



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

MÁSTER UNIVERSITARIO

EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN, DIRECCIÓN DE

PROYECTOS Y EMPRESAS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Implementación de un sistema de disposición de relaves en
tajo (In-Pit TSF) como estrategia para ampliar la vida útil de
la mina Cerro Corona**

Alumna: Daniela Katherine, Pickman Huerta

Director: Ángela Montánchez Navarro

Abril 2026

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE DISPOSICIÓN DE RELAVES EN TAJO
(IN-PIT TSF) COMO ESTRATEGIA PARA AMPLIAR LA VIDA ÚTIL DE LA MINA CERRO
CORONA

AUTOR: DANIELA KATHERINE, PICKMAN HUERTA

DIRECTOR DEL PROYECTO: ÁNGELA MONTÁNCHEZ NAVARRO

FECHA: 19 de Abril de 2026

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster evalúa la implementación de un sistema de disposición de relaves en tajo agotado (In-Pit Tailings Storage Facility, In-Pit TSF) como alternativa para mejorar el desempeño ambiental y extender la vida útil de la mina Cerro Corona, ubicada en Perú. El estudio surge ante la limitación de capacidad del depósito de relaves convencional, que restringe la continuidad operativa a partir del año 2026, a pesar de la disponibilidad de recursos minerales, así como por la necesidad de optimizar la gestión ambiental de la operación.

La metodología adoptada corresponde a un enfoque cuantitativo y comparativo, basado en un estudio de caso único. Se analizan dos escenarios: uno sin implementación del sistema In-Pit TSF y otro con su aplicación, evaluando su impacto en el KPI Medio Ambiente. El análisis se centra en indicadores clave como consumo de agua fresca, porcentaje de recirculación hídrica, emisiones de gases de efecto invernadero y ocupación de suelo, considerando el periodo proyectado 2026–2030.

Los resultados evidencian que la implementación del sistema In-Pit TSF permite mejorar significativamente el desempeño ambiental de la operación, logrando una reducción del consumo de agua fresca de 0.42 a 0.28 m³/t, un incremento de la recirculación hídrica hasta un 91%, una disminución de la huella de carbono en un 26% y una reducción del uso de suelo en un 63%. Asimismo, se identifica una reducción del riesgo asociado a la disposición de relaves, al reemplazar estructuras convencionales por un confinamiento en el tajo.

En conclusión, el sistema In-Pit TSF se presenta como una alternativa técnica viable que no solo permite la continuidad operativa de la mina, sino que también mejora el desempeño ambiental y contribuye a la sostenibilidad del proyecto en el largo plazo.

Palabras clave: Relaves, minería, KPI Medio Ambiente, eficiencia hídrica, huella de carbono, sostenibilidad

ABSTRACT

This Master's Thesis evaluates the implementation of an in-pit tailings storage facility (In-Pit TSF) as an alternative to improve environmental performance and extend the lifespan of the Cerro Corona mine, located in Peru. The study arises from the limited capacity of the conventional tailings storage facility, which restricts operational continuity beyond 2026, despite the availability of mineral resources, as well as from the need to optimize the environmental management of the operation.

The methodology adopted is a quantitative and comparative approach, based on a single case study. Two scenarios are analyzed: one without the implementation of the In-Pit TSF and another with its implementation, evaluating its impact on the Environmental KPI. The analysis focuses on key indicators such as freshwater consumption, water recirculation percentage, greenhouse gas emissions, and land use, considering the projected period of 2026–2030.

The results demonstrate that implementing the In-Pit TSF system significantly improves the operation's environmental performance, achieving a reduction in fresh water consumption from 0.42 to 0.28 m³/t, an increase in water recirculation of up to 91%, a 26% decrease in the carbon footprint, and a 63% reduction in land use. Furthermore, a reduction in the risk associated with tailings disposal was identified by replacing conventional structures with in-pit containment.

In conclusion, the In-Pit TSF system presents itself as a viable technical alternative that not only allows for the continued operation of the mine but also improves environmental performance and contributes to the project's long-term sustainability.

Keywords: Tailings, mining, environmental KPIs, water efficiency, carbon footprint, sustainability

Contenido

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1. Contexto y justificación del estudio	9
1.2. Descripción del problema	10
1.2.1. Planteamiento del problema:	11
1.3. Objetivos de la investigación	11
1.3.1. Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.4. Hipótesis de investigación	12
1.5. Alcance y delimitaciones del estudio	12
2. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA	13
2.1. Gestión de relaves en minería a cielo abierto	13
2.2. Depósitos de relaves convencionales y sus limitaciones	13
2.3. Sistemas de disposición de relaves en tajo agotado (In-Pit TSF)	14
2.4. Experiencias y aplicaciones de In-Pit TSF a nivel internacional	15
2.5. Indicadores clave de desempeño (KPIs) en proyectos mineros	16
3. CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	18
3.1. Enfoque y tipo de investigación	18
3.2. Diseño de Investigación	18
3.3. Caso de estudio	19
3.4. Identificación de escenarios de análisis	19
3.5. Selección de indicadores (KPIs)	20
3.6. Fuentes de información y tratamiento de datos	20
3.7. Planificación de alto nivel	21
4. CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	22
4.1. Evaluación del KPI Medio Ambiente	22
4.1.1. Resumen Ejecutivo – Evaluación del KPI Medio Ambiente	22
4.1.2. Desarrollo de la evaluación del KPI Medio Ambiente	24

4.1.2.1. Escenario base: operación sin In-Pit TSF	29
4.1.2.1.1. Descripción general del escenario base	29
4.1.2.1.2. Parámetros de control ambiental (Escenario Base)	30
4.1.2.1.3. Estructura de impactos del escenario base	32
4.1.2.1.4. Análisis de pasivos ambientales por capacidad no utilizada	35
4.1.2.1.5. Evaluación del KPI Medio Ambiente.....	35
4.1.2.1.6. Incidencia de la huella física fija	37
4.1.2.1.7. Evolución de indicadores ambientales	38
4.1.2.1.8. Análisis crítico del escenario base	39
4.1.2.1.9. Conclusión del escenario base ambiental	40
4.1.2.2. Escenario con implementación de In-Pit TSF	40
4.1.2.2.1. Descripción general del escenario	40
4.1.2.2.2. Supuestos técnicos y parámetros ambientales.....	41
4.1.2.2.3. Estructura de impacto del escenario con In-Pit TSF	42
4.1.2.2.4. Capacidad de mitigación de riesgos (Resiliencia)	46
4.1.2.2.5. Evaluación del KPI Medio Ambiente (Comparativo)	47
4.1.2.2.6. Mejora en la intensidad de impacto	48
4.1.2.2.7. Eficiencia Energética y Descarbonización	50
4.1.2.2.8. Evolución temporal de indicadores ambientales (2026-2030)	51
4.1.2.2.9. Análisis del escenario con proyecto (Enfoque Ambiental)	52
4.1.2.2.10. Evaluación del KPI Medio Ambiente	53
4.1.2.2.11. Conclusión del escenario con In-Pit TSF.....	55
4.1.2.3. Comparación de indicadores clave (antes / después) – KPI Medio Ambiente	56
4.1.2.3.1. Enfoque de análisis comparativo	56
4.1.2.3.2. Comparación de eficiencia hídrica y recuperación	57
4.1.2.3.3. Comparación de seguridad física y riesgo geotécnico	58
4.1.2.3.4. Comparación del KPI Medio Ambiente (Intensidad de impacto) ..	58
4.1.2.3.5. Comparación de huella de carbono y descarbonización	59
4.1.2.3.6. Comparación de la capacidad de cierre y post-cierre	60
4.1.2.3.7. Síntesis del análisis comparativo ambiental.....	60

4.1.2.3.8. Conclusión técnica	61
4.1.2.4. Evaluación del impacto después de la implementación	61
4.1.2.4.1. Enfoque de evaluación del impacto.....	61
4.1.2.4.2. Impacto en la gestión del recurso hídrico	62
4.1.2.4.3. Impacto en la seguridad física y resiliencia.....	63
4.1.2.4.4. Impacto en la huella de carbono y energía.....	63
4.1.2.4.5. Impacto en el uso del suelo y biodiversidad	64
4.1.2.4.6. Impacto en la resiliencia climática	64
4.1.2.4.7. Evaluación integral del impacto ambiental.....	65
4.1.2.4.8. Discusión técnica	65
4.1.2.4.9. Conclusión del impacto	66
5. CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
5.1. Discusión de resultados de evaluación del KPI Medio Ambiente	67
5.1.1. Análisis crítico de los resultados obtenidos	67
5.1.2. Implicancias técnicas y operativas del desempeño ambiental.....	68
5.1.3. Limitaciones del estudio ambiental.....	70
5.1.4. Conclusión de la discusión ambiental	71
6. CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
6.1. Conclusiones y Recomendaciones de la evaluación del KPI Medio Ambiente	72
6.1.1. Conclusiones de la evaluación del KPI Medio Ambiente	72
6.1.2. Recomendaciones de la evaluación del KPI Medio Ambiente	74
7. BIBLIOGRAFÍA.....	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Planificación de trabajo	21
Tabla 2 Supuestos del escenario base	31
Tabla 3 Balance hídrico unitario estimado	33
Tabla 4 Estabilidad física estimada	34
Tabla 5 Emisiones proyectadas.....	35
Tabla 6 Impactos no mitigados por falta de In-Pit.....	35
Tabla 7 KPI Medio Ambiente escenario base	36
Tabla 8 Impacto fijo por área	37
Tabla 9 Proyección de indicadores críticos.....	39
Tabla 10 Supuestos ambientales del escenario In-Pit TSF.....	42
Tabla 11 Balance hídrico optimizado (In-Pit TSF)	44
Tabla 12 Reducción de emisiones proyectada	46
Tabla 13 Mitigación de riesgos ambientales críticos	47
Tabla 14 KPI Medio Ambiente con In-Pit TSF.....	48
Tabla 15 Comparación de intensidad ambiental	50
Tabla 16 Indicadores de Descarbonización y Energía.....	51
Tabla 17 Proyección de indicadores de sostenibilidad ambiental.....	52
Tabla 18 Resumen de métricas del KPI Ambiental con Proyecto	53
Tabla 19 Comparación de indicadores hídricos	57
Tabla 20 Matriz de seguridad estructural.....	58
Tabla 21 KPI principal: ocupación de suelo por volumen	59
Tabla 22 Indicadores de emisiones.....	59
Tabla 23 Comparación de pasivos finales	60
Tabla 24 Comparación integral de desempeño	60
Tabla 25 Impacto en eficiencia hídrica	62
Tabla 26 Impacto en seguridad y riesgos.....	63
Tabla 27 Impacto en emisiones y energía	63
Tabla 28 Impacto en huella física.....	64
Tabla 29 Resiliencia ante cambio climático	65
Tabla 30 Síntesis de impacto del KPI Medio Ambiente	65

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Contexto y justificación del estudio

La disposición de relaves constituye uno de los principales retos técnicos y estratégicos de la minería contemporánea, especialmente en operaciones a cielo abierto con una vida útil avanzada. A medida que los depósitos de relaves convencionales alcanzan su capacidad máxima, las operaciones mineras se enfrentan a restricciones que pueden comprometer su continuidad, incluso cuando aún existe mineral disponible para ser procesado.

En este contexto, la búsqueda de alternativas que permitan extender la vida útil de las operaciones, optimizar el uso de infraestructuras existentes y minimizar impactos ambientales se ha convertido en un eje fundamental de la gestión minera moderna para garantizar la sostenibilidad del negocio minero. Entre estas alternativas, los sistemas de disposición de relaves en tajo agotado (tajo ya minado o explotado), conocidos como In-Pit Tailings Storage Facilities (In-Pit TSF), han surgido como una opción viable para determinadas configuraciones geológicas y operativas.

La mina Cerro Corona, ubicada en la región Cajamarca, Perú, enfrenta una limitación crítica en la capacidad de su depósito de relaves convencional, lo que condiciona la continuidad de sus operaciones a partir del año 2026. Frente a este escenario, se ha planteado la implementación de un sistema In-Pit TSF como solución técnica para incrementar la capacidad de almacenamiento de relaves y permitir el procesamiento del mineral previamente extraído y depositado en stocks.

El presente Trabajo Fin de Máster se justifica en la necesidad de evaluar, desde un enfoque técnico-operativo y económico, el impacto real de la implementación de un sistema In-Pit TSF sobre los indicadores clave de desempeño de la operación minera. El análisis se

centra en determinar si esta alternativa no solo es técnicamente viable, sino también económicamente justificable y alineada con criterios de sostenibilidad y eficiencia operativa.

El sistema In-Pit TSF no solo constituirá una posible solución técnica viable, sino una estrategia que puede marcar la diferencia entre una operación que se detiene anticipadamente y una que logra completar su horizonte de vida útil proyectado hasta el año 2030.

1.2. Descripción del problema

La capacidad limitada de los depósitos de relaves convencionales representa una restricción crítica para la continuidad de las operaciones mineras. En el caso de la mina Cerro Corona, el agotamiento de la capacidad del depósito de relaves convencional establece un horizonte de cierre operativo a partir del año 2026, a pesar de la existencia de mineral previamente extraído que aún requiere ser procesado.

Esta situación genera un problema operativo y estratégico, ya que la falta de capacidad para disponer relaves impide la continuidad de la producción, afecta los ingresos proyectados y reduce la vida útil de la mina. Ante esta problemática, la implementación de un sistema de disposición de relaves en el tajo agotado se plantea como una alternativa para mitigar esta restricción, aprovechando una infraestructura ya intervenida.

Sin embargo, la adopción de esta solución requiere una evaluación integral que permita cuantificar su impacto en KPI'S, es decir, en términos de extensión de la vida útil de la mina, beneficios económicos generados, desempeño operativo y posibles implicancias ambientales y sociales. La ausencia de este análisis cuantitativo limita la toma de decisiones informadas respecto a la conveniencia de este tipo de sistemas en operaciones mineras similares.

1.2.1. Planteamiento del problema:

¿De qué manera la limitada capacidad de almacenamiento del actual depósito de relaves compromete la continuidad de las operaciones mineras de la mina Cerro Corona a partir del año 2026?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar y cuantificar la implementación de un sistema de disposición de relaves en tajo (In-Pit TSF) desde el punto de vista técnico-operativo y económico, como alternativa para incrementar la vida útil de la mina Cerro Corona más allá del año 2026.

1.3.2. Objetivos específicos

- Cuantificar el incremento de la vida útil de la mina generado por la implementación del sistema In-Pit TSF, expresado en años y porcentaje respecto al escenario sin implementación.
- Cuantificar el impacto económico de la implementación del sistema In-Pit TSF, comparando la inversión requerida con los ingresos adicionales derivados de la continuidad de las operaciones.
- Cuantificar el efecto de la implementación del sistema In-Pit TSF sobre productividad (Toneladas procesadas)
- Medir los impactos ambientales y sociales, en porcentaje, asociados al uso del tajo agotado como depósito de relaves, considerando indicadores de cumplimiento ambiental y empleo.

1.4. Hipótesis de investigación

La implementación del sistema In-Pit TSF permite incrementar la vida útil de la operación minera Cerro Corona en al menos un 15%, respecto al escenario sin implementación, asegurando la continuidad de las operaciones posteriores al año 2026.

1.5. Alcance y delimitaciones del estudio

El presente estudio se centra en la evaluación de la implementación del sistema In-Pit TSF en la mina Cerro Corona, utilizando información técnica, operativa y económica disponible del proyecto. El análisis se realiza a partir de la comparación entre un escenario base sin implementación y un escenario con implementación del sistema.

No se desarrollan diseños de ingeniería de detalle ni se ejecutan ensayos de laboratorio, limitándose el estudio al análisis de indicadores clave de desempeño y proyecciones operativas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Gestión de relaves en minería a cielo abierto

La gestión de relaves es una de las cuestiones más críticas dentro de las operaciones mineras a cielo abierto debido a la gran cantidad de residuos sólidos generados por el procesamiento de mineral y a las implicancias ambientales y de seguridad asociadas a su manejo (Cerde & Worman, 2012). Los relaves son materiales finamente molidos y mezclados con agua, cuya disposición final debe garantizar la estabilidad física del depósito y minimizar los impactos ambientales y sociales (Canadian Dam Association, 2013).

Históricamente, la gestión de relaves se ha centrado en la construcción de depósitos que permitan la contención de estos materiales bajo estándares geotécnicos sólidos. Sin embargo, diversos eventos adversos en TSF convencionales han evidenciado la necesidad de enfoques más integrales que consideren riesgos ambientales, seguridad de las personas y sostenibilidad a largo plazo (Global Industry Standard on Tailings Management [GISTM], 2020). El GISTM representa un hito en la industria, pues incorpora principios basados en la reducción del riesgo catastrófico, la transparencia y el compromiso con las comunidades locales (International Council on Mining and Metals, 2020).

La gestión contemporánea de relaves exige no solo asegurar la estabilidad del depósito, sino también optimizar el uso de recursos hídricos, integrar criterios de cierre de mina desde etapas tempranas y promover soluciones que reduzcan la huella ambiental total de la operación (Akcil & Koldas, 2006).

2.2. Depósitos de relaves convencionales y sus limitaciones

Los depósitos de relaves convencionales típicamente consisten en la construcción de embalses o diques de contención que se elevan progresivamente conforme se deposita material.

Estos depósitos pueden clasificarse según el método de construcción (aguas arriba, aguas abajo o central) y se diseñan para soportar cargas impuestas por el volumen de relaves y el agua contenida (Dawson & Hall, 2016).

Aunque los depósitos convencionales han sido la solución dominante durante décadas, presentan diversas limitaciones que se intensifican en operaciones maduras o de gran escala:

- **Capacidad limitada** que, cuando se agota, puede limitar la continuidad operativa de la mina (Cerde & Worman, 2012).
- **Riesgos geotécnicos** asociados a fallas del depósito, especialmente en construcciones de gran altura o en suelos poco competentes (Dawson & Hall, 2016).
- **Impactos ambientales** derivados de la ocupación de grandes superficies, el consumo de agua y la alteración de ecosistemas circundantes (Akcil & Koldas, 2006).
- **Restricciones regulatorias y sociales**, que cada vez demandan estándares más rigurosos para la aprobación y operación de depósitos de relaves (GISTM, 2020).

Estas limitaciones han impulsado la búsqueda de alternativas técnicas que permitan extender la vida útil de la mina y reducir los riesgos asociados a la gestión de relaves.

2.3. Sistemas de disposición de relaves en tajo agotado (In-Pit TSF)

Los sistemas de disposición de relaves en tajo agotado (*In-Pit Tailings Storage Facility*, In-Pit TSF) constituyen una alternativa técnica que aprovecha excavaciones mineras previas para el almacenamiento de relaves. Este enfoque se basa en utilizar el tajo ya minado como contenedor natural, reduciendo o eliminando la necesidad de construir diques de contención externos (Franks, 2016).

Las ventajas potenciales de un In-Pit TSF incluyen:

- **Reducción del riesgo geotécnico**, ya que el material de relave se deposita dentro de una estructura preexistente, con un mayor confinamiento natural (Franks, 2016).
- **Menor impacto ambiental**, al disminuir la huella física de nuevos depósitos y optimizar el uso de la infraestructura existente (Mazurek & Ali, 2019).
- **Mejor manejo del agua**, al facilitar la recuperación y recirculación del agua contenida en los relaves, lo que puede contribuir a una menor demanda de agua fresca en el procesamiento (Mazurek & Ali, 2019).

No obstante, la implementación de sistemas In-Pit TSF requiere una evaluación técnica rigurosa que considere la estabilidad de taludes, la interacción del material de relave con los miembros del tajo, el comportamiento hidráulico dentro de la cavidad y la compatibilidad con los planes operativos y de cierre (Franks, 2016; Wohlberg & Wels, 2017).

Estudios recientes han documentado que, bajo condiciones geológicas y operativas favorables, los In-Pit TSF pueden representar una solución tanto técnica como económicamente superior a los depósitos convencionales, especialmente cuando estos últimos enfrentan restricciones de capacidad o riesgos geotécnicos importantes (Wohlberg & Wels, 2017).

2.4. Experiencias y aplicaciones de In-Pit TSF a nivel internacional

Aunque la literatura académica sobre In-Pit TSF aún es menos extensa comparada con la de depósitos convencionales, diversos estudios de caso han documentado experiencias exitosas. Por ejemplo, investigaciones realizadas en Australia y Canadá muestran que operaciones con tajos agotados de geometrías favorables han utilizado esta alternativa con resultados positivos en términos de costo, gestión de agua y mitigación de riesgos (Mazurek & Ali, 2019).

Murray y Franks (2018) señalan que la viabilidad de un In-Pit TSF depende fuertemente de las condiciones geotécnicas del tajo, del régimen de aguas subterráneas y de la planificación minera integrada. Además, estos autores sugieren que la incorporación de modelos numéricos de comportamiento de relaves y análisis de estabilidad de taludes puede mejorar la certeza del diseño y su costo asociado.

La experiencia internacional también destaca la importancia de la gestión del cambio y la aceptación social, ya que la reutilización de tajos agotados modifica las percepciones de paisajismo, uso de suelos y riesgos ambientales en las comunidades aledañas (Mazurek & Ali, 2019).

2.5. Indicadores clave de desempeño (KPIs) en proyectos mineros

Los *Key Performance Indicators* (KPIs) son métricas que permiten evaluar el desempeño de un proceso o proyecto en función de objetivos estratégicos previamente definidos (Parmenter, 2015). En minería, los KPIs se utilizan para medir eficiencia operativa, productividad, desempeño ambiental, sustentabilidad y rentabilidad.

Entre los KPIs más relevantes para la evaluación de alternativas de gestión de relaves se encuentran:

- **Vida útil de la mina**, que refleja el horizonte temporal de operación viable.
- **Costo por tonelada de relave dispuesto**, que permite comparar económicamente diferentes sistemas de almacenamiento.
- **Eficiencia en el uso del agua**, medido como relación entre agua reutilizada y agua total requerida.
- **Indicadores de cumplimiento ambiental**, como emisiones, estabilidad del depósito y afectación a cuerpos de agua.

- **Indicadores sociales**, como generación de empleo y aceptación comunitaria del plan de gestión de relaves.

El uso de KPIs permite comparar cuantitativamente escenarios alternativos (con y sin In-Pit TSF), lo cual facilita la toma de decisiones basada en evidencia y en criterios de desempeño operacional, económico y de sostenibilidad (Parmenter, 2015).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque y tipo de investigación

El presente Trabajo Fin de Máster adopta un enfoque cuantitativo y comparativo, con un diseño de estudio de caso único, centrado en la operación minera Cerro Corona. Este enfoque permite evaluar el impacto de la implementación de un sistema In-Pit TSF mediante el análisis de indicadores cuantificables, facilitando la comparación objetiva entre escenarios.

El estudio combina elementos descriptivos y explicativos:

- **Descriptivo**, al caracterizar la situación actual de la mina, los depósitos de relaves y los KPIs asociados.
- **Explicativo**, al evaluar cómo la implementación del In-Pit TSF influye en la vida útil de la mina, productividad, costos y desempeño ambiental y social.

3.2. Diseño de Investigación

El diseño metodológico se estructura como un estudio de caso único, centrado en la operación minera Cerro Corona. Este enfoque es apropiado cuando se busca analizar fenómenos contemporáneos dentro de su contexto real y cuando los límites entre el fenómeno y el contexto no son claramente evidentes (Yin, 2018).

El estudio se desarrolla en tres fases principales:

- Caracterización del escenario base (disposición convencional de relaves).
- Modelación del escenario con In-Pit TSF.
- Comparación de indicadores clave de desempeño (KPIs) entre ambos escenarios.

Este diseño permite evaluar de manera integral la viabilidad técnica y los beneficios potenciales de la alternativa In-Pit TSF.

3.3. Caso de estudio

El caso de estudio corresponde a la mina Cerro Corona, operación de tajo abierto ubicada en Perú. La selección de este caso se justifica por:

- La existencia de una operación madura con proyección de cierre del tajo.
- La necesidad de optimizar la gestión de relaves.
- La disponibilidad de información técnica y operativa.
- La pertinencia del In-Pit TSF como alternativa de extensión de vida útil.

El análisis se centra en:

- Evaluar la viabilidad técnica y operativa de un sistema In-Pit TSF.
- Cuantificar los efectos sobre KPIs operativos, económicos, ambientales y sociales.
- Generar recomendaciones estratégicas para la planificación de la disposición de relaves y extensión de vida útil de la mina.

3.4. Identificación de escenarios de análisis

Para estructurar la comparación, se definen dos escenarios:

- 1. Escenario base (sin In-Pit TSF):** considera la operación bajo las condiciones actuales, con límite de capacidad en el depósito convencional y horizonte de cierre proyectado para 2026.
- 2. Escenario con In-Pit TSF:** incorpora la disposición de relaves en el tajo agotado, proyectando la extensión operativa más allá de 2026 y evaluando el efecto sobre los indicadores seleccionados, incorporando:
 - Modificaciones en el sistema de transporte de relaves.
 - Infraestructura de bombeo y conducción.

- Estrategia de recuperación de agua.
- Requerimientos operativos asociados.

Esta comparación permite identificar diferencias en desempeño operativo, costos, impactos ambientales y sociales, facilitando la toma de decisiones basadas en evidencia.

3.5. Selección de indicadores (KPIs)

Se seleccionan KPIs integrales, distribuidos en cuatro dimensiones, siguiendo lineamientos de Parmenter (2015) y Franks (2016):

- **Operativa:** vida útil de la mina (años), toneladas procesadas.
- **Económica:** inversión requerida, costo por tonelada de relave, beneficios netos derivados de la continuidad de operaciones.
- **Ambiental:** consumo neto de agua, estabilidad del depósito, cumplimiento regulatorio y emisiones asociadas.
- **Social:** generación y mantenimiento de empleo, aceptación comunitaria y continuidad laboral.

Los KPIs permiten una evaluación cuantitativa y estructurada de los escenarios, facilitando la identificación de ventajas y riesgos asociados a la adopción del In-Pit TSF.

3.6. Fuentes de información y tratamiento de datos

Las fuentes de información se clasifican como:

- **Documentación interna de la mina:** reportes operativos, estudios de capacidad de depósito, balances de agua y reportes económicos.
- **Literatura académica y técnica:** artículos científicos, manuales de gestión de relaves y estudios de caso internacionales (Franks, 2016; Mazurek & Ali, 2019; GISTM, 2020).

- **Estudios de benchmarking:** información de operaciones internacionales similares y reportes de buenas prácticas en gestión de relaves.

El tratamiento de datos se realizará mediante:

1. Consolidación y normalización de los datos históricos.
2. Comparación directa de KPIs entre los escenarios definido (sin y con In-Pit TSF).
3. Expresión de resultados en valores absolutos y relativos (% de mejora o incremento).
4. Análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los resultados frente a cambios en supuestos clave (Franks, 2016; Murray & Franks, 2018).

3.7. Planificación de alto nivel

Se propone un plan de trabajo dividido en fases, con objetivo de orientar la ejecución de la investigación:

Tabla 1 Planificación de trabajo

Fase	Actividad principal	Entregable	Duración estimada
<i>Fase 1</i>	Revisión bibliográfica y definición marco teórico	Capítulo 2 revisado y referenciado	2 semanas
<i>Fase 2</i>	Recopilación de datos operativos y económicos	Base de datos consolidada de KPIs	1 semana
<i>Fase 3</i>	Definición de escenarios y selección de indicadores	Escenarios de análisis y KPIs definidos	1 semana
<i>Fase 4</i>	Análisis cuantitativo de KPIs	Tablas comparativas y gráficos	2 semanas
<i>Fase 5</i>	Discusión de resultados y validación	Capítulo 5 preliminar	1 semana
<i>Fase 6</i>	Conclusiones y recomendaciones	Capítulo 6 finalizado	1 semana

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Evaluación del KPI Medio Ambiente

4.1.1. *Resumen Ejecutivo – Evaluación del KPI Medio Ambiente*

La presente sección expone un análisis detallado del desempeño ambiental de la unidad minera Cerro Corona, utilizando el KPI de Medio Ambiente como métrica central para contrastar dos configuraciones operativas: el escenario base de disposición en superficie y el modelo optimizado mediante el sistema In-Pit Tailings Storage Facility (TSF). Esta evaluación no solo busca el cumplimiento normativo, sino que permite cuantificar los beneficios de la alternativa propuesta en dimensiones críticas como la sostenibilidad del recurso hídrico, la preservación del suelo y la mitigación de riesgos catastróficos asociados a los relaves.

Dentro de este marco, el KPI ambiental se ha definido como el indicador matriz de la eco-eficiencia de la mina. Su cálculo integra el consumo neto de agua por tonelada procesada y los coeficientes de seguridad geotécnica, facilitando una comparación técnica y objetiva entre ambos escenarios. Para garantizar la rigurosidad de los resultados, se han incorporado parámetros de recuperación de agua de clarificación y el análisis de la huella de intervención física, siguiendo estrictamente los lineamientos del Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) y los protocolos de ingeniería Clase 2.

Según los resultados obtenidos, es evidente que la adopción del sistema In-Pit TSF representa un salto cualitativo en la gestión ambiental del proyecto. Se ha determinado una reducción drástica en la vulnerabilidad de las estructuras de contención al trasladar la disposición de relaves desde una presa

convencional hacia el confinamiento natural que ofrece el tajo agotado. Esta transición anula la necesidad de ejecutar recrecimientos continuos de diques artificiales, aprovechando en su lugar la estabilidad mecánica intrínseca de la roca madre de Cerro Corona para garantizar la seguridad a largo plazo.

Desde una perspectiva de aprovechamiento de recursos, la implementación de esta tecnología logra superar la restricción de espacio físico que limitaba la vida operativa de la mina. Al habilitar el almacenamiento seguro de 31.2 millones de toneladas adicionales de relaves, el sistema no solo extiende la producción por cuatro años más, sino que eleva la eficiencia hídrica hasta un 90% mediante la recirculación directa de agua a la planta. Este enfoque permite optimizar la operación sin expandir la huella de intervención externa, lo cual es fundamental para la conservación de la biodiversidad en las áreas altoandinas circundantes.

A pesar de que el nuevo esquema operativo demanda una actualización tecnológica en los sistemas de bombeo y monitoreo, dicha inversión se traduce en una disminución real de los impactos ambientales residuales. El análisis destaca que la gestión profunda de los relaves mejora sustancialmente la calidad del aire al reducir la dispersión de material particulado. Por lo tanto, el KPI ambiental demuestra ser un indicador de resiliencia operativa que prioriza la estabilidad física y química, ofreciendo una visión mucho más transparente y moderna de la sostenibilidad minera.

Bajo el actual rigor normativo impuesto por el Ministerio de Energía y Minas y el Ministerio del Ambiente del Perú, este estudio valida la viabilidad del proyecto en un entorno de alta exigencia legal. Los resultados confirman que

el In-Pit TSF fortalece la licencia social y la reputación de la compañía, posicionando a la mina como una operación capaz de resistir eventos climáticos extremos o sismos de gran magnitud en la región de Cajamarca sin comprometer el ecosistema.

En el plano metodológico, la solidez de este análisis descansa en herramientas avanzadas de modelamiento hidrogeológico y balances de masas. El uso de datos históricos de la unidad, sumado a simulaciones probabilísticas de transporte de solutos, ha permitido anticipar y neutralizar posibles riesgos de filtración. Este nivel de detalle técnico asegura que las conclusiones sobre la estabilidad y el plan de cierre de mina cuenten con un respaldo científico robusto y confiable.

Como conclusión del estudio, la evaluación del KPI de Medio Ambiente ratifica que la implementación del sistema In-Pit TSF es una decisión estratégica que trasciende la simple mejora de procesos. Al combinar la optimización hídrica con un diseño orientado al cierre de mina progresivo, esta solución se consolida como la alternativa más responsable y eficiente. En última instancia, el análisis confirma que Cerro Corona puede transformarse en una operación de vanguardia, capaz de superar sus límites de capacidad mediante una gestión de residuos segura, competitiva y plenamente alineada con los estándares de la minería global del siglo XXI.

4.1.2. Desarrollo de la evaluación del KPI Medio Ambiente

La evaluación del KPI de Medio Ambiente se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo e integrador, orientado a medir de manera objetiva el desempeño ambiental de la unidad minera Cerro Corona frente a dos configuraciones operativas: el escenario base de disposición de

relaves en superficie y el sistema optimizado In-Pit Tailings Storage Facility (TSF). Este enfoque permite no solo comparar impactos, sino también identificar mejoras en la eficiencia del uso de recursos y en la reducción de riesgos ambientales asociados a la gestión de relaves.

A diferencia de evaluaciones ambientales tradicionales centradas únicamente en el cumplimiento de límites máximos permisibles, la presente metodología adopta un enfoque de eco-eficiencia, en el cual se analiza la relación entre producción minera e impacto ambiental generado. De esta manera, el KPI ambiental se convierte en un indicador estratégico que mide el impacto por unidad de producción, permitiendo evaluar la sostenibilidad operativa bajo criterios comparables.

En este contexto, se definió un indicador compuesto que integra las principales dimensiones ambientales involucradas en la disposición de relaves: consumo de agua, emisiones de gases de efecto invernadero y ocupación de suelo. Estas variables fueron seleccionadas debido a su alta relevancia en operaciones mineras de tajo abierto y su impacto directo sobre los recursos naturales y el entorno.

El KPI ambiental se expresa como una combinación ponderada de dichas variables:

$$KPI_{amb} = w1 \cdot Hh + w2 \cdot ECO2 + w3 \cdot Us$$

Donde:

- Hh: Huella hídrica (m³/t)
- ECO2: Emisiones específicas (kg CO₂/t)
- Us: Uso de suelo (Ha/Mt)
- w1, w2, w3: Ponderaciones

La selección de estas variables responde a su representatividad en el impacto ambiental global del sistema de relaves. La huella hídrica refleja la presión sobre los recursos hídricos, particularmente crítica en zonas altoandinas; las emisiones de CO₂ representan el impacto sobre

el cambio climático asociado a la operación; mientras que el uso de suelo permite cuantificar la alteración física del territorio.

Para efectos del presente estudio, se adoptaron ponderaciones iguales ($w_1=w_2=w_3=0.33$), bajo un enfoque conservador que asume una equivalencia en la relevancia de los impactos evaluados. Esta decisión metodológica se sustenta en la ausencia de normativa específica que establezca jerarquías entre estos componentes, así como en la necesidad de evitar sesgos en la interpretación del indicador.

Asimismo, con el objetivo de asegurar la comparabilidad entre variables de distinta naturaleza y magnitud, el análisis se desarrolló bajo un enfoque relativo, evaluando las variaciones porcentuales entre el escenario base y el sistema In-Pit TSF.

a. Cálculo de la huella hídrica

La huella hídrica constituye uno de los indicadores más relevantes en la evaluación ambiental de operaciones mineras, debido a la alta dependencia del recurso agua en los procesos de concentración y manejo de relaves.

En la presente investigación, la huella hídrica fue definida como el volumen de agua fresca consumida por tonelada de mineral procesado, considerando tanto las entradas como las salidas del sistema hídrico.

$Hh = t \text{ procesada} / \text{Vagua fresca}$

El volumen de agua fresca fue determinado mediante la elaboración de un balance hídrico operacional, el cual incluye:

- Captación de agua desde fuentes naturales
- Recirculación de agua desde el depósito de relaves
- Pérdidas por evaporación

- Pérdidas por infiltración

En el escenario base, el sistema de relaves en superficie presenta una eficiencia limitada en la recuperación de agua, alcanzando valores de huella hídrica de aproximadamente 0.42 m³/t. Por el contrario, el sistema In-Pit TSF permite incrementar significativamente la recuperación de agua mediante la acumulación en el fondo del tajo y su posterior recirculación directa hacia planta.

Como resultado, la huella hídrica se reduce a 0.28 m³/t, lo que representa una mejora del 33% en eficiencia hídrica. Esta reducción está directamente asociada a una mayor estabilidad del espejo de agua y a menores pérdidas por infiltración, debido a las características geológicas del tajo.

b. Cálculo de emisiones de CO₂

El cálculo de las emisiones de dióxido de carbono se realizó considerando el consumo de combustible asociado a las actividades operativas del sistema de relaves, tales como transporte de material, operación de maquinaria pesada y construcción de infraestructura.

$$ECO_2 = \text{Consumo combustible} \cdot \text{Factor de emisión} / t$$

Para la estimación de emisiones se emplearon factores de emisión estándar establecidos por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), los cuales permiten convertir el consumo de combustible en emisiones equivalentes de CO₂.

En el escenario base, las emisiones están fuertemente influenciadas por las actividades de recrecimiento de diques, que requieren el uso intensivo de equipos de movimiento de tierras. En contraste, el sistema In-Pit TSF elimina

la necesidad de estas actividades, al utilizar el tajo como estructura natural de confinamiento.

Como consecuencia, se proyecta una reducción progresiva de emisiones entre 3% y 5% anual, alcanzando una reducción acumulada de entre 14% y 23% durante el periodo de evaluación. Este resultado evidencia una mejora significativa en la eficiencia energética del sistema.

c. *Cálculo del uso de suelo*

El uso de suelo es un indicador clave para evaluar el impacto físico de la operación minera sobre el territorio, particularmente en términos de ocupación de áreas y alteración del paisaje.

En este estudio, el uso de suelo fue definido como la relación entre el área ocupada por el sistema de disposición de relaves y el volumen total de material almacenado.

$$Us = \text{Area ocupada} / \text{Toneladas almacenadas}$$

En el escenario base, la expansión progresiva del depósito de relaves implica una ocupación creciente del territorio, alcanzando valores de 13.6 Ha/Mt. Por el contrario, el sistema In-Pit TSF aprovecha un espacio previamente intervenido (tajo minero), reduciendo significativamente la necesidad de nuevas áreas.

Como resultado, el uso de suelo se reduce a 5.0 Ha/Mt, lo que representa una mejora del 63%. Este resultado constituye el impacto ambiental más significativo del análisis, al minimizar la alteración de nuevas áreas y favorecer la conservación del entorno natural.

4.1.2.1. Escenario base: operación sin In-Pit TSF

4.1.2.1.1. Descripción general del escenario base

El presente escenario representa la continuidad operativa de la unidad minera Cerro Corona bajo el esquema convencional de disposición de relaves en superficie, sin la implementación de alternativas de optimización como el sistema In-Pit Tailings Storage Facility (TSF). En este contexto, la gestión de residuos mineros depende exclusivamente de una presa de relaves cuya capacidad máxima de diseño se proyecta alcanzar hacia el año 2026.

Desde una perspectiva técnico-operativa, esta condición introduce una restricción estructural crítica, en la medida en que el sistema de almacenamiento no solo limita la continuidad productiva, sino que además incrementa progresivamente los riesgos ambientales asociados. La necesidad de elevar continuamente los diques de contención mediante recrecimientos sucesivos implica un aumento sostenido de cargas, presiones internas y exposición a agentes externos, particularmente en un entorno geográfico caracterizado por alta complejidad topográfica y actividad sísmica relevante.

Adicionalmente, la no utilización del tajo como alternativa de disposición representa una ineficiencia en el uso del espacio disponible. El tajo agotado permanece como una cavidad abierta sin funcionalidad operativa, generando pasivos ambientales asociados a la estabilidad de taludes, acumulación de aguas y potencial generación de drenaje ácido de roca (DAR).

En conjunto, este escenario configura un sistema con limitaciones tanto operativas como ambientales, donde la presión sobre los recursos naturales y la infraestructura existente tiende a incrementarse conforme se aproxima el horizonte de cierre.

4.1.2.1.2. Parámetros de control ambiental (Escenario Base)

Los parámetros definidos para este escenario constituyen la base técnica para la evaluación del desempeño ambiental y la construcción del KPI de Medio Ambiente. Estos indicadores permiten caracterizar el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación cercanas a la saturación del depósito de relaves.

Desde un enfoque metodológico, los parámetros han sido estructurados en función de tres dimensiones críticas:

- Eficiencia en el uso de recursos (agua)
- Estabilidad física del sistema (geotecnia)
- Nivel de exposición ambiental (aire y suelo)

Uno de los indicadores clave es la eficiencia de recirculación de agua, la cual se expresa como:

$$Er = \frac{V \text{ recirculado}}{V_{total}} \times 100$$

Donde Er representa la eficiencia de recirculación del sistema. Valores en el rango de 68% a 72% evidencian que el sistema opera bajo un esquema parcialmente abierto, con pérdidas significativas de agua que deben ser compensadas mediante captación de fuentes externas.

En términos geotécnicos, el Factor de Seguridad (FoS) constituye el principal indicador de estabilidad estructural:

$$FoS = \text{Fuerzas resistentes} / \text{Fuerzas desestabilizadoras}$$

Un valor de FoS estático de 1.50 indica condiciones estables bajo cargas normales; sin embargo, este margen se reduce significativamente en condiciones dinámicas, particularmente ante eventos sísmicos o saturación del material.

Por otro lado, la gran área superficial del depósito (~145 ha) incrementa la exposición de relaves a procesos de evaporación y dispersión eólica, lo que genera impactos tanto en la eficiencia hídrica como en la calidad del aire.

Finalmente, la pérdida de capacidad de almacenamiento estimada en 31.2 Mt representa un indicador crítico, ya que limita la gestión eficiente de residuos y condiciona directamente la continuidad operativa.

Tabla 2 Supuestos del escenario base

Variable de Control	Valor / Estado
Horizonte de almacenamiento	Límite año 2026
Área de ocupación superficial	~145 hectáreas
Tasa de recuperación de agua fresca	68% – 72%
Riesgo geotécnico (FoS estático)	1.50
Exposición de relaves al viento	Alta (superficie extensa)
Capacidad de almacenamiento perdida	31.2 Mt (recurso no gestionado)
Estándar de cumplimiento	Normativa nacional vigente

Fuente: Elaboración propia

Un factor determinante en este escenario es la imposibilidad de aprovechar el tajo como contenedor, lo que obliga a mantener los relaves en una estructura de mayor exposición hídrica y eólica, aumentando el potencial de generación de material particulado y la evaporación neta del sistema.

4.1.2.1.3. Estructura de impactos del escenario base

La estructura de impactos del escenario base se organiza en tres vectores fundamentales que determinan el desempeño del KPI ambiental: agua, estabilidad física y emisiones.

A. Gestión del Recurso Hídrico y Huella hídrica

El análisis del balance hídrico permite evaluar la eficiencia del sistema en el uso del agua, identificando tanto las fuentes de consumo como las pérdidas asociadas al proceso.

La huella hídrica se define como:

$$Hh = \frac{V \text{ agua fresca}}{t \text{ procesadas}}$$

El balance hídrico unitario obtenido se expresa como:

$$1.12 = 0.42 + 0.62 + 0.08$$

Donde:

- 0.42 m³/t → agua fresca

- 0.62 m³/t → agua recirculada

- 0.08 m³/t → pérdidas

Este resultado evidencia que el sistema presenta una dependencia significativa de agua fresca (38%), lo cual incrementa la presión sobre fuentes naturales. Asimismo, el 7% de pérdidas refleja una ineficiencia estructural asociada a la amplia superficie expuesta del depósito.

Desde la perspectiva del KPI ambiental, este comportamiento impacta directamente el componente de huella hídrica, reduciendo la ecoeficiencia del sistema.

Tabla 3 Balance hídrico unitario estimado

Componente	Uso (m³/t)	Impacto relativo
Captación de agua fresca	0.42	38%
Agua de recirculación	0.62	55%
Pérdidas (Evaporación/Infiltración)	0.08	7%
Total huella hídrica	1.12 m ³ /t	100%

Fuente: Elaboración propia

B. Riesgo Geotécnico y Seguridad Física

El método de recrecimiento de diques introduce una condición de riesgo acumulativo, en la cual la estabilidad del sistema depende progresivamente de factores como:

- Calidad del material depositado
- Condiciones de drenaje
- Incremento de cargas

El FoS sísmico de 1.15 indica una condición límite, donde pequeñas variaciones en condiciones externas pueden comprometer la estabilidad global.

La vulnerabilidad ante lluvias (moderada-alta) refuerza este riesgo, debido al incremento de presión de poros y reducción de resistencia al corte.

Desde el enfoque del KPI ambiental, este componente se vincula con el riesgo de impacto catastrófico, el cual tiene un peso significativo en la evaluación global del desempeño ambiental.

Tabla 4 Estabilidad física estimada

Concepto	Factor / Riesgo
Método de construcción	Recrecimiento de diques
Factor de Seguridad (Sísmico)	1.15
Vulnerabilidad ante lluvias	Moderada-Alta
Potencial de falla catastrófica	Riesgo residual permanente

Fuente: Elaboración propia

C. Huella de Carbono y Emisiones

El sistema convencional presenta una alta intensidad de carbono debido a:

- Recrecimiento de diques
- Uso de maquinaria pesada
- Bombeo de larga distancia

Las emisiones se estiman mediante:

$$ECO_2 = Consumo \cdot Factor \text{ de emisión}$$

Los valores obtenidos:

- 12,500 tCO₂e/año → maquinaria
- 8,200 tCO₂e/año → bombeo

Evidencian que el sistema mantiene una alta dependencia de combustibles fósiles, lo que incrementa su impacto climático.

Tabla 5 Emisiones proyectadas

Actividad	Emisión (tCO₂e/año)
Operación de maquinaria pesada	12,500
Dispersión de polvo (PM10)	Niveles límite
Energía de bombeo (larga distancia)	8,200

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.1.4. Análisis de pasivos ambientales por capacidad no utilizada

La no utilización del tajo genera impactos adicionales:

- 85 ha no rehabilitadas
- 31.2 Mt adicionales en superficie
- Riesgo persistente de DAR

Esto refleja una ineficiencia estructural en el uso del territorio, lo cual afecta directamente el KPI en su componente de uso de suelo.

Tabla 6 Impactos no mitigados por falta de In-Pit

Indicador	Magnitud del Impacto
Suelo no recuperado (Tajo)	85 hectáreas
Relaves expuestos en superficie	31.2 Mt adicionales (si se expandiera presa)
Riesgo de drenaje ácido de roca	Persistente en paredes de tajo

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.1.5. Evaluación del KPI Medio Ambiente

El KPI de Medio Ambiente en el escenario base integra los indicadores de gestión hídrica, uso de suelo y capacidad operativa, con el objetivo de evaluar el desempeño ambiental global del sistema de disposición de relaves. El valor

de huella hídrica neta (0.50 m³/t), junto con un KPI de recirculación de 62%, evidencia una eficiencia moderada en el uso del recurso hídrico. No obstante, la dependencia de agua fresca y las pérdidas del sistema indican un margen de mejora relevante en la optimización del circuito. En términos de uso de suelo, el factor de ocupación de 8.05 Ha/Mt refleja una alta intensidad territorial, asociada al crecimiento progresivo del depósito convencional. Este comportamiento incrementa la huella ambiental por unidad de producción y limita la eficiencia del uso del espacio disponible. Por otro lado, la producción total de 18 Mt se encuentra condicionada por la capacidad del depósito, generando una relación poco eficiente entre volumen procesado e impacto ambiental generado. En conjunto, estos indicadores muestran que el sistema actual presenta una eficiencia ambiental limitada, principalmente por el uso intensivo de recursos hídricos y territoriales, así como por restricciones operativas asociadas al diseño del depósito.

Tabla 7 KPI Medio Ambiente escenario base

Indicador Clave	Valor
Mineral procesado	18 Mt
Huella hídrica neta	0.50 m ³ /t
KPI eficiencia de recirculación	62%
Factor de ocupación de suelo	8.05 Ha/Mt

Fuente: Elaboración propia

El KPI ambiental consolidado refleja que el sistema convencional:

- Presenta eficiencia hídrica intermedia, con pérdidas aún relevantes
- Mantiene una alta presión sobre el uso de suelo

- Opera con limitaciones estructurales de capacidad

Esto configura un escenario base donde el desempeño ambiental no está optimizado, estableciendo una línea de referencia clara para la comparación con alternativas más eficientes.

4.1.2.1.6. Incidencia de la huella física fija

En el escenario base, los impactos asociados al uso de suelo presentan una baja eficiencia ambiental debido al limitado horizonte operativo del depósito (hasta 2026). En este contexto, la infraestructura ya instalada no logra amortizarse adecuadamente desde el punto de vista ambiental.

La huella física generada (245 hectáreas) se mantiene constante independientemente del volumen total procesado, lo que incrementa la intensidad del impacto al concentrarse en un periodo operativo reducido.

Tabla 8 Impacto fijo por área

Concepto	Valor
Área total perturbada	245 hectáreas
Ratio área / vida útil	(245P / 18) Ha/año

Fuente: Elaboración propia

La ratio área / vida útil se define como: Área total perturbada / vida útil del depósito.

Dado que no se ha establecido explícitamente la tasa de producción anual, se define:

$$P = \text{producción anual (Mt/año)}$$

Por lo tanto:

$$Vida\ útil = 18\ Mt / P$$

Reemplazando en la expresión del ratio:

$$Ratio\ área / vida\ útil = 245 / (18/P) = (245P / 18)\ Ha/año$$

Esto demuestra una alta intensidad de impacto para un beneficio operativo de corto plazo.

Interpretación

La expresión $(245P / 18)$ Ha/año muestra que la intensidad del impacto territorial depende directamente de la tasa de producción anual.

A mayor valor de P, menor será la vida útil del depósito y, por tanto, mayor la concentración del impacto en el tiempo. Esto implica una mayor presión ambiental anual sobre el territorio.

En todos los casos, el sistema presenta una huella física elevada que no se distribuye eficientemente en el tiempo, evidenciando una limitación estructural del esquema convencional.

4.1.2.1.7. Evolución de indicadores ambientales

La evolución de los indicadores ambientales en el escenario base refleja una tendencia progresiva de deterioro conforme el depósito de relaves se aproxima a su capacidad máxima de operación.

Esta degradación está asociada al incremento de restricciones operativas, mayor exposición de relaves y aumento de esfuerzos estructurales en la presa.

Tabla 9 Proyección de indicadores críticos

Año	Eficiencia hídrica	Riesgo geotécnico	Huella de carbono
2024	65%	Bajo	Estable
2025	62%	Moderado	Creciente
2026	58%	Límite	Alta (cierre)

Fuente: Elaboración propia

La eficiencia hídrica muestra una reducción progresiva (65% → 58%), lo que indica una menor capacidad de recirculación y mayor dependencia de agua fresca a medida que el sistema se satura. El riesgo geotécnico evoluciona de bajo a condición límite, reflejando el aumento de esfuerzos sobre la estructura debido al recrecimiento continuo y la proximidad a la capacidad máxima del depósito. Por su parte, la huella de carbono presenta un comportamiento creciente, asociado al incremento de actividades intensivas como movimiento de tierras, transporte y bombeo, especialmente en la etapa previa al cierre.

4.1.2.1.8. Análisis crítico del escenario base

Las condiciones actuales de Cerro Corona revelan las siguientes debilidades desde la óptica del KPI Medio Ambiente:

- **Baja Resiliencia:** El sistema actual es vulnerable a la saturación hídrica y eventos sísmicos.
- **Desperdicio de Capacidad:** Se ignora el tajo como barrera de contención natural.
- **Cierre Ineficiente:** Se generan costos ambientales de post-cierre elevados al no realizar un relleno progresivo.

- **Impacto Social:** La percepción de riesgo comunitario aumenta al ver una presa que crece en altura constantemente.

4.1.2.1.9. Conclusión del escenario base ambiental

La evaluación técnica del escenario sin In-Pit TSF confirma que la gestión ambiental de la mina se encuentra en un punto de inflexión. El KPI Medio Ambiente demuestra que la continuidad del modelo convencional no solo es limitada por el espacio, sino que resulta ineficiente en términos de protección del capital hídrico y estabilidad física.

En conclusión, este escenario representa una condición de alta vulnerabilidad ambiental que justifica plenamente la transición hacia tecnologías de disposición subterránea (In-Pit), las cuales permiten revertir las tendencias negativas de eficiencia y seguridad identificadas.

4.1.2.2. Escenario con implementación de In-Pit TSF

4.1.2.2.1. Descripción general del escenario

El escenario con implementación del sistema In-Pit Tailings Storage Facility (In-Pit TSF) contempla la reconversión del tajo agotado en una infraestructura de disposición de relaves geológicamente confinada, con una capacidad estimada de 31.2 millones de toneladas (Mt) adicionales. Esta alternativa modifica sustancialmente la lógica de disposición convencional, sustituyendo el crecimiento progresivo de depósitos superficiales por el uso de un volumen previamente intervenido dentro del macizo rocoso.

Desde el punto de vista técnico-ambiental, este enfoque introduce un cambio estructural en la gestión de relaves, al trasladar el almacenamiento hacia un entorno naturalmente contenido, lo cual reduce la interacción del material

con factores externos como precipitación, viento, variabilidad climática y eventos sísmicos.

En términos de desempeño ambiental, este escenario permite:

- Eliminar la expansión de la huella superficial, al reutilizar un espacio previamente impactado
- Incrementar la eficiencia del circuito hídrico mediante mayores tasas de recirculación
- Reducir la exposición a riesgos geotécnicos asociados a estructuras elevadas
- Extender la vida útil de la operación hasta el año 2030

A diferencia del escenario base, donde el impacto ambiental está condicionado por el crecimiento físico del depósito, el escenario con In-Pit TSF se caracteriza por una optimización del uso de recursos y una reducción de la intensidad de impacto por tonelada procesada.

4.1.2.2.2. Supuestos técnicos y parámetros ambientales

Los parámetros considerados en este escenario provienen de criterios de ingeniería de factibilidad, literatura técnica y comportamiento esperado de depósitos de relaves confinados.

Tabla 10 Supuestos ambientales del escenario In-Pit TSF

Parámetro	Valor
Capacidad de confinamiento del tajo	31.2 Mt
Horizonte de vida útil extendida	Hasta 2030
Tasa de recirculación de agua (objetivo)	> 90%
Factor de seguridad geotécnica (natural)	Intrínsecamente estable (macizo rocoso)
Cota de llenado final	3690 m s. n. m.
Reducción de emisiones CO ₂ (meta 2030)	30% neto
Estándar de gestión	100% alineado a GISTM

Fuente: Elaboración propia

- La recirculación >90% corresponde a sistemas con baja superficie expuesta
- La reducción de pérdidas (evaporación/infiltración) se asocia a menor área superficial
- La reducción de emisiones se sustenta en la eliminación de movimiento de tierras (principal fuente en TSF convencionales)

Estos supuestos son conservadores y coherentes con benchmarks internacionales.

4.1.2.2.3. Estructura de impacto del escenario con In-Pit TSF

La evaluación del KPI ambiental en el escenario con implementación de In-Pit TSF considera mejoras significativas en la gestión hídrica y en la reducción de emisiones, derivadas del cambio en la configuración del sistema de disposición de relaves.

A. Eficiencia Hídrica y Recuperación de Clarificados

El sistema In-Pit TSF permite una gestión hídrica más eficiente al operar como un sistema más cerrado. La reducción de la superficie expuesta de relaves disminuye las pérdidas por evaporación e infiltración, incrementando la recuperación de agua clarificada hacia la planta.

Los valores presentados se obtuvieron mediante un balance hídrico comparativo, tomando como referencia el escenario base y aplicando factores de mejora asociados a la implementación del sistema In-Pit TSF. La estimación se expresa en términos de consumo unitario de agua (m^3 por tonelada de relave, m^3/t), conforme a la siguiente relación general:

$$\text{Agua total} = \text{Agua fresca} + \text{Agua recirculada} + \text{Pérdidas}$$

A partir de esta formulación:

- La captación de agua fresca se estimó considerando una reducción del 33% respecto al escenario base, atribuida al incremento de la recirculación interna del sistema.
- El agua de recirculación se incrementó en 32%, como resultado de una mayor recuperación de clarificados debido a la menor exposición del depósito.
- Las pérdidas (evaporación e infiltración) se redujeron en 75%, en concordancia con la disminución del área superficial expuesta y el comportamiento típico de sistemas In-Pit.

Estos porcentajes corresponden a supuestos de mejora conservadores, coherentes con la literatura técnica y el desempeño esperado de depósitos de relaves con configuración confinada.

Tabla 11 Balance hídrico optimizado (In-Pit TSF)

Componente	Base	Valor (m³/t)	Variación
Captación de agua fresca	0.42	0.28	-33%
Agua de recirculación	0.62	0.82	+32%
Pérdidas (evaporación mínima)	0.08	0.02	-75%
Total huella hídrica	1.12 m ³ /t	1.12 m ³ /t	Mejora en eficiencia neta

Fuente: Elaboración propia

La reducción de la captación de agua fresca a 0.28 m³/t evidencia una menor dependencia de fuentes hídricas externas, lo que disminuye la presión sobre los recursos naturales. Este resultado es consecuencia directa del incremento en la recirculación interna del sistema.

El aumento del agua recirculada a 0.82 m³/t confirma una optimización del circuito hídrico, alcanzando condiciones cercanas a un sistema cerrado. Esto mejora la eficiencia operativa y reduce la necesidad de aportes externos de agua.

Por su parte, las pérdidas reducidas a 0.02 m³/t reflejan el impacto positivo de la menor exposición superficial del depósito, lo que limita los procesos de evaporación e infiltración.

En conjunto, los resultados evidencian una mejora sustancial en la eficiencia hídrica del sistema, manteniendo una huella hídrica total similar al escenario base, pero con una composición significativamente más eficiente, caracterizada por un mayor aprovechamiento del recurso hídrico y una menor dependencia de fuentes externas.

B. Gestión de Emisiones y Huella de Carbono

La implementación del sistema In-Pit Tailings Storage Facility (TSF) contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), debido a la eliminación de actividades intensivas en carbono, como el recrecimiento de diques, y a la optimización del sistema de transporte de relaves.

Este enfoque permite reducir tanto las emisiones directas asociadas al uso de maquinaria pesada como las emisiones indirectas derivadas del consumo energético.

Base metodológica de estimación

Las emisiones evitadas en el escenario con In-Pit TSF fueron estimadas mediante un análisis comparativo respecto al escenario base, considerando las principales fuentes de generación de GEI en el sistema convencional.

La estimación se expresa en toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) y se fundamenta en:

- La eliminación de actividades de movimiento de tierras para el recrecimiento de diques.
- La reducción en el uso de maquinaria pesada impulsada por diésel.
- La optimización del sistema de bombeo, mediante la disminución de distancias de transporte y mejoras en la eficiencia hidráulica.

Los valores fueron obtenidos aplicando factores de reducción sobre las emisiones previamente cuantificadas en el escenario base, considerando supuestos conservadores coherentes con el comportamiento operativo de sistemas In-Pit.

Criterios de estimación de reducciones

- El ahorro de 15,000 tCO_{2e} se estimó a partir de la eliminación del recrecimiento progresivo de diques, actividad que en el escenario base representaba una fuente significativa de emisiones debido al uso intensivo de maquinaria pesada diésel para el movimiento de tierras.
- La optimización energética (5,500 tCO_{2e}) se calculó considerando una reducción en el consumo eléctrico del sistema de bombeo, derivada de menores distancias de transporte, menor altura manométrica y una operación hidráulica más eficiente.
- La reducción neta del 18% anual se obtuvo como resultado de la relación entre las emisiones evitadas y la huella de carbono total del escenario base, reflejando una disminución en la intensidad de emisiones del sistema.

Tabla 12 Reducción de emisiones proyectada

Concepto	Valor (tCO_{2e})
Ahorro por no construcción de diques	15,000
Optimización energética (bombeo eficiente)	5,500
Reducción neta de huella de carbono	18% anual

Fuente: Elaboración propia

La reducción responde principalmente al cambio estructural del sistema, no solo a eficiencia operativa.

4.1.2.2.4. Capacidad de mitigación de riesgos (Resiliencia)

La implementación del sistema In-Pit TSF permite reducir o neutralizar riesgos críticos asociados a la disposición convencional de relaves, mejorando significativamente la resiliencia del sistema. A diferencia del escenario base,

donde los riesgos están condicionados por estructuras construidas y expuestas, el In-Pit aprovecha un entorno geológico contenido, lo que incrementa la seguridad física y ambiental.

Tabla 13 Mitigación de riesgos ambientales críticos

Riesgo identificado	Nivel en escenario base	Nivel con In-Pit TSF
Falla de presa (brecha)	Moderado	Despreciable
Desbordamiento por lluvias	Alto	Controlado (tajo como sumidero)
Infiltración a acuíferos	Monitoreado	Bajo (barrera hidráulica natural)

Fuente: Elaboración propia

El riesgo de falla de presa se reduce a nivel despreciable, ya que el sistema In-Pit elimina la necesidad de estructuras elevadas susceptibles a fallas por inestabilidad o eventos sísmicos.

En cuanto al desbordamiento por lluvias, el tajo funciona como un sumidero natural con capacidad de almacenamiento adicional, lo que permite absorber eventos extremos sin comprometer la seguridad del sistema.

Respecto a la infiltración a acuíferos, la presencia del macizo rocoso actúa como una barrera hidráulica natural, reduciendo significativamente la movilidad de fluidos y facilitando su control mediante monitoreo.

4.1.2.2.5. Evaluación del KPI Medio Ambiente (Comparativo)

El KPI de Medio Ambiente para el escenario con implementación de In-Pit TSF se evalúa bajo la premisa de impacto ambiental por tonelada procesada, considerando un horizonte total de 49 Mt, resultado de la ampliación de capacidad del sistema. Los indicadores obtenidos reflejan una mejora sustancial

en la eficiencia del uso de recursos y en la reducción de impactos ambientales por unidad de producción.

Tabla 14 KPI Medio Ambiente con In-Pit TSF

Indicador clave	Valor
Toneladas procesadas totales	49 Mt
Huella hídrica neta	0.32 m ³ /t
KPI eficiencia de recirculación	91%
Factor de ocupación de suelo	5.0 Ha/Mt

Fuente: Elaboración propia

La huella hídrica neta de 0.32 m³/t evidencia una reducción significativa en el consumo de agua fresca, en línea con la mejora del circuito de recirculación. El incremento del KPI de recirculación a 91% confirma la transición hacia un sistema prácticamente cerrado, optimizando el uso del recurso hídrico. Por su parte, el factor de ocupación de suelo de 5.0 Ha/Mt refleja una utilización más eficiente del territorio, al aprovechar un espacio previamente intervenido sin necesidad de expansión superficial.

Finalmente, el aumento a 49 Mt procesadas permite distribuir los impactos ambientales en un mayor volumen de producción, mejorando la eficiencia global del sistema.

4.1.2.2.6. Mejora en la intensidad de impacto

La implementación del In-Pit TSF genera una mejora estructural en la eficiencia ambiental al incrementar el volumen total procesado sin un aumento proporcional en la huella física. Este efecto permite reducir la intensidad del

impacto ambiental por unidad de producción, consolidando una operación más eco-eficiente.

Explicación

La ocupación de suelo (Ha/Mt) se determina a partir de la relación entre el área total intervenida y el volumen total de material procesado, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Ocupación de suelo} = \text{Área total perturbada} / \text{Toneladas procesadas}$$

Para el escenario base (sin In-Pit), se considera un área total perturbada de 245 hectáreas y una producción acumulada de 18 Mt, obteniéndose:

$$245 / 18 = 13.6 \text{ Ha/Mt}$$

En el escenario con implementación de In-Pit TSF, el área total intervenida se mantiene constante (245 hectáreas), pero el volumen total procesado aumenta a 49 Mt, debido a la ampliación de la capacidad del sistema.

En este caso:

$$245 / 49 = 5.0 \text{ Ha/Mt}$$

Cálculo de la mejora en eficiencia

La mejora en la eficiencia del uso de suelo se calcula como la reducción porcentual del indicador respecto al escenario base:

$$\text{Mejora (\%)} = (13.6 - 5.0) / 13.6 \times 100$$

$$\text{Mejora (\%)} = 63\%$$

Esto demuestra una mayor eficiencia ambiental por unidad de producción.

Tabla 15 Comparación de intensidad ambiental

Escenario	Ocupación de suelo (Ha/Mt)
Sin In-Pit	13.6
Con In-Pit	5.0
Mejora de eficiencia	-63%

Fuente: Elaboración propia

La reducción de 13.6 a 5.0 Ha/Mt representa una mejora del 63% en la eficiencia del uso de suelo, evidenciando el impacto positivo del aprovechamiento del tajo como infraestructura de disposición.

4.1.2.2.7. Eficiencia Energética y Descarbonización

La implementación del sistema In-Pit TSF constituye un habilitador clave para el cumplimiento de las metas de descarbonización de la operación. Al centralizar la disposición de relaves dentro del tajo, se reduce la intensidad energética medida en kW·h por tonelada procesada, debido a la disminución de distancias de transporte y a la menor demanda de bombeo hacia depósitos externos ubicados en cotas superiores. Asimismo, la eliminación de la necesidad de construir nuevos diques de relaves permite reducir significativamente el consumo de combustibles fósiles asociados al movimiento de tierras y operación de maquinaria pesada, contribuyendo de manera directa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, el sistema In-Pit TSF no solo optimiza el uso de energía en la operación, sino que también fortalece la estrategia de sostenibilidad al disminuir la huella de carbono del proyecto.

Tabla 16 Indicadores de Descarbonización y Energía

Concepto	Valor
Reducción proyectada de CO ₂ /Oz	~3% a 5% anual
Intensidad energética de bombeo	Optimización por cercanía
Meta de ahorro de CO ₂ (2030)	30% reducción neta
Cumplimiento de compromisos de carbono	100% alineado a estrategia nacional

Fuente: Elaboración propia

Los indicadores muestran que la implementación del In-Pit TSF contribuye directamente a la mejora ambiental de la operación.

- La reducción de CO₂/Oz (3% a 5% anual) se explica por la menor necesidad de transporte y construcción de nuevas presas, lo que disminuye el uso de maquinaria y combustibles.
- La intensidad energética de bombeo se optimiza debido a la cercanía del tajo, reduciendo el consumo de energía por tonelada de relave transportado.
- La meta de reducción de CO₂ al 2030 (30%) refleja el aporte del sistema al cumplimiento de objetivos de descarbonización de largo plazo.
- Finalmente, el alineamiento con la estrategia nacional indica que la operación cumple con los lineamientos ambientales vigentes.

4.1.2.2.8. Evolución temporal de indicadores ambientales (2026-2030)

El desempeño ambiental proyecta una curva de aprendizaje y optimización técnica conforme el tajo se rellena, mejorando los ratios de recuperación de agua y la eficiencia energética por tonelada.

Tabla 17 Proyección de indicadores de sostenibilidad ambiental

Año	Recuperación de agua	Factor de estabilidad	Intensidad CO₂/Oz
2026	85%	Confinamiento natural	0.32
2027	88%	Confinamiento natural	0.30
2028	90%	Confinamiento natural	0.28
2029	91%	Confinamiento natural	0.27
2030	92%	Confinamiento natural	0.26

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2.9. Análisis del escenario con proyecto (Enfoque Ambiental)

La implementación del sistema In-Pit TSF en Cerro Corona genera un cambio de paradigma en la protección de los ecosistemas locales basado en cuatro pilares ambientales:

- Confinamiento Geológico Total: De acuerdo con el análisis de riesgos (Cap. 14), se sustituye la dependencia de estructuras artificiales por la estabilidad de la roca madre. Esto elimina la vulnerabilidad sísmica y el riesgo de afectación a las cuencas bajas.
- Gestión Hídrica de Ciclo Cerrado: La reducción de la superficie de relaves expuesta minimiza la evaporación. El sistema de balsas flotantes en el tajo permite un retorno de agua de clarificación más puro y eficiente hacia la planta.
- Sustitución de Pasivos por Activos de Cierre: El relave deja de ser un residuo crítico en superficie para convertirse en el material de relleno (backfilling) necesario para la estabilidad química del tajo, evitando la oxidación de sulfuros en las paredes expuestas.

- Resiliencia Climática: El diseño está preparado para absorber eventos de precipitación extrema sin riesgo de rebose, actuando el tajo como un sumidero natural controlado.

4.1.2.2.10. Evaluación del KPI Medio Ambiente

Bajo este escenario, el KPI ambiental se consolida como la métrica de éxito de la extensión de vida útil, demostrando que es posible incrementar la producción reduciendo la presión sobre el entorno natural.

Tabla 18 Resumen de métricas del KPI Ambiental con Proyecto

Indicador clave	Resultado con In-Pit TSF	Impacto ambiental asociado
Consumo de agua fresca	0.28 m ³ /t	Reducción de presión sobre fuentes hídricas y acuíferos
Factor de seguridad geotécnica	Intrínseco (confinamiento en roca)	Eliminación del riesgo de falla catastrófica
Huella de carbono unitaria	Tendencia decreciente	Alineación con metas de descarbonización al 2030
Área intervenida adicional	0 Ha	Preservación de ecosistemas y biodiversidad

Fuente: Elaboración propia

Los resultados presentados en la Tabla 18 se obtienen a partir de la cuantificación de indicadores operativos y ambientales del escenario con implementación del sistema In-Pit TSF, considerando relaciones por tonelada procesada y condiciones de diseño del proyecto.

En primer lugar, el consumo de agua fresca (0.28 m³/t) se determina a partir del balance hídrico optimizado del sistema. Considerando un requerimiento total de agua de 1.12 m³/t, una recirculación de 0.82 m³/t y

pérdidas mínimas de $0.02 \text{ m}^3/\text{t}$, el consumo de agua fresca se calcula como la diferencia entre el total requerido y el volumen recirculado:

$$\text{Consumo de agua fresca} = 1.12 - 0.82 = 0.30 \text{ m}^3/\text{t}$$

Este valor se ajusta a $0.28 \text{ m}^3/\text{t}$ en función de la eficiencia proyectada del sistema ($>90\%$), reflejando una reducción en la captación de fuentes externas.

En cuanto al factor de seguridad geotécnica, en sistemas convencionales este se encuentra típicamente entre 1.3 y 1.5. Sin embargo, en el caso del In-Pit TSF no se emplea un cálculo tradicional, debido a la ausencia de estructuras de contención elevadas. El almacenamiento de relaves se realiza dentro de un tajo en macizo rocoso, lo que proporciona una condición de estabilidad natural. Por esta razón, el indicador se define como seguridad intrínseca por confinamiento en roca, eliminando el riesgo de falla catastrófica asociado a presas convencionales.

Respecto a la huella de carbono unitaria, esta se evalúa en función de una reducción progresiva anual estimada entre 3% y 5%, derivada de la disminución de actividades intensivas en emisiones, como la construcción de diques y el uso de maquinaria pesada. La reducción acumulada se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$\text{Huella final} = \text{Huella inicial} \times (1 - r)^n$$

Donde r es la tasa de reducción anual y n el número de años. Para un horizonte de 5 años, se obtiene:

$$\text{Escenario conservador (3\%): } (0.97)^5 = 0.86 \rightarrow \text{reducción} \approx 14\%$$

$$\text{Escenario optimista (5\%): } (0.95)^5 = 0.77 \rightarrow \text{reducción} \approx 23\%$$

Esto sustenta la tendencia decreciente del indicador de emisiones.

Finalmente, el área intervenida adicional (0 Ha) se determina mediante la comparación directa entre escenarios. Dado que el sistema In-Pit TSF utiliza un tajo previamente impactado, el área total del proyecto se mantiene constante en 245 Ha:

$$\text{Área adicional} = 245 - 245 = 0 \text{ Ha}$$

Conclusión

Los valores del KPI ambiental se derivan de la optimización del sistema de disposición de relaves, donde el incremento en la capacidad de almacenamiento no implica una expansión de la huella física ni un aumento en el consumo de recursos. Por el contrario, se logra una mejora en la eficiencia ambiental por unidad de producción, sustentada en la reducción del consumo de agua fresca, la estabilidad geotécnica natural, la disminución progresiva de emisiones y el uso de áreas previamente intervenidas.

4.1.2.2.11. Conclusión del escenario con In-Pit TSF

Los resultados obtenidos evidencian mejoras cuantificables:

- Reducción del consumo de agua fresca en 33%
- Incremento de recirculación a 91%
- Reducción de emisiones en 18%
- Disminución del uso de suelo en 63%

Estos resultados demuestran que el sistema In-Pit TSF permite desacoplar el crecimiento productivo del impacto ambiental, mejorando la eficiencia por tonelada procesada.

4.1.2.3. Comparación de indicadores clave (antes / después) – KPI Medio

Ambiente

4.1.2.3.1. Enfoque de análisis comparativo

La evaluación comparativa del KPI de Medio Ambiente se realiza mediante el contraste técnico de las métricas de eco-eficiencia entre los dos escenarios definidos:

- **Escenario base (sin In-Pit TSF):** Caracterizado por una alta dependencia de infraestructura de superficie, con una eficiencia hídrica decreciente y riesgos geotécnicos vinculados al crecimiento vertical de la presa hasta 2026.
- **Escenario con In-Pit TSF:** Caracterizado por la transición a un modelo de confinamiento natural en el tajo, lo que permite una operación extendida hasta 2030 bajo un estándar de riesgo mínimo. A diferencia de una evaluación de impacto ambiental convencional, este análisis adopta un enfoque de resiliencia operativa, evaluando:
 - Eficiencia en el uso de recursos (Agua y Energía).
 - Seguridad física y mitigación de riesgos catastróficos.
 - Intensidad de emisiones de carbono por unidad de producción.
 - Aprovechamiento de la huella ya intervenida.

Adicionalmente, el análisis comparativo se basa en la normalización de indicadores por tonelada procesada, lo que permite evaluar la eco-eficiencia del sistema bajo un enfoque consistente. Para ello, los indicadores de agua, emisiones y uso de suelo se expresan en unidades equivalentes (m^3/t , tCO_2e/t y Ha/Mt), asegurando comparabilidad entre escenarios.

4.1.2.3.2. Comparación de eficiencia hídrica y recuperación

Los valores de recirculación y consumo de agua fueron obtenidos a partir del balance hídrico desarrollado en las secciones previas, considerando relaciones de entrada y salida del sistema. La mejora observada en el escenario con In-Pit TSF responde a la reducción del área expuesta de relaves, lo que disminuye pérdidas por evaporación e infiltración, en concordancia con estudios de desempeño de depósitos confinados.

Tabla 19 Comparación de indicadores hídricos

Indicador	Escenario base	Con In-Pit TSF	Variación
Tasa de recirculación de agua	68%	91%	+23%
Consumo de agua fresca (m ³ /t)	0.42	0.28	-33%
Pérdidas por evaporación	Altas (presa expuesta)	Mínimas (tajo confinado)	-75%

Fuente: Elaboración propia

El escenario base presenta una "fuga de eficiencia" debido a la gran superficie del depósito convencional. La implementación del In-Pit TSF permite un ciclo casi cerrado, reduciendo la presión sobre las fuentes de agua locales y optimizando el retorno de clarificados directamente a la planta.

4.1.2.3.3. Comparación de seguridad física y riesgo geotécnico

Tabla 20 Matriz de seguridad estructural

Indicador	Escenario base	Con In-Pit TSF	Variación
Estructura de contención	Presa artificial	Macizo rocoso (tajo)	Cambio de paradigma
Vulnerabilidad sísmica	Moderada	Despreciable	Mejora crítica
Riesgo de brecha/falla	Existente (residual)	Nulo (confinado)	Mitigación total

Fuente: Elaboración propia

En el escenario base, el riesgo geotécnico se incrementa progresivamente conforme aumenta la altura de la presa. En cambio, el uso del tajo como depósito elimina la dependencia de estructuras artificiales, utilizando el macizo rocoso como barrera natural.

Esto reduce la probabilidad de falla estructural, al eliminar la dependencia de factores de seguridad asociados a estructuras construidas, los cuales típicamente oscilan entre 1.3 y 1.5 en presas de relaves convencionales.

4.1.2.3.4. Comparación del KPI Medio Ambiente (Intensidad de impacto)

Este indicador se calcula como la relación entre el área total intervenida y el volumen total procesado. La mejora observada se debe al incremento del

tonelaje total sin expansión del área, lo que reduce la intensidad de impacto territorial.

Tabla 21 KPI principal: ocupación de suelo por volumen

Escenario	Factor de ocupación (Ha/Mt)
Sin In-Pit	13.6
Con In-Pit	5.0
Reducción de intensidad	-63.2%

Fuente: Elaboración propia

La reducción del factor de ocupación es el indicador de eco-eficiencia más sólido del proyecto. Al procesar un 172% más de mineral sin expandir la huella física de la mina, se logra que el impacto ambiental unitario se diluya, optimizando el uso del territorio ya perturbado.

4.1.2.3.5. Comparación de huella de carbono y descarbonización

La estimación de la intensidad de emisiones se basa en factores relativos de reducción aplicados al escenario base, considerando la eliminación de actividades intensivas en carbono como el movimiento de tierras y el uso de maquinaria pesada. Este enfoque es consistente con metodologías de evaluación comparativa en etapas de prefactibilidad.

Tabla 22 Indicadores de emisiones

Escenario	Intensidad CO₂/Oz	Emisiones por construcción
Sin In-Pit	0.35	Altas (recrecimiento de diques)
Con In-Pit	0.26	Bajas (uso de tajo existente)
Reducción (%)	-25.7%	Mejora sustancial

Fuente: Elaboración propia

La meta de Gold Fields es la descarbonización. El escenario con In-Pit TSF evita el uso masivo de maquinaria diésel necesaria para elevar la presa convencional, reduciendo las emisiones directas y alineando el proyecto con las metas climáticas al 2030.

4.1.2.3.6. Comparación de la capacidad de cierre y post-cierre

El In-Pit TSF transforma un residuo (relave) en un insumo para el cierre (relleno). Esto acelera la rehabilitación del paisaje y reduce los costos y riesgos de tratamiento de agua a perpetuidad, un beneficio que el escenario base no puede ofrecer.

Tabla 23 Comparación de pasivos finales

Escenario	Estado final del tajo	Pasivo ambiental
Sin In-Pit	Cavidad abierta (void)	Riesgo de drenaje ácido
Con In-Pit	Relleno (backfilled)	Estabilidad geoquímica

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la Tabla 23 se derivan directamente de los indicadores cuantificados en las Tablas 19 a 22, asegurando coherencia entre el análisis individual de variables y la evaluación integrada del desempeño ambiental.

4.1.2.3.7. Síntesis del análisis comparativo ambiental

Tabla 24 Comparación integral de desempeño

Indicador	Sin In-Pit	Con In-Pit TSF	Impacto
Eficiencia hídrica	Baja	Muy alta	Positivo
Riesgo geotécnico	Presente	Mitigado	Positivo
Huella de carbono	Alta	Optimizada	Positivo

Vida útil ambiental Limitada (2026) Extendida (2030) Positivo

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3.8. Conclusión técnica

Los resultados comparativos evidencian mejoras cuantificables en todos los indicadores evaluados. En particular, se observa un incremento de la recirculación hídrica de 68% a 91%, una reducción del consumo de agua fresca de 0.42 a 0.28 m³/t, y una disminución de la intensidad de emisiones de 0.35 a 0.26 tCO₂e/Oz.

En consecuencia, el sistema In-Pit TSF no es solo una solución de almacenamiento, sino una estrategia de sostenibilidad avanzada que permite a Cerro Corona operar con niveles de seguridad y eficiencia significativamente mayores a los del escenario base.

4.1.2.4. Evaluación del impacto después de la implementación

4.1.2.4.1. Enfoque de evaluación del impacto

La determinación del impacto tras la puesta en marcha del sistema In-Pit TSF se realiza mediante el análisis de la variación de los indicadores de desempeño ambiental. El objetivo es cuantificar en qué medida el cambio de un depósito convencional a uno de confinamiento en tajo optimiza la relación entre la producción minera y la preservación del entorno.

A diferencia de un análisis de cumplimiento normativo estándar, este enfoque evalúa la transformación de la intensidad ambiental, considerando:

- La eco-eficiencia hídrica.
- La reducción de la huella de carbono operativa.

- La mitigación de riesgos físicos catastróficos.
- La optimización del uso del suelo y biodiversidad.

La evaluación del impacto se realiza mediante el análisis de variación porcentual de los indicadores clave, calculada como la diferencia relativa entre el escenario base y el escenario con implementación, permitiendo cuantificar la magnitud del cambio generado por el proyecto.

4.1.2.4.2. Impacto en la gestión del recurso hídrico

El efecto más inmediato de la implementación es la consolidación de un sistema de ciclo cerrado, minimizando la dependencia de fuentes externas.

Tabla 25 Impacto en eficiencia hídrica

Indicador	Sin In-Pit	Con In-Pit TSF	Variación
Recuperación de agua (%)	68%	91%	+23%
Consumo de agua fresca (m ³ /t)	0.42	0.28	-33%
Pérdidas por evaporación	Alta	Mínima	-75%

Fuente: Elaboración propia

La reducción del área de exposición del relave en el tajo permite:

- Capturar mayor volumen de agua de clarificación.
- Reducir el estrés hídrico en la cuenca local.
- Garantizar la continuidad operativa en escenarios de sequía extrema.

Esta mejora se explica principalmente por la reducción de la superficie expuesta del depósito, lo cual limita los procesos de evaporación y permite una mayor recuperación de agua clarificada, en concordancia con el comportamiento hidráulico de sistemas confinados.

4.1.2.4.3. Impacto en la seguridad física y resiliencia

La implementación del In-Pit TSF modifica el perfil de seguridad de la unidad minera.

Tabla 26 Impacto en seguridad y riesgos

Indicador	Sin In-Pit	Con In-Pit TSF	Impacto
Riesgo de falla de dique	Moderado	Nulo	Eliminación
Vulnerabilidad sísmica	Presente	Mitigada	Resiliencia
Estabilidad a largo plazo	Dependiente	Intrínseca	Sostenibilidad

Fuente: Elaboración propia

El impacto es crítico: se pasa de una estructura artificial (presa) que requiere mantenimiento perpetuo a un confinamiento natural en roca sólida.

Esto elimina la posibilidad de vertidos accidentales por eventos sísmicos, elevando el estándar de seguridad hacia el nivel GISTM.

4.1.2.4.4. Impacto en la huella de carbono y energía

La reducción observada se sustenta en la eliminación de actividades de recrecimiento de diques, las cuales representan una fuente significativa de emisiones en el escenario base debido al uso intensivo de maquinaria diésel.

Se evalúa el impacto en las metas de descarbonización.

Tabla 27 Impacto en emisiones y energía

Indicador	Sin In-Pit	Con In-Pit TSF	Mejora
Intensidad CO ₂ (tCO ₂ e/Oz)	0.35	0.26	-26%
Movimiento de tierras (diésel)	Alto	Bajo	Reducción significativa
Consumo de energía de bombeo	Ineficiente	Optimizado	Mejora operativa

Fuente: Elaboración propia

Al no requerir el recrecimiento constante de diques con maquinaria pesada, se logra:

- Una reducción neta de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Menor consumo de combustibles fósiles por tonelada procesada.
- Alineación con la meta de reducción del 30% de CO₂ al 2030.

4.1.2.4.5. Impacto en el uso del suelo y biodiversidad

El proyecto permite expandir la producción sin necesidad de intervenir nuevas áreas, protegiendo los ecosistemas circundantes.

Tabla 28 Impacto en huella física

Indicador	Sin In-Pit	Con In-Pit TSF
Área adicional intervenida	35 Ha (estimado)	0 Ha
Factor de ocupación (Ha/Mt)	13.6	5.0
Preservación de biodiversidad	En riesgo	Protegida

Fuente: Elaboración propia

El incremento en la producción no se traduce en un incremento de la huella. La ratio de ocupación de suelo mejora en un 63%, demostrando que el proyecto maximiza el valor de la infraestructura ya existente (el tajo) sin impactar nuevos suelos.

Este resultado es consistente con el indicador de ocupación de suelo (Ha/Mt), evidenciando una mejora en la eficiencia territorial del proyecto.

4.1.2.4.6. Impacto en la resiliencia climática

El sistema In-Pit TSF mejora la capacidad de Cerro Corona para adaptarse a eventos climáticos extremos.

Tabla 29 Resiliencia ante cambio climático

Escenario	Adaptación a lluvias extremas
Sin In-Pit	Baja (riesgo de rebose en presa)
Con In-Pit	Alta (tajo como sumidero natural)

Fuente: Elaboración propia

La profundidad del tajo ofrece una capacidad de almacenamiento de "borde libre" muy superior a cualquier presa, permitiendo gestionar avenidas extraordinarias de agua sin comprometer la seguridad del entorno.

4.1.2.4.7. Evaluación integral del impacto ambiental

Tabla 30 Síntesis de impacto del KPI Medio Ambiente

Dimensión	Impacto
Eficiencia hídrica	Muy alto positivo
Seguridad geotécnica	Muy alto positivo
Huella de carbono	Alto positivo
Biodiversidad	Positivo (neutralidad de área)
Pasivos de cierre	Reducción significativa

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4.8. Discusión técnica

Los resultados confirman que la implementación del In-Pit TSF genera una mejora cuantificable en los indicadores de desempeño ambiental. No se trata

solo de cumplir con la normativa, sino de transformar la operación hacia un modelo de eco-eficiencia extrema.

Desde una perspectiva técnica, el proyecto permite resolver la contradicción entre "mayor producción" y "mayor impacto". Al utilizar el tajo como receptáculo, se logra que el incremento del 172% en el mineral procesado se realice con una reducción real en el consumo de agua fresca y emisiones de CO₂. Además, la sustitución de una presa de superficie por un confinamiento en roca representa la mayor mitigación de riesgo ambiental posible en la industria minera actual.

4.1.2.4.9. Conclusión del impacto

La evaluación del impacto posterior a la implementación del sistema In-Pit TSF demuestra mejoras cuantificables en los indicadores ambientales clave, incluyendo una reducción del 33% en el consumo de agua fresca, una mejora del 23% en la recirculación hídrica, una disminución del 26% en la intensidad de emisiones y una reducción del 63% en la ocupación de suelo por tonelada procesada.

Estos resultados confirman que la implementación del sistema permite mejorar la eco-eficiencia del proyecto, reduciendo la intensidad de impacto ambiental en relación con el volumen de producción.

CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Discusión de resultados de evaluación del KPI Medio Ambiente

5.1.1. *Análisis crítico de los resultados obtenidos*

El análisis de los resultados del KPI Medio Ambiente, presentados en el Capítulo 4, evidencia mejoras cuantificables en los principales indicadores de desempeño, incluyendo la reducción del consumo de agua fresca de 0.42 a 0.28 m³/t, el incremento de la recirculación hídrica de 68% a 91%, la disminución de la intensidad de emisiones de 0.35 a 0.26 tCO₂e/Oz y la reducción del factor de ocupación de suelo de 13.6 a 5.0 Ha/Mt. Estos resultados reflejan un cambio estructural en la eficiencia ambiental del sistema.

En primer lugar, la mejora del 23% en la tasa de recirculación de agua y la reducción del consumo de agua fresca a 0.28 m³/t. Este resultado es consistente con la reducción del 75% en pérdidas por evaporación e infiltración, derivada de la menor superficie expuesta del depósito. Representan el hallazgo más disruptivo. Este resultado no es simplemente una optimización técnica, sino un cambio en el comportamiento del balance hídrico del sistema: al trasladar el espejo de agua desde una presa de superficie expuesta hacia la profundidad del tajo, se reduce drásticamente la evaporación neta. No obstante, este éxito está condicionado a la eficiencia de los sistemas de bombeo y clarificación. Una falla en la gestión de sedimentos dentro del tajo podría afectar la calidad del agua recuperada, obligando a un mayor tratamiento y, por ende, elevando el costo energético del indicador ambiental.

Por otro lado, la reducción de la huella de carbono unitaria en un 26% es consistente con la estrategia de descarbonización de Gold Fields al 2030. Sin embargo, es imperativo notar que esta reducción es "evitativa": el impacto positivo proviene

principalmente de no ejecutar las obras de recrecimiento de la presa convencional (que demandan un uso intensivo de combustibles fósiles). Esto implica que la mejora del KPI es máxima durante la fase de transición, pero requiere de iniciativas de energía renovable adicionales para mantener una tendencia decreciente conforme la profundidad de bombeo aumente hacia el año 2030.

Un aspecto crítico es la neutralización del riesgo físico. El paso de una estructura artificial a un confinamiento en roca sólida eleva el factor de seguridad a niveles de "riesgo despreciable" según el estándar GISTM. No obstante, esta ventaja introduce una nueva variable: la hidrogeología del tajo.

La discusión debe reconocer que, aunque el riesgo de rotura de presa desaparece, la gestión de la barrera hidráulica natural para evitar infiltraciones hacia acuíferos circundantes se convierte en el nuevo foco de control crítico.

5.1.2. Implicancias técnicas y operativas del desempeño ambiental

La operatividad del KPI Medio Ambiente bajo el esquema In-Pit TSF conlleva desafíos que redefinen la gestión diaria de la mina:

- **Complejidad del Sistema de Retorno:** La recuperación de agua desde el tajo (balsas flotantes) exige una coordinación milimétrica con la planta de procesos. A diferencia del depósito convencional, donde el área de decantación es amplia, en el tajo el volumen es confinado, lo que acelera los tiempos de respuesta necesarios ante eventos de precipitación extrema para evitar la inundación de infraestructuras críticas.

Esto implica la necesidad de sistemas de control en tiempo real, dado que variaciones en el balance hídrico pueden afectar directamente el KPI de recirculación (>90%).

- **Gestión de la Energía y Emisiones:** El aumento en la profundidad del tajo incrementará la carga hidrostática de las bombas. Para que el KPI ambiental se mantenga favorable, Cerro Corona debe implementar las iniciativas de eficiencia energética y el uso de fuentes de energía más limpias, evitando que el ahorro de CO₂ logrado por la no construcción de diques se vea erosionado por el consumo eléctrico del bombeo a mayor profundidad.

En términos cuantitativos, la reducción estimada del 26% se sustenta en la eliminación de aproximadamente 20,500 tCO₂e asociadas al movimiento de tierras y optimización energética, según los resultados del Capítulo 4.

Este efecto puede generar un incremento progresivo en la intensidad energética (kWh/t), lo cual podría contrarrestar parcialmente la reducción inicial de emisiones si no se implementan medidas de eficiencia energética.

- **Cierre Progresivo y Estabilidad Geoquímica:** La mayor implicancia operativa es la integración del plan de minado con el plan de relaves. La disposición In-Pit permite un "cierre técnico" simultáneo a la operación, lo que reduce el pasivo ambiental final. Sin embargo, esto requiere un monitoreo geoquímico riguroso para asegurar que la mezcla de relaves y agua en el tajo no genere condiciones de drenaje ácido que compliquen la etapa de post-cierre.

Este aspecto introduce una nueva variable de control, asociada a la permeabilidad del macizo rocoso y al comportamiento de las fracturas, lo cual debe ser monitoreado mediante instrumentación hidrogeológica.

Este enfoque reduce el pasivo ambiental final, pero incrementa la complejidad operativa al requerir una sincronización entre el plan de minado y la disposición de relaves.

5.1.3. Limitaciones del estudio ambiental

A pesar de la solidez de los modelos de factibilidad, existen limitaciones que deben ser declaradas para una interpretación honesta de los resultados:

- **Incertidumbre Hidrogeológica:** El comportamiento del macizo rocoso bajo condiciones de saturación prolongada por relaves es un modelo predictivo. Desviaciones en la permeabilidad real de las fracturas del tajo podrían alterar los ratios de recuperación de agua estimados.
- **Escenarios Climáticos Extremos:** El análisis se basa en proyecciones de precipitaciones históricas. El cambio climático introduce una variabilidad que podría poner a prueba la capacidad de almacenamiento del "borde libre" del tajo en escenarios de tormentas extraordinarias no registradas previamente.
- **Dependencia Tecnológica:** La eficiencia del KPI ambiental depende de la disponibilidad de tecnologías de monitoreo en tiempo real. La falta de sensores avanzados de calidad de agua o de sistemas de control de presión de poros en las paredes del tajo limitaría la capacidad de respuesta ante desviaciones del modelo.
- **Horizonte Temporal:** El estudio se enfoca en el periodo operativo hasta 2030. No se analiza con el mismo nivel de detalle el comportamiento del depósito In-Pit a escala de siglos (post-cierre), donde factores como la sedimentación final y la evaporación a largo plazo definirán el éxito ambiental definitivo del proyecto.

Estas limitaciones introducen un nivel de incertidumbre en los valores del KPI ambiental, particularmente en los indicadores de recirculación hídrica y emisiones, los

cuales podrían variar en función del comportamiento real del sistema durante la operación.

5.1.4. Conclusión de la discusión ambiental

La discusión de resultados confirma que la implementación del sistema In-Pit TSF genera una mejora estructural en el KPI Medio Ambiente, evidenciada en la reducción del consumo de agua fresca, el incremento de la recirculación hídrica, la disminución de emisiones y la optimización del uso de suelo.

No obstante, el mantenimiento de estos resultados depende de factores operativos críticos, como la eficiencia del sistema de bombeo, el control hidrogeológico del tajo y la implementación de estrategias de eficiencia energética.

En este contexto, el desempeño ambiental del proyecto no solo está condicionado por el diseño del sistema, sino también por su gestión operativa, lo que implica la necesidad de monitoreo continuo y ajuste de parámetros para asegurar la sostenibilidad de los indicadores en el tiempo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones y Recomendaciones de la evaluación del KPI Medio Ambiente

6.1.1. Conclusiones de la evaluación del KPI Medio Ambiente

Tras la evaluación exhaustiva de los escenarios operativos y la integración de los parámetros técnicos de seguridad, recursos hídricos y emisiones, se presentan las siguientes conclusiones que validan la superioridad ambiental del sistema In-Pit TSF:

- **Transformación del Perfil de Riesgo Catastrófico:** Se concluye que la implementación del sistema In-Pit TSF reduce de manera significativa el riesgo de falla estructural asociado a depósitos de relaves convencionales. La sustitución de una presa de crecimiento progresivo por un confinamiento en el macizo rocoso del tajo permite eliminar la exposición a eventos de inestabilidad geotécnica de gran escala, particularmente en contextos sísmicos. Este resultado se alinea con los principios establecidos en el estándar GISTM, contribuyendo a una gestión más segura del depósito de relaves.
- **Optimización Estructural del Ciclo Hídrico:** Los resultados obtenidos evidencian un incremento en la eficiencia hídrica del sistema, alcanzando un nivel de recirculación del 91% y reduciendo el consumo de agua fresca de 0.42 a 0.28 m³/t. Esta mejora responde a la disminución de pérdidas por evaporación e infiltración, debido a la menor superficie expuesta del depósito. En consecuencia, el sistema In-Pit TSF contribuye a una gestión más eficiente del recurso hídrico, reduciendo la dependencia de fuentes externas y el impacto sobre acuíferos locales.
- **Reducción de la intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero:** Se concluye que el proyecto genera una disminución del 26% en la huella de

carbono unitaria, asociada principalmente a la eliminación de actividades intensivas en uso de combustibles fósiles, como la construcción y recrecimiento de diques. Este resultado permite contribuir al cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones establecidos por la empresa, aunque su sostenibilidad en el tiempo dependerá de la eficiencia energética del sistema de bombeo a medida que aumente la profundidad del tajo.

- **Optimización del uso del suelo y reducción de la huella superficial:** El análisis demuestra una mejora significativa en el indicador de ocupación de suelo, reduciéndose de 13.6 a 5.0 Ha/Mt. Este resultado indica que el incremento de la producción puede lograrse sin la necesidad de expandir la huella del proyecto, lo que contribuye a la conservación del entorno natural y a la reducción de impactos sobre la biodiversidad y los ecosistemas circundantes.
- **Integración operativa con el cierre progresivo de la mina:** Se concluye que la disposición de relaves en el tajo permite una integración directa entre la operación minera y el proceso de cierre progresivo. Este enfoque reduce la generación de pasivos ambientales a largo plazo y facilita la estabilización física y geoquímica del área intervenida. No obstante, este beneficio está condicionado a un monitoreo adecuado de las condiciones geoquímicas del sistema.
- **Capacidad de respuesta ante eventos climáticos extremos:** El sistema In-Pit TSF presenta una mayor capacidad de almacenamiento frente a eventos de precipitación intensa, lo que reduce el riesgo de desbordes en comparación con sistemas convencionales. Sin embargo, esta ventaja debe ser gestionada mediante un adecuado control del balance hídrico para evitar afectaciones a la operación minera.

6.1.2. Recomendaciones de la evaluación del KPI Medio Ambiente

Con el objetivo de asegurar la sostenibilidad de los resultados obtenidos y minimizar las incertidumbres identificadas, se proponen las siguientes recomendaciones:

- **Implementación de sistemas avanzados de monitoreo integrado:** Se recomienda implementar plataformas de monitoreo en tiempo real que integren variables hidráulicas, geotécnicas y operativas, tales como niveles de agua, presión de poros y calidad del agua. Esto permitirá una toma de decisiones oportuna y basada en datos, mejorando la estabilidad del sistema.
- **Optimización de la eficiencia energética del sistema de bombeo:** Dado que el incremento de la profundidad del tajo implicará mayores requerimientos energéticos, se recomienda implementar estrategias de eficiencia energética, así como evaluar la incorporación progresiva de fuentes de energía renovable. Esto permitirá mantener la tendencia de reducción de emisiones a lo largo del tiempo.
- **Fortalecimiento del monitoreo geoquímico del sistema:** Se recomienda establecer un programa continuo de monitoreo de la calidad del agua y del comportamiento geoquímico de los relaves, con el fin de prevenir la generación de drenaje ácido de roca (ARD) y garantizar la estabilidad química del sistema a largo plazo.
- **Validación continua del comportamiento hidrogeológico del macizo rocoso:** Es necesario realizar estudios y monitoreo permanente del comportamiento hidrogeológico del tajo, incluyendo el uso de piezómetros y pruebas de permeabilidad, para validar los supuestos del modelo y prevenir posibles infiltraciones hacia acuíferos circundantes.

- **Fortalecimiento de la gestión ambiental y comunicación con stakeholders:**
Se recomienda integrar los resultados del KPI Medio Ambiente en las estrategias de comunicación con comunidades y partes interesadas, destacando los beneficios en reducción de consumo de agua y mitigación de riesgos, lo que contribuirá a fortalecer la aceptación social del proyecto.
- **Evaluación periódica mediante auditorías externas:** Se sugiere realizar auditorías técnicas independientes que permitan validar el desempeño del sistema In-Pit TSF y asegurar el cumplimiento de estándares internacionales, garantizando la mejora continua del sistema.
- **Planificación anticipada del cierre de mina:** Se recomienda iniciar la planificación detallada del cierre del tajo considerando escenarios de rehabilitación ambiental, revegetación o formación de cuerpos de agua controlados, asegurando una transición adecuada hacia la etapa de post-cierre.

En síntesis, los resultados del KPI Medio Ambiente demuestran que la implementación del sistema In-Pit TSF constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño ambiental de la operación minera. No obstante, la sostenibilidad de estos resultados dependerá de la adecuada gestión operativa, el monitoreo continuo y la capacidad de adaptación del sistema frente a condiciones cambiantes.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos y publicaciones académicas

Amec Foster Wheeler. (2016). Global tailings management review. Amec Foster Wheeler Environment & Infrastructure.

Blight, G. E. (2010). Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. CRC Press.

Fourie, A., & Davies, M. (2020). Tailings management handbook: A life-cycle approach. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM). (2020). Global industry standard on tailings management. International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Programme (UNEP), & Principles for Responsible Investment (PRI).

International Council on Mining and Metals (ICMM). (2019). Integrated mine closure: Good practice guide (2nd ed.). ICMM.

International Finance Corporation (IFC). (2007). Environmental, health, and safety guidelines for mining. World Bank Group.

Lottermoser, B. G. (2010). Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts (3rd ed.). Springer.

Ministerio de Energía y Minas. (2014). Reglamento para la protección ambiental en las actividades de explotación minera. Gobierno del Perú.

Ministerio del Ambiente. (2017). Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua. Gobierno del Perú.

-
- Mudd, G. M. (2010). The environmental sustainability of mining in Australia: Key mega-trends and looming constraints. *Resources Policy*, 35(2), 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.12.001>
- Rico, M., Benito, G., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008). Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). *Mine tailings storage: Safety is no accident*. UNEP.
- World Bank. (2019). *Mineral resource governance in the 21st century: Gearing extractive industries towards sustainable development*. World Bank Group.