenar residuos en su interior durante periodos geológicos. Por tanto, se debe garantizar la fiabilidad de toda la construcción y un impacto compatible con el medio ambiente durante la rehabilitación a largo plazo (Witt and Schönhardt, 2004).

3.7.2 Disposición de relaves espesados

El consumo excesivo de agua durante el proceso de flotación provocó el desarrollo 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, minimizando el volumen, resultando en una mayor capacidad del estanque (Luiña, R. et al., 2012).

El proceso de espesamiento tiene cuatro etapas. La primera etapa se refiere al transporte de residuos de la planta de tratamiento al espesador. Una vez en este 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 superior al 35%, alcanzando niveles de producción de 70%. Después del tiempo de residencia, los rellenos espesados se descargan a través del fondo y el agua limpia se extrae de la parte superior (Wesh Tech Engineering, Inc., 2011) que se recicla a la planta de tratamiento, logrando una producción más sostenible.



Figura 13: Espesador de alta densidad de relaves (Paste Thick Associates, 2013)

La tercera etapa es el bombeo de relaves espesados. 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).

Por último, se produce el vertido de líquido en función del tipo de balsa que depende a su vez 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 14: 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.

Pero también existen algunas desventajas de los relaves de paste, que afectan a la aplicabilidad de este método (Engels, J., 2017c):

- Normalmente se requieren bombas de desplazamiento positivo costosas para su descarga, aunque en ocasiones es suficiente con bombas centrífugas 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 requerida. El proceso requiere mantener alturas de lecho consistentes. 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 de mantenimiento,
- Los métodos de almacenamiento espesado y convencional de alta velocidad son más probados en comparación con los de paste.

El almacenamiento de relaves espesados tiene muchas ventajas en comparación con las instalaciones convencionales: reduce los riesgos de los desastres ecológicos y se ha probado con éxito en muchas minas, pero también tiene muchas desventajas como el alto coste operativo, requiere un alto nivel de infraestructuras tecnológicas y está relativamente poco probada en comparación con otros métodos de eliminación de relaves superficiales (Engels, J., 2017c).

3.7.3 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). Se produce un depósito estable que, generalmente, no requiere un sistema de retención y se denomina "pila seca".

El filtrado emplea una combinación de cintas, tambores, placas de presión apiladas horizontal y vertical y sistemas de filtración al vacío para conseguir un contenido de humedad típico de menos del 20% (Davies and Martin, 2002a).



Figura 15: Apilamiento en seco de relaves mediante cinta transportadora en La Coipa, Chile

(Fuente: Anglo American/Debswana)

Al igual que con los relaves espesados y de paste, el proceso de deshidratación mecánica La producción de torta húmeda y seca mediante procesos de deshidratación mecánica aumenta los costes en comparación con la deposición de lechada convencional e incluso con el espesado, especialmente si se requieren altos rendimientos. Sin embargo, presenta algunas ventajas:

- Puede utilizarse en áreas donde la conservación del agua es crítica y cualquier ausencia 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.
- Es adecuado para áreas de alta actividad sísmica, ya que se evita la construcción de terraplenes de retención.
- Es adecuado cuando hay poco material 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 alturas debido al alto estado denso de los relaves colocados frente a los relaves depositados convencionalmente. El acceso de las máquinas para la extensión y compactación resulta más sencillo.
- En climas fríos, el apilado en seco previene la congelación de tuberías y los problemas de escarchado de las balsas convencionales.
- La contaminación del agua subterránea por filtración es prácticamente nula.
- 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 sociales (Davies and Rice, 2001).



Figura 16: Apilamiento de relaves en seco utilizando transporte mediante camión (Fuente: 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 tecnología de filtración (energía, mantenimiento) hacen que otras opciones sean más económicas.
- 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 no es posible.
- Requiere sistemas de gestión de aguas para evitar la inundación y la acumulación de aguas superficiales.
- No permite su funcionamiento como pulmón de agua, como se hace en ocasiones con las balsas.
- 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.
- En climas áridos la generación de polvo es un problema común y puede ocurrir con relativa rapidez de la deposición de los relaves debido al bajo contenido de humedad del material colocado.

No obstante, los costes asociados a los sistemas de filtración de relaves han disminuido rápidamente en los últimos 5 años, principalmente por el aumento de la capacidad de los sistemas de filtración y la optimización operativa.

3.7.4 Co-deposición

La co-deposición 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 rápido a la zona para su 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 puede reducir significativamente la generación de ácido asociado con los residuos 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 química, reduciendo así la oxidación y el potencial de AMD (Davies and Martin, 2002b).

La principal desventaja de la co-deposición 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 rentable si las dos alimentaciones pueden ser bombeadas juntas o mezcladas (DPI, 2003).

Aunque el término general de 'co-disposición' se refiere a la mezcla de los flujos de residuos finos y gruesos, se utilizan terminologías específicas en función del punto donde se produce la mezcla:

- **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 sin mezclarse formando 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 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.

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.

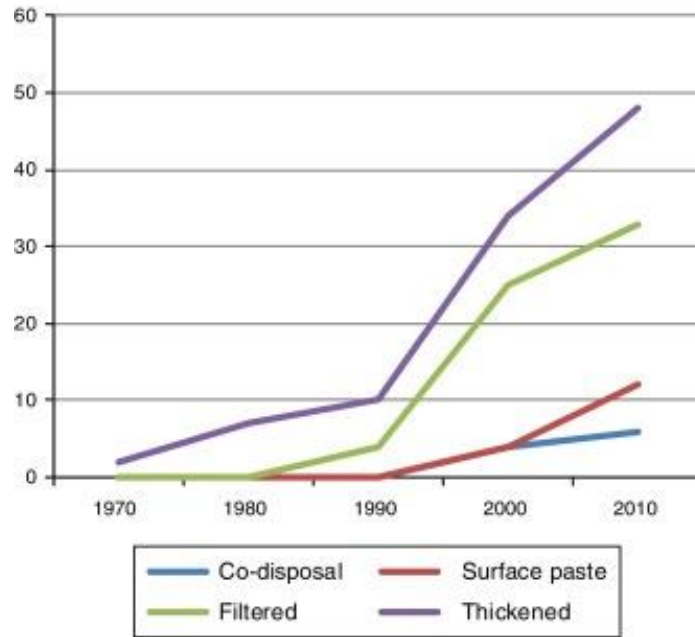


Figura 17: Tendencias en el uso de relaves deshidratados en la minería (Davies, 2011)

3.8 TÉCNICAS DE TRANSPORTE.

Los residuos son transportados a su lugar de almacenamiento por varios medios. 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 el Gobierno Australiano, los transportes utilizados en la actualidad dependiendo de las propiedades de los relaves son los siguientes:

3.8.1 Lodos

- **Sistemas de tuberías bombeadas:** Transporte por tuberías mediante sistemas de bombeo centrífugos o de desplazamiento positivo.
- **Sistema de tubería de presión por gravedad:** 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 para evitar altas velocidades de flujo y el posterior desgaste en el sistema de tuberías.
- **Canal (launder):** Sistema abierto donde los residuos fluyen gravitacionalmente 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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (Australian Government, 2016).

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

3.8.2 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 18: 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 19: Tipos de relaves y sus transportes (adaptado de Davies and Rice (2004)).



4. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD

A la vista de que el almacenamiento de residuos mineros es uno de los principales impactos de la actividad minera, es necesario encontrar criterio de decisión que permita evaluar si las mejoras introducidas son realmente la mejor opción.

El concepto más interesante y extendido en este campo es la herramienta de Análisis del Ciclo de Vida que incorpora la consideración de todas las etapas involucradas, desde la obtención de las materias primas hasta la disposición final del producto o el desmantelamiento de la instalación. No obstante, el ACV no incluye la posibilidad de que ocurra un accidente y, por lo tanto, no contabiliza el impacto de las posibles consecuencias. Debido a las grandes catástrofes que han acontecido como consecuencia de fallos en el almacenamiento de residuos, es necesario combinar los análisis de sostenibilidad de los residuos mineros con una metodología de evaluación de riesgos.

4.1 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que se utiliza para evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o actividad particular con una filosofía conocida como "de la cuna a la tumba" al tener en cuenta las implicaciones ambientales de la cadena de suministro a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.

De acuerdo con la norma *UNE-EN-ISO 14040: 2006 Gestión medioambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco*, el ACV se define como "la recopilación y evaluación de insumos, productos e impactos potenciales del sistema de un producto a lo largo de su ciclo de vida" (ISO, 2006). Por lo tanto, un ACV analiza tanto la extracción de materias primas como la producción, transporte, distribución, uso, reciclado y disposición final del producto generado (Vargas, 2008).



Figura 20: Ciclo de vida (Fuente: RENOVGAL)

La metodología de Evaluación del ACV permite determinar las partes de la cadena de suministro que presentan los impactos ambientales más significativos y encontrar las oportunidades de mejora.

Por su parte, la norma ISO 14040 lo define como "una técnica para evaluar los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto, proceso o servicio mediante:

- La compilación de un inventario de insumos relevantes de energía y materiales y liberaciones ambientales.
- La evaluación de los posibles impactos ambientales asociados con los consumos y liberaciones identificados;
- La interpretación de los resultados con objeto de permitir una toma de decisiones más informada (ISO, 2006).

4.1.1 Norma ISO 14040: 2006

La norma *ISO 14040:2006 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia* sienta las bases para la realización de este tipo de estudios.

Para describir las etapas de un ACV, la ISO 14040 propone el esquema mostrado en la figura siguiente:

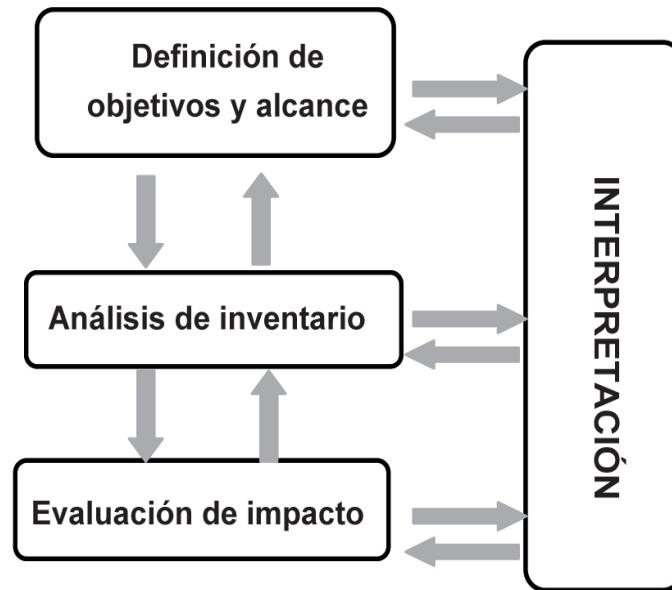


Figura 21: Etapas en la realización de un ACV (Luiña,2013)

1.- Definición del objetivo y alcance

Esta etapa inicial, aunque revisable, tiene por objeto definir detalladamente el campo de aplicación en el que se realiza el análisis, así como describir y justificar las elecciones que el analista toma a lo largo del estudio. Generalmente incluye:

- Justificación y motivación del estudio.
- Definición del ciclo de vida para la obtención del bien o servicio y función que cumple.
- Definición de la base de comparación (unidad funcional).
- Calidad requerida de los datos.
- Audiencia a la que se dirige el estudio.

En esta fase, además, se fijan los límites del estudio definiendo con claridad qué partes del proceso son tomadas en cuenta en el análisis, y cuáles se quedan fuera, justificando detalladamente dichas decisiones.

2.- Definición de la unidad funcional

Según la ISO 14040, se define la unidad funcional como *“la cuantificación de la función de un sistema del producto, servicio o actividad, que se utiliza como unidad de referencia en el estudio de ACV”*. También, se define sistema en esta norma como el *“conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones definidas”*.

La unidad funcional es pues, aquella entidad a la que se refieren todas las entradas y salidas del sistema.



3.- Asignación de impactos

Dado que los ACVs modelizan procesos complejos, habitualmente las actividades analizadas no dan lugar a un solo producto, sino que se obtienen otros secundarios que pueden ser valorizados, conocidos como sub-productos, que difieren de los residuos en que éstos últimos no aportan ningún tipo de valor.

Dado que para estos casos se produce más de un bien o servicio, se debe decidir en qué proporción se distribuyen los impactos ambientales para cada producto o sub-producto generado. Esta distribución, conocida como asignación, puede realizarse siguiendo varios métodos, aunque la norma ISO establece la siguiente jerarquía a la hora de emplearlos:

- a. La asignación se debe evitar en la medida de lo posible. Preferentemente, se emplearán las siguientes técnicas alternativas:
 - i. La división del proceso de dos o más subprocesos a los que se refieran las entradas y las salidas.
 - ii. La extensión de los límites del sistema mediante su ampliación hasta contener las funciones de los co-productos.
- b. En caso de que la asignación sea inevitable, ésta se debe llevar a cabo preferentemente de forma que refleje las relaciones físicas existentes entre los co-productos y el producto principal. A tal efecto se pueden emplear magnitudes físicas como masa, volumen, energía, exergía, número de unidades, composición química o proteínas.
- c. Si no es posible concretar una relación física, entonces la asignación puede realizarse en base al valor económico de cada producto/co-producto.

4.- Análisis de inventario

Esta fase es la más intensiva en tiempo y esfuerzo del análisis, al consistir en la recolección de los datos de entradas y salidas de cada proceso del sistema, así como en la cuantificación de los consumos de energía y materias primas, las emisiones a la atmósfera y los cursos acuáticos, así como los residuos sólidos y cualquier otro vertido. En esta fase se exige realizar una definición detallada del sistema en estudio y una normalización de los datos, de forma que queden expresados en referencia a la unidad funcional.

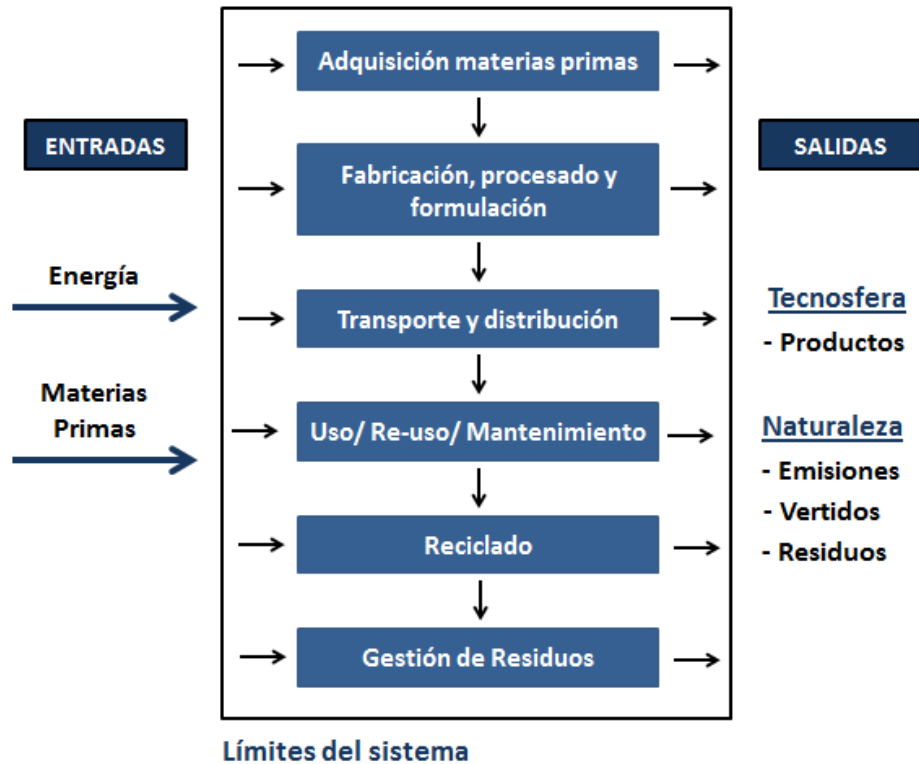


Figura 22: Diagrama de flujo del inventario del ciclo de vida (Luiña, 2013)

5.- Evaluación del impacto

En esta fase se caracterizan y analizan las cargas ambientales identificadas en el inventario con el objetivo de dotar de mayor relevancia a la información ambiental generada (Tillman and Baumann, 2004).

Esta fase se compone de tres pasos obligatorios según la ISO 14040/44:

- Selección de las categorías relevantes de impacto, indicadores y caracterización de modelos.
- Asignación de los resultados de impacto (clasificación)
- Cálculo de los resultados de los indicadores escogidos (caracterización)

Opcionalmente, se incluyen los siguientes dos pasos:

- **Normalización.** Se divide el indicador en cada categoría por un valor de referencia con objeto de mostrar la importancia relativa de cada indicador de categoría.
- **Ponderación.** Se establecen factores de ponderación que conceden importancia relativa a las distintas categorías de impacto para sumarlas y obtener un único índice total. Este paso está cargado de una gran componente de subjetividad por lo que la norma no permite su empleo en declaraciones públicas de impacto comparativas.



4.1.2 Metodologías de Evaluación de Impacto

Una vez evaluado, el impacto ambiental se expresa en forma de un conjunto de indicadores teniendo generalmente en cuenta tres áreas de protección:

- Salud humana
- Medio ambiente
- Uso de recursos naturales

Los impactos, a su vez, se agrupan en Categorías de Impacto, que son clases que representan asuntos ambientales de interés, tales como Cambio Climático, Toxicidad Humana o Reducción de la capa de Ozono.

Los indicadores se desarrollan siguiendo dos enfoques:

- Los orientados al problema (*Midpoints*)
- Los orientados al daño final (*Endpoints*)

Los *midpoints* están directamente relacionados con el mecanismo ambiental que los genera y el parámetro recogido en el inventario. Los *endpoints*, en cambio, describen la consecuencia final de dicho mecanismo y se calculan generalmente a partir de los *midpoints*, por lo que presentan una mayor carga de subjetividad y por lo tanto llevan asociadas mayores incertidumbres. Por contraposición, al estar éstos orientados al daño, son más fáciles de interpretar por parte de audiencias no expertas.

Actualmente existen varias metodologías de evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) que emplean criterios y procedimientos diferentes para el cálculo de los indicadores. La ISO 14040 no exige la utilización de ninguna metodología de EICV concreta siempre y cuando se fundamenten en mecanismos debidamente documentados y avalados por la comunidad científica.

De entre todos los métodos que existen en la actualidad, cuatro son los más comúnmente empleados.

- 1.- **Eco-Indicador 99.** Este método se origina a partir de uno anterior llamado Eco-Indicador 95. Es de tipo *endpoint* (orientado al daño) y proporciona 3 indicadores:
 - Daño sobre la salud humana
 - Daño a la calidad del ecosistema
 - Uso de recursos
- 2.- **CML 2001.** Este sistema de indicadores fue diseñado en consonancia con los estándares fijados por la ISO 14040 y proporciona 18 indicadores de impacto agrupados en 4 grupos:
- 3.- **Impact 2002+.** Este sistema aplica enfoques *midpoint* y *endpoint*, de forma que proporciona 14 y 4 indicadores respectivamente (Salud Humana, Calidad de los ecosistemas, Cambio climático, Recursos).
- 4.- **ReCiPe.** Es una evolución del EI99 concebida para combinar su facilidad de interpretación del Eco-Indicador 99 con la solidez científica de los métodos CML2001.



Este método proporciona 18 categorías de impacto *midpoint*, a partir de los cuales se calculan 3 indicadores *endpoint* tal y como se muestra en la figura:

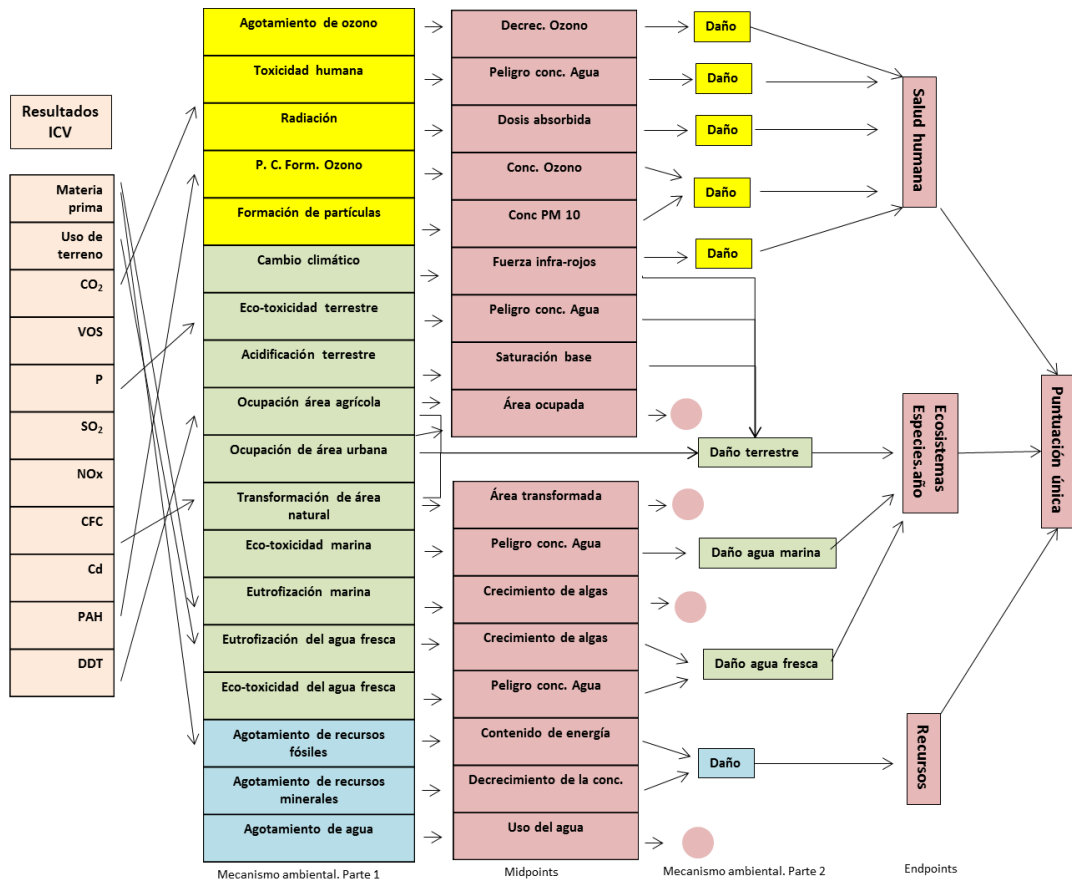


Figura 23: Relación entre los parámetros del inventario ambiental, las categorías de impacto *midpoint*, y las categorías *endpoint* de ReCiPe (ReciPe, 2009)

4.2 HUELLA HÍDRICA

Cada día, es más relevante el interés que muestran las diferentes partes implicadas en los proyectos como son gobiernos, inversores y comunidades por el desarrollo sostenible basado en el conocimiento y comprensión de los recursos hídricos y sus interacciones con la naturaleza.

El agua es un recurso natural vital para todos los ecosistemas, el bienestar humano y muchas actividades económicas. Debido a la combinación del crecimiento de la población y el desarrollo económico que conduce al aumento del uso humano de agua dulce (Vörösmarty et al., 2000) y a los efectos del cambio climático en el ciclo mundial del agua, la escasez de agua se está convirtiendo en una preocupación ambiental creciente. Aunque el agua dulce es un recurso local, la escasez de agua lleva a la amenaza de una crisis mundial del agua, con una gran proporción de la población mundial afectada (Kounina et al., 2013).

El agua dulce es un recurso precioso en nuestro planeta, es crucial para sostener la vida y no puede ser reemplazado por ninguna otra sustancia. En términos de ecosistemas, la escasez de agua puede afectar la biodiversidad, ya que las especies sensibles pueden no



ser capaces de hacer frente a la menor disponibilidad de agua dulce (Berger and Finkbeiner, 2010). En 2025 se estima que aproximadamente 1.800 millones de personas vivan en zonas de absoluta escasez de agua. Con el aumento de la población, se espera que los patrones de consumo cambiantes y las presiones adicionales ejercidas por el cambio climático tengan mayores dificultades para satisfacer la demanda de agua (Zarate and Kuiper, 2013).

4.2.1 Concepto y evolución histórica

La evaluación de la huella hídrica (HH) es una metodología que fue desarrollada por la Red Internacional de Huella Hídrica (WFN) para evaluar la apropiación humana de los recursos hídricos y su sostenibilidad. Es una herramienta analítica que permite ayudar a entender cómo gestionar las diferentes actividades y productos relacionados con la escasez y contaminación de agua y valorar lo que se puede hacer para asegurarse de que las actividades y productos no contribuyen al uso insostenible de agua dulce. Como herramienta que es, proporciona una visión sin indicar el método de actuación (Aldaya et al., 2012).

Este primer enfoque de la Huella Hídrica desarrollado por Hoekstra et al. (2009) era uno de los más utilizados hasta ahora imitando a la huella de carbono (HC). Sin embargo, en agosto de 2014, ISO publicó el nuevo estándar sobre huella hídrica (ISO, 2014), la norma ISO 14046. Esto supone un hito fundamental en la evaluación de la huella hídrica y en la evaluación de la sostenibilidad en general.

Esta norma tiene por objeto proporcionar un marco para garantizar la coherencia en la forma en que se realizan y se presentan las huellas de agua, al tiempo que refuerza la necesidad de un enfoque de ciclo de vida (Northey et al., 2014). Es una medida proactiva para que la gestión de la cadena de suministro esté un paso adelante y tenga información disponible para que estas evaluaciones se conviertan en una realidad (Dimitra Triantou, 2009).

4.2.2 Huella hídrica y ciclo de vida.

La metodología de Análisis del Ciclo de Vida, a pesar de ser la forma de evaluación de la sostenibilidad de los productos y procesos que más éxito ha tenido en los últimos años, contaba con alguna debilidad, dado que las antiguas metodologías como Ecoindicador 99 no consideraban el uso del agua. Este problema se derivó tanto de la falta de información sobre los flujos de agua en las bases de datos como de la falta de factores de caracterización para traducir estos flujos en impactos (Jeswani and Azapagic, 2011).

Esto puede explicarse por la historia del ACV, que se desarrolló en países industrializados que normalmente no sufren escasez de agua (Berger and Finkbeiner, 2010). Además, los impactos debidos al uso del agua dependen de la ubicación y el tiempo, pero el ACV utiliza valores globales.

En general, la mayoría de los estudios de ACV que informan sobre el uso del agua simplemente hablan de la entrada total sin diferenciar entre los usos de agua corriente y agua almacenada o entre agua dulce y agua de mar, la disponibilidad de agua dulce



(que varía alrededor del globo), o las cualidades que permiten diferentes usos (Berger and Finkbeiner, 2010).

La llegada de la nueva huella hídrica ha venido a compensar esta ausencia. Actualmente, hay factores de caracterización que evalúan el consumo de agua dulce considerando el efecto de los consumos de agua como los desarrollados por (i Canals et al., 2009) Motoshita et al., 2011; Pfister et al., 2017; Kounina et al., 2013; Jeswani and Azapagic, 2011.

4.2.3 Metodologías para el desarrollo de la Huella Hídrica

Dado que existe una estrecha relación entre el consumo de agua y otras cuestiones ambientales y sociales como los sistemas de uso de la tierra, el cambio climático y el cambio demográfico, es necesario evaluar el impacto del consumo de agua de forma tanto regional como global (Hoekstra, AY. et al., 2011).

Los diferentes autores han intentado abordar este problema desarrollando herramientas para medir y evaluar el uso de agua dulce. Algunas propuestas son la de *Water Footprint Network (WFN)*, Canals (i Canals et al., 2009) y Pfister et al., 2017 (*World Business Council for Sustainable Development*), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) y la Organización Internacional de Normalización (ISO).

En 2002, WFN introdujo el indicador de huella hídrica para calcular la relación entre el consumo humano y el uso del agua, así como entre el comercio mundial y la gestión de los recursos hídricos (Hoekstra and Chapagain, 2008). Este indicador es una herramienta analítica que puede ayudar a entender cómo las actividades y productos están relacionados con la escasez de agua y la contaminación y qué se puede hacer para asegurarse de que las actividades y productos no contribuyen al uso insostenible de agua dulce (Hoekstra, AY. et al., 2011).

El concepto de huella hídrica introducido por Hoekstra ha evolucionado definiéndose como un método de evaluación del agua utilizada por un producto, servicio o país (Hoekstra and Chapagain, 2008; Hoekstra et al., 2009; Water Footprint Network, 2011).

En este enfoque, la huella de agua representa la suma de toda el agua utilizada en una cadena de suministro, que comprende agua azul, verde y gris. El agua azul se define como el volumen de agua dulce extraída de ríos, lagos y acuíferos. El agua verde corresponde a la cantidad de agua de lluvia utilizada por las plantas. El agua gris representa el agua necesaria para diluir el agua descargada a las concentraciones de contaminantes de fondo (Jeswani and Azapagic, 2011).

Canals (i Canals et al., 2009) considera el uso del agua a nivel de una cuenca hidrográfica. Este método recomienda tener en cuenta en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) tanto la fuente de agua como el tipo de uso. En cuanto a la fuente, Milà I Canals et al. (2009) siguen los mismos criterios que Hoekstra, que clasifica como el agua azul y verde. El agua azul se puede dividir en flujo (río / lago), fondo (acuífero) y almacenada (fósil). El uso del agua podría ser evaporativo y no evaporativo (agua que, una vez utilizada, retorna a la



fuentes de agua dulce para ser utilizada de nuevo). Canals sugiere que el agua verde y el uso no evaporativo del agua de los ríos, los lagos y los acuíferos no tienen impactos relevantes, por lo que no es necesario tomar en cuenta en la Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida (LCIA), pero proponen considerar la relación entre el uso de la tierra y la disponibilidad de agua de lluvia, porque los cambios en el uso de la tierra implican cambios en la infiltración y la evapotranspiración.

Pfister et al., 2017 definen la huella hídrica como la suma del consumo multiplicada por la tasa de estrés hídrico local. El impacto del uso del agua se evalúa como el agotamiento físico del agua contenida en un almacén y la degradación de los sistemas de agua debido a cambios en la calidad del agua. Este método implica varias diferencias con el enfoque de (i Canals et al., 2009) que proponen una evaluación a mayor escala, a nivel de cuenca. Se considera agua azul, pero se distingue como tres categorías de uso del agua: uso del agua en la corriente, consumo de agua (donde el agua ya no está disponible en la cuenca) y degradación de la calidad del agua.

Además, el agua vertida en otra cuenca se clasifica como pérdida y las aguas residuales descargadas se tratan como una pérdida de calidad del agua (aunque no se especifica cómo).

4.2.4 Norma ISO 14046:2014

Publicada bajo el título de "Gestión ambiental - Huella hídrica - Principios, requisitos y directrices", especifica principios, requisitos y directrices relacionados con la evaluación de la huella hídrica de productos, procesos y organizaciones basados en la evaluación del ciclo de vida (ACV).

Esta norma sigue el mismo patrón que la huella de carbono, pero es mucho más compleja. El enfoque, desarrollado en la ISO, se basa en el examen de los impactos sobre el medio ambiente y la salud humana. Incluye dimensiones geográficas y temporales e identifica la cantidad de agua directa e indirecta utilizada y los cambios en la calidad del agua. El enfoque ISO enfatiza que la huella hídrica es un impacto, no un volumen. Dado que la huella hídrica es un indicador local, debe determinarse la escasez de agua regional o el estrés hídrico (VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2014)

Esta norma permite evaluar la magnitud de los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua, identificar los "hotspots" para reducirlos y facilitar la eficiencia del agua y la optimización de la gestión del agua en los productos, procesos y organizaciones. Además, los resultados de la huella de agua permiten un seguimiento a lo largo del tiempo y la aplicación de benchmarking tecnológico relacionado con el agua de proceso. Puede realizarse como una evaluación independiente o como parte de una evaluación ambiental más completa.

La norma dice que la huella hídrica es el resultado de una evaluación integral de la que se obtiene un perfil de resultados en las diferentes categorías de impacto. Las etapas incluidas son:



- **Definición del objetivo y alcance.** Definir y describir el producto, proceso o actividad. Establecer el contexto en el que se realiza la evaluación e identificar los límites y los efectos ambientales que se revisaron para la evaluación.
- **Análisis de inventario de huella hídrica.** Incluye las entradas y salidas de cada proceso unitario que forman parte del sistema a estudiar. Es necesario aclarar las discrepancias que pudieran darse en el balance del inventario a la hora de realizar el seguimiento de cada flujo elemental, el procedimiento, las cantidades, los tipos de recursos utilizados, los parámetros y / o características de la calidad del agua, las formas de uso del agua, aspectos temporales del uso del agua, emisiones al aire, agua y suelo que impactan la calidad del agua, etc.
- **Evaluación del impacto de la huella hídrica.** Viene representado por uno o más parámetros que cuantifican los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto, proceso u organización relacionados con el agua, incluyendo el resultado del indicador de huella de agua relacionados con una sola categoría de impacto o el perfil de huella de agua.
- **Interpretación.** Supone la identificación de todas las cuestiones significativas en base a los resultados obtenidos de la evaluación de la huella hídrica. Además, requiere evaluar la exhaustividad, sensibilidad y los controles de coherencia de los resultados. En este punto es necesario dejar constancia de las limitaciones encontradas a lo largo de la evaluación de la huella hídrica. Se ha de aplicar una evaluación cualitativa y/o cuantitativa de la incertidumbre y considerar un análisis de sensibilidad para proporcionar rangos de validez y significado en torno a los resultados reportados.

Sin embargo, la información sobre el uso del agua en las bases de datos sigue siendo limitada. Bases de datos como *GaBi* y *ELCD* difieren sólo la fuente de agua, mientras que *Ecoinvent 3.1* también incluye corrientes adicionales basadas en el uso del agua.

El mayor avance en este sentido se encuentra en las últimas versiones de la base de datos *Ecoinvent* y del software *SimaPro*. *Ecoinvent V.3* incorpora parte de los flujos regionalizados, mientras que *SimaPro 8* permite elegir entre los diferentes métodos de evaluación del impacto del uso del agua, tanto las categorías intermedias como finales. Sin embargo, todavía hay un largo camino por recorrer para mejorar la consistencia de los estudios con la norma 14046.

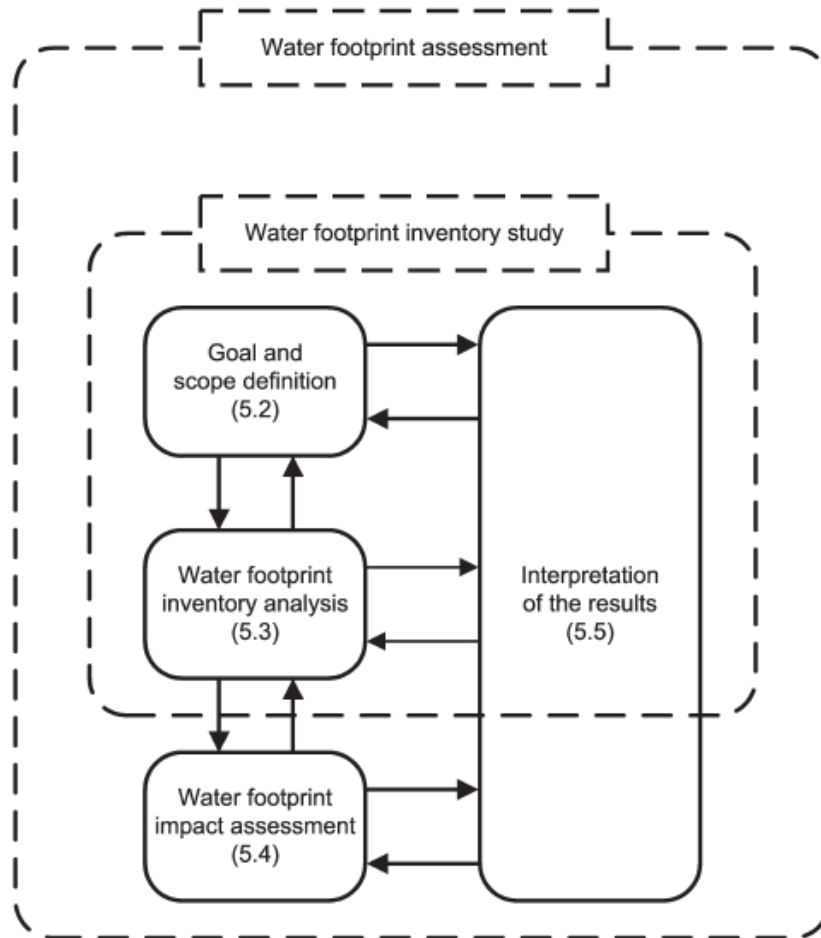


Figura 24: Fases de la evaluación de la huella de agua (ISO 2014)

4.3 HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono se ha convertido en un término ampliamente utilizado en el debate público sobre la responsabilidad y la acción de reducir la amenaza mundial como lo es el cambio climático. Su aparición pública ha ido aumentando en los últimos meses y años, tratándose ahora de una palabra de moda ampliamente utilizada por los medios de comunicación, el gobierno y el mundo de los negocios.

Se han propuesto numerosos enfoques para proporcionar estimaciones, que van desde las básicas calculadoras en línea a sofisticados análisis del ciclo de vida o herramientas y métodos basados en entradas (*inputs*) y salidas (*outputs*).

Si bien el término en sí se basa en el lenguaje de la Huella ecológica, la línea base común es que la huella de carbono representa una cierta cantidad de emisiones de gases que son relevantes para el cambio climático y se asocia con actividades humanas de producción o consumo. Pero hasta ahí llega la similitud (Wiendahl et al. 2007).

Se puede definir huella de carbono como una metodología para estimar la emisión total de los gases de efecto invernadero en el carbono equivalente de un producto a través de su ciclo de vida de la producción de materias primas utilizado desde su fabricación hasta la eliminación del producto acabado. Otras definiciones la describen como una



medida exclusiva de la cantidad total de las emisiones de dióxido de carbono que está directa o indirectamente causadas por una actividad o se acumula en las etapas de vida de un producto, incluyendo todas las emisiones directas e indirectas (Wiendahl et al. 2007). La Norma ISO 14067 la define como el parámetro utilizado para describir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a una empresa, evento, actividad o al ciclo de vida de un producto/ servicio en orden a determinar su contribución al cambio climático. Se expresa en toneladas de CO₂ equivalente.

El propósito de la huella de carbono (Tejos et al., 2008) es contribuir a:

- Reducción de emisiones de CO₂ en productos y organizaciones en el marco de la mitigación del cambio climático.
- Creación de un mercado de productos y servicios de bajo carbono que da respuesta a la demanda social actual.
- Identificar oportunidades de ahorro de costes en las organizaciones.

Las normas más relevantes para el cálculo de la huella de carbono son las siguientes:

- **PAS 2050** (BSI/DEFRA/Carbon Trust-UK). Basada en la metodología del análisis del Ciclo de Vida (norma ISO 14004 y 14044; 2006) y en la norma de ecoetiquetado (ISO 14021).
- **PAS 2060** (BSI). Especificadores para la demostración de la neutralidad del carbono en organizadores.
- **GHG Protocol**. “A Corporate Accounting and Reporting Standard”. Protocolo internacional elaborado por el WRI/WBCSD, para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero en el que posteriormente se basó la ISO 14064.
- **ISO 14064-1**. Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Especificación con orientación a nivel de las organizaciones para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero, validación y verificación.
- **ISO 14067 partes 1 y 2**. Huella de Carbono de productos (en elaboración): cálculo y comunicación. Esta norma seguirá las directrices marcadas por el borrador del estándar “Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard” elaborado por GHG Protocol.
- **ISO 14069**. Huella de Carbono de las organizaciones. Cálculo y comunicación.

4.4 ANÁLISIS DE RIESGOS

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). La norma AS/NZS 4360:2004 recomienda el siguiente proceso de evaluación de riesgos (RET, 2007):

- Establecer el contexto geográfica, 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 más utilizada para realizar este análisis es el Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE).

4.4.1 Análisis modal de fallos y efectos.

El AMFE 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), por el fallo de uno o varios de los subsistemas (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, 2009).

Este tipo de AMFE es un enfoque de sistema experto descendente 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, 2009). 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 fallo 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. 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 AMFE son una parte esencial de cualquier programa de reducción de riesgo y responsabilidad (Eng and Shaw).

De acuerdo con esas consideraciones, en este trabajo se utilizarán los siguientes valores extraídos de ENG and:

- **Etapa 1:** 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).
- **Etapa 2:** 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:** 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..**



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:** Existe 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. Según Robertson GeoConsultants Inc (Strachan and Caldwell, 2010), la clasificación por intervalo de confianza baja, media y alta suele ser adecuados y apropiados, por lo que es elegida. En los casos en que existe poca confianza en un valor de evaluación de alto riesgo, se debe 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, 2009).

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



4.4.2 Limitaciones

Considerando la enorme multitud de riesgos existentes, todo análisis de riesgos requiere centrarse exclusivamente en los más comunes e importantes bajo consideraciones de expertos.

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

La evaluación del riesgo es específica del lugar seleccionado. 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 se debe centrar en los riesgos y consideraciones más comunes, siendo necesario, para cada caso específico, un estudio de campo detallado para evaluar los riesgos de manera más completa.



5. METODOLOGÍA

El sector minero produce importantes impactos medioambientales, tanto en las explotaciones como en las plantas de tratamiento. Uno de los principales problemas es la gran cantidad de residuos generados (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 los tratamientos aplicados. Se requieren grandes extensiones y el almacenaje por largos periodos de tiempo se transforma en un problema medioambiental relevante. (Lesage et al., 2008). 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. Además, parte de las minas están en lugares con escasez de agua o con lluvias muy irregulares, lo que hace la gestión del agua muy importante.

Por otra parte, están 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 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 grandes instalaciones y 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 energía y agua.



En el caso de llegar a espesados con gran reducción en el porcentaje de agua, el consumo energético en el espesado y el movimiento de material es muy importante, por lo que es comparar esta solución con el almacenamiento para tomar las decisiones de cual es más sostenible desde el punto de vista medio-ambiental.

El espesamiento surge entonces como una opción para el tratamiento de los relaves mineros, sin embargo, los posibles beneficios medioambientales del método dependen de la instalación en la que se aplica.

La selección del mejor método de eliminación de residuos mineros proporcionará beneficios para la minería, no sólo a corto plazo sino también a largo plazo, particularmente asociados con la aceptación social para operar. Los componentes del desarrollo sostenible, incluidos el agua, la energía, el costo, la tecnología y el impacto ambiental, deberían utilizarse como referencia para determinar la estrategia apropiada de eliminación de relaves mineros para una mina (Northey et al., 2016).

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 ESCENARIOS PLANTEADOS

5.1.1 Escenario 1: Relaves convencionales.

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).

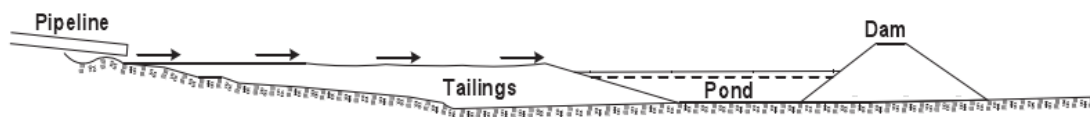


Figura 25: Depósito de relaves convencionales (Wennberg, 2010)

5.1.1.1 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 rebasamiento. El agua de retorno es bombeada de vuelta a la planta a través de tuberías (Bóhm et al., 2005).

5.1.1.2 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.

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

Los sistemas Paste Tailings consisten en un ciclo de relaves convencional con una etapa de espesamiento antes del almacenamiento. Esta etapa está hecha por 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 espeso, 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%, capaz de lograr propiedades de pasta: una pendiente conceptualmente igual al 2%, no segregación y virtualmente Sin agua (Wennberg, 2010).

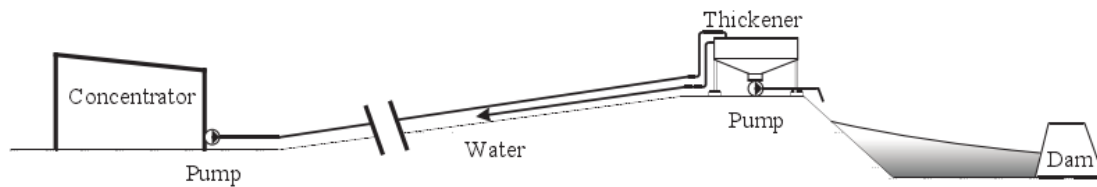


Figura 26: Descripción esquemática del proceso de relaves espesados con el espesador localizado cerca del área de deposición (Wennberg, 2010)

5.1.2.1 Espesador

Los relaves de 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 poliácridamida 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.

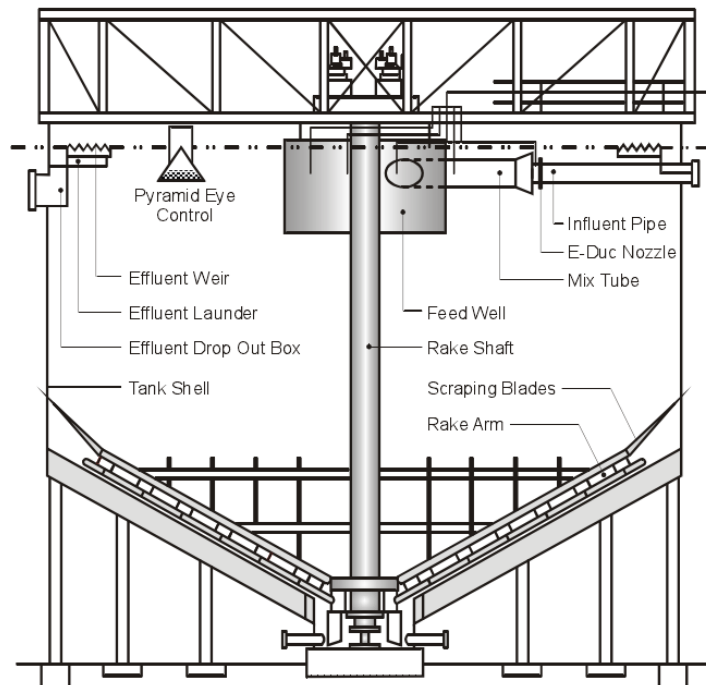


Figura 27: Espesador de alta densidad, EIMCO (Bedell et al. 2002)



Figura 28: Fluido típico de un espesador de alta densidad (Bedell et al.2002)

5.1.2.2 Transporte y bombeo por tubería

La lechada de relaves se espesa en la planta de procesamiento antes de que la pasta 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).

5.1.2.3 Presa

Las áreas de eliminación de relaves pueden consistir en valles o terreno plano 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 que encuentre 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.

5.1.3 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 a pulpa en condiciones muy controladas para preparar con precisión la pasta de consistencia correcta. El reciente desarrollo del equipo ha permitido preparar la pasta 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 la pasta de este tipo de equipo depende de las características de los relaves y se requieren ensayos (Edraki et al., 2014).

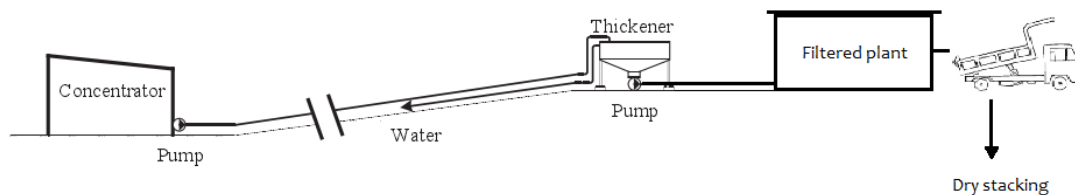


Figura 29: Descripción esquemática del sistema de filtrado de relaves mineros

5.1.3.1 Espesador

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

5.1.3.2 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.



Figura 30: Ejemplo de una planta de filtrado

La naturaleza del material de relaves es importante para considerar la filtración, no sólo la gradación de los relaves, sino también su 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).

El filtro prensa seleccionado para este escenario es de Advanced Mineral Processing.



Figura 31: 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.

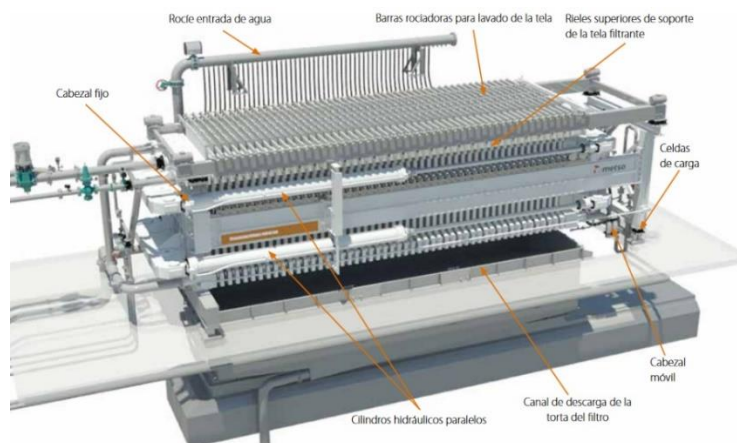


Figura 32: Partes de un filtro prensa



5.1.3.3 Transporte en camión

Los relaves se pueden llevar a un estado de tipo sólido mediante centrifugación o filtración, produciendo una consistencia que 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 33: Consistencia de los relaves filtrados (RET, 2007)

5.1.3.4 Apilamiento en seco

El verdadero apilamiento en seco requiere que los rellenos floculados sean filtrados, usualmente bajo presión o 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 espesado y/o pasta.

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.

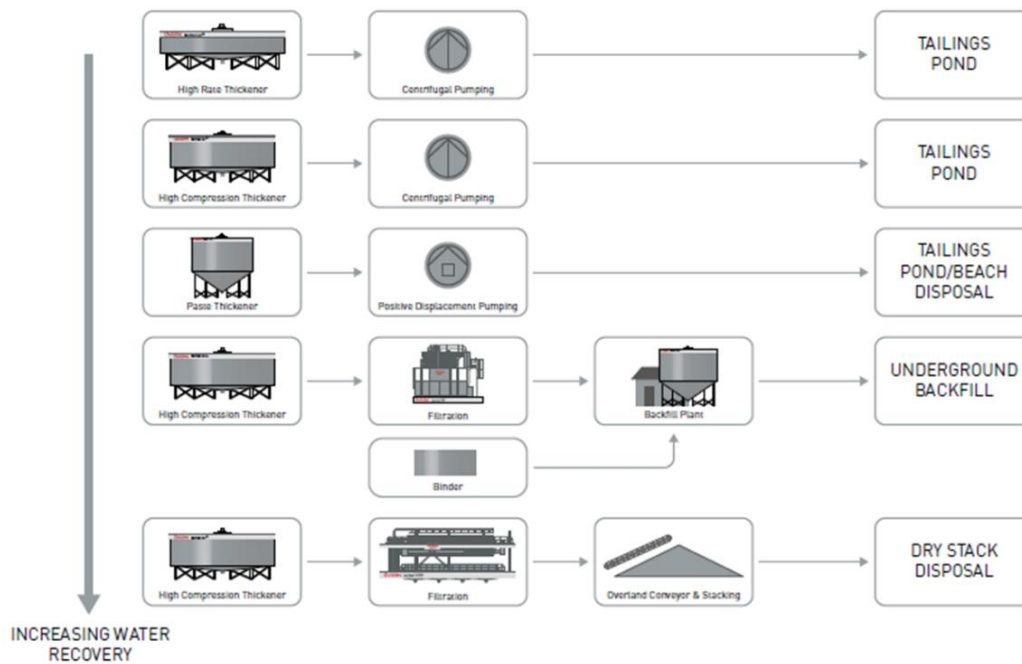


Figura 34: Tipos de procesos de tratamiento de relaves mineros (OUTOTEC)

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).

5.2 JUSTIFICACIÓN DE LOS INDICADORES AMBIENTALES SELECCIONADOS

Al repartirse los efectos entre la fase de instalación, uso y desmantelamiento de la instalación, para una toma de decisiones adecuada desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental es imprescindible un enfoque que contemple todo el ciclo de vida. Si se repasan los factores medioambientales considerados como principales ventajas del método, estos no aparecen completamente representados.

Para dicha toma de decisiones, sería necesario buscar una metodología que tuviera en cuenta el concepto de ciclo de vida, considerando todas las etapas del proceso. La metodología de Análisis de Ciclo de Vida se presenta como una buena alternativa, ya que es utilizada de forma muy habitual para evaluar el impacto ambiental generado por productos y procesos, pero como ya se ha comentado presenta ciertas carencias.



Por su parte, la Evaluación de Riesgos (ER) de los relaves mineros es una herramienta de gestión ambiental utilizada para evaluar el riesgo de procesos específicos, que son dañinos para el hombre o el medio ambiente en ciertas circunstancias de uso o en ciertos receptores ambientales.

Ambas herramientas se desarrollan a partir de conceptos muy diferentes y, como tales, son diferentes en sus enfoques. ER es una herramienta absoluta, que es capaz de predecir/evaluar la aparición de efectos adversos de un proceso, mientras que el ACV es una herramienta comparativa creada para ser utilizada en la mejora del medio ambiente del proceso. Ambas herramientas son necesarias porque cumplen diferentes propósitos.

Debido a estas ventajas e inconvenientes, se requiere un conjunto de herramientas diferentes para evaluar la viabilidad de una instalación de paste o de filtrado en una mina específica. Entre estas herramientas, las relacionadas con el riesgo se vuelven importantes ya que una de las principales ventajas de la pasta está relacionada con esta dimensión. Por lo tanto, seleccionar la herramienta adecuada para este análisis es un factor clave en el proceso de toma de decisiones que puede conducir a la selección de esos nuevos métodos como alternativa al almacenamiento convencional de relaves.

5.2.1 ACV

La metodología del ciclo de vida se aplica a la minería y la industria de procesamiento de minerales en la década de los 90s. Inicialmente se usa con el objetivo de llevar a cabo inventarios del ciclo de vida en ACV comparativos entre metales y otros productos sustituidos. Su interés es ser parte de los procesos de obtención de materiales como el acero, por ejemplo. Pero no se consideró hasta más tarde el interés de realizar análisis orientados al propio proceso minero. A partir de proyectos como el *Minería, minerales y desarrollo sostenible* (MMSD) se llegó a la conclusión de que "el ACV es una herramienta útil para proporcionar una evaluación de las consideraciones medioambientales durante la toma de decisiones dentro de la industria", a pesar de las limitaciones de la herramienta.

En general, todos los ACV realizados reflejan sistemas de explotación minera muy simplificados en los que la gestión de los residuos no se llega a considerar. Sin embargo, el tratamiento de los relaves y el cierre de la explotación son partes del ciclo de vida que afectan al impacto de la instalación de forma relevante (Kulczycka, 2008). En la actualidad hay una tendencia a considerar la gestión de residuos sólidos como un proceso adicional (proceso de fin de vida). Por ejemplo, en los conjuntos de datos de Ecoinvent según se recoge en (Lesage et al., 2008) se describe el proceso de manejo de relaves sulfuroso pero considerando sólo la ocupación de tierras, no considerando las emisiones de los relaves en el tiempo y los requisitos de energía y material necesarios.

Por otra parte, la metodología ACV se ha aplicado al proceso de obtención de minerales considerando como entradas el volumen de los materiales utilizados y la energía consumida para realizar un análisis de los beneficios económicos y la producción de residuos en diferentes metales. Sin embargo, en (Durucan et al., 2006) y (Reid et al.,



2009) se sugiere utilizarlo con el fin de seleccionar uno o más métodos de control para las actividades de operación de la mina, gestión de residuos y cierre. En (Reid et al., 2009) se hace hincapié en la importancia de evaluar y comparar diferentes opciones de gestión de residuos en relación a los potenciales impactos ambientales y sociales y no sólo en base a términos económicos.

En la línea de esta recomendación surge LICYMIN, un proyecto de investigación internacional liderado por el Imperial College de Londres en el cual se desarrolla una herramienta ACV capaz de representar el sistema de minería de manera integral, no como una caja negra. El modelo integra todas las etapas de la producción minera, procesamiento, tratamiento y eliminación de residuos, rehabilitación y cuidados posteriores etapas de la vida de una mina dentro de un marco de ACV (Durucañ et al., 2006).

Se ha encontrado otro modelo de uso de ACV como herramienta de decisión en el diseño de diferentes soluciones tecnológicas para la gestión de residuos en combinación con la metodología del Valor Actual Neto del Ciclo de Vida (LCNPV). El análisis se realizó para los productores de zinc y plomo en Polonia, en la mina de ZG Trzebień SA (Kulczyca,, 2008). El objetivo es atender tanto a aspectos ambientales como económicos en la etapa de diseño. Como resultado se obtuvo el desarrollo de un indicador de eficiencia ecológica integrada (Kulczyca,, 2008).

Sin embargo, a pesar de que ya existen recomendaciones y experiencias de aplicación de ACV como indicador ambiental y herramienta de decisión en el diseño en minería, se advierten ciertas debilidades que deben ser solventadas ampliando la perspectiva de análisis mediante la selección de otros indicadores ambientales y evaluaciones.

5.2.2 Huella Hídrica

Dado que el sector minero depende de grandes volúmenes de agua y que su impacto en los recursos locales puede ser significativos y también tener su repercusión a nivel global, es necesario analizar eahustivamente este aspecto (Barton 2010).

Hasta ahora, la metodología de ACV, no tenía en cuenta ni el consumo ni la degradación del agua era suficiente y había que recurrir a la Huella Hídrica (Fernández-Iglesias et al., 2013). No obstante, a pesar de que actualmente, la Huella Hídrica es una categoría de impacto más del ACV, dada su relevancia en este campo es conveniente hacer un análisis más exhaustivo y tratarla como un indicador ambiental independiente.

5.2.3 Huella de Carbono

En la misma línea puede ser interesante y clarificador hacer un análisis independiente y particular referido a la Huella de Carbono. Se trata de un indicador ampliamente extendido, sencillo de interpretar y relacionado con las categorías de consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad, el cual está directamente relacionado con el consumo energético que supone el espesado y transporte de grandes volúmenes de relave sin espesar o menores volúmenes de un fluido más denso.



5.2.4 Estimación de riesgos.

A partir de los años 70 se considera 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 los análisis de ciclo de vida medioambientales no se consideran los accidentes. Pero en este tipo de instalaciones, los accidentes pueden ocurrir y los efectos medioambientales pueden ser gigantescos.



Figura 35: 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.

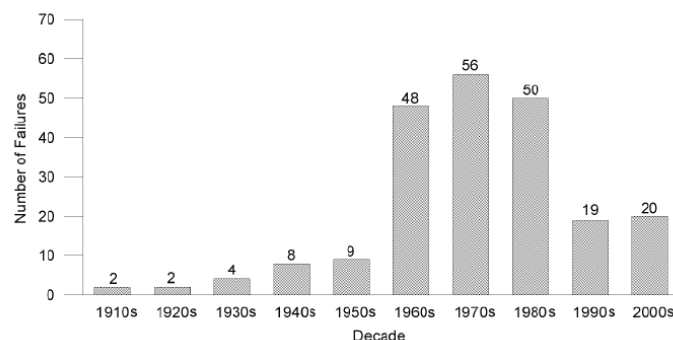


Figura 36: Histórico de accidentes en presas de relaves

De los estudios realizados por ICOLD, se desprende que no hay ninguna forma constructiva que evite con seguridad los fallos. Además, el porcentaje de fallos no puede determinarse con exactitud puesto que no se conocen la totalidad de balsas. 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 aparece, pues los fallos debidos a lluvias inusuales han pasado del 25% antes del 2000 al 40% en el periodo a partir del 2000. Los efectos sísmicos han prácticamente desaparecido.

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).

Por ello, se selecciona también la metodología de Análisis de Riesgos. Esta ha sido y es frecuentemente utilizada para tomar decisiones en cuestiones de gestión de las operaciones mineras. Un caso es el trabajo realizado en (Kizil et al., 2011) donde se analizan diferentes ubicaciones y formas de gestión de relaves con el fin de realizar una gestión eficiente y eficaz del riesgo.



6. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

6.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE

A continuación se describen el objetivo y el alcance general del estudio de acuerdo con las recomendaciones de la ISO-14040 y el manual del Sistema internacional de referencia de datos de ciclo de vida (ILCD) (JRC, 2010). El manual incluye la descripción del sistema, la elección de la unidad funcional, la definición de los límites del estudio, el procedimiento de recolección de datos y las restricciones y la selección de metodologías para la EICV.

6.1.1 Descripción y límites del sistema

Este estudio busca conocer desde la perspectiva de sostenibilidad ambiental el impacto de diferentes formas de almacenar los residuos de una mina tras el proceso de flotación según el porcentaje de sólidos. Para ello se utilizarán los escenarios planteados en el epígrafe 5.1 de este documento.

- Escenario 1: La suspensión de relaves se descarga convencionalmente, con una cantidad considerable de agua de proceso, en un estanque de sedimentación (30% en peso).
- Escenario 2: La suspensión de relaves se espesa de 30% en peso a 70% en peso antes de la descarga en un estanque.
- Escenario 3: La suspensión de relaves se espesa y se filtra hasta 88% en peso antes de ser descargada en un apilamiento en seco.

Aunque una de las ventajas de esta técnica de espesado es la posibilidad de rellenar la mina para su cierre, en este caso esta opción no se considera porque se evaluará como una mina a cielo abierto.

Dado que en los tres escenarios tanto la etapa de flotación como su posterior espesado hasta un 35% en peso es común, se partirá de la salida del relave en este punto hasta llegar a la etapa de disposición final, entendiendo como tal la deposición y almacenamiento del residuo. No se contemplarán en este estudio las diferentes



posibilidades de rehabilitación de la explotación minera por ser muy diversas y requerir casos concretos de aplicación de los cuales no se dispone información, así como por la necesidad de acotar el trabajo a las etapas más relevantes.

Para realizar el estudio, se utiliza un proceso en el que se estima un caudal de 6768 t/h de cola con una concentración de 35% de sólidos y con vida útil de las instalaciones de 15 años (OUTOTEC, 2014). Los pasos para llevar a cabo el análisis en otros casos, serían los mismos que los aquí descritos.

Al tratarse de un estudio de ciclo de vida completo - desde la cuna hasta la tumba - de un almacenamiento de relaves, todos los procesos se modelizan teniendo en cuenta las instalaciones requeridas, su fase de uso y la disposición final.

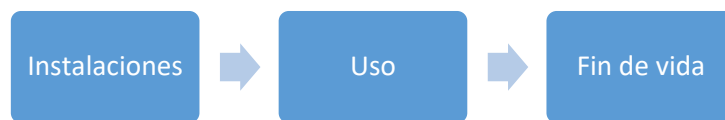


Figura 37: Etapas del ciclo de vida

Las instalaciones se modelizan exclusivamente como materiales, dejando fuera del inventario los esfuerzos necesarios para su construcción.

6.1.2 Unidad funcional

La unidad funcional es un elemento central de un ACV, sin ella, no sería posible realizar una comparación significativa y válida. El primer paso para definir la unidad funcional es identificar y cuantificar las propiedades cuantificables relevantes y el rendimiento técnico/funcional del sistema (JRC, 2010).

Para este estudio se planteó seleccionar como unidad funcional una tonelada de mineral producido en la mina, pero esta unidad funcional sería difícil de cuantificar, ya que no está relacionada con el siguiente proceso ni con las características de la instalación y depende fundamentalmente de la pureza del mineral. Por lo tanto, se decide tomar como unidad funcional “1000 m³ de relave a la salida del proceso de flotación”.

6.1.3 Metodología de evaluación de impacto

Los métodos para realizar la EICV incluyen las etapas de clasificación, caracterización y ponderación. En ellas los distintos impactos son agrupados, transformados a unidades comunes y posteriormente ponderados entre sí hasta alcanzar un pequeño número de indicadores que representan los impactos totales. Aunque la metodología de ACV es universalmente aceptada, existen muchas metodologías de EICV y su conveniencia es discutida. Cada método se ha desarrollado para entornos diferentes, con métodos y factores distintos. Los más utilizados en Europa son el Ecoindicador99 de origen holandés y Recipe, evolución del anterior y el previo CML suizo. El conjunto de indicadores intermedios es grande, pero, por ejemplo, en muchas de las metodologías el uso del agua no está contemplado. La dificultad de ponderar el uso de agua como



impacto y la dependencia del impacto de las condiciones geográficas del lugar de extracción ha hecho que la práctica totalidad de las metodologías no la incluyan (con excepción del efecto de los vertidos).

Aun las etapas con mayor consenso como la caracterización están en constante actualización. Uno de los puntos más conflictivos es que los potenciales impactos se consideran globales. Por ejemplo, el CO₂ emitido puede ser considerado como un factor que afecta al Cambio Climático independientemente de donde se produce. Pero en impactos locales y regionales, la localización es extremadamente importante. La acidificación no produce las mismas consecuencias en todos los lugares, depende de la situación geográfica, de los ecosistemas involucrados, y de la confluencia con otras emisiones.

Para alcanzar los objetivos planteados es necesario seleccionar una metodología EICV que contenga las categorías de impacto que permitan valorar el uso y transformación de suelo, el uso y degradación del agua y el uso de combustibles fósiles para la obtención de energía y sus consecuentes emisiones a la atmósfera.

De entre todas las opciones disponibles se selecciona ReCiPe. Utiliza un mecanismo ambiental como base para el modelado. Un mecanismo ambiental es una serie de efectos que juntos pueden crear un cierto nivel de daño sobre unos receptores, agrupados como daños sobre la salud humana, sobre los ecosistemas o agotamiento de recursos.

El objetivo de RECIPE como metodología para la evaluación del impacto del ciclo de vida es doble:

- Proporcionar información genérica sobre el método, cómo aplicarlo y sobre qué principios se basa.
- Proporcionar información detallada sobre los modelos utilizados, y permitir a cada investigador para analizar y potencialmente mejorar los modelos.

El objetivo principal del método ReCiPe es transformar la larga lista de resultados del inventario del ciclo de vida en un número limitado de indicadores. Las puntuaciones obtenidas para los indicadores expresan la gravedad relativa en una categoría de impacto ambiental. ReCiPe presenta indicadores en dos niveles:

- Indicadores midpoint, que están orientados al problema.
- Indicadores endpoint, que están orientados al daño.

El set de indicadores ReCiPe permite calcular dieciocho indicadores midpoint y tres indicadores endpoint. Estos últimos emanan de los midpoints y presentan mayores incertidumbres. La motivación para calcular los indicadores endpoint, es que el gran número de indicadores de midpoint dificultan su interpretación, en parte porque hay demasiados, en parte porque tienen un significado muy abstracto. Sin embargo, los indicadores endpoint están destinados a facilitar la interpretación, ya que sólo hay tres, y tienen un significado más comprensible por parte de una audiencia no



especialista. La idea es que cada usuario pueda elegir a qué nivel desea tener el resultado (RECIPE).

6.1.4 Criterios de corte

Los criterios de corte se refieren a la omisión de etapas del ciclo de vida no pertinentes, tipos de actividad, procesos y productos específicos y flujos elementales del modelo del sistema. Los límites máximos se cuantifican en relación con el porcentaje de impactos ambientales que se aproxima para ser excluidos a través del límite (JRC, 2010).

Los criterios de corte de este estudio permiten la exclusión de materiales, energía y datos de emisión con los siguientes criterios:

- Masa. Si el proceso es inferior al 3% de la masa total manejada en el modelo, se puede excluir, siempre y cuando el impacto ambiental no sea relevante.
- Energía. Si el proceso representa menos del 3% de la energía primaria total del inventario, puede excluirse, siempre y cuando el impacto ambiental no sea relevante.
- Relevancia ambiental. Si un proceso que cumple con las condiciones anteriores, debido a las características especiales del material o al proceso de producción de energía, tiene un impacto ambiental en algunas de las categorías superior al 5%, este proceso no puede ser excluido.

El tratamiento de los datos realizado en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) se centra en asegurar que la suma de todos aquellos procesos o productos despreciados es inferior al 5%. Por lo tanto, y debido a estos criterios de corte, el riesgo de que los procesos omitidos puedan influir en las conclusiones finales es insignificante.

6.1.5 Calidad de los datos

La calidad de los datos se compone de exactitud (es decir, representatividad y adecuación metodológica y coherencia), precisión/incertidumbre e integridad del inventario (JRC, 2010). En este trabajo se han utilizado principalmente dos fuentes:

- Datos bibliográficos procedentes de diferentes estudios realizados en el ámbito del tratamiento de residuos mineros y transporte de fluidos densos.
- Datos de catálogos de instalaciones y maquinarias proporcionados por fabricantes.
- Datos procedentes de la base de datos Ecoinvent 3.1, que cuenta con flujos actualizados y regionalizados. Se decide trabajar con esta base de forma exclusiva, descartando el uso de otras bases de datos para no introducir más incertidumbre en el inventario y consiguiente evaluación.

El estudio se centra en datos del periodo 2010-2017. Sólo en aquellos casos en que no ha sido posible localizar datos más actuales se han utilizado datos más antiguos. En todos los casos se corresponde con procesos de tecnologías muy establecidas, en donde se han producido pocos cambios.



6.1.6 Software utilizado

Para realizar este Análisis de Ciclo de Vida se ha utilizado Simapro 8, software de ACV desarrollado por la consultora holandesa Pré Consultants ampliamente utilizado. Es una herramienta profesional para el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos, asociados a una producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida, con aplicación al ecodiseño, al desarrollo de ecoetiquetas, al cálculo de huellas de carbono o huellas hídricas, entre otros.

Cuenta con acceso a varias bases de datos, aunque la de referencia para este estudio por ser la más utilizada es Ecoinvent 3.2.

6.1.7 Limitaciones

Para realizar este trabajo se describen tres escenarios basados en un ejemplo de aplicación proporcionado por Outotec (OUTOTEC, 2014) y se han localizado en Minas Gerais, Brasil, con el fin de poder evaluar los efectos locales de la actividad minera, además de los tradicionales impactos globales. En el modelo, todas las variables pueden ser modificadas con el fin de generar diferentes escenarios que permitan construir una base para el desarrollo futuro de un sistema de decisión, que contribuya a la selección de la alternativa más adecuada para el almacenamiento.

Por otra parte, como ya se ha comentado, no existe una metodología de EICV que se adapte perfectamente a este caso de estudio, y las que hay cuentan con ciertas debilidades en categorías de impacto tan importantes como el uso y transformación del suelo.

Todo esto tratará de solventarse mediante un análisis exhaustivo de sensibilidad que contemple diferentes posibilidades y que permita comprender la importancia de estas limitaciones.

6.2 INVENTARIO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

Para los inventarios del ciclo de vida se toma como punto de partida un flujo de 6.768 t/h de relaves de mineral de hierro, con una concentración del 35 % en peso. Estos relaves son residuos inertes y se acumulan durante toda la vida de la explotación, que se considera de 15 años (OUTOTEC, 2014).

El volumen de relaves bombeados es el correspondiente a 7200 horas al año durante 15 años de vida útil de la mina.

Los flujos tomados como base (OUTOTEC, 2014), se refieren a un proceso de tratamiento de Cu, por lo que se han utilizado las cantidades de producto y los porcentajes en peso, pero en los cálculos y dimensionamientos realizados se ha tomado como densidad del sólido $3,62 \text{ g/cm}^3$ (A.M.C. Portes and T. Espósito, 2013), correspondiente a relaves de hierro.

Las estaciones de bombeo de relaves se han dimensionado de acuerdo con el manual de Angus Paterson and Robert Cooke, 2014. Para la elección de las dimensiones y



características de las bombas se han utilizado las fabricadas por la empresa *Dragflow*. Del mismo modo, las estaciones de bombeo de agua se han seleccionado con la herramienta de dimensionado de GRUNDFOS.

Las características de las tuberías para el bombeo de relaves y de agua de retorno se toman de SAC Adecua infraestructuras, puesto que son válidas, tanto para transporte y conducción de agua, como para labores mineras. El material de las mismas es Policloruro de Vinilo (PVC).

El depósito de los relaves se encuentra a 10 Km de las plantas de tratamiento en los 3 escenarios y cuenta con una superficie total de 16 Km² y una altura de 30 m para el almacenamiento de los mismos (OUTOTEC, 2014).

6.2.1 Escenario 1

Corresponde al escenario de referencia, que estudia el impacto generado por la forma tradicional de almacenamiento de residuos de la minería extractiva. Son producto del proceso de flotación y suponen el segundo mayor impacto de las actividades mineras, incluso para los residuos no tóxicos como la extracción de mineral de hierro.

Aunque se dan casos de descargas de estos relaves no tóxicos directamente al río pese a que existen recomendaciones específicas para cambiar esta práctica, en este caso se evaluarán los impactos ambientales asociados con la descarga y el almacenamiento de los relaves convencionales en un estanque de sedimentación.

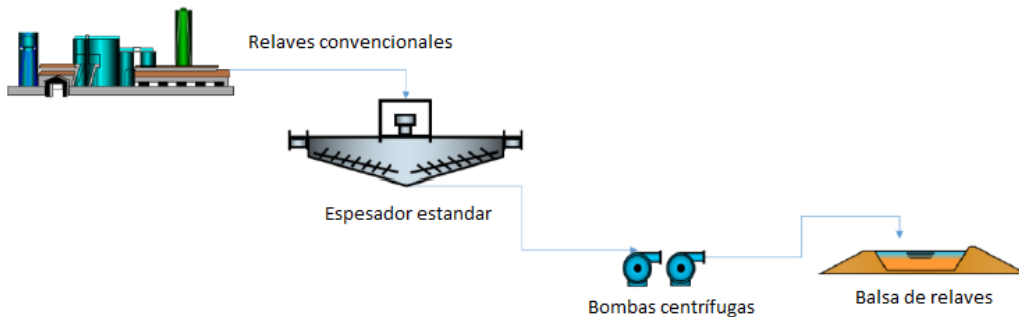


Figura 38: Disposición estandar de transporte de relaves convencionales (Pedro Valencia et al., 2016)

Este escenario consiste en una etapa, en la que el material residual del proceso de flotación es bombeado al punto de descarga, pasando previamente por un espesador que eleva la concentración a un 30%wt. Además, se bombeará agua drenada del depósito de relaves hasta la planta de tratamiento donde se reciclará. Todo ello requiere una potente estación de bombeo que abastezca la demanda energética requerida en este proceso.

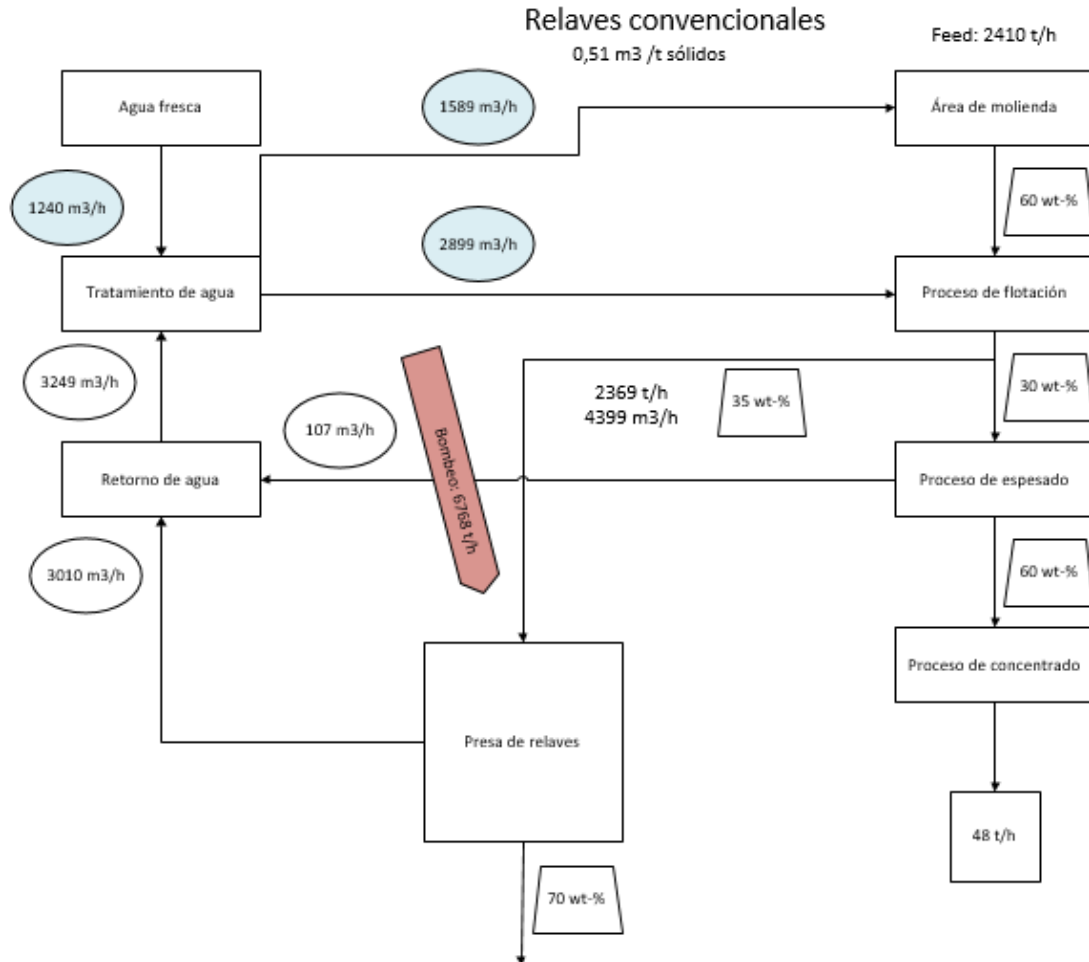


Figura 39: Ciclo de proceso de relaves convencionales, adaptado de (OUTOTEC,2014)

1. Instalaciones

El transporte y deposición de relaves convencionales generados en la industria del hierro comprende el aumento de la concentración de sólidos a través de un espesador estándar hasta alcanzar un nivel que permita el transporte por gravedad o por bombas centrífugas de lodos hacia su disposición final (Pedro Valencia et al., 2016). Dado el elevado consumo energético se requiere de una estación de bombeo constituida por bombas centrífugas tanto en serie como en paralelo (JRC, 2004).

La presa de la balsa o estanque de relaves está formada por residuos de rocas de las propias minas, mediante inundaciones sucesivas, basadas en niveles y compactación. Requieren de un sistema de sellado que evite la infiltración de lixiviados, tanto por razones ambientales y como para evitar daños a la fundación.

Esta presa se hace durante la operación de la planta y la posterior deposición de relaves, por lo tanto, sus dimensiones deben soportar la deposición total final de los relaves generados por la actividad de la mina a lo largo de toda su vida. La construcción de la presa es inventariada como transporte de materiales. Otro elemento que se necesita es



el geotextil, que se coloca en el fondo, ocupando toda la zona, en este caso será de Polypropileno (Intermas Geosynthetics).

El tiempo de vida del estanque cubrirá la fase operacional de 15 años y la de cierre, 100 años según (Doka, 2008). Por lo tanto, el embalse se modeliza como una ocupación de suelo durante 115 años. Este hecho, junto con que el almacenamiento de lodo ocupa un gran espacio, se espera que se traduzca en el mayor impacto del estudio.

Además, la balsa de residuos contará con un sistema de drenaje de tuberías especiales de PVC (Uralita sistemas de tuberías S.A., 2016) que dirigirán el agua hacia una balsa de decantación, desde la que se bombeará el agua de nuevo a la planta para su reutilización.

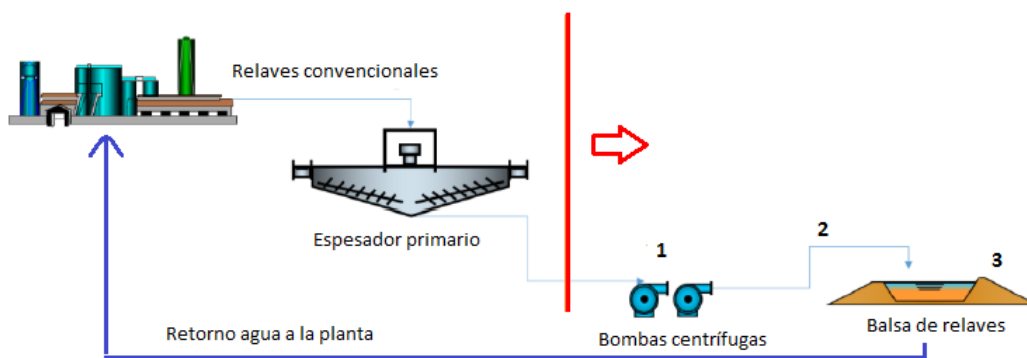


Figura 40: Instalaciones consideradas

Además de las tres instalaciones descritas, como se ha indicado anteriormente, es necesaria la instalación de un drenaje en la balsa de relaves para dirigir el agua hasta una balsa de decantación, de donde se bombeará de nuevo a la planta.

Para el drenaje se han seleccionado tuberías de policloruro de vinilo (PVC) específicas para esta función (Uralita sistemas de tuberías S.A., 2016), con una inclinación adecuada para que el agua se filtre hacia la balsa. El número de tuberías y la dimensión se ha calculado teniendo en cuenta una velocidad máxima de tubería de 1,6 m/s.

El agua sobrante en la balsa de tailings, una vez drenada, será bombeada de nuevo hasta la planta para su reutilización. La balsa deberá tener capacidad para almacenar 9.030 m³ de agua como mínimo, y será necesaria una estación de bombeo con una potencia de 732 Kw.

2. Uso

Los relaves son bombeados a una balsa de almacenamiento ubicada a 10 Km de distancia de instalación (OUTOTEC, 2014). Se considera una eficiencia en el bombeo de 55% y una inclinación de 2° de la tubería. Se considera una eficiencia de bombeo del 94%.

Es necesario lograr una velocidad adecuada en el flujo de manera que no haya depósitos a lo largo del tiempo que pudieran taponar el paso de los relaves. Se ha considerado un fluido no newtoniano con flujo laminar (Díaz, A.A. and Hechavarría, T.L., 1999).



3. Fin de vida

El desmantelamiento de las instalaciones es una parte fundamental del ACV. En este caso afecta al sistema de transporte, bombas y tuberías y estanques de relaves.

Todo material de bombas y tuberías será reciclado. Se considera una proporción de recuperación del 95% para los componentes de acero y hierro (Fernández et al.). Los elementos plásticos no se clasifican fácilmente y se supone que son enviados a un vertedero inerte con recuperación energética. El material no reciclado se envía a un vertedero de materiales inertes, utilizando un modelo representativo de la tecnología europea de gestión de residuos de la OCDE.

Se supone que la tierra pasa de origen desconocido a zona de vertedero. Después de una fase operacional de 15 años, la restauración espontánea de un estado consolidado se alcanza después de cien años. Por lo tanto, el tiempo total de ocupación es de 115 años (Doka, 2008).

6.2.2 Escenario 2: Paste

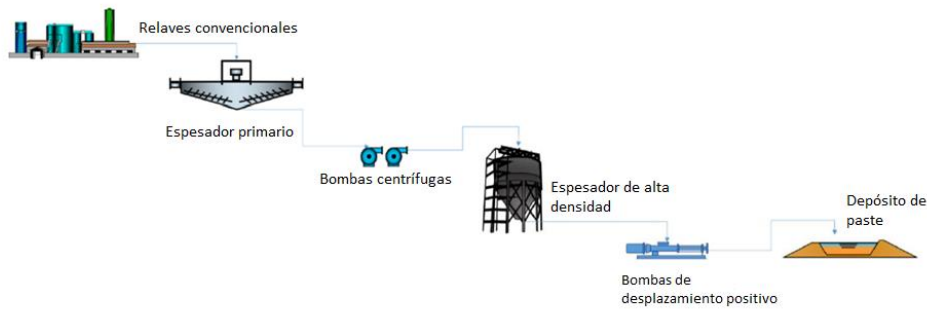


Figura 41: Descripción esquemática de un sistema de relaves de paste (Pedro Valencia et al., 2016)

Esta etapa evalúa el tratamiento de relaves por espesamiento, que comienza a la salida del tanque de flotación, y se realiza en 4 etapas (Jewel & Fourie, 2011) con un sistema de relaves que incluye un espesante que produce un subflujo muy concentrado 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).

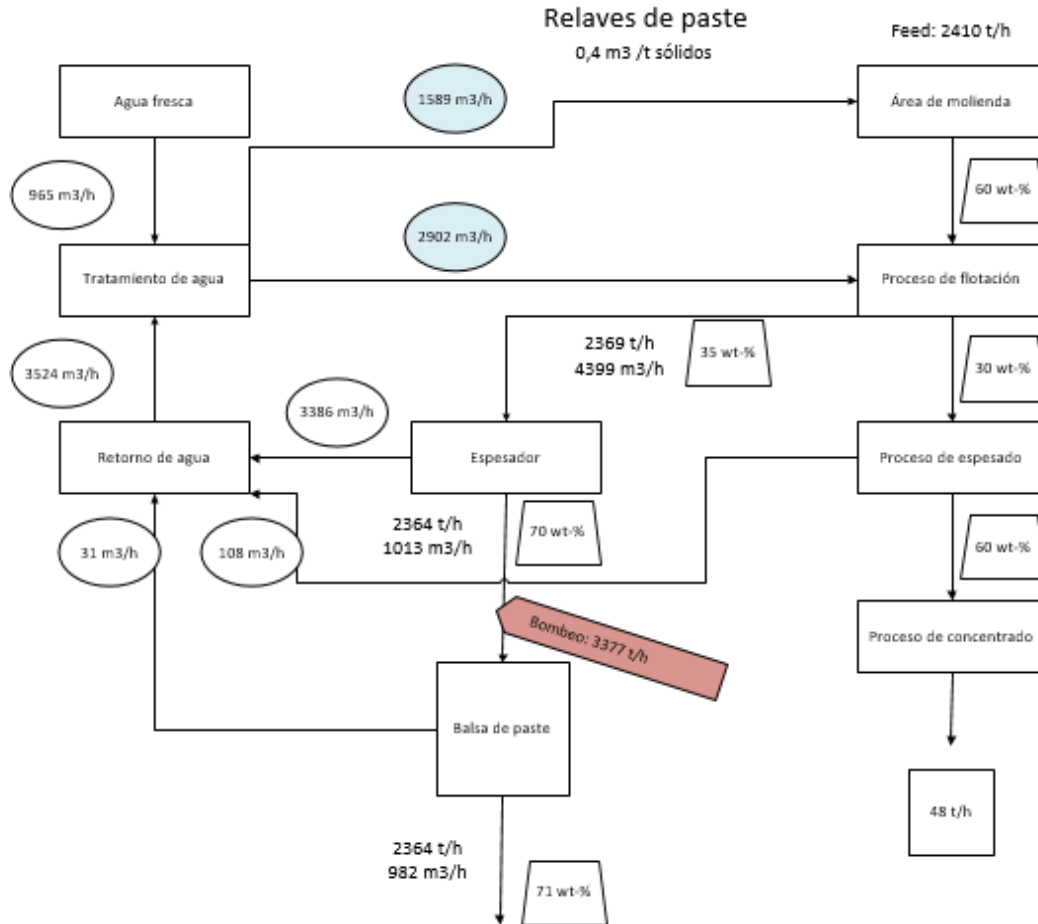


Figura 42: Ciclo de proceso de relaves de paste adaptado de (OUTOTEC, 2014)

Con una ubicación elevada del espesador cerca de la zona de eliminación, sólo se requiere un bombeo a corta distancia de la suspensión espesa. Con un sistema de relaves más espeso, se puede reciclar hasta el 90% del agua directamente del rebosante del espesador. Las concentraciones de sólidos deben ser superiores al 60% para obtener propiedades de paste que consigan una pendiente conceptualmente uniforme de residuo depositado del 2%, sin segregación de partículas y prácticamente sin drenaje de agua (Wennberg, 2010).

Los relaves se transportan desde el tanque de sedimentación al espesador, a una distancia de 1Km, una vez que los relaves están en el tanque espesante, 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 de 35%, alcanzando niveles de producción del 70%.

Después del tiempo de residencia, los relaves espesados son descargados a través del fondo y el agua limpia es extraída de la parte superior (Wesh Tech Engineering, Inc., 2011).



Existen varios tipos de espesadores, pero el más común es un mecanismo de rastrillos móviles que favorece la decantación y reduce el tiempo de residencia del lodo en el tanque. Este sistema representa un consumo de energía de 3 kWh por 1.500 m³ de colas en la toma del tanque (Advanced Mineral Processing S.L.). Para su instalación, es necesario hacer una cimentación que implica la excavación de 61,5 m³ y 147 t de hormigón. El espesador se registra como 70 t de acero con una vida útil de 15 años.

La tercera etapa se refiere al bombeo de relaves espesados hasta la balsa con una longitud de 10 km y una pendiente de 2°, requiriendo 100 kW por bomba. Se requieren 50 unidades de bombeo (Angus Paterson and Robert Cooke, 2014).

La etapa 4 consiste en la deposición de los relaves en el depósito.

1. Instalaciones

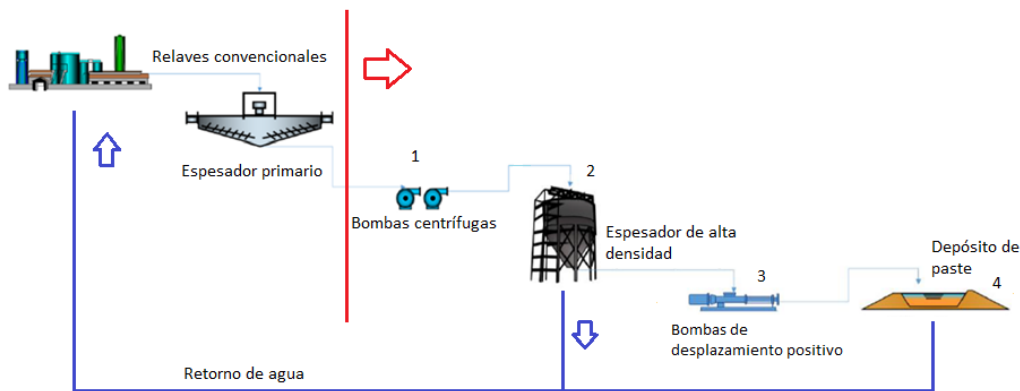


Figura 43: Instalaciones consideradas

Los cambios en las características de los fluidos implican aumentar la capacidad del equipo de bombeo debido a una mayor densidad de residuos y una caída de energía debido a la fricción dentro de la tubería. Para los relaves altamente espesados, la solución actual es el uso de bombas de desplazamiento positivo (Pedro Valencia et al., 2016).

Siguiendo las simplificaciones establecidas, el espesador se describe como un conjunto de materiales (hormigón, acero, acero y sistemas electrónicos) y deja los procesos de fabricación fuera del espesador.

En este escenario también es necesario la impermeabilización de la balsa, el drenaje y por lo tanto la balsa de decantación de agua, de la que posteriormente se bombeará el agua de nuevo a la planta para su reutilización. También se bombará agua de retorno a la planta desde el espesador. Se describen a continuación las características de las instalaciones.

El agua sobrante en la balsa de tailings, una vez se hayan depositado, será bombeada de nuevo hasta la planta para su reutilización. La balsa deberá tener capacidad para almacenar 93 m³ de agua como mínimo, y será necesaria una estación de bombeo con una potencia de 34 Kw.



2. Uso

Este proceso tiene lugar en 4 etapas. La primera etapa es el transporte a un espesador, donde comienza la segunda etapa. Este bombeo se realiza a lo largo de 1000 m de distancia con una inclinación de 2°. Para este bombeo es necesaria una potencia total de 1500 Kw.

Una vez en el espesante, por adición de un floculante se promueve la agregación de las partículas sólidas que forman aglomerados naturalmente decantados, asentándose sobre el fondo del tanque. El floculante de elección depende principalmente del porcentaje inicial de sólidos, de la concentración final deseada, del pH y del tiempo de residencia. El porcentaje de sólidos se introduce en el 35%, alcanzando niveles de 70% de la producción. Después del tiempo de residencia, la cola espesa se descarga a través de la parte inferior y el agua limpia se extraerá de la parte superior.

La tercera etapa se refiere a los relaves espesados que bombean la balsa con una longitud de 10 Km una diferencia de altura con una pendiente de 2°. Para este bombeo se requeriran 5000 kw de potencia total.

La cuarta y última etapa consiste en la descarga del paste, que está determinada por el tipo de presa seleccionado, eligiendo la más apropiada dependiendo del terreno, la cantidad total a depositar, las condiciones meteorológicas (precipitación, evapotranspiración y regímenes de viento) y la geología y sismicidad de la ubicación. En este caso se ha seleccionado la disposición del valle.

3. Final de vida útil

La vida útil del estanque cubrirá la fase operativa, de 15 años, pero este escenario favorece el sellado del vertedero al llenarse. Esto implica que en 5 años la tierra en la que se depositaron los relaves puede ser repoblada. De esta manera, no sólo el área ocupada es más pequeña, sino también el tiempo de ocupación.

Al final de la vida, las instalaciones se desensamblarán y todos los materiales del sistema de transporte y espesantes se reciclarán mejorando el LCA global de la misma manera que el escenario 1.

En este escenario el cierre será diferente del escenario 1, porque cuando la mina deje de funcionar, toda el agua se habrá drenado y el estanque será capaz de sostener la cubierta del suelo, incluso una reforestación (Bóhm et al., 2005).

6.2.3 Escenario 3: Filtrados

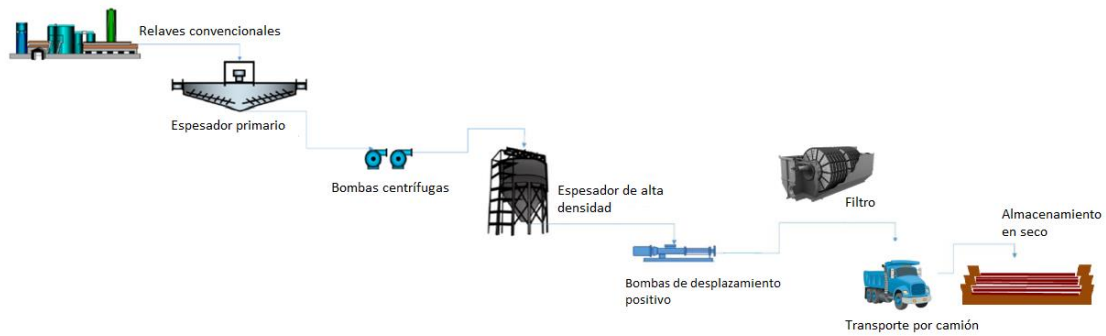


Figura 44: Disposición estandar de transporte de relaves filtrados, modificado de (Pedro Valencia et al., 2016)

En este escenario el proceso consiste en el tratamiento de relaves mediante filtrado. Tras la salida del tanque de flotación el proceso consta de 6 etapas. En la primera, los lodos con un 35% en peso son transportados al espesador, donde adquieren una consistencia de un 55% en peso. Este sistema de transporte estará formado por una estación de bombeo de iguales características a la del escenario anterior.

La segunda etapa consiste en el espesamiento de los relaves en el espesador, la tercera etapa consiste en el transporte, también mediante bombeo, de los tailings espesados al equipo de filtrado, de donde salen con una consistencia del 88% en peso. La cuarta etapa corresponde al proceso de filtrado y por último los relaves ya filtrados se transportan hasta un depósito donde se apilarán en seco mediante camiones (OUTOTEC, 2014).

La sexta y última etapa consiste en la deposición de los relaves en el depósito en seco.

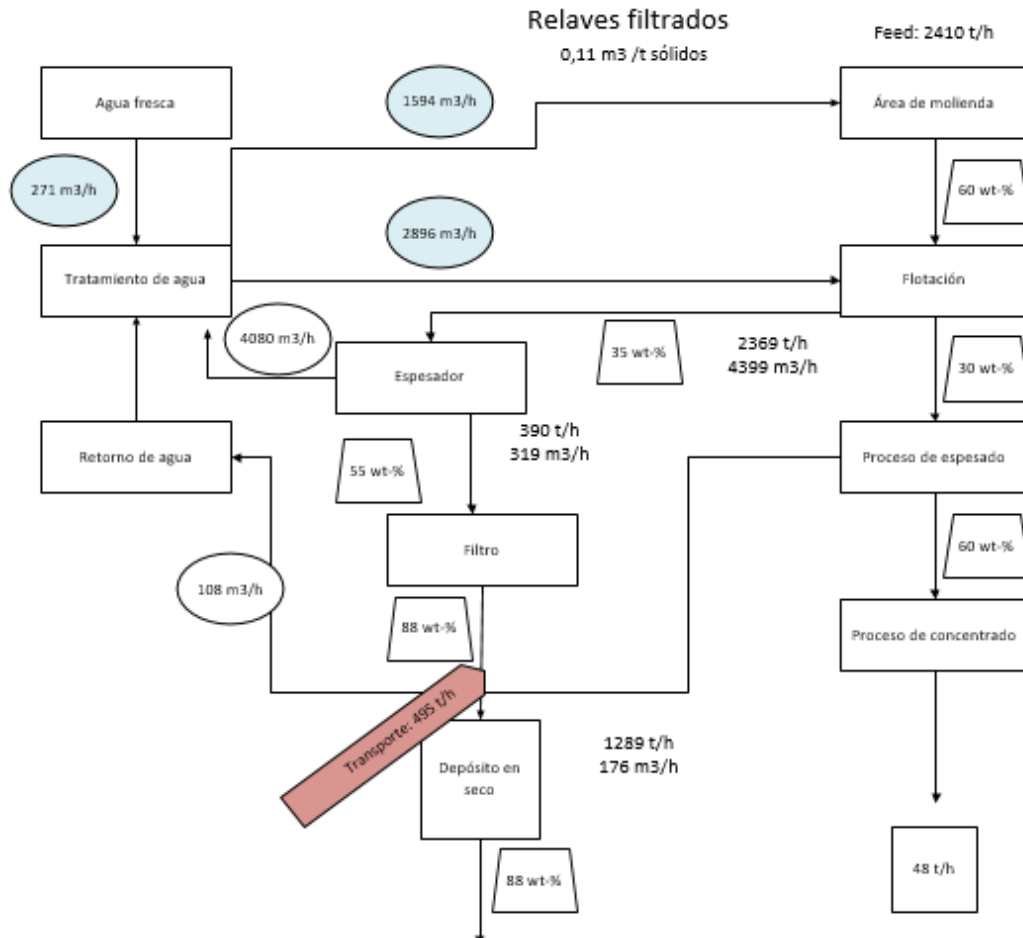


Figura 45: Diagrama del proceso de relaves filtrados, adaptado de (OUTOTEC,2014)

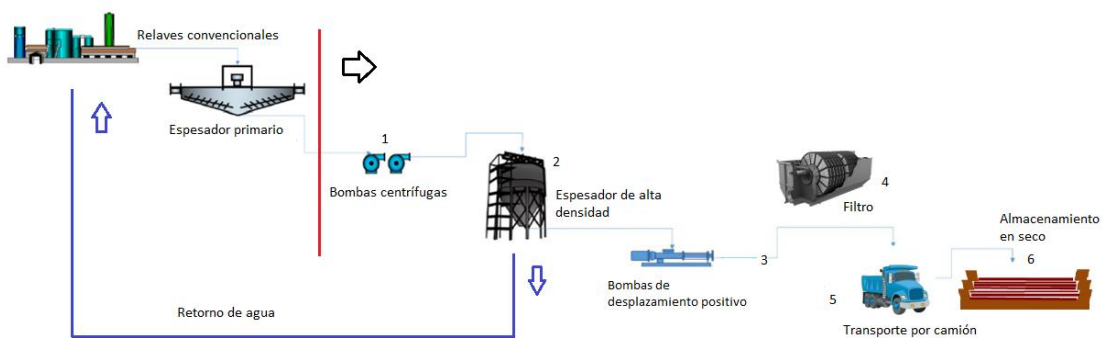


Figura 46: Instalaciones consideradas

Como en el escenario anterior, el bombeo hasta el espedador esta basado en bombas centrífugas, pero en este caso la distancia es inferior, se ha considerado que la planta de tratamiento de relaves se encuentra a 1Km de la mina.

El bombeo del espedador a el equipo de filtrado también tiene características similares, pero la distancia considerada es de 800 m.

El espedador es el mismo que el utilizado en el escenario 2.



El equipo de filtrado seleccionado tiene capacidad para 350 t/h de relaves, se ha inventariado como 180 t de acero y para su ubicación será necesaria una cimentación de 13,5 m³ que supondrá 32,4 t de hormigón. Este equipo de filtrado consume 22 Kw por cada 350 t/h de alimentación.

La vida útil de la presa cubrirá la fase operativa, de 15 años, pero este escenario favorece el sellado del vertedero al llenarse. Esto implica que en 5 años la tierra en la que se depositaron los relaves puede ser repoblada. De esta manera, no sólo el área ocupada es más pequeña, sino también el tiempo de ocupación.

En este escenario el depósito es el mismo que para los casos anteriores, solo que no necesitará de geotextil, puesto que debido a la poca humedad de los relaves no existe posibilidad de infiltración. No será necesario tampoco ni drenaje, ni bombeo de agua para reutilizar desde la presa. La presa tendrá una superficie de 2500 m² con una capacidad para 20000 m³.

El agua de retorno a la presa en este escenario es el sobrante del espesador, para el cual se ha dimensionado una estación de bombeo. En este caso, el bombeo se realiza a una distancia de 1 Km.

Al final de la vida útil, las instalaciones se desmontarán y todos los materiales del sistema de transporte de tuberías, espesantes y filtros se reciclarán mejorando el LCA global del mismo modo que el paisaje 2.

Según un estudio realizado en España, el 86,529% de los vehículos se recuperan mediante reciclado.

Una de las principales ventajas de los relaves de pilas secas es la facilidad de la recuperación progresiva y el cierre de la instalación. A menudo, la instalación puede desarrollarse para iniciar la recuperación muy ciclo de vida del proyecto. Esto puede tener muchas ventajas en el control de polvo fugitivo, en el uso de materiales de recuperación a medida que estén disponibles, ya corto y largo plazo

Impacto del proyecto. La recuperación progresiva incluye a menudo la construcción de al menos cubiertas temporales y re-vegetación de las pendientes y superficies de relaves como parte del ciclo operativo anual (Davies, 2011).

6.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

A continuación se presenta el EICV de los distintos escenarios según la unidad funcional "1000 m³ de relave a la salida del proceso de flotación". Según se definió en la primera etapa de la metodología de ACV, se utilizará el método de evaluación de impacto ReCiPe por ser la versión más actualizada del Ecoindicador 99 y uno de los más extendidos a nivel mundial.

6.3.1 Escenario 1

Este escenario supone el trasvase de un importante volumen de relaves desde la planta de tratamiento hasta la balsa de almacenamiento y a la vez el bombeo del agua de



drenaje desde la balsa hasta la planta. Además, está gravemente penalizado por la gran extensión que ocupa el depósito de relaves.

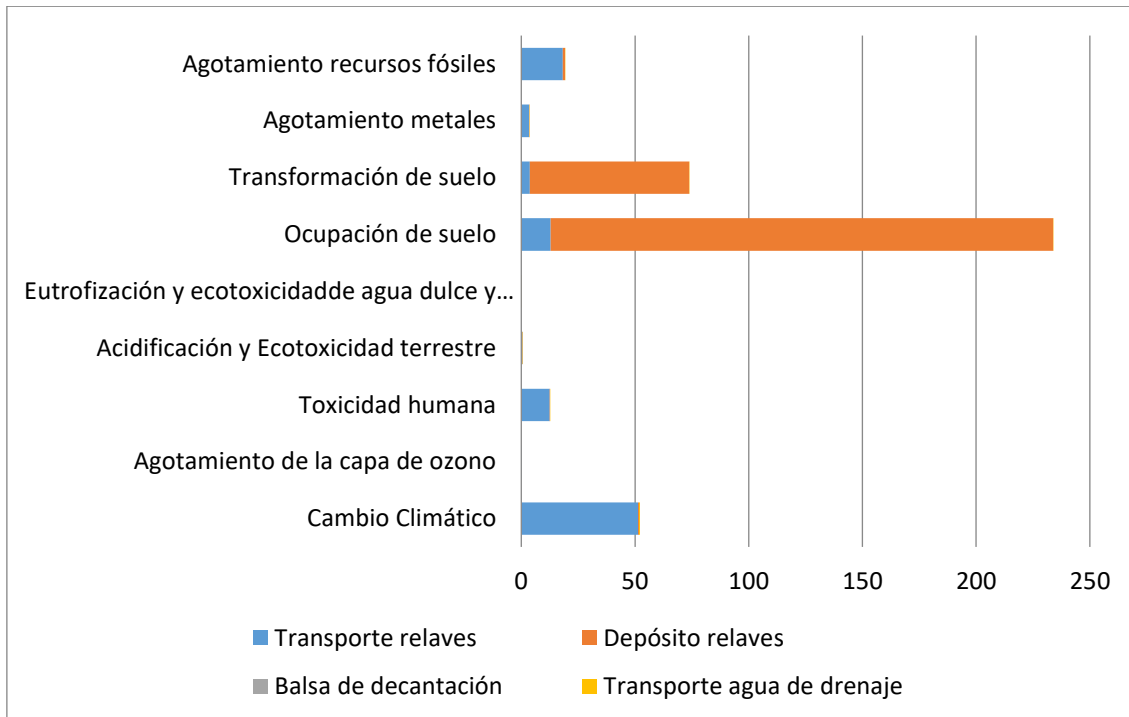


Figura 47. EICV del tratamiento de 1000 m³ en el escenario 1 según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

Como era de esperar, el impacto generado por el depósito de relaves mucho más relevante que los demás. Este impacto se compone fundamentalmente de las categorías de ocupación y transformación de suelo. Esto se debe, por una parte, a la gran extensión que ocupa este tipo de depósito, pero también a la estimación de que esa ocupación será durante al menos los 15 años de explotación de la mina y los 100 siguientes, salvo que se proceda a realizar labores de restauración.

El siguiente impacto en orden de importancia está en la categoría de Cambio Climático que, junto con la categoría de Agotamiento de los recursos fósiles y Toxicidad Humana, responde al gran consumo de combustibles fósiles para el transporte de los tailings hasta el depósito y del retorno del agua de drenaje a la planta.

6.3.2 Escenario 2

En este escenario se realiza el espesado de los relaves hasta un 70%, lo que supone un menor volumen de relave transportado hasta el depósito que en el caso del escenario 1, pero con un mayor coste energético por m³ por tratarse de un fluido denso. Otra característica de este escenario es que se recircula parte del agua recuperada en el espesador hasta la planta de tratamiento, además del agua drenada en el depósito. Esto hace que sea necesario introducir en el sistema menos agua que en el escenario 1.

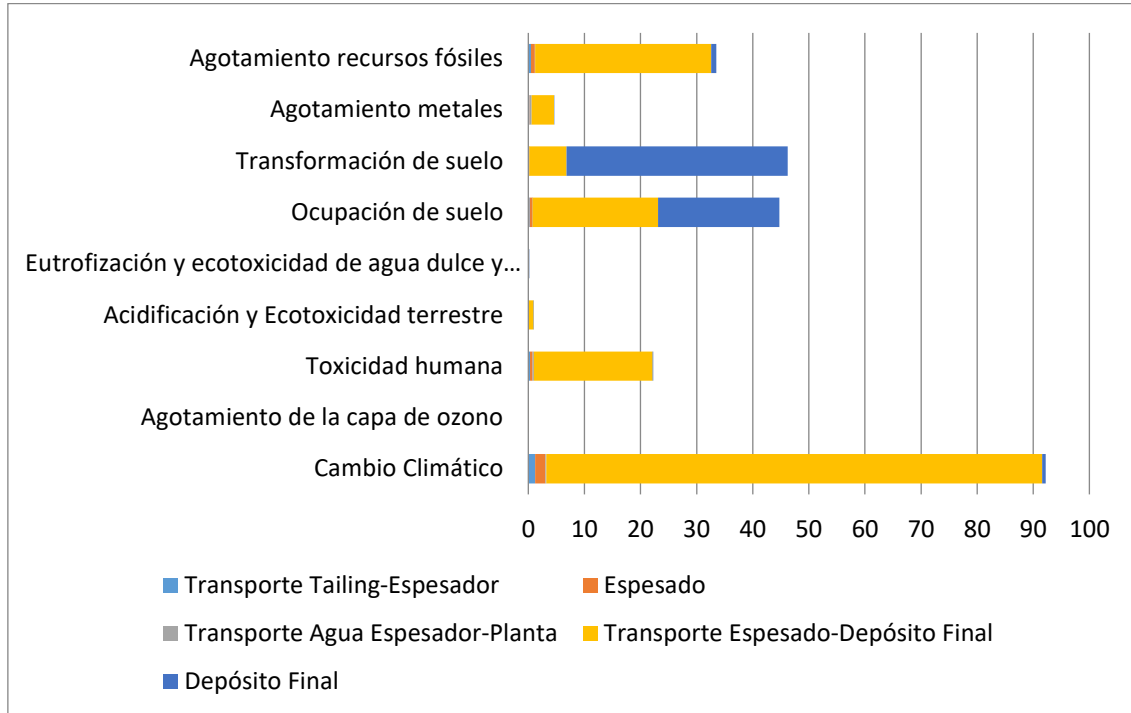


Figura 48: EICV del tratamiento de 1000 m³ en el escenario 2 según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

Como era de esperar, la mayor puntuación recae sobre la categoría de Cambio Climático como consecuencia del consumo energético necesario para transportar el relave espesado, menos m³ que en el escenario 1 pero con mayor potencia de bombeo requerida. El consumo de energía, supone el consumo de combustibles fósiles y a la vez las emisiones que se producen en consecuencia, que puntúan en la categoría de Cambio Climático y Toxicidad Humana.

Otro proceso relevante en este escenario es el depósito de relaves espesados que puntúa en las categorías de ocupación y transformación de suelo. En este caso supone menos puntos que en el escenario 1 debido a dos factores. Por un lado, la extensión que ocupa es mucho menor y por otro lado, esta ocupación se da durante los 15 años de explotación de la mina más 5 años que se estima que son necesario hasta que se puede realizar una repoblación y proceder a la transformación del suelo nuevamente.

6.3.3 Escenario 3

Este escenario se presenta a priori como el ideal, por tratarse del método de gestión de residuos que menos superficie ocupa y el que, desde el punto de vista de la seguridad, el más seguro. Sin embargo, se presupone que ambientalmente pueda tener un gran impacto como consecuencia del secado y del transporte.

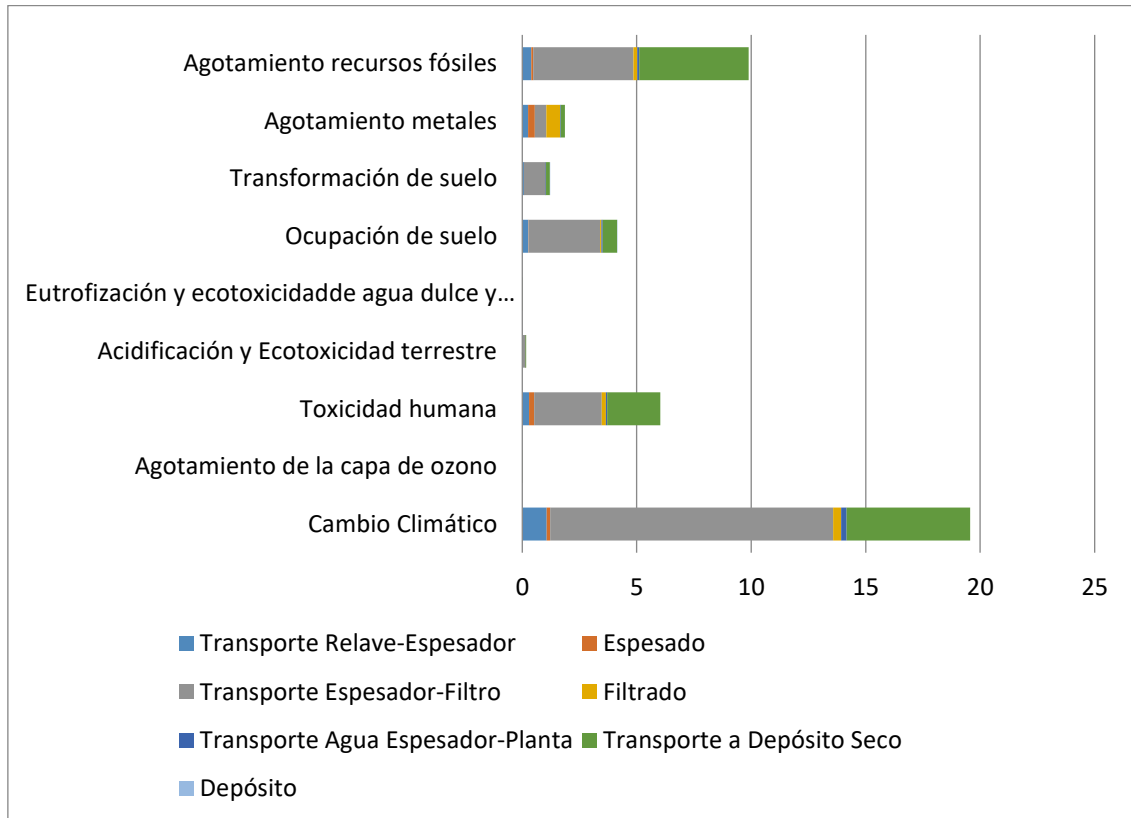


Figura 49: EICV del tratamiento de 1000 m³ en el escenario 3 según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

A la luz de los resultados se puede concluir que las etapas que mayor impacto generan son las del transporte del espesador al filtro y del filtro al depósito seco. En ambos casos se corresponde con consumo energético, sin embargo, en el primero se debe a consumo eléctrico para bombeo, mientras que en el segundo a consumo diesel para el transporte en camiones. No obstante, la caracterización y clasificación de las entradas para estas categorías de impacto es la misma que en escenarios anteriores. El consumo energético requiere consumo de combustibles y, por lo tanto, Agotamiento de recursos fósiles, y las emisiones consecuentes que puntúan en las categorías de Cambio Climático y Toxicidad Humana.

Por último, como se presuponía, el depósito del relave filtrado (Depósito Seco) supone muy pocos puntos del impacto global, ya que su extensión es mucho menor que en los escenarios anteriores y la ocupación se produce sólo durante los 15 años de explotación de la mina.

6.3.4 Comparación de escenarios

Tras el análisis de cada uno de los escenarios se comprueba como los principales impactos se concentran en las categorías de transformación y ocupación del terreno, cambio climático, toxicidad humana y agotamiento de los recursos fósiles. La puntuación de estas categorías está directamente relacionada con la ocupación del terreno del depósito final de relaves y la energía requerida para las operaciones de transporte en cada escenario. Por lo tanto, se procede a analizar de forma comparativa estos dos aspectos.

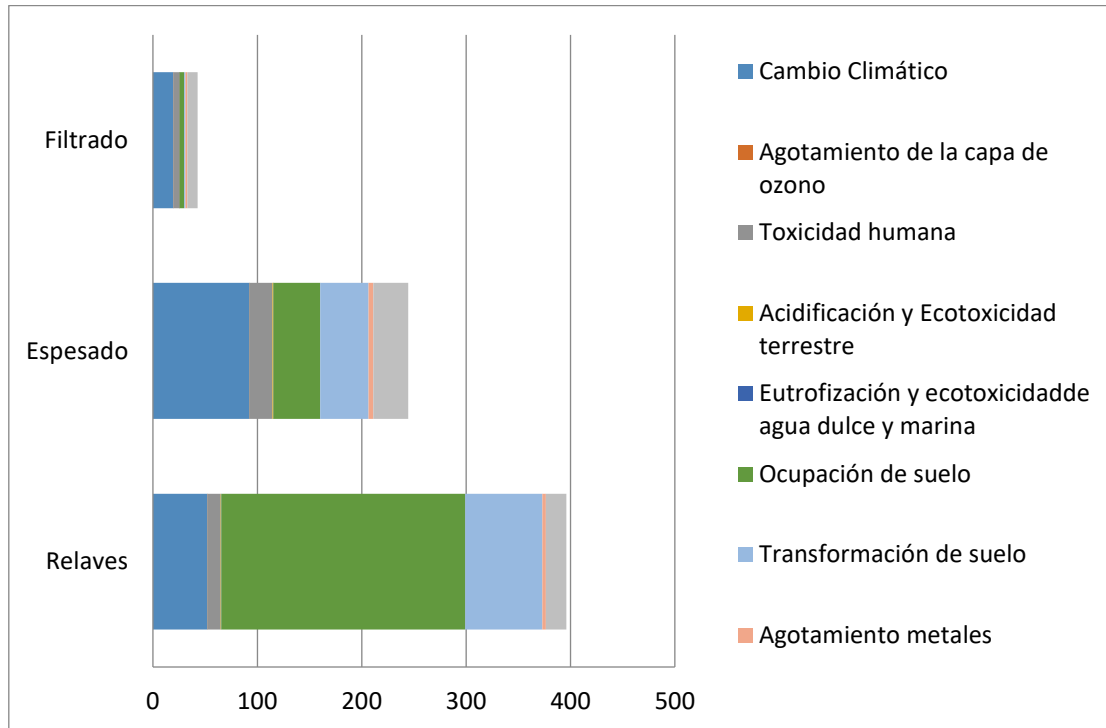


Figura 50: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m³ en los tres escenarios según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

En la gráfica se muestra el impacto que supone el depósito final en los tres escenarios. Como era de suponer, el depósito del escenario 3 que se corresponde con el proceso de filtrado genera un impacto que pasa desapercibido en comparación con el de los otros dos escenarios.

En el caso del escenario 2, espesado, si aparece puntuación, pero supone tan solo la cuarta parte de la puntuación del escenario 1.

Analizando con más detenimiento qué sucede en esta parte del proceso de los escenarios 2 y 3, se observa cómo la categoría que más puntúa es la de ocupación del terreno en el escenario 1. Esto se debe, como ya se comentó previamente, a la forma en la que se ha modelizado el inventario, al suponer que la ocupación va a tener lugar durante 115 años. En el inventario, esta categoría se calcula como m²*año. El depósito de los relaves ocupa una superficie de 16 km² durante 115 años. La categoría de transformación del terreno se mide en m². Por lo tanto, la puntuación del depósito de relaves, representada fundamentalmente por la transformación del suelo, es mucho mayor que la del depósito de espesado, representado fundamentalmente por la ocupación del suelo.

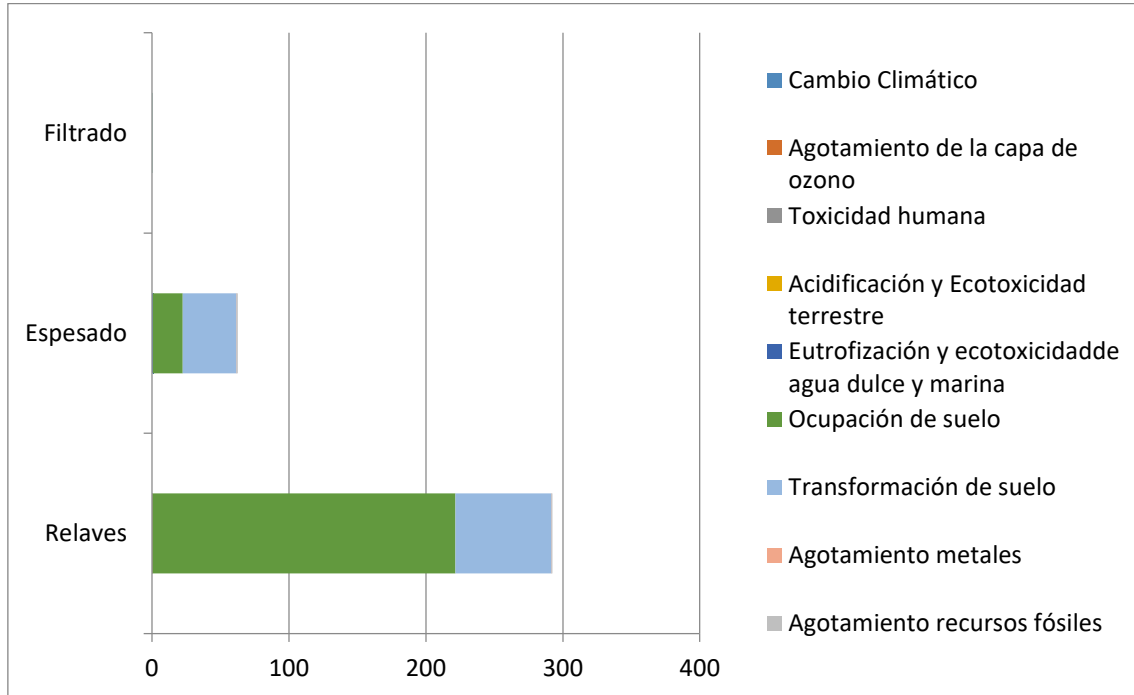


Figura 51: Comparativa del EICV del depósito de 1000 m³ de relaves en los tres escenarios según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

La Figura 51 muestra cómo influye el transporte en cada escenario. En este caso, el escenario en el que es más relevante es el 2, espesado. Se puede decir que la reducción del impacto del depósito en el escenario 2 respecto al escenario 1 se produce a costa de un incremento en el impacto debido al transporte.

A pesar de que en el escenario 1 se requiere el transporte de una ingente cantidad de m³ de relave hacia el depósito y su correspondiente agua de drenaje hacia la planta, éste es más barato energéticamente que el transporte de menos m³ de relave espesado, el cual requiere una potencia mucho mayor. De hecho, para el transporte de relaves espesados son necesarias bombas de desplazamiento positivo.

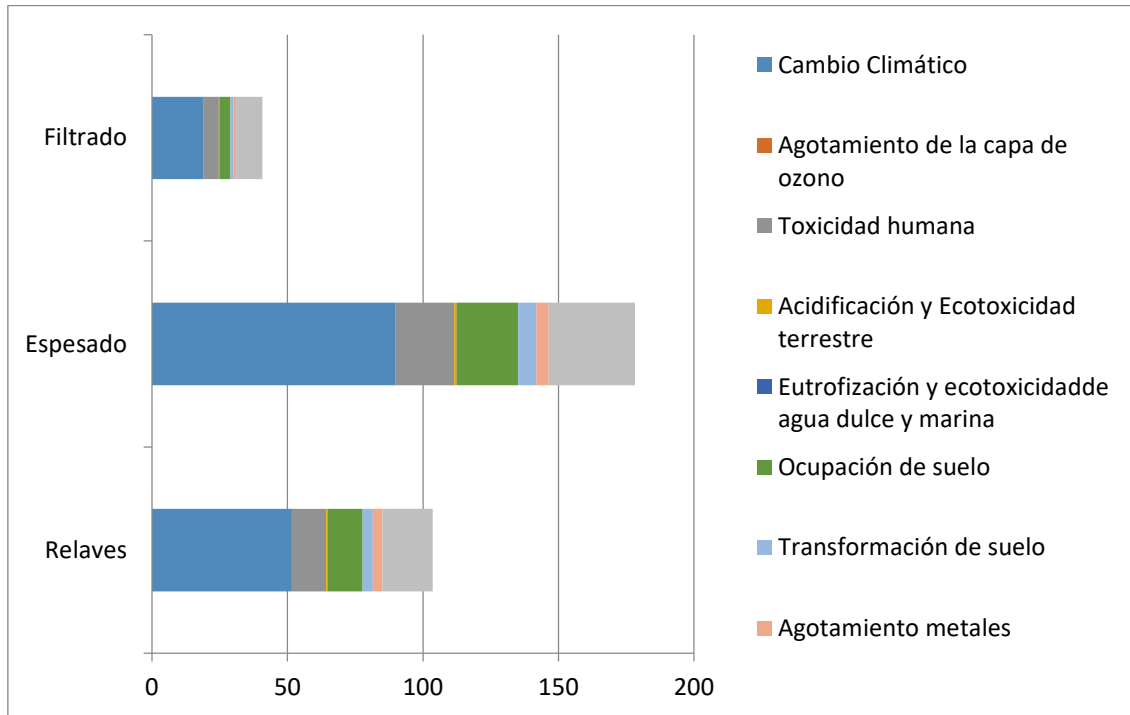


Figura 52: Comparativa del EICV del transporte de 1000 m³ de relaves, relaves espesados al 70% y relaves filtrados según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

El escenario 3, filtrado, es el que menor puntuación tiene en el proceso de transporte a costa del depósito final, puesto que el filtrado tenía un impacto despreciable en este proceso de depósito final.

El transporte en este escenario se reparte entre el bombeo del relave hasta un espesador donde se espesa hasta el 55% y de ahí hasta el filtro. Desde este punto es transportado en camiones hasta el depósito final.

A la vista de los resultados se puede concluir que esta forma de transporte en camiones es una buena elección, ya que contribuye a obtener un escenario donde el impacto del depósito final es insignificante, a la vez que el transporte es menos relevante que en los otros dos escenarios.

6.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La evaluación realizada en los epígrafes anteriores hace recaer los “hot spots” de este estudio en el transporte y en el uso del suelo. Por lo tanto, se procede a realizar el análisis de sensibilidad sobre estos dos aspectos.

6.4.1 Tipo de energía de transporte

Dado que la planta de tratamiento se ha ubicado en Brasil, se ha seleccionado la forma de producción de electricidad más común en minas brasileñas, con un alto porcentaje en renovables.

Sin embargo, esta forma de obtención de energía varía en función de la localización de la planta. Por ejemplo, una explotación minera situada en China tendrá un consumo



eléctrico con bajo porcentaje en renovables. De la misma forma, una mina situada en España tendrá un *mix* energético con un porcentaje en renovables aún mayor que el *mix* energético de Brasil.

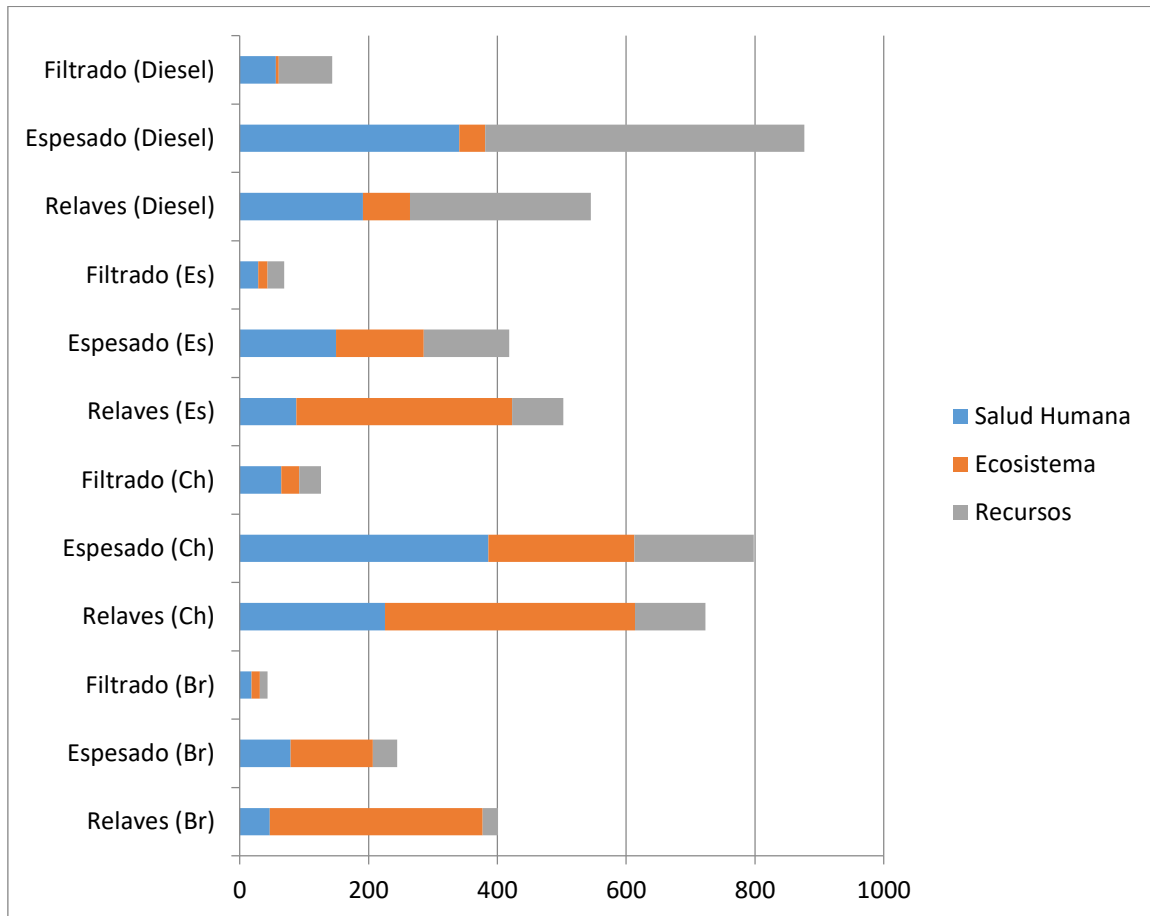


Figura 53: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m³ de relaves, con diferentes tipos de mix energéticos según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

Al hacer esta comparativa se puede observar que el filtrado sigue siendo la mejor opción en cualquiera de las tres ubicaciones. Sin embargo, para los casos de relaves sin espesar y relaves espesados, la localización de la planta sí marca diferencias cuando se tiene un *mix* energético diferente. De esta forma, en una explotación situada en España, la gestión de relaves espesados tendrá menor impacto. Lo mismo pasa con la mina situada en Brasil (*Espesado (BR)*). Sin embargo, en el caso de un país como China, es preferible el manejo de relaves sin espesar (*Relaves (Ch)*).

Se incluye, además, en el análisis la opción de obtención de energía a partir de Diesel. Este es una posibilidad real en minería, ya que podría no haber conexión a red siendo necesaria la presencia de motogeneradores eléctricos a partir de diesel. En este caso, la opción de espesado es aún peor, como consecuencia del fuerte consumo eléctrico.

Por lo tanto, se puede afirmar que la opción de espesado será mejor que la de no espesado en aquellas localizaciones en las cuales se pueda disponer de energía eléctrica



basada en un alto porcentaje de renovables, de lo contrario, la opción de no espesar sería mejor. Aún así, en cualquier caso, el filtrado es la opción óptima.

6.4.2 Ubicación de la planta de espesado

En el tratamiento de relaves existen dos soluciones posibles en cuanto a la localización de la planta de espesado de relaves. Ésta puede estar a continuación de la misma planta de flotación (A), donde se generan los relaves, o pueden ubicarse en las inmediaciones del depósito final (B). La decisión dependerá fundamentalmente de la conveniencia de cada situación concreta en cuanto a cuestiones orográficas, pero una evaluación de qué opción es más sostenible permitirá tomar dicha decisión de forma más consciente y fundamentada.

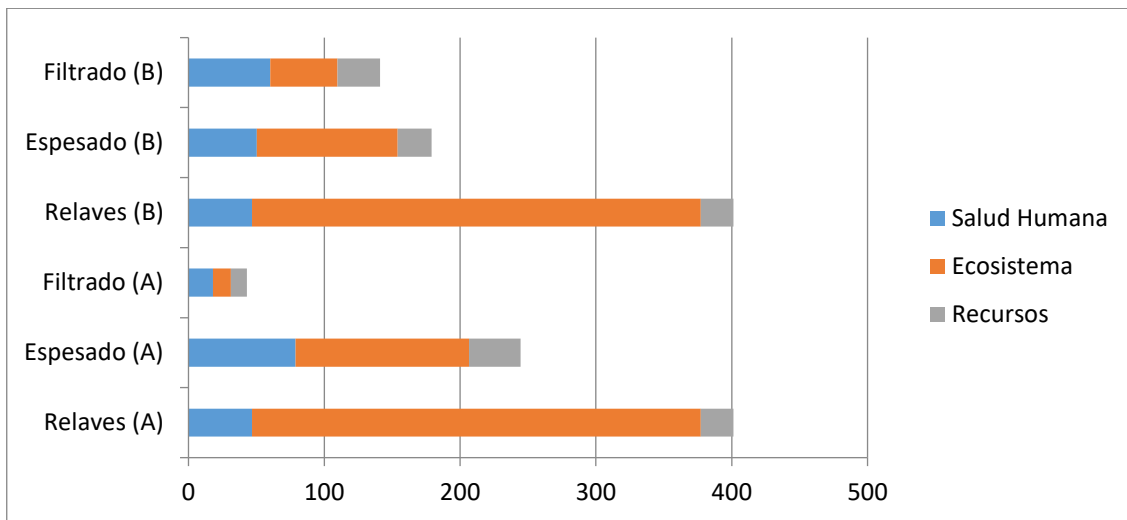


Figura 54: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m³ de relaves, ubicando la planta de espesado cerca de la planta de tratamiento (A) o cerca del depósito (B) según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

Ante dicho planteamiento, se comprueba que la localización de la planta de espesado en un lugar cercano al depósito consigue reducir el impacto del transporte y, por lo tanto, el impacto global en la opción de espesado. Esto se debe a que es menos costoso en términos energéticos transportar relave sin espesar, a pesar de que será más volumen.

Sin embargo, la opción de filtrado empeora si el espesado previo se realiza en las proximidades del depósito por los mayores requisitos de transporte en la opción B.

Por lo tanto, ante este análisis se puede concluir que lo más interesante continúa siendo la opción de filtrado, ubicada cerca de la planta de flotación.

6.4.3 Consideraciones en cuanto a la ocupación del terreno

A la vista de que el impacto debido al uso del suelo es la mayor contribución al impacto global en la opción de relaves sin espesar convirtiéndola en la peor opción de manejo, se hace imprescindible considerar más horizontes de ocupación del terreno. Es decir, se ha estimado una ocupación del terreno durante los 100 años posteriores a la explotación de la mina, siguiendo (Doka, 2008).



La transformación del terreno se mide en unidades de superficie mientras que la ocupación del terreno deberá medirse en unidades de espacio*tiempo. El suelo es un recurso limitado, en la que su uso en una actividad limita otros, se causa una disminución en la biodiversidad, en las acciones regulatorias de los ecosistemas. Entre los efectos sobre la biodiversidad están la pérdida de espacio para los ecosistemas naturales, fragmentación de espacios naturales, cambio en las condiciones microclimáticas, etc.

Para la caracterización del uso del terreno existen muchos métodos, entre los que destacan IVAM y Kollner. (Kollner 2001) (Weidema 2001). En la caracterización se tiene en cuenta la densidad de especies del área a partir de una clasificación del terreno. Los modelos se basan en estudios de Holanda y Centro-Europa, lo cual limita su aplicación a ecosistemas naturales muy diferentes. El modelo de Kollners está parcialmente integrado en Ecoindicador99 y tiene en cuenta el efecto local y el efecto regional o nacional (relativo al suelo como recurso limitado), a los que da igual peso en la ponderación.

Pero los modelos de evaluación de impacto del suelo no son los más adecuados para este tipo de estudios, ya que se basan en el análisis del número de especies presentes para determinar si la ocupación es positiva o negativa. Además, son modelos europeos (donde el suelo es un bien escaso) que no se adaptan a otros lugares como América, por contar con grandes extensiones de terreno.

Por lo tanto, se propone considerar diferentes opciones de ocupación del terreno partiendo de los 100 años. Se valorará un tiempo de ocupación menor (50 años), un tiempo de ocupación mayor (500 años) y finalmente, obviar este impacto.

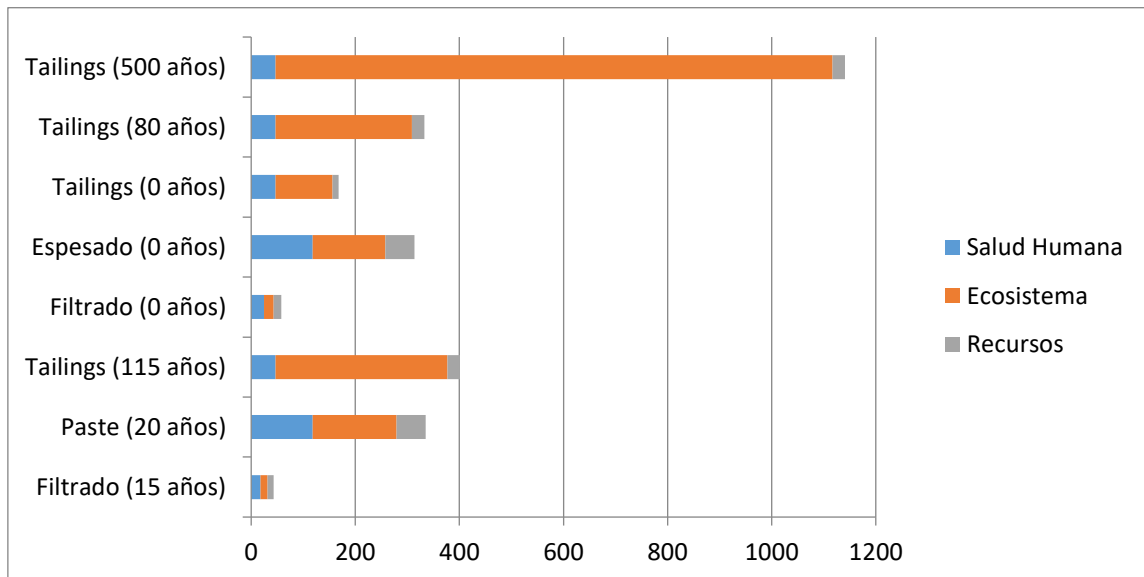


Figura 55: Comparativa del EICV del tratamiento de 1000 m³ de relaves, bajo diferentes consideraciones en cuanto a la ocupación de suelo, según ReCiPe medido en puntos finales (Pt).

El análisis demuestra que en cualquiera de los casos es más rentable la opción del filtrado. En cuanto a la opción de espesado, sólo cuando se considera una ocupación



mayor de 115 años para el depósito de relaves es mejor frente a no espesado. Es decir, el impacto del uso del suelo frente al del consumo energético prevalece.

Sin embargo, en la situación en la que se considere una ocupación de 80 años o que se prescinda de la categoría de ocupación del terreno, será preferible la técnica de no espesado frente a la de espesado.



7. HUELLAS

7.1 HUELLA HÍDRICA

Dado que la gestión del agua es un pilar básico de la sostenibilidad y que este tipo de proyectos son especialmente demandantes de grandes volúmenes de agua a la vez que fuertemente dependientes de ella, se hace necesario evaluar de forma independiente la sostenibilidad de las diferentes opciones desde el prisma de la HH.

Como ya se comentó anteriormente, a pesar de la norma ISO 14046, aún no existe un consenso claro sobre cómo abordar un análisis de este tipo. En (Gunson, 2011) se recogen varios esfuerzos realizados para cuantificar y entender el uso de agua en minería, centrándose en los indicadores de análisis y la perspectiva de ciclo de vida. Pero no hay ningún método de evaluación de impacto que cuantifique lo que supone el consumo de agua o su ahorro en un lugar determinado, si no que sólo es posible evaluar la contaminación que producen sus vertidos o las consecuencias que se producen en otras categorías de impacto .

En un estudio realizado en la mina de mineral de hierro de Khumani en Sudáfrica (Toit 2012) se indica como principal ventaja del espesamiento de relaves la reducción del consumo de agua. Esta mina está situada en una zona semiárida con precipitaciones anuales de 300 mm, en una zona que soporta una alta actividad minera. Con la adopción de un espesado en dos fases se ha disminuido el consumo de agua del entorno de 0,22 m³/tonelada de producto a valores inferiores a 0,16 m³/t orientado a acercarse a niveles cercanos a 0,1 m³/t. Con una capacidad instalada de más de 8 millones de toneladas en la primera fase, el ahorro de consumo de agua es enorme.

Como resulta evidente, la importancia de este ahorro, se debe tanto a las cantidades como al estrés hídrico de la zona. Para valorar la importancia de la reducción de impactos del agua será necesario considerar no sólo los valores sino especialmente la posición geográfica y sus condicionantes de pluviosidad e hidrología. Un tratamiento global y uniforme del proceso se quedaría muy desvirtuado. La evaluación del impacto del uso del agua depende, por tanto, en gran medida del factor local



Para tratar los flujos de agua de un proceso es necesario categorizar los usos. Existen varias clasificaciones. Por ejemplo (Owens 2002) separa los flujos de entrada y los de salida separando entre uso y consumo. En las metodologías de EICV se trata sobre todo el cambio en la calidad del agua por los vertidos (así se trata en CML, Ecoindicador, IMPACT, ReCiPe) y se refleja en categorías como ecotoxicidad, nutrificación y acidificación, pero no se considera al agua como un recurso finito. (Koehler 2008)(Steward et al 2005) plantean un esquema que refleja el consumo de agua hoy por sus consecuencias para futuras extracciones (por ejemplo desalación). Pero, la mayor parte de los métodos de EICV, al no considerar el recurso agua como finito y no hay ningún tipo de caracterización.

A la vista de una falta de criterio claro que oriente hacia una metodología determinada, se realizará la evaluación del uso del agua desde la perspectiva de la escasez de huella hídrica y desde la perspectiva de ACV.

Para realizar esta evaluación se parte de la descripción de escenarios identificados en la metodología y del inventario detallado en la segunda etapa del ACV. Como se puede ver, a medida que se procede al espesado del tailing se va recirculando agua dentro del propio proceso, lo que se traduce en una menor entrada de agua industrial.

De tal forma, recircula 3.249 m³/h en el escenario 1, 3.524 m³/h en el escenario 2 y 4.188 m³/h en el escenario 3.

Este balance también se puede expresar haciendo referencia a los m³ de agua que se requieren en cada uno de los escenarios por cada tonelada de mineral, de tal forma que esta ratio supone 0.6-0.9 m³/t en el primer caso, 0.45-0.6 m³/t en el segundo y 0.15 m³/t en el tercero.

Se tiene, además, en cuenta la evaporación en cada caso, calculada a partir de las precipitaciones anuales (1.479 mm/año) y la evapotranspiración (1.860,60 mm/año) que, en función de la superficie de la balsa en cada caso, esto se traduce en 1.468,22 m³/h para el escenario 1. 825,87 m³/h para el escenario 2 y 0,2294 m³/h para el escenario 3.

7.1.1 Escasez Hídrica

Para el caso de estudio es adecuado utilizar el “*Swiss Ecological Scarcity method 2006*” (Frischknecht et al. 2008) que es sensible a la localización geográfica asignando un ecofactor distinto en función del estrés hídrico de la zona.

El Índice de Escasez Hídrica, en inglés Water Scarcity Index (WSI), considera tanto la disponibilidad como la demanda de agua, e indica que no puede determinarse exclusivamente en base al clima. Por ejemplo, puede que en el momento en el que se está buscando la localización de una mina, dicha ubicación pertenezca a una región donde no existen problemas de disponibilidad de agua, sin embargo, pasado el tiempo, se da un aumento de la presión sobre los recursos hídricos en la zona debido al gran número de explotaciones establecidas y se convierte entonces en una región árida (Northey et al. 2014).



Para calcular el WSI se ha utilizado la herramienta de ETH (ETH 2014). Para Belo Horizonte en Minas Gerais, Brasil, es 0,0203. Por lo tanto la Escasez de Huella Hídrica se obtiene multiplicando los consumos de agua por este factor para obtener 7.13 m³ en el primer escenario, 5,55 m³ en el segundo escenario y 1,56 m³ en el tercer escenario. Estos valores están referidos a la Unidad Funcional.

Sin embargo, si estos escenarios se trasladan a una región mucho más árida de lo que es Minas Gerais en Brasil, la Escasez de Huella Hídrica se incrementará notablemente. Esto ocurriría con una localización como la del desierto de Atacama, en Chile, donde el WSI es 1. De esta forma, los valores de la Escasez de Huella Hídrica se transforman en 351,23 m³ en el primer escenario, 273,33 m³ en el segundo escenario y 76,76 m³ en el tercer escenario. Estos valores están referidos a la Unidad Funcional.

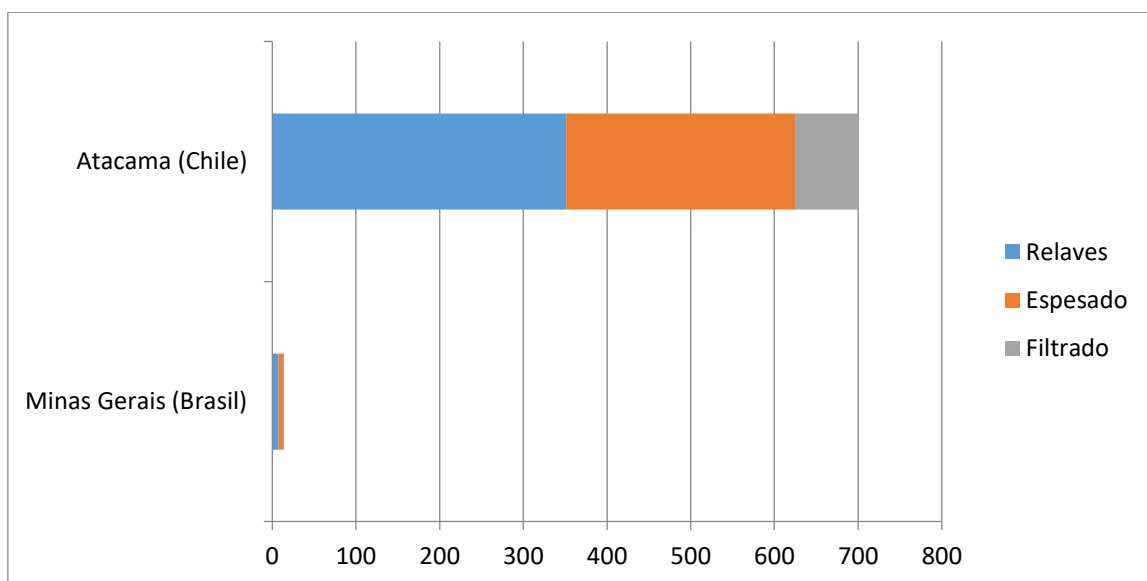


Figura 56: Escasez de Huella Hídrica de los 3 escenarios en dos localizaciones diferentes, expresada por Unidad Funcional

Como era de esperar, cuando se analiza el volumen de agua demandado en cada proceso, se obtiene que el impacto del escenario 1, deposición tradicional de relaves, es mucho mayor que en el escenario 2, deposición de relaves espesados, y que en el 3, deposición de lodos filtrados. Sin embargo, al aplicar el factor de Escasez de Huella Hídrica, se obtiene que esta diferencia tiene un impacto insignificante cuando se trata de una localización como Minas Gerais, mientras que en regiones extremadamente áridas como la zona de minas del desierto de Atacama, realmente relevante la mejora en la gestión de los relaves.

Cualquier proceso industrial tiene como objetivo lograr la menor cantidad de insumos. Si la entrada es agua y las instalaciones están ubicadas en una región de escasez de agua, este será un objetivo industrial más apremiante. Por lo tanto, un ahorro de 2 millones de metros cúbicos de entrada de agua debido a una nueva técnica de manejo de relaves es una gran ventaja.



La región de Minas Gerais tiene un clima tropical. La disponibilidad de agua es abundante. Por lo tanto, el impacto de la reducción de la huella hídrica de un proceso aquí ubicado no tendrá el mismo impacto que si fuera una región con escasez de agua. Este es el caso de algunas minas ubicadas en Chile, Australia o Sudáfrica.

En la localización de Minas Gerais, debido a un WSI muy bajo, se espera que la cuenca pueda mantener su nivel de recarga siendo una situación sostenible para la producción de la mina.

Sin embargo, desde una perspectiva global, la reducción de la huella de agua de proceso significa una menor huella de agua global y este hecho es beneficioso para todos. Por lo tanto, debe buscar la aplicación de las mejores técnicas disponibles en la minería, como pasta, lo que permite reducir la huella hídrica de la producción de mineral de hierro.

7.1.2 ReCiPe

La metodología ReCiPe utiliza como factor de caracterización Pfister et al. (2009), el cual tiene en cuenta el consumo de agua y le aplica un factor de estrés local, como en el caso del apartado anterior de la Escasez de Huella Hídrica. Sin embargo, en este caso, el enfoque es completamente de ciclo de vida, por lo que se tienen en cuenta todos los flujos que suponen un consumo de agua a lo largo del proceso, como sería la producción de electricidad, y no sólo el consumo directo en el proceso. No obstante, viene expresado como m³ de agua y para conocer su valor es necesario recurrir a una evaluación en categorías de impacto intermedias.

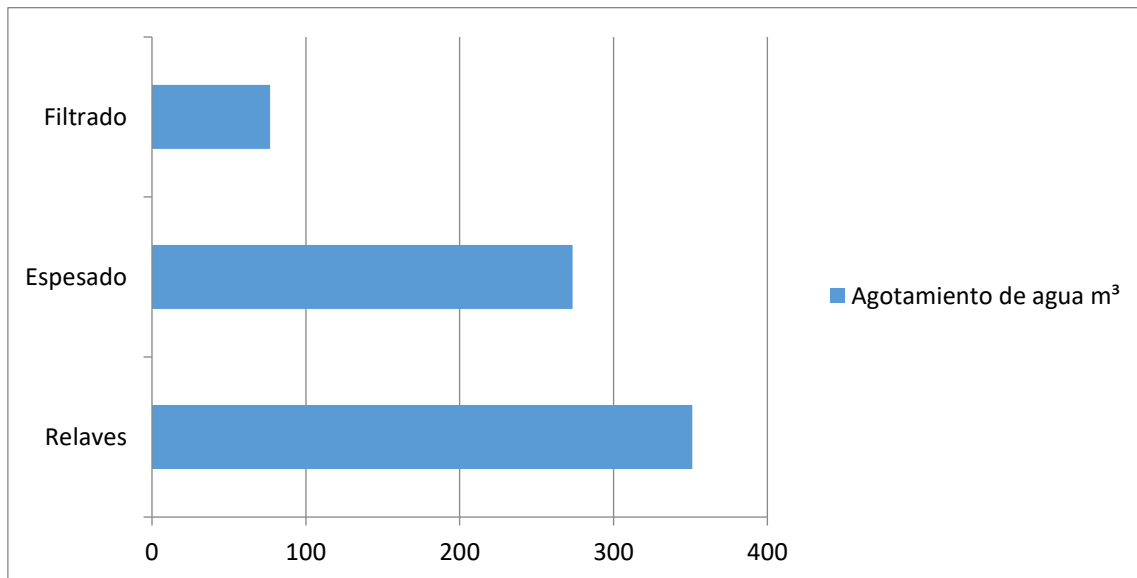


Figura 57: Huella Hídrica desde una perspectiva de ACV utilizando la metodología ReCiPe, categoría de agotamiento de agua, expresada por Unidad Funcional.

La figura muestra como, cuando no sólo se tiene en cuenta el consumo de agua de proceso, sino todo el agua que interviene a lo largo de todo el ciclo de vida, la perspectiva cambia al obtener como peor escenario el del espesado de relaves. La razón fundamental es que para el escenario 2 se requiere un importante consumo de energía, el cuál está ligado a consumo de agua. Por lo tanto, al no contabilizarse de forma



exclusiva el ahorro de agua en los escenarios 2 y 3, en los cuales se utilizan técnicas novedosas de manejo de relaves, el escenario 2 aparece fuertemente penalizado.

Además de este valor se pueden analizar otras categorías de impacto donde se habla de la contaminación de agua marina o agua dulce, pero al no estar normalizadas, ponderadas y traducidas a una unidad común han de estudiarse de forma independiente. Se muestran, por lo tanto, respecto a valores del 100% en cada categoría.

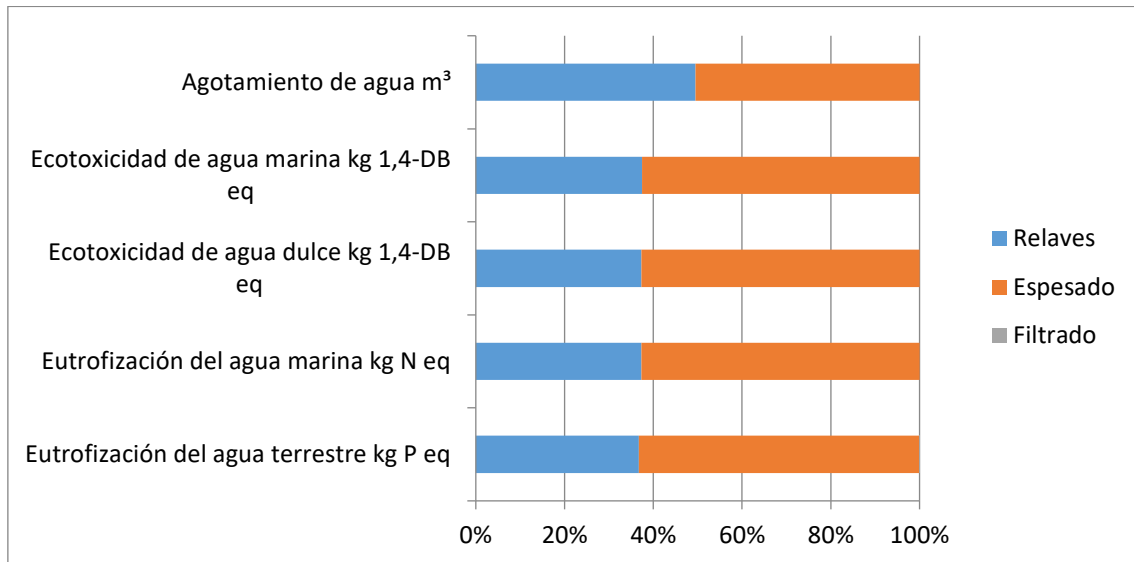


Figura 58: Huella Hídrica desde una perspectiva de ACV utilizando la metodología ReCiPe, todas las categorías de impacto de agua, expresada por Unidad Funcional

Este enfoque es el que recomienda ISO 14046, que defiende la necesidad de encontrar la correspondencia entre el uso y degradación de la calidad del agua y las diferentes categorías de impacto, las cuales a su vez se relacionan con las categorías de daño finales de salud humana y calidad de ecosistema.

Bajo este análisis se detecta cómo el impacto del escenario 2 se localiza fundamentalmente en categorías de impacto relacionadas con la calidad del agua. Esto se debe en gran medida a las emisiones que genera el consumo de energía para el espesado del relave.

Finalmente se muestra la comparación entre la perspectiva ofrecida por Hoekstra (WFN) y la recomendada por ReCiPe, reflejando como es fundamental concebir la Huella Hídrica desde la perspectiva de ACV y utilizar un indicador que tenga en cuenta todos los impactos que acontecen. De lo contrario, se dejan impactos sin evaluar, como sería el agua de consumo.

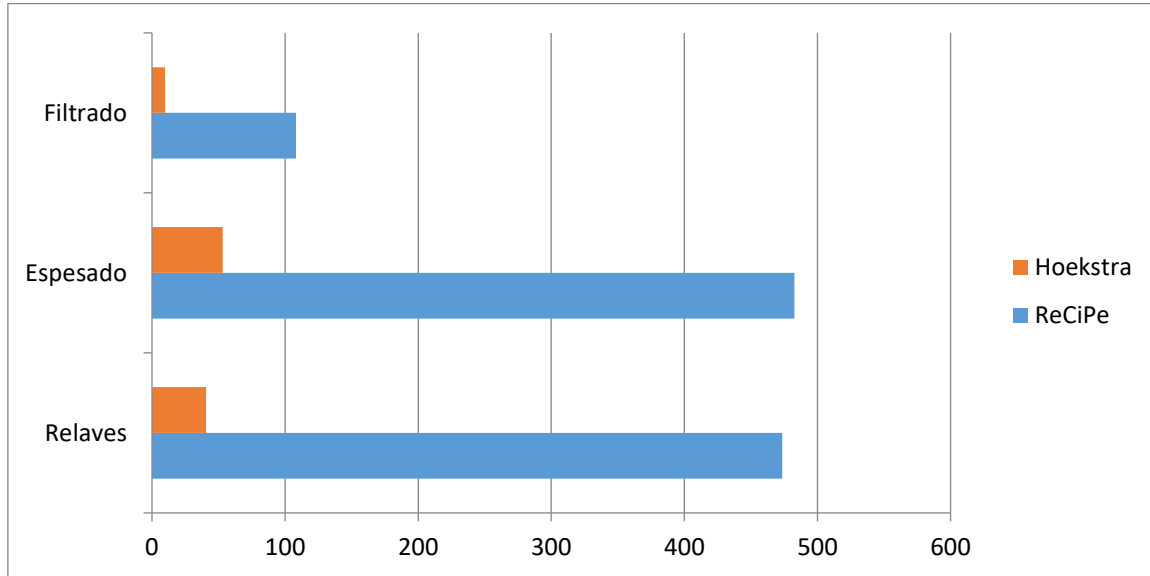


Figura 59: Comparativa de dos metodologías para el cálculo de la Huella Hídrica.

7.2 HUELLA DE CARBONO

Se trata este de un indicador de sostenibilidad que contabiliza las emisiones de efecto invernadero, íntimamente relacionadas estas con el consumo energético. Es por tanto, un indicador muy adecuado a este caso de estudio, donde la EICV ha comprobado las premisas de partida, concluyendo que todo el impacto de los escenarios recae sobre el consumo energético y el uso del suelo, convirtiendo a las demás entradas de inventario y sus consecuentes impactos en despreciables.

Para realizar este análisis se procede a utilizar la metodología ReCiPe, buscando una coherencia con el resto de los análisis. Para ello se toma la categoría de Cambio Climático en puntos intermedios, medida en Kg de CO₂ equivalentes.

Como era de esperar, el escenario 2 es el que tiene mayor Huella de Carbono, por ser el que requiere un mayor consumo de energía en la etapa de transporte del relave espesado. Por otra parte, el escenario 1 sale beneficiado de esta evaluación al no considerar su mayor impacto, el uso del suelo. Es decir, al ser la energía un factor clave, se concluye que la Huella de Carbono es un indicador adecuado para evaluar la sostenibilidad de las diferentes opciones de gestión del relave. Sin embargo, queda patente que hay más aspectos que considerar y que no se puede tomar este de forma exclusiva, si no a la luz de los demás indicadores.

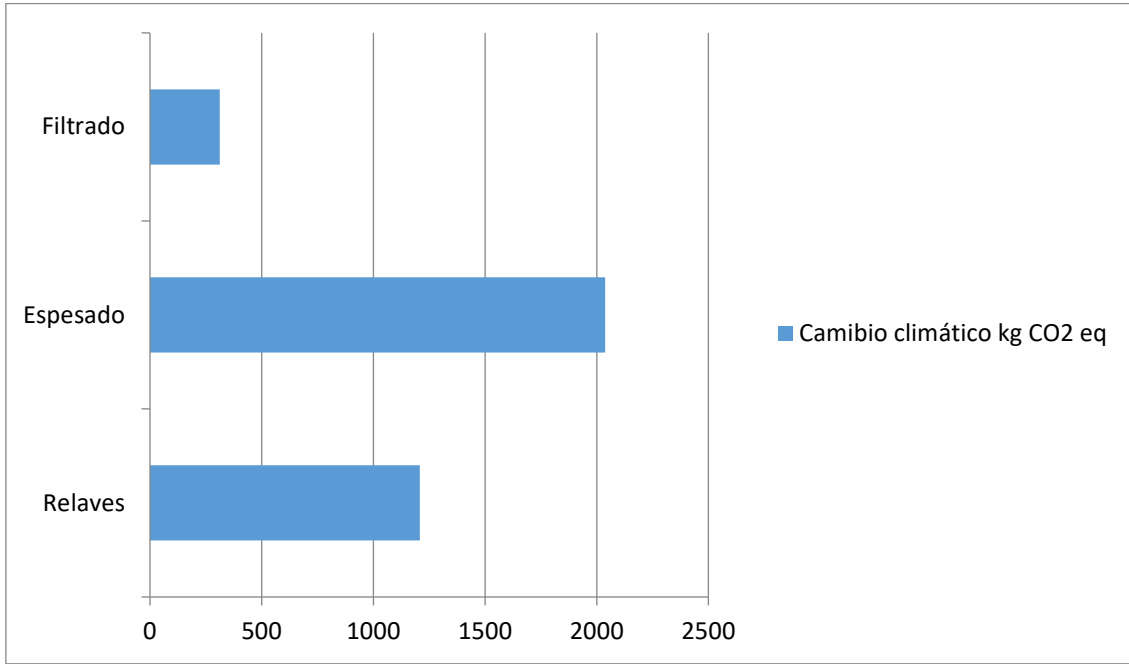


Figura 60: Comparativa de la Huella de Carbono en los tres escenarios.



8. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

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).

Se han establecido muchas bases de datos para registrar los fallos de este tipo de presas en todo el mundo. En 1994, ICOLD desarrolló una base de datos de 185 incidentes relacionados con presas de residuos mineros entre 1913 y 1989. La ICOLD y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA) agregaron más incidentes recientemente. A partir de dicha base de datos, se puede concluir que entre 1970 y 2000, ha habido entre dos y cinco incidentes “importantes” por año debidos a fallos de estas presas de relaves. 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 acontecimientos extraños y que pueden darse en todos los continentes y países donde existe minería (Robinsky, 1999).



Figura 61: Derrame contaminante en Aznalcóllar, España (Aguilar et al., 2000)

Estos incidentes han elevado la preocupación pública sobre los impactos ambientales y sobre 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 62: Derrame en el monte Polley, Canadá

Para su evaluación 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.

8.1 EVALUACIÓN DE RIESGOS EN MINERIA

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 riesgo de forma sostenible, proporcionando una orientación general sobre la realización de la evaluación de riesgos para relaves y emplazamientos similares (ENPI, E., 2011).

Existen 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 único 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.

8.2 OBJETIVO Y DEFINICIÓN DEL ALCANCE

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

La Figura 634 muestra los elementos clave de los sistemas de gestión de relaves mineros durante el ciclo de vida de una instalación de almacenamiento de relaves.

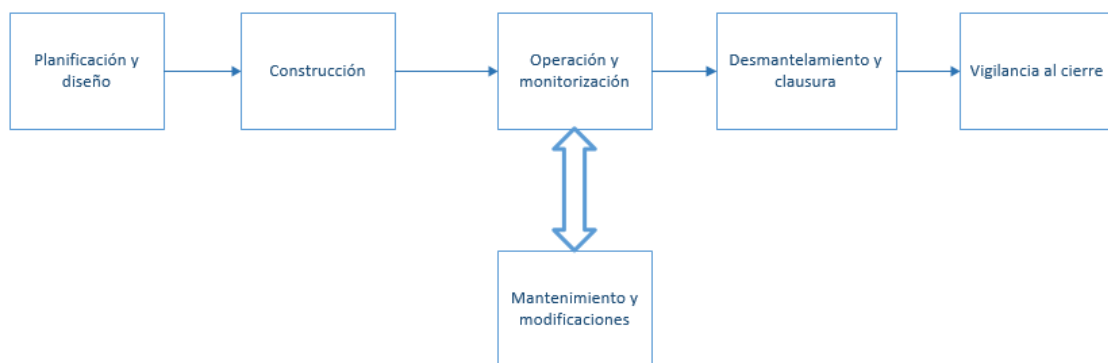


Figura 63: Elementos clave de los sistemas de gestión de colas adaptado de (RET, 2007)

Entre estas etapas, la de post-clausura 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-clausura serán el enfoque principal de este estudio.

El análisis modal de efectos y fallos es 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-clausura (EPC)**, se refiere al período de 100 años posterior a la implementación del plan de cierre (Doka, 2008).

Se analiza 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 de aplicación son los seleccionados en el apartado Metodología:

- 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.

8.3 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.

8.3.1 Fallos de transporte y bombeo en las tuberías

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

8.3.1.1 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

8.3.1.2 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

8.3.1.3 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



Figura 64: Fallo en una tubería y posterior erosión en una cara aguas abajo (Engels, 2004)

1.1.1.4 Fallo del estanque/presa (durante las etapas de operación y cierre)

El fallo de la presa es el más habitual y también el que más problemas presenta. Puede deberse a causas muy diversas:

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:

- a) elevación de los niveles freáticos en los relaves y/o cimientos
- b) mala estimación de diseño contra terremotos
- c) superación del diseño contra terremotos por un terremoto
- d) utilización de propiedades de resistencia al corte no precisas en el análisis de estabilidad
- e) velocidad excesiva en las operaciones de crecimiento
- f) presión excesiva de capas superiores de relaves
- g) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa

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:

- a) elevación de los niveles freáticos en los relaves
- b) 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

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.



Figura 65: Desprendimiento de un terraplén de relaves causado por una superficie con alto nivel freático (Engels, 2004)



Figura 66: Erosión en la cara aguas abajo de un terraplén de relaves debida a una extensa canalización del agua (Engels, 2004).

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:

- a) error en el cálculo del agua libre que puede almacenarse en la balsa.
- b) 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.
- c) puntos de descarga inadecuados que mueven el agua estancada más cerca de un terraplén y pueden hacer inútil una torre de decantación.
- d) puntos de desagüe monitoreados incorrectamente que ocasionan un desbordamiento de los relaves.



- e) una reducción de la cara libre como resultado del hundimiento de la cresta de la presa
- f) escorrentía de lluvias.
- g) fallo del sistema de drenaje.
- h) fallo del desagüe.
- i) fallo del sistema de derivación.

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 deberse a uno o una combinación de los siguientes puntos:

- a) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves.
- b) fallo de la tubería de drenaje (no taponado con hormigón).
- c) degradación del revestimiento y fallo eventual (drenaje taponado con hormigón).
- d) rotura del sistema estanco.

8.3.1.4 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:

- a) erosión del terraplén.
- b) erosión de los estanques de disposición final.
- c) viento fuerte.



Figura 67: Emisiones de polvo (RET,2007)

8.3.1.5 Fallos en el espesador

El espesador es un elemento clave especialmente en los escenarios 2 y 3. Existen diversos modos de fallo.

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.

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:

- a) taponamiento de las últimas etapas de bombeo
- b) cuerpo desconocido en el espesante
- c) mala caracterización de los residuos (propiedades reológicas)
- d) cambio de las propiedades reológicas en los relaves de alimentación

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:

- a) lluvia (en espesador abierto)
- b) fallo del sistema de recolección del vertedero
- c) rebose debido a taponamiento de salida
- d) excesivo flujo de alimentación



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:

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

8.3.1.6 Fallos en el filtro

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.

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:

- a) taponamiento de las últimas etapas de bombeo
- b) cuerpo desconocido en el filtro
- c) mala caracterización de los residuos (propiedades reológicas)
- d) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación

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

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

8.3.1.7 Fallos en el transporte

Existen algunas actividades complementarias con la operación que también son causa de riesgo. Específicamente, el transporte es parte cosustancial de cualquier actividad que mueve material en cantidades tan enorme. Los tipos de fallo que se pueden producir en este ámbito son muy diversos, pero se indican sólo los dos más relevantes.



1. Generación de polvo

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

- a) transporte por camion
- b) viento fuerte
- c) mala cobertura del material en el camión

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:

- a) colisión
- b) errores de conducción
- c) fallo mecánico
- d) actores ambientales que perjudiquen la conducción



Figura 68: Dúmpper volcado en la mina Veladero-Barrick Gold

8.4 EVALUACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE LOS MODOS 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" según lo indicado en la Tabla 2: Probabilidad de evento (Eng and Shaw).

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 3: Severidad de los efectos (Eng and Saw). Nuevamente, se sugieren las clasificaciones que se han encontrado útiles en el pasado, pero podrán ser adaptadas al sitio o plan evaluado en cada momento (Eng and Shaw).

Por último, 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. En esta investigación, se utilizará dicha clasificación tal como se indicó en el capítulo 3 (Tabla 4: Nivel de confianza (Eng and Saw)).

8.5 LIMITACIONES

Dado el carácter generalizable que se pretende dar a este estudio, existen una serie de limitaciones en la aplicación e interpretación de sus resultados, entre las que destacan las siguientes:

- 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.
- Puesto 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.



No obstante, se considera que el estudio puede conseguir su doble objetivo de suponer una comparativa global de la sostenibilidad del tratamiento de relaves desde una perspectiva holística y suponer una guía de aplicación particularizable en cada caso concreto.

8.6 RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el AMFE 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 plantea 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.

Dado el elevado número de riesgos considerados, las tablas se incluyen en anexos.

8.7 MATRIZ DE RIESGOS

Una forma simplificada de ver los resultados de impacto y probabilidad son las matrices de riesgos. A continuación se muestran las matrices de riesgos correspondientes a las dos categorías de Impactos Ambientales y Seguridad Pública. Cada modo de fallo se expresa con un identificador de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 5: 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



ID	Descripción de los modos de fallo
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	Underflow exit plugging
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



Tabla 6: 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, G14, 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,	



Tabla 7: Matriz de riesgos para seguridad pública

		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	E5.2,		B5.2, B4.2,		
	BAJA	E7.1,	C5.1, 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,	D3.2, E5.1, E6.1, 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,	

8.8 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 mas



insignificante) hasta el valor 9 para el rojo (riesgo mas severo), quedando la matriz de riesgos del siguiente modo (Tabla 8):

Tabla 8: Ponderación de la matriz de riesgos

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 (número) especificado en la Tabla 5.

La interpretación de la mejor solución en el análisis de riesgos no es sencilla puesto que depende profundamente de la tolerancia y forma de afrontar el riesgo de la persona que lo analiza. En general se podría optar por diversos procedimientos:

- Criterio univariante, que considere un solo factor, generalmente la severidad de los riesgos detectados.
- Comportamiento no tolerante a fallos, rechazando los casos que tiene valores superiores a un umbral.
- Criterio ponderado que intente equilibrar ambos, de modo que sin llegar a rechazar casos por el nivel de riesgo, estime un riesgo total combinando los pesos de cada uno de ellos.

8.8.1 Criterio univariante-

Una primera aproximación, sin duda la más débil, se basa en la idea considerar la severidad como el único factor relevante.

La Figura 69 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, la pasta y el filtrado tienen un mayor riesgo de efectos ambientales que los relaves húmedos convencionales para todos los fallos de transporte 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.

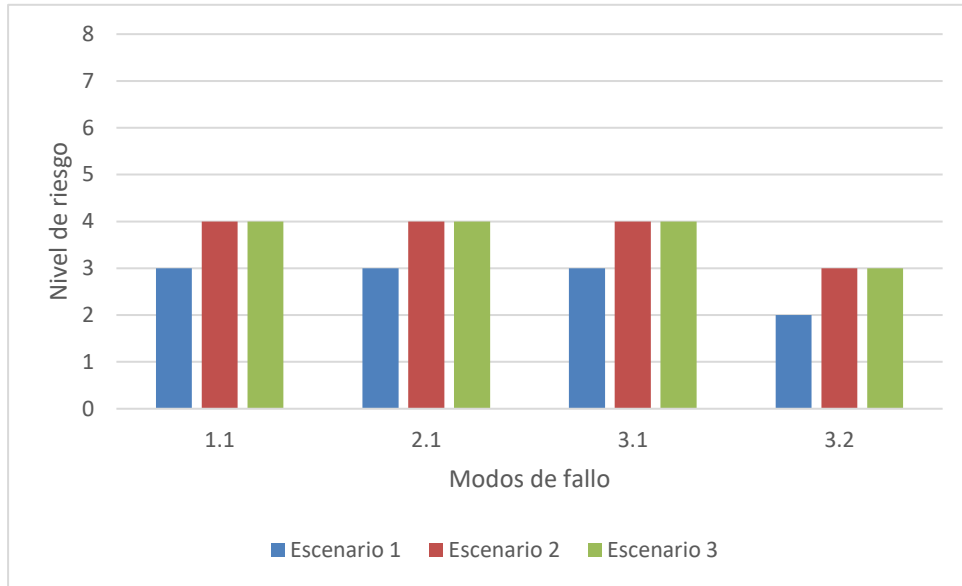


Figura 69: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación

Los mismos riesgos debidos a los fallos en el transporte y el bombeo por tubería de los escenarios 1, 2 y 3 en la etapa de operación se muestran para la seguridad pública en la Figura 70. Como se observa, los relaves convencionales tienen menor riesgo de efectos de seguridad pública que los otros dos escenarios en los modos de fallo relacionados con transporte.

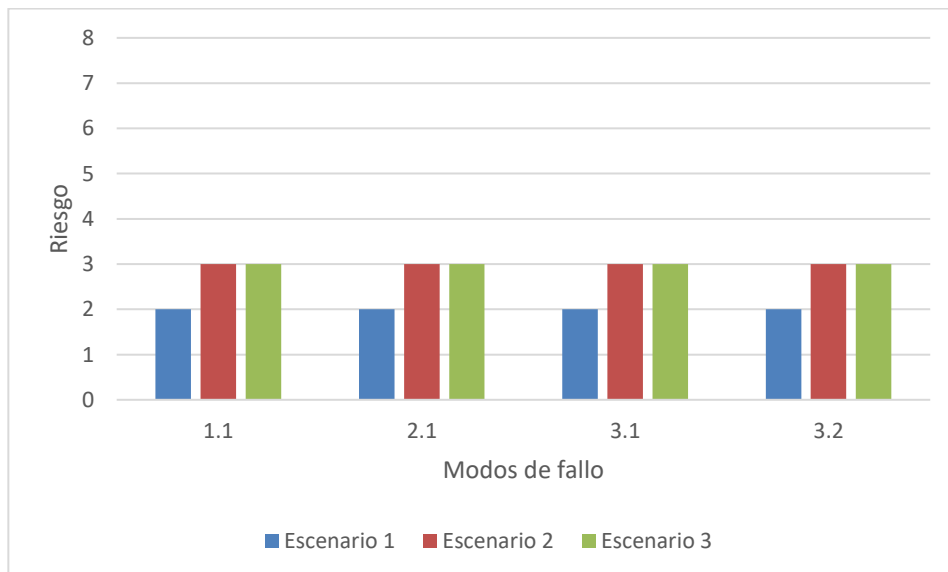


Figura 70: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en el transporte y bombeo por tubería en la etapa de operación

Son de mayor relevancia 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 en la Figura 71, 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.

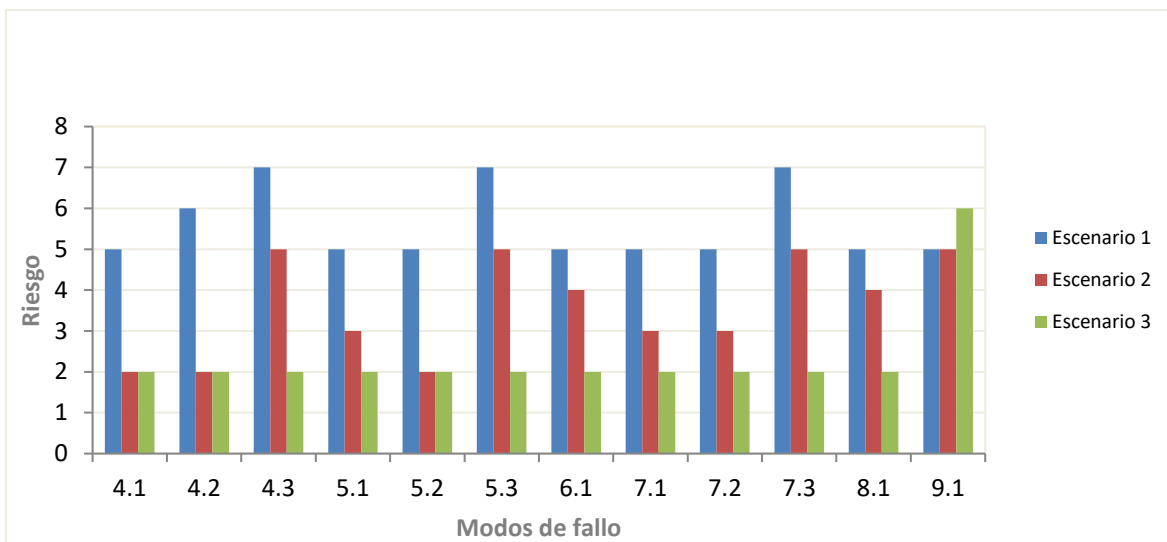


Figura 71: Severidad de los riesgos de impacto ambiental producidos por fallos en la presa en la etapa de operación

La Figura 72 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, siendo mayor el del residuo seco.

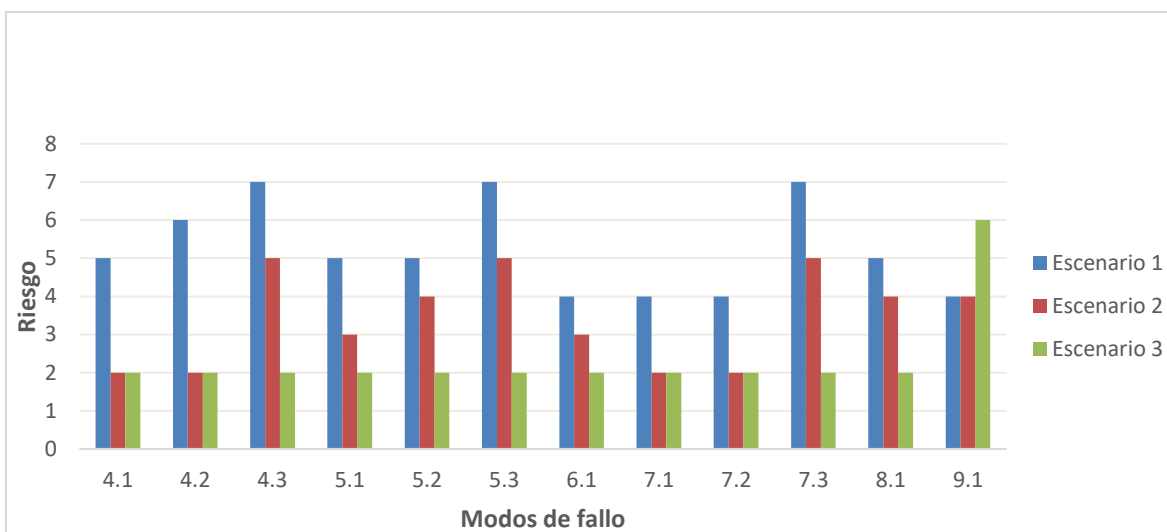


Figura 72: Severidad de los riesgos para la seguridad pública producidos por fallos en la presa en la etapa de operación

En el caso de los riesgos de impacto ambiental que pueden darse durante la etapa de post-cierre (Figura 73), 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.

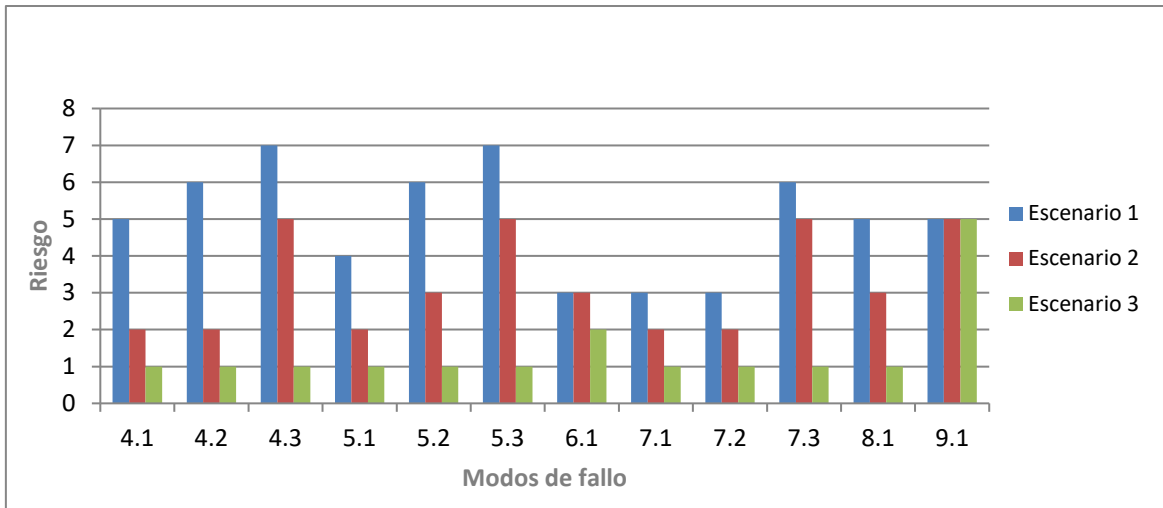


Figura 73: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos a fallos en la presa en la etapa de operación

Este comportamiento es similar en cuanto a la seguridad pública (Figura 74).

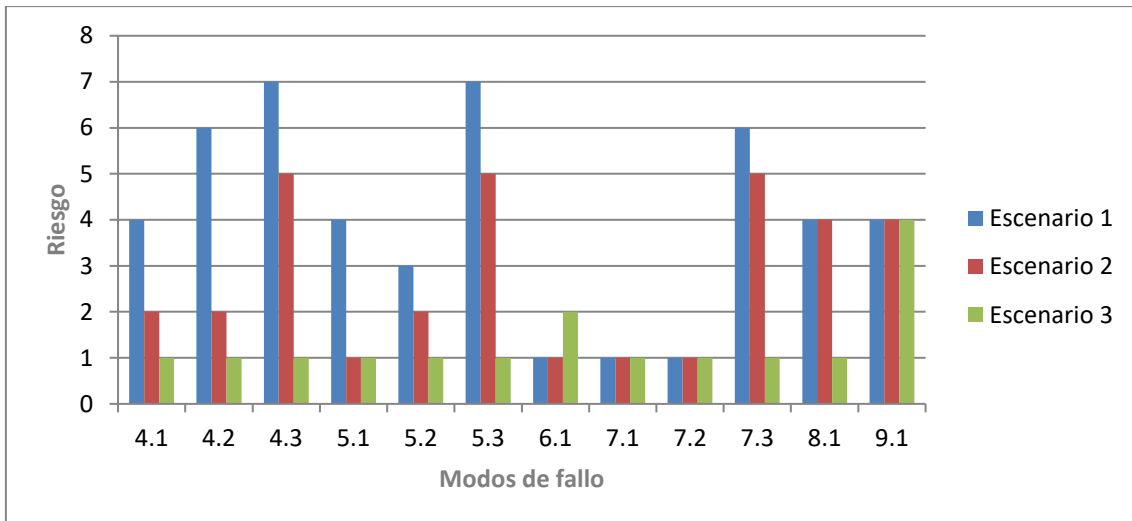


Figura 74: Severidad de los riesgos para la seguridad pública debidos a fallos en la presa en la etapa de post-cierre

En lo referente al espesador, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los riesgos (Figura 75 y Figura 76) para el espesador en los escenarios 2 y 3, durante la etapa de operación son similares debido a que el proceso es el mismo en ambos escenarios. 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).

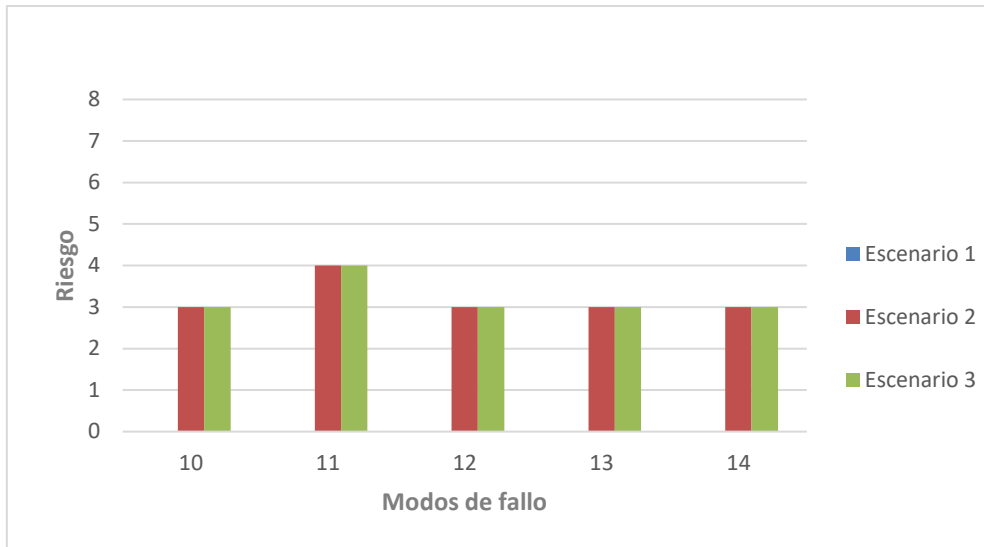


Figura 75: Severidad de los riesgos de impacto ambiental debidos al espesador en la etapa de operación

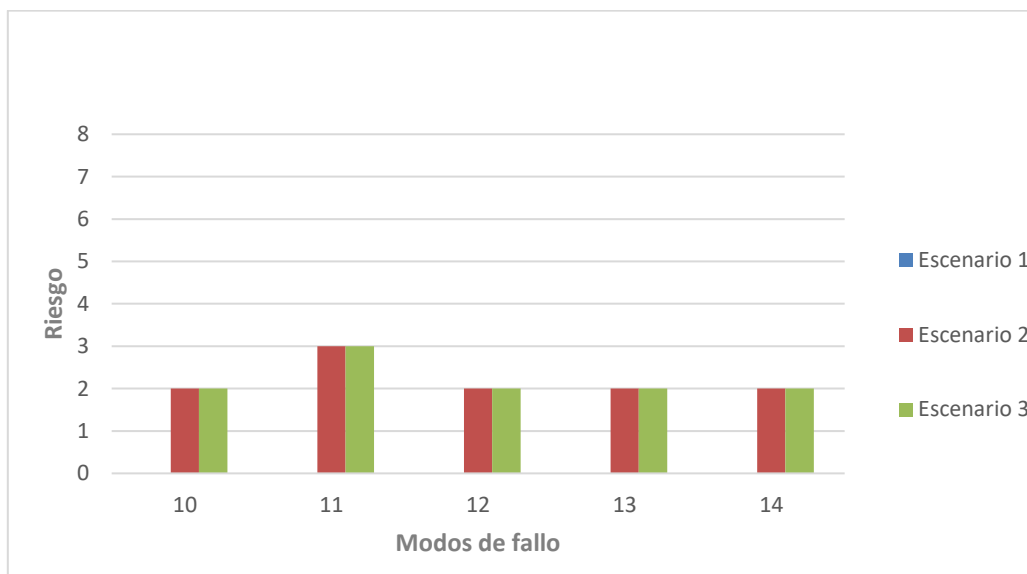


Figura 76: Severidad de los riesgos para la seguridad pública por fallos en el espesador durante la etapa de operación

Las Figura 77 y Figura 78 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 presentan niveles de riesgo medio superior. Por otro lado, los sistemas de colas filtradas tienen niveles de riesgo bajos a medios.

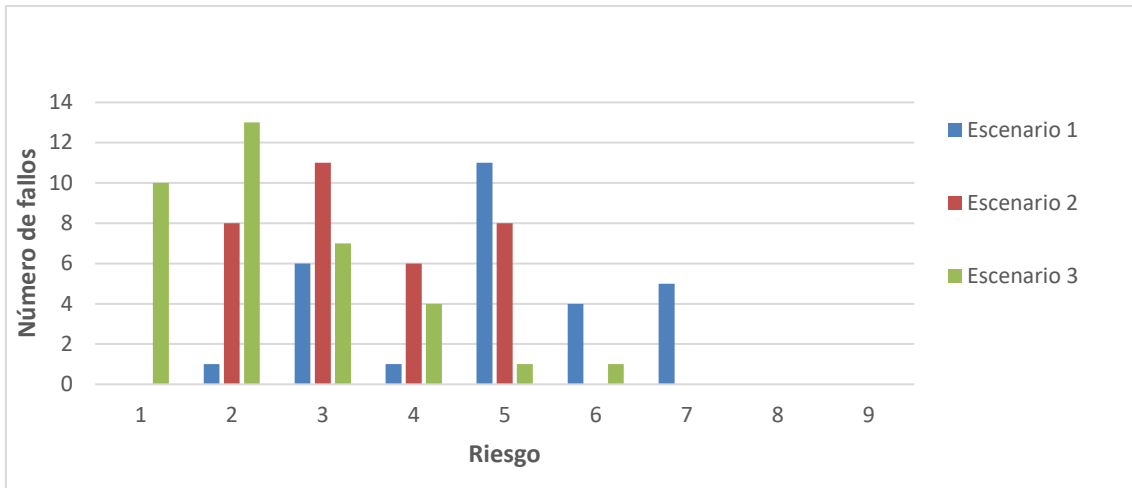


Figura 77: Distribución del número de riesgos con efectos ambientales para las diferentes severidades

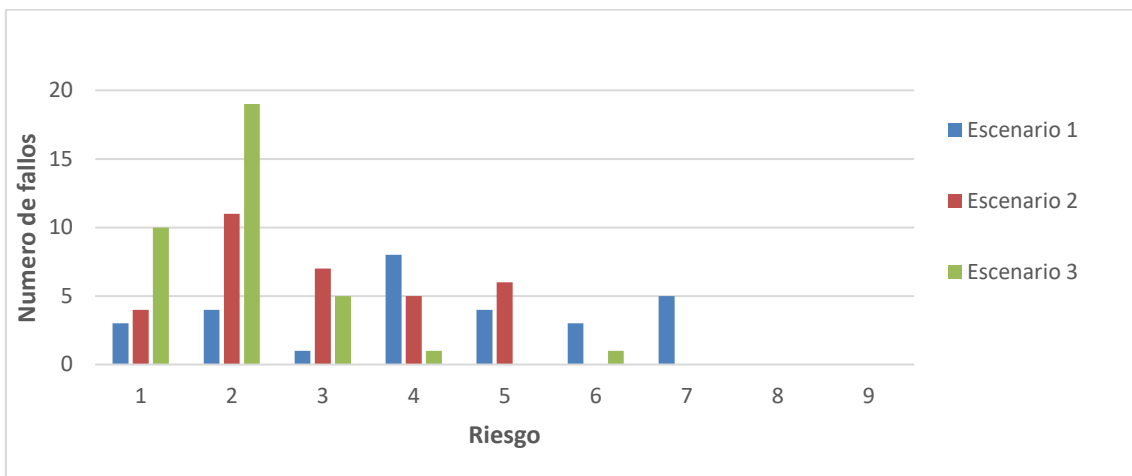


Figura 78: Distribución del número de riesgos con efecto en la seguridad pública para las diferentes severidades

8.8.2 Intolerancia al riesgo

En función del nivel de tolerancia al riesgo, puede ocurrir que algunas alternativas sean directamente descartables. Esto puede hacerse por el valor ponderado fruto de la combinación de probabilidad de ocurrencia y consecuencias o, a menudo, directamente por el valor de severidad.

En este caso ambos valores son los mismos y corresponden a los riesgos que se valoran con probabilidad moderada y severidad extrema, correspondientes a los casos B4.3, B5.3, B7.3, C4.3 y C5.3. De ellos los dos últimos corresponden a problemas en la operación del caso 1, mientras que los tres primeros se corresponden con problemas de cierre pero también en el mismo escenario.

Cabe pensar por tanto que en caso de aplicar este criterio, al bajar el umbral el primer caso eliminado sería el escenario 1, de relaves tradicionales en vía húmeda.



8.8.3 Riesgos ponderados.

La posibilidad de ponderar los riesgos permite equilibrar entre la aproximación cuantitativa estricta que sólo considera los riesgos existentes y la eliminación de casos por el simple hecho de superar determinado nivel de riesgo.

Esta ponderación puede ser lineal, exponencial o incluso con funciones discontinuas. En este caso se opta por una aproximación conservadora, en la que se pondera cada caso de forma lineal, con los valores establecidos en la matriz de la Tabla 8.

El resultado de aplicar los coeficientes a cada riesgo da lugar a las siguientes tablas:

Tabla 9: Valores ponderados del riesgo ambiental

Escenario	Operación	Cierre
1	79	60
2	71	40
3	73	17

Tabla 10: Valores ponderados del riesgo de seguridad

Escenario	Operación	Cierre
1	75	53
2	70	37
3	67	16

En ella se presentan los valores de riesgo ponderados para cada uno de los escenarios distinguiendo las dos etapas principales: operación y cierre para los dos tipos de impacto estudiados.

En evidente que, tanto a nivel de operación como de cierre los riesgos acumulados en el escenario 1 son muy superiores a los escenarios 2 y 3, siendo este último el más favorable.

El mismo resultado se repite para los dos impactos valorados.

1.2. CONCLUSIONES

En resumen, los principales problemas que afectan la sostenibilidad de las operaciones mineras, en relación a los relaves, provienen de los fallos de las instalaciones de almacenamiento utilizadas en la etapa de operación y post cierre.

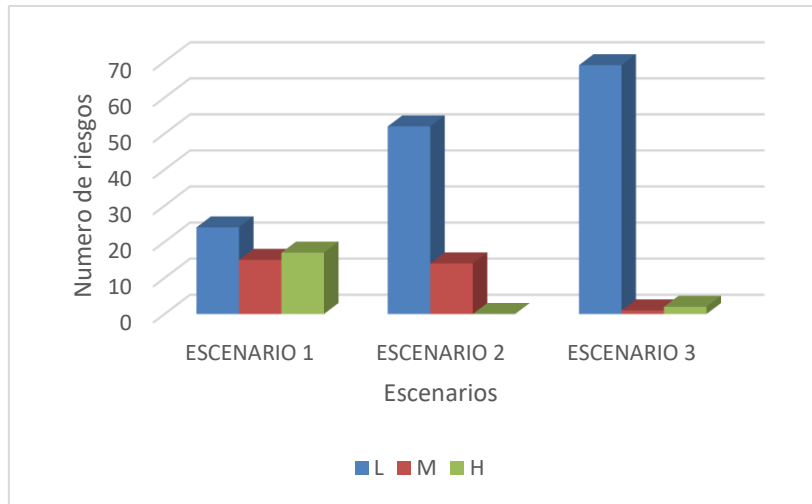


Figura 79: Distribución total de los riesgos por escenario

Se puede concluir que los relaves filtrados son más sostenibles, desde todas las estrategias de consideración del nivel de riesgo, que los residuos convencionales de relaves húmedos y pastosos. 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. La represa 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 en 100 años después del cierre, demostró cualitativamente que los relaves filtrados son más sostenibles.



9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO

9.1 CONCLUSIONES

Como consecuencia de los estudios realizados a lo largo del presente trabajo se obtienen una serie de resultados, los más relevantes de los cuales se muestran a continuación:

- Hoy en día, el desarrollo sostenible es una perspectiva permanentemente presente en la sociedad, tener una perspectiva de pensamiento de ciclo de vida o de cadena de producto es fundamental para abordar cualquier proyecto.
- La minería es un sector socialmente percibido de forma negativa pero que se encuentra en la base de todas las actividades humanas al proveer de aquellas materias primas necesarias para el desarrollo de otros procesos productivos que llevan a la satisfacción de una necesidad. Resulta imprescindible mejorar su sostenibilidad desde todos los puntos de vista, muy especialmente el social.
- El creciente uso de la flotación por su menor consumo energético y mejor aprovechamiento ha provocado que la gestión de los relaves sea el aspecto que más compromete la sostenibilidad dentro de la actividad minera.
- La valoración desde el punto de vista de ciclo de vida del tratamiento de relaves o colas demuestra que estas presentan tres aspectos casi hegemónicos a lo largo de la realización de un inventario: el consumo de energía, la ocupación de superficie y el consumo de agua. Cualquier acción que pretenda mejorar su sostenibilidad debe ir necesariamente enfocada a alguno de estos elementos.
- Los elevados consumos de agua de la actividad minera, que en algunos países superan el 10% del consumo total implican que pequeñas mejoras en los consumos tengan un fuerte impacto sobre el consumo global. Algo muy similar, aunque en menor medida, sucede con la energía.
- No menos relevante es el riesgo que esta actividad supone, tanto para el medio ambiente como para la salud humana los depósitos de relaves, con los mayores niveles de incidentabilidad que superan los dos incidentes a gran escala por año.



- La aplicación de la metodología de ACV se presenta como una herramienta de evaluación de impacto holística, capaz de atender a una gran variedad de impactos pero las simplificaciones que supone evidencian debilidades en la aplicación a los escenarios por lo que se concluye que para tomar una decisión informada es imprescindible completar la evaluación otros indicadores. Su combinación con Huella Hídrica y Análisis de Riesgos resulta especialmente informativa.
- Escogiendo escenarios para valorar la idoneidad de eliminar agua de los relaves se concluye que el vertido húmedo está fuertemente penalizado, siendo el que mayor impacto genera, por la gran ocupación del suelo durante un gran periodo temporal (superior a 100 años).
- El espesado hasta nivel paste no aparece nunca como la mejor opción y se ve fuertemente penalizado por el gran consumo que requiere el transporte de un relave espesado.
- La opción de filtrado se presenta como la mejor desde un punto de vista sostenible, por requerir una superficie despreciable en comparación con el depósito del primer escenario. Además, su consumo energético es muchísimo menor que el de relaves espesados, pues el transporte se realiza en camiones, con un impacto mínimo en comparación con el transporte por bombeo.
- El análisis de sensibilidad evidencia cómo el filtrado siempre es la mejor opción, pero el hecho de que espesado o no espesado sea mejor o peor va a depender de cómo se haga la valoración del uso del suelo, del tipo de energía que se utiliza y de la ubicación de la planta de espesado, lo que lo hará dependiente de cada explotación. Así, en un país con un alto porcentaje de renovables favorece el que el espesado de relaves sea más desable que el no espesado. La ubicación de la planta de espesado cercana al depósito también contribuye a la elección de esta forma de gestión de relaves.
- La combinación de procesos con escasa demanda de agua fresca, existencia de minas en zonas áridas y el efecto de escasez de lluvias que introduce el cambio climático recomiendan considerar la huella hídrica como elemento crítico en la valoración. Se debe tener en cuenta toda el agua que se llega a requerir a lo largo de las diferentes etapas de cada uno de los elementos del sistema, incluyendo aspectos que habitualmente se ignoran como el consumo de agua para la producción de energía.
- Tras el análisis de HH, cuando se tiene en cuenta sólo el consumo de agua, se llega a la conclusión de que tanto el espesado como el filtrado son opciones mucho mejores que la del relave sin espesar. Esta diferencia es aún más drástica cuando se tiene en cuenta la escasez en la disponibilidad de agua que se da en diferentes zonas del planeta.
- Sin embargo, cuando se realiza la HH hídrica con un enfoque completo de ACV, según la norma 14046 la peor opción de manejo pasa a ser el espesado de relaves por el consumo energético.
- Las valoraciones son extremadamente sensibles a la metodología utilizada. Tras someter el inventario al análisis con Hoekstra, una metodología de enfoque



diferente a ReCiPe, se detecta que los impactos son mucho menos valorados en cada uno de los escenarios, alterando el orden en el resultado global de la puntuación de cada uno de los escenarios para resultar menos impactante la gestión de relaves sin espesar que la de espesados.

- Respecto a la Huella de Carbono, la mejor opción sigue siendo el filtrado y el espesado se presenta como la peor.
- Finalmente, el Análisis de Riesgos ratifica que el filtrado es sin duda la opción más segura. No implica esto que no tenga fallos y accidentes. De hecho, se considera una serie de posibles fallos, pero de poca severidad, mientras que el escenario 1 se describe con importantes accidentes con categoría de graves o muy graves.
- Tras el análisis de las tres formas de gestión bajo un conjunto de indicadores complementarios de sostenibilidad se trata de dar cobertura a todos los posibles impactos que se pueden generar y el resultado es que para funcionar alineados con el desarrollo sostenible es necesario escoger la vía de filtrado, escenario 3.

9.2 LINEAS DE FUTURO

Fruto de los resultados y de las limitaciones detectadas a lo largo de este trabajo se han detectado una serie de trabajos que no han podido ser abordados en la presente tesis y que se contribuirían sin duda al avance del conocimiento en este campo. Entre ellos destacan los siguientes:

- 1.- Los resultados incorporan todos los indicadores considerados más relevantes para la valoración de este tipo de tratamientos. Sin embargo la toma de decisiones a partir de los resultados depende estrictamente de la interpretación de cada uno de ellos. Sería muy conveniente generar un indicador unificado que incorpore todos los indicadores individuales. Se propone la utilización de herramientas que valoren la opinión de los expertos como AHP.
- 2.- Para este análisis se han utilizado una serie de escenarios tomados de bibliografía, pero sería realmente interesante realizar un estudio sistemático de diferentes casos reales que permitan conocer con más detalle las diferentes variables que están participando en los procesos.
- 3.- El uso del suelo plantea un debate que sería necesario resolver. A pesar de su importancia, la categoría de uso del terreno es uno de los impactos en las que las metodologías de análisis son más discutidas y donde se reconoce una necesidad de mejora. Las metodologías existentes no discriminan suficientemente entre distintos usos y transformaciones del suelo. Es primordial desarrollar una metodología de evaluación de esta categoría o factores de caracterización que permitan ajustar con más precisión el modelo generado en el inventario con la realidad.
- 4.- Los análisis son realizados para tres escenarios con distintos niveles de espesamiento pero resultaría extremadamente útil determinar cuál es el porcentaje de carbono que supone el valor óptimo para que los diseñadores de las instalaciones puedan tomar como puntos de partida en sus cálculos de ingeniería.



- 5.- Los resultados obtenidos están fuertemente condicionados por factores físicos (latitud, orografía, clima), del mineral (tipo, ley, propiedades reológicas, ...) e incluso sociales. Esto obligaría a cada proyectista a realizar desde 0 el estudio de la idoneidad de su solución de tratamiento de relaves, sin ser expertos en este tipo de evaluación. Se considera que sería muy útil para el sector y muy especialmente para las empresas y las administraciones públicas el desarrollo de una metodología y/o herramienta de valoración que, a partir de los datos de usuario reproduzca el proceso y genere el impacto esperado en cada escenario concreto.



10. REFERENCIAS

ABB (2012). ABB drives in mining: medium voltage drives for reduced energy consumption and optimized process control.

ABS (2016). Water Account Australia.

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.

Adiansyah, J.S., Rosano, M., Vink, S., Keir, G., and Stokes, J.R. (2016). Synergising water and energy requirements to improve sustainability performance in mine tailings management. *J. Clean. Prod.* *133*, 5–17.

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

Aldaya, M.M., Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., and Mekonnen, M.M. (2012). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard* (Routledge).

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

Angus Paterson, and Robert Cooke (2014). *The Design of Slurry Pipeline Systems*.

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.
- Berger, M., and Finkbeiner, M. (2010). Water footprinting: How to address water use in life cycle assessment? *Sustainability* 2, 919–944.
- Bóhm, J., Debreczeni, Á., Faitli, J., Gombkötő, I., and László, T. (2005). Tailings Management Facilities Water Management and the Use of Thickened Tailings.
- Bolis, I., Morioka, S.N., and Sznelwar, L.I. (2017). Are we making decisions in a sustainable way? A comprehensive literature review about rationalities for sustainable development. *J. Clean. Prod.* 145, 310–322.
- Brachebusch, F.W. (1994). Basics of paste backfill system. *Min. Eng.* 10, 175–1.
- BREE (2014). Australian Energy Update. Commonwealth of Australia, Canberra Australia, p. 2014.
- Brundtland, G.H., and Mansour, K. The World Commission on Environment and Development (WCED). 1987. Our Common Future 2010.
- de Burgos Jiménez, J., and Céspedes Lorente, J.J. (2001). Environmental performance as an operations objective. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 21, 1553–1572.
- Buxton, A. (2012). MMSD+ 10: Reflecting on a decade of mining and sustainable development. Lond. UK Int. Inst. Environ. Dev. Available Online [Http://pubs.ied.org/pdfs/16041IIED.Pdf](http://pubs.ied.org/pdfs/16041IIED.Pdf).
- i Canals, L.M., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., and Clift, R. (2009). Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *Int. J. Life Cycle Assess.* 14, 28–42.
- 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.
- Cowell, S.J., Wehrmeyer, W., Argust, P.W., and Robertson, J.G.S. (1999). Sustainability and the primary extraction industries: theories and practice. *Resour. Policy* 25, 277–286.
- 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.

Díaz, A.A., and Hechavarría, T.L. (1999). Selección de diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos (tercera parte). *Método generalizado. Régimen laminar.*

Dimitra Triantou, A. (2009). Carbon, Energy and Water Footprint of three AkzoNobel Internal Sizing Chemicals:: A Cradle to Gate LCA related study.

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

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.

Dragflow Dragflow, bombas y dragas.

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. (2009) *RISK MANAGEMENT FOR MAJOR GEOTECHNICAL STRUCTURES ON MINES*. www.infomine.com (Acceso 03/06/2015)



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.

Fernández, R.L., Fernández, F.O., Huerta, G.M., and Clemente, D.P. Valoración del interés del espesamiento de residuos mineros como herramienta de mejora ambiental.

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.

GRUNDFOS Bombas Grundfos | Sistemas de bombeo.

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

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

Hilson, G., and Murck, B. (2000). Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective. *Resour. Policy* 26, 227–238.

Hoekstra, A.Y., and Chapagain, A.K. (2008). Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources Appendix XX: Water footprints of nations (Blackwell Publishing, Oxford, UK. Abrufbar unter [www. waterfootprint. org](http://www.waterfootprint.org)).

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., and Mekonnen, M.M. (2009). Water footprint manual: State of the art 2009.



Hoekstra, A.Y., Chapagain, K., Aldaya, M., and Mekomen, M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*, Earthscan, London, Washington DC.

Humphreys, D. (2015). *The remaking of the mining industry* (Springer).

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.

Intermas Geosynthetics Geo@intermasgroup.com.

ISO, I. (2006). 14040: *Environmental management—life cycle assessment—principles and framework*. Lond. Br. Stand. Inst.

ISO, I. (2014). 14046 *Environmental Management, Water Footprint—Principles, Requirements and Guidelines*. Int. Organ. Stand. Geneva Switz.

Jain R., Cui Z., and Domen J. (2016). *Environmental Impact of Mining and Mineral Processing: Management, Monitoring, and Audit*.

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

Jeswani, H.K., and Azapagic, A. (2011). *Water footprint: methodologies and a case study for assessing the impacts of water use*. *J. Clean. Prod.* 19, 1288–1299.

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

Johnson, D., and Fourie, C.J.S. (2012). *An overview of energy efficiency in South African hard rock mining*. In *Energy Efficiency Convention (SAEEC), 2012 Southern African*, (IEEE), pp. 1–6.

Jolliet, 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.

JRC (2004). *High density slurry and paste tailings, transport systems*. In *International Platinum Conference 'Platinum Adding Value*, pp. 159–166.

JRC (2010). *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment-Detailed guidance*. (European Union).

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.

Kondo, S. (2002). Foreign direct investment and the environment: lessons from the mining sector. *Foreign Direct Invest. Environ.* 7.

Kounina, A., Margni, M., Bayart, J.-B., Boulay, A.-M., Berger, M., Bulle, C., Frischknecht, R., Koehler, A., i Canals, L.M., and Motoshita, M. (2013). Review of methods addressing freshwater use in life cycle inventory and impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 707–721.

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.

Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. *Environ. Impact Assess. Rev.* 18, 493–520.

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

Ministerio de España La sequia en España.

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.

Motoshita, M., Itsubo, N., and Inaba, A. (2011). Development of impact factors on damage to health by infectious diseases caused by domestic water scarcity. *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 65–73.

Nguyen, M.T., Vink, S., Ziemski, M., and Barrett, D.J. (2014). Water and energy synergy and trade-off potentials in mine water management. *J. Clean. Prod.* 84, 629–638.

Niemeijer, D., and de Groot, R.S. (2008). A conceptual framework for selecting environmental indicator sets. *Ecol. Indic.* 8, 14–25.

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., Haque, N., Lovel, R., and Cooksey, M.A. (2014). Evaluating the application of water footprint methods to primary metal production systems. *Miner. Eng.* 69, 65–80.

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).

OUTOTEC, K.J. (2014). Towards Minimum Impact Cu concentrator a conceptual study. (Helsinki: OUTOTEC), p.

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.

Pedro Valencia, Ricardo Abarca, and Jorge Casanova (2016). High-Density Slurry Transportation using Centrifugal Pumps: Control and Limits. NUTRAM Case. SHIMIN Engineering, Chile. p.

Pfister, S., Boulay, A.-M., Berger, M., Hadjikakou, M., Motoshita, M., Hess, T., Ridoutt, B., Weinzettel, J., Scherer, L., and Döll, P. (2017). Understanding the LCA and ISO water footprint: A response to Hoekstra (2016) “A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA.” *Ecol. Indic.* 72, 352–359.

Pimentel, B.S., Gonzalez, E.S., and Barbosa, G.N. (2016). Decision-support models for sustainable mining networks: fundamentals and challenges. *J. Clean. Prod.* 112, 2145–2157.

Rausand, M., and Høyland, A. (2004). System reliability theory: models, statistical methods, and applications (John Wiley & Sons).



RECIPE www.lcia-recipe.net.

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.

Rennings, K., and Wiggering, H. (1997). Steps towards indicators of sustainable development: linking economic and ecological concepts. *Ecol. Econ.* 20, 25–36.

RENOVGAL Renovgal-Ánisis de Ciclo de Vida-Energías Renovables-Vigo.

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.

SAC Adequa infraestructuras Ficha técnica tubería lisa PVC presión adecuada para abastecimiento y distribución.

Simpson, M., Aravena, E., and Deverell, J. (2014). The future of mining in Chile (CSIRO Futures Report, 64p).

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.



Tejos, M., Proust, J., 2008. Derechos, Extracciones Y Tasas Unitarias de Consumo de Agua Del Sector Minero Regiones Centro-norte de Chile. Proust Consultores, for Ministerio de Obras Publicas Direccion General de Aguas Division de Estudios y Planificacion, Santiago.

Tillman, A.-M., and Baumann, H. (2004). The hitch hiker's guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application (Lund, Sweden: Studentlitteratur).

Tilton, J.E. (1996). Exhaustible resources and sustainable development: Two different paradigms. *Resour. Policy* 22, 91–97.

Tremblay, G. (1998). Subaqueous Tailings Disposal: Results of the MEND program-Case studies on tailings management (ICME, United Nations Environment Programme (UNEP)).

Uralita sistemas de tuberías S.A. (2016). Soluciones y tuberías de drenaje adecuada.

U.S. Environmental Protection Agency (1994). Technical report. Design and evaluation of tailings dams.

Vargas, J.C. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV): con una bibliografía selecta. *Rev Esc Colomb Ing* 37–70.

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).

Vörösmarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R.B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science* 289, 284–288.

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd (2014). Water footprint, VTT Technical Research Centre of Finland.

Water Footprint Network (2011). Home.

WCED (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford. (Oxford: Oxford University Press).

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.

Wiendahl, H-P; ElMaraghy, H; Nyhuis, P; Zäh, M; Wiendahl, H-H; Duffie, N; Brieke, M. Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2), pp. 783-809, 2007.

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.

Zarate, E., and Kuiper, D. (2013). Evaluación de Huella Hídrica de la banana para pequeños productores en Perú y Ecuador [Water Footprint Assessment of Bananas Produced by Small Banana Producers in Peru and Ecuador].

ANEXO I

Resultados del Análisis Modal de Efectos y Fallos

CONTENIDOS

ESCENARIO 1

- Escenario 1: Fallos de transporte en la etapa de operación
- Escenario 1: Fallos de la presa en la etapa de operación
- Escenario 1: Fallos de la presa en la etapa de clausura

ESCENARIO 2

- Escenario 2: Fallos de transporte y bombeo en la etapa de operación
- Escenario 2: Fallos de la presa en la etapa de operación
- Escenario 2: Fallos de la presa en la etapa de clausura
- Escenario 2: Fallos del espesador en la etapa de operación

ESCENARIO 3

- Escenario 3: Fallos de transporte en la etapa de operación
- Escenario 3: Fallos de la presa en la etapa de operación
- Escenario 3: Fallos de la presa en la etapa de clausura
- Escenario 3: Fallos del espesador en la etapa de operación
- Escenario 3: Fallos del filtrado en la etapa de operación
- Escenario 3: Fallos de transporte en traslado en camión

Escenario 1: Fallos de transporte en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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 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, afecta al sistema de drenaje y contamina el agua y el suelo, no hay muertes	L	L	L	N
A2	Rotura de la tubería					
A2.1	Rotura 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 muertes.	L	L	L	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
A3	Rotura de la bomba					
A3.1	Rotura 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 muertes.	L	L	L	N
A3.2	Rotura 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 válvula cerrada; (v) mala selección de la bomba o mala caracterización de relaves (propiedades reológicas); (vi) cambio en	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.	NL	L	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba					

Escenario 1: Fallos de la presa en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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 capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa / relaves	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	M	L	M	M

B4.2	<p>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</p>	<p>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.</p>	M	L	H	H
B4.3	<p>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</p>	<p>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</p>	M	L	E	E

	<p>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</p>	<p>riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes</p>				
B5	Hundimiento o rotura del pie de presa					
B5.1	<p>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 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</p>	<p>Desplome de la presa sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.</p>	M	M	M	M

B5.2	<p>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</p>	<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 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.</p>	M	M	H	H
B5.3	<p>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</p>	<p>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</p>	M	L	E	E

	erosión inducida por un estanque de agua y/o una corriente formada en el dique de la presa	infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.				
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	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	Pared de contención que falla debido a la erosión. Sin licuefacción. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	M	L	M	L

	<p>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; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación</p>					
B7.2	<p>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</p>	<p>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.</p>	M	L	M	L

	<p>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; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación</p>					
B7.3	<p>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</p>	<p>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</p>	M	L	E	E

	<p>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; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación</p>	<p>agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.</p>				
B8	Filtración y lixiviación					
B8.1	<p>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</p>	<p>Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes</p>	M	M	M	M

	falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético					
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) viento fuerte; (iv) erosión de la cara expuesta de los relaves	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin muertes.	H	H	L	N

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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
C4	Liquefacción de la balsa					
C4.1	Liquefacción 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 de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	Presa que se desploma sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	M	L	M	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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 estabilidad realizado con propiedades de resistencia al corte no precisas; (v) velocidad excesiva en las operaciones de 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	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 dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.	M	L	H	H

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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 capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	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
C5	Hundimiento o fallo del pie de presa					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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 agua y/o una corriente formada en el dique de la presa	Presa que se desploma sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	L	M	M	M
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	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 del agua adyacente y del	M	M	H	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	una corriente formada en el dique de la presa	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.				
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; (ii) 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					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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	Desbordamiento					
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 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	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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	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.					
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	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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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) fallo del sistema de derivación</p>					
C7.3	<p>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</p>	<p>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.</p>	L	L	E	E

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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 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</p>	<p>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>				

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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					
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)	Generación de polvo que afectará comunidades vecinas y vegetación, sin muertes.	H	H	L	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
	erosión de la cara expuesta de los relaves					

Escenario 2: Fallos de transporte y bombeo en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 muertes	M	L	L	N
D2	Rotura de la tubería					
D2.1	Rotura 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 muertes.	M	L	L	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
D3	Rotura de la bomba					
D3.1	Rotura 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 selección de la bomba o mala caracterización de 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 muertes.	M	L	L	N
D3.2	Rotura 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	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

ID	MODO DE FALLO	EFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba					

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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 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	<p>La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren derrames a una 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. Posible daño humano de las personas cercanas o dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.</p>	NL	L	L	L
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	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de	NL	L	E	E

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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 de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes				
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	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	L	M	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	inducida por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa					
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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 razones: (i) caída durante el terremoto (ii) erosión de la hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos, que causan la contaminación del agua y el soplado de polvo, sin muertes.	L	L	M	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	viento; (iii) erosión o tubería de la cara externa de relaves					
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 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	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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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					
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	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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>agua libre) sobrepasan el terraplen 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</p>					
E7.3	<p>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</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</p>	NL	L	E	E

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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 infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes.				
E8	Filtración y lixiviación					
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)	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes de agua subterráneas. Posibles daños humanos debidos a la	L	M	M	M

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	degradación del revestimiento y eventual falla (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema hermético	contaminación del acuífero, sin muertes				
E9	Generación de polvo					
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 muertes.	H	H	L	N

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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
F4	Liquefacción de la balsa					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	L	L
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	La presa fluidizada fluye a cierta distancia, mientras que los relaves no están licuados y sólo sufren caídas a una corta distancia. Contaminación de	NL	L	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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 de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	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.				
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 comtra terremotos; (iii) terremoto que excede el diseño; (iv) análisis de estabilidad realizados	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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	utilizando 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 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 estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	M	L	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.	NL	M	L	N
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	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	NL	L	E	E

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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	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				
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

ID	MODO DE FALLO	EFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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 vertedero; (ix) evitar el fallo del sistema.</p>	<p>daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.</p>				

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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) 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	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

ID	MODO DE FALLO	EFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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
------	--	---	----	---	---	---

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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 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	L	M

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 muertes.	H	H	L	N

Escenario 2: Fallos del espesador en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 muertes.	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 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	Este fallo conduce a la rotura del espesador, y también al desbordamiento, por lo tanto, causa la contaminación del agua y el suelo de la zona cercana, sin muertes.	M	L	L	N
G12	Propiedades reológicas inadecuadas					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 dilución de la alimentación; (iv) floculante/aglutinante inadecuado	Esta fallo conduce a la rotura de la bomba, al derrame de relaves que contaminan el agua y el suelo del área cercana, sin muertes.	L	L	L	N
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 muertes.	L	L	L	N
G14	Rotura o atascamiento de los rastrillos					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
G14	Rotura o atasco de los rastrillos del espesador 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

Escenario 3: Fallos de transporte en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 muertes	M	L	L	N
H2	Rotura de la tubería					
H2.1	Rotura 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 muertes.	M	L	L	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
H3	Rotura de la bomba					
H3.1	Rotura 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 selección de la bomba o mala caracterización de 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 muertes.	M	L	L	N
H3.2	Rotura 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	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

ID	MODO DE FALLO	EFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	reológicas); (vi) cambio en las propiedades reológicas; (vii) erosión de la bomba					

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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
I4	Licuefacción de la presa					
14.1	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 de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves	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 dentro de la presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.	NL	N	L	L
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)	Fallo catastrófico. La licuación de las presas y los residuos, ambos fluyen sobre una amplia área, contaminando suelos, cursos de	NL	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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 de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los relaves</p>	<p>agua, agua subterránea en caso de infiltración. Alto riesgo de daño humano debido al amplio área de flujo, posibles muertes</p>				
15	Hundimiento o rotura del pie de presa					
15.1	<p>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</p>	<p>Presa que hunde sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.</p>	NL	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	por un estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa					
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	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	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
		presa, dependiendo de la altura de la presa, posibles muertes.				
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					
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	El agua y la erosión eólica de los relaves expuestos, que causan la	NL	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	hendidura en la cara debido al escurrimiento superficial o al viento; (iii) erosión o tubería de la cara externa de relaves	contaminación del agua y el soplado de polvo, sin muertes.				
17	Desbordamiento					
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	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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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					
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 más cerca de un terraplén y podría hacer	Formación del barranco, exponiendo la cara de los relaves que los hace vulnerables a la escorrentía y la erosión del aire. Contaminación del agua de escorrentía y formación de polvo, posibles muertes.	NL	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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; (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</p>					
17.3	<p>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</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</p>	NL	N	L	L

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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 vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación</p>	<p>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>				
18	Filtración y lixiviación					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 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	NL	N	L	L
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 muertes.	H	M	M	M

Escenario 3: Fallos de la presa en la etapa de clausura

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
J4	Licuefacción de la presa / fallo de la base					
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 de tubería dentro de la presa	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	N	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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 crecimiento; (vi) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa	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 la altura de la presa, posibles muertes.	NL	L	N	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	de relaves, saturando la presa y/o los relaves					
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) presión excesiva de capas superiores de relaves; (vii) rotura de tubería dentro de la presa de relaves, saturando la presa y/o los 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 muertes	NL	L	N	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 estanque de agua / corriente formada en el dique de la presa	Presa que cae sin brecha. Posible daño humano de personas dentro o por la presa, posibles muertes.	NL	L	N	N
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	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	NL	L	N	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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	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.				
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
J6	Fallo por exposición de la cara libre					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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	Desbordamiento					
J7.1	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	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	N	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	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 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	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

ID	MODO DE FALLO	EFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
	<p>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 sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero; (ix) fallo del sistema de derivación</p>					

<p>J7.3</p>	<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) 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 bordo como consecuencia del hundimiento de la cresta de la presa; (vi) escurrimiento de las precipitaciones; (vii) fallo del sistema de drenaje; (viii) fallo del vertedero</p>	<p>El desbordamiento desencadena un fallo que deriva en licuefacción, afectando a los relaves y a la balsa. Fallo catastrófico: relaves y material de la balsa fluyen sobre un área extensa, contaminando suelos, cursos de agua, agua subterránea en el caso de infiltración. Alto riesgo de daños civiles, debido al gran área afectada, con posibles muertes.</p>	<p>NL</p>	<p>L</p>	<p>N</p>	<p>N</p>
-------------	---	--	-----------	----------	----------	----------

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
J8	Infiltraciones y lixiviados					
J8.1	Infiltraciones de los lixiviados causadas por una o más de las siguientes razones: (i) lixiviación de metales residuales dentro de los relaves; (ii) fallo de tubería de drenaje (no taponado por hormigón); (iii) degradación del revestimiento y eventual fallo (drenaje taponado con hormigón); (iv) rotura del sistema estanco	Contaminación de suelos cercanos, cursos de agua o fuentes subterráneas de agua. Posibles daños humanos debidos a la contaminación del acuífero, sin muertes	NL	L	N	N
J9	Generación de polvo					
J9.1	Polvo causado por una o más de las siguientes razones: (i) erosión de la presa; (ii) transporte por camión; (iii) erosión en las balsas de depositación finales; (iv) viento fuerte; (v) erosión de la parte expuesta de los relaves.	Generación de polvo que impactará a las comunidades vecinas y la vegetación, sin muertes.	H	M	L	N

Escenario 3: Fallos del espesador en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
K10	Fallo de operación					
K10.1	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 muertes.	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) 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	Este fallo conduce a la rotura del espesador, y también al desbordamiento, por lo tanto, causa la contaminación del agua y el suelo de la zona cercana, sin muertes.	M	L	L	N
K12	Propiedades reológicas inadecuadas					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 de los relaves; (iii) fallos en el sistema de dilución de la alimentación; (iv) floculante/aglutinante inadecuado	Este fallo conduce a la rotura de la bomba, al derrame de relaves que contaminan el agua y el suelo del área cercana, sin muertes.	L	L	L	N
K13	Desbordamiento					
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 muertes.	L	L	L	N

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
K14	Rotura o atascamiento de los rastrillos					
K14.1	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

Escenario 3: Fallos del filtrado en la etapa de operación

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
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 muertes.	L	L	L	N
L16	Taponamiento de la salida de flujo					
L16	El taponamiento es causado por una o más razones siguientes: (i) taponamiento de las últimas etapas de bombeo; (ii) cuerpo desconocido en el filtrado; (iii) caracterización de malos residuos (propiedades reológicas); (iv) cambio en las propiedades reológicas de los relaves de alimentación	Este fallo conduce a la rotura de las tuberías filtradas, y también el problema de la superación, por lo tanto, causa la contaminación del suelo de la zona cercana, sin muertes.	L	M	N	N
L17	Fallo en las membranas del filtro					

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTO AMBIENTAL	SEGURIDAD PÚBLICA
L17	<p>El fallo de las membranas del filtro puede producirse por una o más de las siguientes razones:</p> <p>(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</p>	<p>Este fallo conduce a la interrupción del filtro, es posible causar la obstrucción del flujo inferior, contaminando así el agua y el suelo cercanos, sin muertes.</p>	L	L	L	N

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

ID	MODO DE FALLO	EFFECTOS	PROBABILIDAD	NIVEL DE CONFIANZA	IMPACTOS AMBIENTALES	SEGURIDAD PÚBLICA
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 muertes.	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 conducción (iii) fallos mecánicos (iv) factores de conducción ambiental	Estos fallos conducen a la generación de polvo que afectará a las comunidades vecinas y la vegetación, sin muertes.	L	L	N	M