



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

RELAVES Y LA GRAN MINERÍA: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

JAIME PATRICIO RIQUELME SEREY

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO FRÉRAUT CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN
ESTEBAN RAMÍREZ OTAÍZA

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y
DIRECCIÓN DE EMPRESAS
POR: JAIME PATRICIO RIQUELME SEREY
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: ROBERTO FRÉRAUT CONTRERAS

RELAVES Y LA GRAN MINERÍA: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

Este trabajo aborda la gestión de relaves en la minería, destacando su importancia desde perspectivas tanto económicas, como ambientales y sociales. Con el objeto de sistematizar y mejorar la gestión de estos, se proponen varias mejoras e iniciativas para implementar en la Gran Minería tomando como caso práctico la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, las cuales se resumen en:

- Modelo de Gestión: se propone un sistema dinámico para administrar los relaves en su totalidad basado en la metodología de mejora continua. La definición clara de procesos y responsabilidades es esencial para el éxito de este modelo.
- Modelo de Integridad: este modelo permite analizar los riesgos de cualquier instalación incluyendo el Depósito de Relaves, estableciendo una metodología de trabajo que comienza desde la definición de los objetivos hasta el plan de seguimiento en el marco de la mejora continua.
- Análisis de Nuevas Tecnologías de Depositación: se han propuesto y desarrollado un conjunto de nuevas tecnologías de depositación, revisando en particular la aplicabilidad del Apilamiento Hidráulico Deshidratado, se tiene que los resultados preliminares indican un potencial de recuperación de agua que permitiría una mayor acumulación de relaves en el depósito al término de su vida útil.
- Tecnologías de Recuperación: se espera el desarrollo de la minería de los relaves, por lo que es importante mantener la información actualizada y evaluar la factibilidad económica de la recuperación de los relaves de manera sistemática en un marco de gobernanza específico.

En conclusión, los relaves han adquirido una importancia superlativa en las organizaciones con foco en la gran minería producto de las tasas de generación, por lo tanto en el presente trabajo se proponen una serie de acciones para enfrentar este desafío, comenzando con la propuesta de un marco de gobernanza, seguido por la definición de un plan de integridad con un ejemplo concreto, la revisión conceptual de un modelo distinto de depositación y la formulación de una estrategia de largo plazo. Producto del enfoque y la potencial implementación en otras faenas, estas propuestas individualizadas en una sola faena minera pueden ser replicables a toda la industria, en donde se espera que vayan evolucionando y mejorando día a día, ya que la industria no puede tolerar la falla de otro depósito como los ocurridos en los últimos años.

DEDICATORIA

A mi Buely, aunque ya no estés conmigo físicamente, me acompañas en cada uno de los pasos, siempre fuiste un apoyo y tu recuerdo vive en mí, este logro está dedicado a tu memoria.

AGRADECIMIENTOS

A todos quienes me han apoyado en este camino recorrido, en especial a mi señora Alexandra que desde un comienzo de este proceso estuvo ahí, a mi hermano y a mi mamá que han sido fundamentales en mi desarrollo a lo largo de la vida, al grupo de los 6 por su ejemplo de compañerismo y a Collahuasi por la oportunidad de poder desarrollarme profesionalmente.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ANTECEDENTES.....	3
2.1	ANTECEDENTES DE LA EMPRESA	3
2.2	ANTECEDENTES DEL DEPÓSITO DE RELAVES	4
3	MODELO DE GESTIÓN DE RELAVES.....	7
3.1	INTRODUCCIÓN	7
3.2	MÉTODO	7
3.3	RESULTADOS.....	9
4	MODELO DE INTEGRIDAD DE RELAVES	21
4.1	INTRODUCCIÓN	21
4.2	MÉTODO	21
4.3	RESULTADOS.....	23
4.4	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	36
5	OPTIMIZACIÓN PROCESO DE DEPOSITACIÓN.....	37
5.1	INTRODUCCIÓN	37
5.2	MÉTODO	38
5.3	RESULTADOS.....	38
5.4	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	41
6	CASO DE NEGOCIO RECUPERACIÓN	42
6.1	INTRODUCCIÓN	42
6.2	MÉTODO	42
6.3	RESULTADOS.....	43
6.4	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	44
7	DISCUSIÓN.....	45
8	BIBLIOGRAFÍA.....	47
9	ANEXO.....	48

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Collahuasi	3
Figura 2: Metodologías Constructivas.....	4
Figura 3: Depósito de Relaves Pampa Pabellón	6
Figura 4: Ciclo de Gestión de Riesgos	8
Figura 5: Ciclo de Gestión de Riesgos	10
Figura 6: Mapa Integrado Gestión de Relaves CMDIC	13
Figura 7: Mapa Integrado Gestión Ambiental Social CMDIC.....	13
Figura 8: Detalle Directrices Gestión Compañía.....	14
Figura 9: Flujo de Comunicaciones	19
Figura 10: Flujo ISO 55001	22
Figura 11: Modelo de Gestión de Integridad del Depósito.....	24
Figura 12: Trazado Tubería 1600 mm	26
Figura 13: Matriz de Negocio CMDIC.....	27
Figura 14: Segmentación tubería 1600 mm.....	30
Figura 15: Identificación de Calicatas	31
Figura 16: Proceso Constructivo HDS	37
Figura 17: Distribución Actividades – Área - Medida	43

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Tendencias Calicata 1	32
Gráfico 2: Tendencias Calicata 5.....	33
Gráfico 3: Tendencias Calicata 10.....	33
Gráfico 4: Tendencias Calicata 15.....	34
Gráfico 5: Tendencias Calicata Espesor Mínimo	34
Gráfico 6: Tendencias Calicata 1 Máximo Mínimo	35
Gráfico 7: Modelos determinación índice de vacíos en función del P80 (Arcadis, 2020)	38
Gráfico 8: Humedad de retención en función del contenido de finos (Arcadis, 2020)	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz RACI Depósito CMDIC	15
Tabla 2: Matriz RACI Depósito CMDIC	16
Tabla 3: Ponderación y clasificación de la probabilidad de falla	28
Tabla 4: Ponderación y clasificación de la consecuencia de falla	28
Tabla 5: Identificación e índice de falla por amenaza	28
Tabla 6: Identificación e índice de consecuencia	29
Tabla 7: Identificación de subvariables para la valoración de consecuencias	29
Tabla 8: Resultados evaluación de riesgo	30
Tabla 9: Resultados evaluación de riesgo	40
Tabla 10: Mediciones Calicata 1	48
Tabla 11: Mediciones Calicata 5	48
Tabla 12: Mediciones Calicata 10	49
Tabla 13: Mediciones Calicata 15	49

1 INTRODUCCIÓN

Los relaves mineros, por definición, corresponden al conjunto de desechos de procesos mineros de la concentración de minerales usualmente constituidos por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales. Desde su origen, considerando lo anterior, su generación se encuentra estrictamente ligada al proceso minero, siendo históricamente postergados no dimensionando los costos operativos, de capital y comunitarios que conllevan, transformándose en un pasivo que ha tomado una relevancia primordial en los últimos años por su tasa de generación, así como también por el impacto que han provocado en la comunidad internacional las graves fallas ocurridas en depósitos ubicados tanto en Brasil como en Canadá.

Desde una perspectiva nacional, Chile es el tercer país del mundo con una mayor cantidad de relaves generados, cada 36 horas se depositan del orden de 2.5 millones de toneladas de relaves y se proyectan al año 2026 unas 4 millones de toneladas de relaves en el mismo horizonte de tiempo, lo que genera una serie de oportunidades y desafíos con foco en la Gran Minería para su gestión, dado que su costo de administración cada vez es mayor y desde un punto de vista de relacionamiento tanto comunitario como ambiental su tratamiento es cada vez más demandante.

Como la generación de relaves es un proceso continuo, existe un pasado, un presente y un futuro que se extiende en toda la vida útil de un proyecto minero, surge la necesidad de realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa de las oportunidades y desafíos a la cual se encuentra sometida la Gran Minería del Cobre en cuanto a la gestión de estos “desechos”, para lo cual se tomará en específico la faena minera Doña Inés de Collahuasi, ubicada en la región de Tarapacá, en donde bajo una mirada de corto, mediano y largo plazo, se trazarán distintas líneas de acción para administrar este pasivo y proponer mejoras que permitan optimizar la administración de este activo y proyectar estas mejoras prácticas al resto de la industria.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta tesis es proponer un Modelo de Gestión de Relaves y su Estructura, estableciendo planes de acción en el Corto, Mediano y Largo Plazo para impulsar una reducción de costos del proceso, aumentar la vida útil del depósito y recuperar, a través del tratamiento de los relaves históricamente depositados, minerales que pudiesen potencialmente contener.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumplir el objetivo definido, tomando como base la experiencia en la gestión de relaves de la faena Doña Inés de Collahuasi, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Inmediato: proponer un modelo de Gestión de Relaves que integre los distintos requerimientos existentes en la Industria.
- Corto Plazo: disminuir los costos operacionales y de mantención de los sistemas de transporte de relaves por medio de la evaluación de metodologías preventivas.
- Mediano Plazo: optimizar el proceso de depositación de relaves con foco en la reducción de volumen requerido para disposición final.
- Largo Plazo: formular marco estratégico de caso de negocio de recuperación de minerales desde los relaves para ser incorporados en la vida útil del proyecto.

2 ANTECEDENTES

2.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA

Compañía Doña Inés de Collahuasi S.C.M. (CMDIC), es una empresa minera dedicada a la extracción y producción de concentrado y cátodos de cobre, así como concentrado de molibdeno, localizada en la comuna de Pica, Región de Tarapacá, en el extremo norte de Chile.

Sus instalaciones industriales y los yacimientos Rosario y Ujina ubicados en la comuna de Pica, conforman el Área Cordillera. En el sector de Ujina se encuentra la planta concentradora, desde donde nace un sistema de mineroductos de 203 km de extensión, a través del cual el concentrado de cobre es transportado hasta el Terminal Marítimo Collahuasi. Desde este recinto, ubicado en Punta Patache a 65 km al sur de la ciudad de Iquique, se embarcan los productos hacia los mercados internacionales, así como también en este lugar se encuentran las plantas de molibdeno y de filtrado de concentrado (Figura 1).

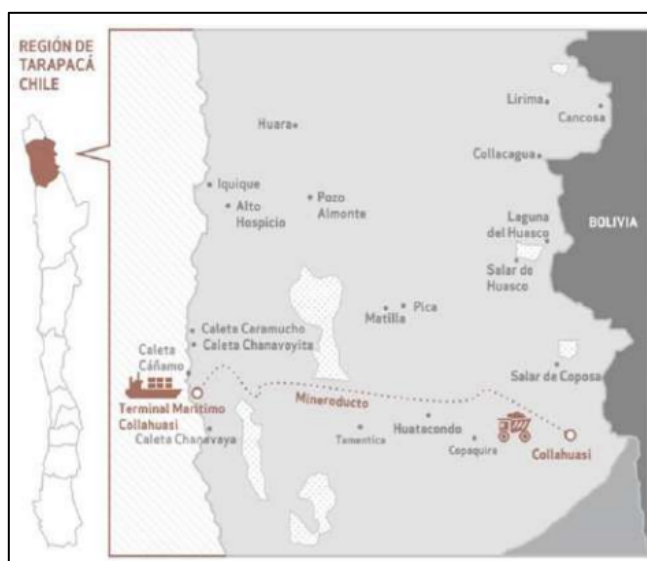


Figura 1: Ubicación Collahuasi

Desde el gobierno corporativo, CMDIC es una sociedad contractual minera cuyos accionistas son Anglo American PLC (44%), Glencore (44%), y Japan Collahuasi Resources B.V. (12%), los que están representados proporcionalmente en su directorio.

La estrategia de CMDIC considera la gestión de las variables ambientales, sociales y de gobernanza como un elemento central buscando que, por medio de sus operaciones y esta integración, transforme positivamente el entorno y la calidad de vida de los trabajadores, colaboradores y comunidades que la circunscriben.

En cuanto a los focos estratégicos establecidos se define: Personas, Transformación Digital, Modelo de Gestión, Sustentabilidad Corporativa y Crecimiento, los cuales son trabajados en forma simultánea como parte de la búsqueda continua de instaurar un Modelo de Negocio Sostenible.

2.2 ANTECEDENTES DEL DEPÓSITO DE RELAVES

CMDIC, desde sus inicios, ha construido y operado un solo Depósito de Relaves desde el año 1999, denominado “Depósito de Relaves Pampa Pabellón”, el cual es construido a símil de un embalse utilizando para ello materiales de botadero del Rajo Ujina para el material masivo, y material de empréstito para generar el sello impermeable requerido entre el relave depositado y el material masivo que constituye en mayor proporción el muro principal.

Para la metodología de construcción, en el Decreto Supremo N°248 (DS N°248), se establecen 3 secuencias distintas a implementar en un depósito de relaves siendo éstas: aguas arriba, eje central y aguas abajo (Figura 2), encontrándose prohibido en la legislación chilena el primero por el riesgo de estabilidad más aún frente a sollicitaciones sísmicas esperadas en territorio nacional, ya que su construcción toma como punto de partida los relaves antiguamente depositados.

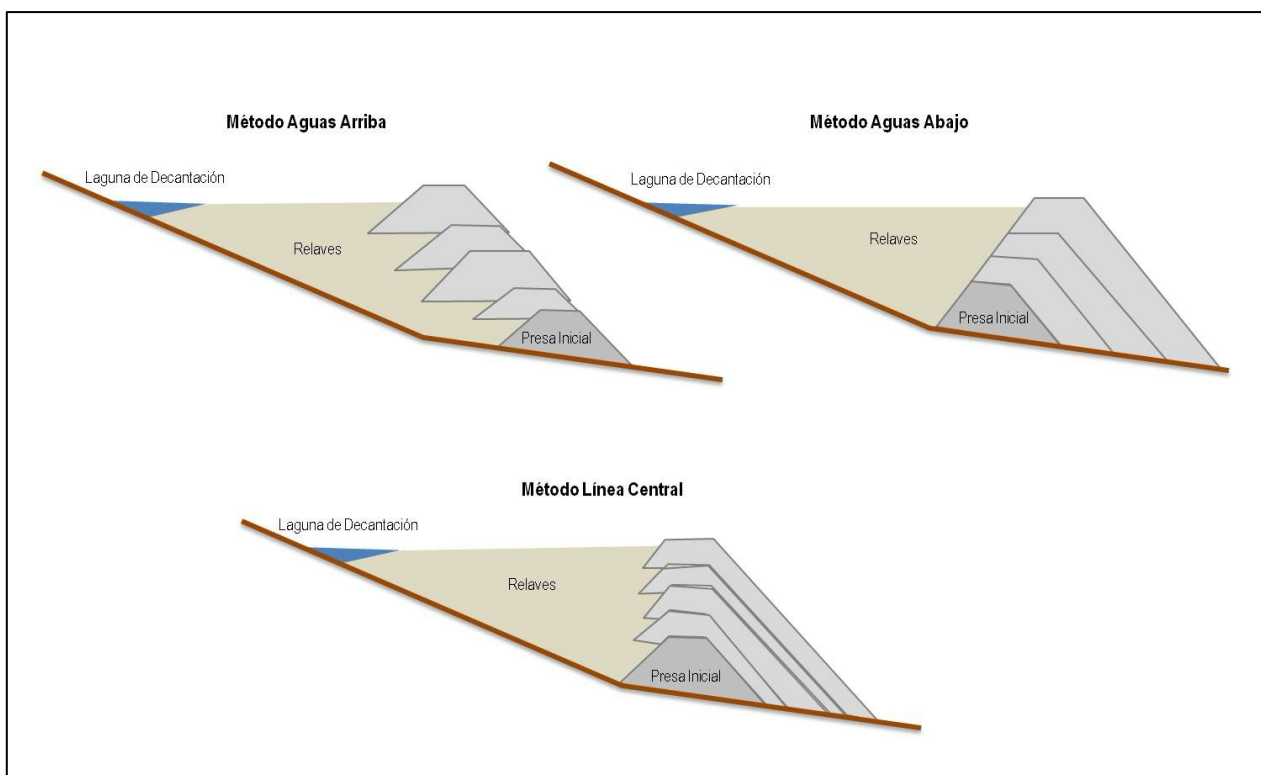


Figura 2: Metodologías Constructivas

Con el objeto de establecer el mayor estándar y asegurar la integridad estructural, CMDIC adoptó el crecimiento aguas abajo para la operación de su depósito de relaves desde sus inicios a la fecha.

Como se aprecia en la Figura 2, la ventaja comparativa de los métodos aguas abajo y eje central versus el de aguas arriba es que el muro, a medida que transcurre el tiempo ya sea total o parcialmente, es construido en suelo competente con propiedades geomecánicas estudiadas por medio de campañas en etapas previas a la construcción, en cambio el método aguas arriba se construye en base a relaves el cual va variando sus propiedades a medida que transcurre el tiempo.

Desde la administración general, se establece la Gerencia Tranque, Aguas y Mineroducto (GTAM), como la estructura dentro de CMDIC que lidera la gestión operativa, de mantenimiento, de proyectos y constructiva del Depósito de Relaves, dependiendo organizacionalmente de la Vicepresidencia Ejecutiva de Operaciones (VPEO), la cual por medio de definiciones uno a uno con otras áreas de la Compañía asegura la continuidad operativa del activo en cuestión.

De los actores relevantes en cada uno de los procesos, se identifica:

- Operación: dependiente directamente de GTAM;
- Mantenimiento: a través de un programa establecido se define tanto un mantenimiento interno como externo, el cual consiste en el primer caso en la mantención de los sistemas de bombeo por la Gerencia Mantenimiento Procesos (GMP), y en el segundo en todas las instalaciones del Depósito provisto por una empresa externa de dependencia directa de GTAM.
- Construcción: en base a una secuencia constructiva proyectada a detalle en quinquenio, la Vicepresidencia Mina (VPM), dispone de los equipos necesarios para el crecimiento continuo del muro de contención (pala hidráulica, camiones de extracción, cargador frontal y equipos de apoyo);
- Proyectos: se define una Gerencia de Proyectos de Infraestructura de Relaves y Aguas (GPIRA), que habilita los proyectos identificados en la vida útil de CMDIC para el desarrollo de su ingeniería y ejecución.

Adicional a los actores antes identificados, existen otras áreas de CMDIC que interactúan con el proceso habilitando el crecimiento como lo son el área Legal, Geotecnia, Gestión Ambiental, Permisos, Comunidades, Seguridad, Protecciones Industriales y Desarrollo

En cuanto a las características del Depósito Pampa Pabellón y a término de junio 2023, se tiene:

- Cantidad de Relaves Autorizados: 2.329.000.000 ton.
- Cantidad de Relaves Dispuestos: 1.009.147.408 ton.
- Altura del Depósito: 81 m.
- Área del Depósito: 16.034.126 m².
- Ángulo del Talud Externo: 28°.
- Ángulo del Talud Interno: 32°.
- Revancha Operacional (distancia entre cota de coronamiento y cota relaves): 5,9 mt.

De los sistemas de transporte y depositación de relaves en la cubeta, se cuenta con un sistema de tuberías y disipadores de energía que permite la descarga controlada del relave en el depósito junto con un sistema paralelo de depositación compuesto por una canaleta de hormigón.

Finalmente, de las obras periféricas, se cuenta con una serie de canales de contorno que evitan el ingreso de agua a la cubeta, dos drenes longitudinales que captan el agua que potencialmente podría infiltrar desde los relaves hacia una sentina, una torre de captación que permite la recuperación del agua contenida en el relave o que se separa de esta por acción de las

pendientes existentes, y un sistema integrado de control piezométrico, desplazamientos y sísmico para el control del Depósito desde la componente de seguridad.

A modo de resumen, se presenta a continuación el Depósito de Relaves Pampa Pabellón con sus sistemas principales (Figura 3).

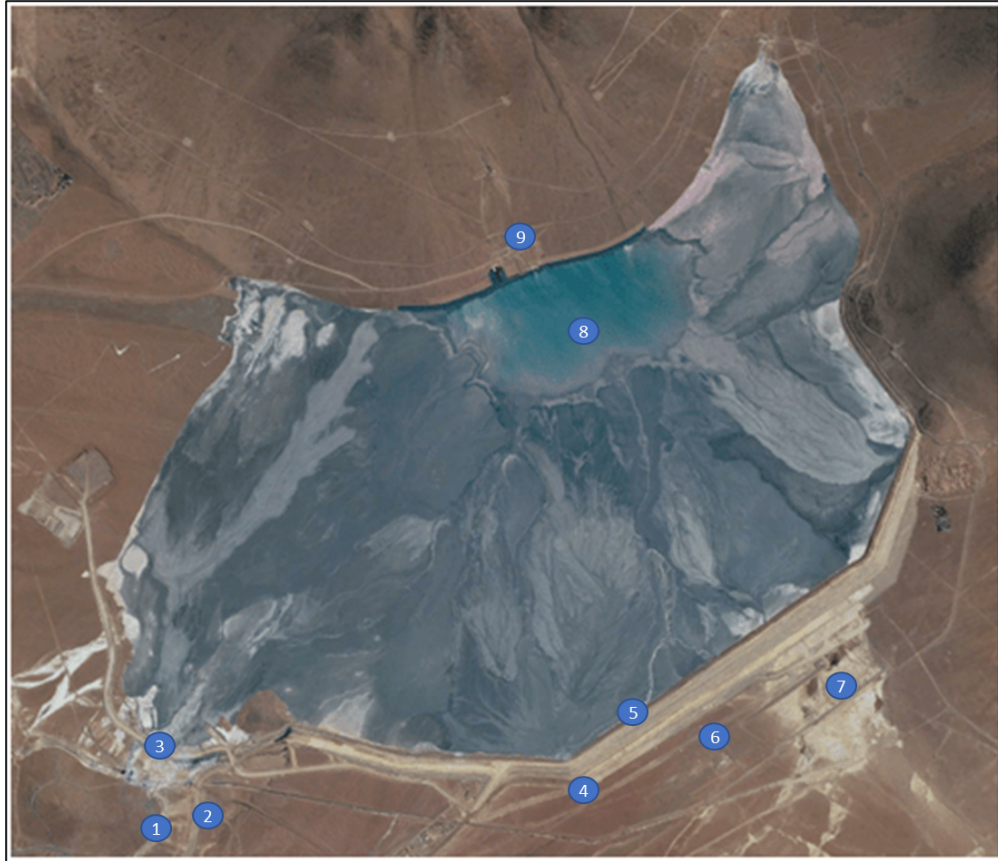


Figura 3: Depósito de Relaves Pampa Pabellón

Donde:

- 1.- Tubería de Transporte de 1600 mm
- 2.- Canaleta de Hormigón
- 3.- Sistemas de Disipación
- 4.- Muro Principal
- 5.- Tubería de Transporte de 1000 mm
- 6.- Dren Longitudinal
- 7.- Sentina Dren
- 8.- Laguna Aguas Claras
- 9.- Torre de Captación Agua Recuperada

3 MODELO DE GESTIÓN DE RELAVES

3.1 INTRODUCCIÓN

Los relaves son inherentes al ejercicio productivo de cualquier faena minera, su generación es obligada, y de una u otra forma se deben administrar ya que tanto por su cuantía como por sus características deben ser dispuestos de forma controlada en un depósito que los contenga de forma segura.

La generación y disposición de relaves no son menos importantes que actividades relacionadas como la extracción de minerales y el procesamiento posterior de estos, tiene una connotación particular en el ámbito ambiental y social, por lo que su impacto potencial puede ser mayor a los reconocidos históricamente en la industria si no son apropiadamente gestionados.

¿Cómo deben ser incorporados los relaves en el proceso productivo?, la respuesta aun cuando puede ser trivial, no lo es, ya que lleva consigo la pregunta de ¿cuán importantes son los relaves para una organización?, su administración se encuentra ligada al entendimiento específico del negocio y su gestión se encuentra en línea a la forma de administrar de cada empresa minera.

Desde la administración, en el presente tópico se discutirá en base a un ejemplo de Gran Minería, una propuesta de cómo deben ser gestionados los relaves de una forma controlada y segura, para lo cual se propondrá un modelo único construido en base al proceso mejora continua junto con lineamientos establecidos en el Estándar de Gestión de Relaves elaborado por el International Council on Mining and Metals (ICMM), y el Decreto Supremo N°24 que rige el Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves Nacionales.

3.2 MÉTODO

El Ciclo de Deming es un modelo clásico de gestión de procesos, en donde se determina un ciclo de mejora continua en base a las actividades de planificar, hacer, verificar y actuar. Como parte de la estabilización de los procesos impulsada en CMDIC desde el año 2013, se adoptó el ciclo antes mencionado como pilar fundamental de la gestión de la organización fundando las bases del Ciclo de Gestión de Riesgos (CGR).

Desde las etapas constituyentes el CGR de CMDIC, éste cuenta con las 4 etapas del Ciclo de Deming (Figura 4), los cuales son:

- I. Etapa de Planificación: etapa inicial que da cuenta de la estructura de gestión, la cual se divide en 3 subetapas:
 - Mapa de Proceso: Etapa en donde se define el proceso, se identifica el objetivo de este y las distintas entradas que lo alimentan, así como también las salidas o entregables. La definición de las entradas y salidas es clave, ya que o bien pertenecen a otros procesos, o bien provienen de una fuente claramente identificada con un responsable.

- Matriz de Riesgos: Permite evaluar el proceso por medio de sus actividades, evaluando el riesgo inherente a cada una de las actividades constituyentes para determinar la categorización: riesgo alto, riesgo medio, riesgo bajo.
 - Planes de Control y Mitigación: Identificada la magnitud del riesgo, se establecen planes de control y mitigación para gestionar los riesgos identificados y bajar su magnitud.
- II. Etapa de Ejecución: Definido el proceso y las actividades asociadas junto con la evaluación de riesgos y la determinación de planes de control y mitigación, se procede a la ejecución de la actividad por el personal definido y capacitado para tales efectos.
- III. Etapa de Verificación: Con el objeto de asegurar la correcta ejecución de las actividades en la etapa anteriores, se establece un nivel de supervisión que busca que ésta se realice según lo estipulado mediante revisiones documentales o bien en terreno en función del comportamiento esperado por personal ejecutor.
- IV. Conocimiento / Aprendizaje: En toda actividad surgen aprendizajes y oportunidades de mejora, esta etapa viene a integrar ambos conceptos, evalúa el cómo se realizó la actividad definida, establece mejoras al proceso y retroalimenta la etapa de planificación modificando y/o actualizando ya sea el Mapa de Proceso, Matriz de Riesgo o los Planes de Mitigación y Control para que cada iteración sea mejor que la anterior construyendo un círculo virtuoso.



Figura 4: Ciclo de Gestión de Riesgos

Para el desarrollo del Modelo de Gestión del Depósito de Relaves, se propone la siguiente metodología de elaboración:

- Revisión bibliográfica Decreto Supremo DS N°248 (Sernageomin, 2017)
- Revisión bibliográfica Estándar Gestión de Relaves ICMM GISTM (ICMM, 2020);
- Establecer los lineamientos de gobernanza sugeridos;
- Actualización de Mapa de Proceso desde la óptica de Dueño del Proceso;
- Elaboración de Mapa de Procesos Integrado del Proceso.

Como se mencionó en los objetivos, el Modelo de Gestión de Relaves se basa en un Mapa de Procesos Integrado, ya que producto de la cantidad de estructuras que interaccionan en el depósito, es clave identificar claramente las relaciones existentes y como se comunican entre sí.

Adicional a lo anterior, se propondrá una estructura de gobernanza, ya que de esta forma se establece la forma en que los distintos actores se relacionan entre sí junto con las interacciones existentes.

3.3 RESULTADOS

El DS N°248 es un documento normativo nacional promulgado el año 2006, que establece en el Capítulo Primero sobre Propósito y Campo de Aplicación los siguientes artículos:

- Artículo 1°: el reglamento tiene por objeto fijar normas sobre la aprobación de los proyectos de depósitos mineros y los requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros y la disposición de sus obras anexas que garanticen la seguridad de las personas y de los bienes.
- Artículo 2°: toda faena minera que genere y debe depositar relaves como parte del proceso extractivo, está obligado a cumplir las disposiciones del reglamento.
- Artículo 3°: corresponde al Servicio Nacional de Geología y Minería la aplicación y fiscalización del Reglamento, sin perjuicio de las atribuciones que en materia de fiscalización posean otros órganos del Estado.

Al revisar en detalle el reglamento, se evidencia una importante componente técnica, no incorporándose de forma tácita recomendaciones orientadas a los modelos de gestión que se deben implementar para una operación segura de los relaves, establece principalmente un marco técnico que debe ser cumplido para la autorización del proyecto en particular y su posterior operación.

El GISTM, es un documento elaborado con fecha agosto 2020 por el ICMM, que pretende alcanzar el objetivo de cero daños en las personas y en el ambiente, y tolerancia cero para fatalidades humanas. Para tales efectos exige a los operadores que asuman la responsabilidad y prioricen la seguridad de sus instalaciones de relaves, a lo largo de todas las fases del ciclo de vida del proyecto, incluso cierre y post cierre. También exige la divulgación de la información pertinente como respaldo de la rendición de cuentas frente al público.

Desde su estructura, establece en las componentes de Gestión y Gobernanza dos principios que indican los mínimos esperables, teniendo:

- Principio 8: Establecer las políticas, sistemas y rendiciones de cuenta para respaldar la seguridad e integridad de las instalaciones de relaves.
- Principio 11: Desarrollar una cultura organizacional que promueva el aprendizaje, la comunicación y el reconocimiento temprano de los problemas.

Tomando los Principios antes indicados, se establece la necesidad de desarrollar los siguientes tópicos para la conformación de un Modelo de Gestión de Relaves en línea a lo estipulado en el Estándar de Gestión de Relaves ICMM:

- Mapa de Proceso actualizado GTAM
- Mapa de Proceso Integral
- Responsabilidades y Roles
- Sistema de Riesgos y Calidad
- Flujo de Comunicación Corporativo

Mapa de Procesos Actualizado GTAM

El Mapa de Procesos es la primera etapa del CGR (Figura 5), y es el punto de inicio para la elaboración de un Modelo de Gestión, definiendo la siguiente estructura:

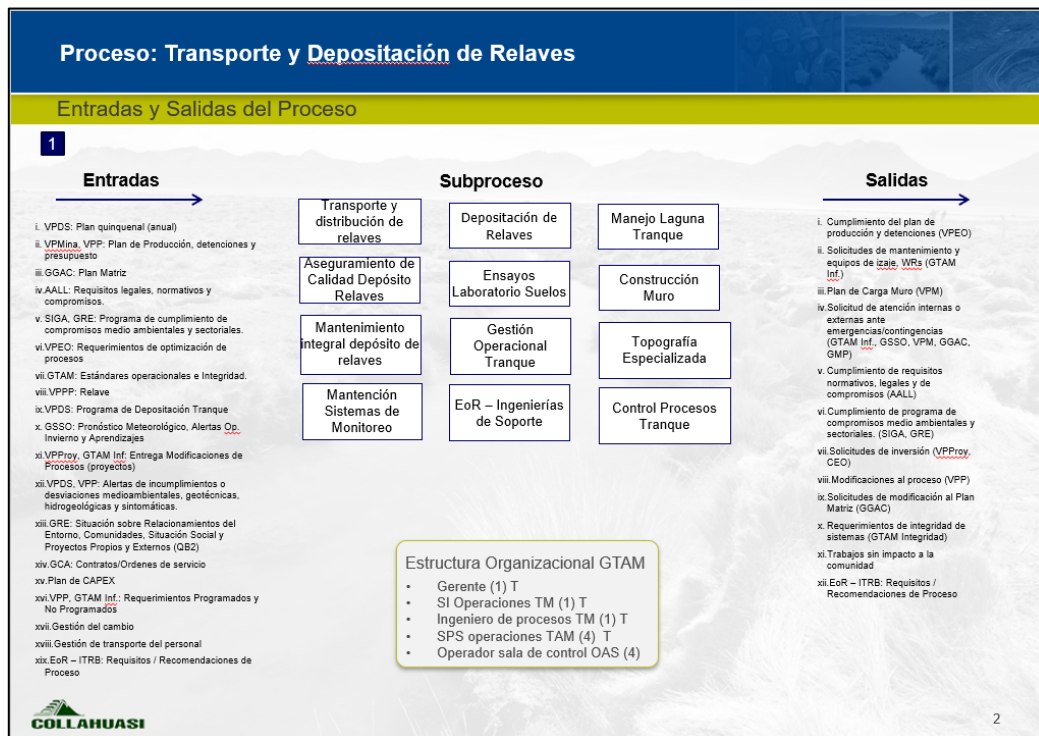


Figura 5: Ciclo de Gestión de Riesgos

Donde se identifica:

- Entradas: se define como entradas a los inputs del proceso, aquellos componentes que van desde requerimientos a datos que alimentan y permiten definir el proceso.
- Subprocesos: se define como una parte más pequeña y específica de un proceso, permitiendo de esta forma establecer una jerarquía, independencia funcional y optimización para así gestionar procesos más complejos de manera efectiva, identificar áreas de mejora y facilitar la asignación de responsabilidades.
- Salidas: son el resultado de las actividades realizadas en el subproceso, los cuales van desde documentos a la ejecución misma de la actividad definida.

Para la elaboración del Mapa de Proceso, se trabaja en base a una estructura ya establecida, incorporando un conjunto de nuevos subprocesos que no se encontraban identificados, para lo cual se complementa con entradas y por consiguiente nuevas salidas, como es lo asociado al trabajo del Ingeniero de Registro y Panel Revisor Independiente, ambas figuras establecidas en el GISTM.

Mapa de Proceso Integrado

CMDIC en el marco de su CGR establece la confección de Mapas de Proceso por unidad operativa, sin embargo, éstos fueron realizados tomando las mejoras prácticas de la industria no integrándose de forma clara entre ellos. Para mejorar lo ya realizado, se propone la construcción de Mapas de Proceso Integrados, los cuales se basan en lo indicado en el Principio 8 del Estándar de Gestión de Relaves elaborado por la ICMM y los siguientes protocolos de conformidad incluidos en él:

- Se establece la constitución de un Sistema de Gestión de Relaves (SGR), el cual consiste en el conjunto de componentes interrelacionados que trabajan juntos para recopilar, procesar, almacenar y proporcionar información relevante para la toma de decisiones y la gestión eficiente.
- El SGR en su origen considera la mejora continua, incorporando de forma secuencial las etapas de Planificar, Hacer, Revisar y Actuar establecidos.
- Las responsabilidades y competencias asociadas para la implementación de ese marco que están definidas respaldan la identificación y gestión adecuada de los riesgos de la instalación de relaves.
- El marco de gobernanza respalda el SGR y sus sistemas fundamentales relevantes y otros relacionados con el Sistema de Gestión Ambiental y Social (SGAS).
- Los vínculos entre el SGR y otros sistemas como el SGAS son claros para asegurar una gestión integral eficaz de la instalación de relaves.

Además, a continuación, se presentan las definiciones que establece el ICMM para los sistemas de gestión:

Sistema de Gestión de Relaves (SGR): El SGR específico del sitio comprende los componentes clave para la gestión y el diseño de la instalación de relaves y, a menudo, se lo denomina el "marco" que gestiona estos componentes. El SGR se encuentra en el núcleo del Estándar y se centra en la operación y gestión segura de la instalación de relaves a lo largo de su ciclo de vida. El SGR sigue el ciclo establecido Planificar-Hacer-Verificar-Actuar. Cada operador desarrolla un SGR que mejor se adapta a su organización e instalaciones de relaves. Un SGR incluye elementos, tales como: establecer políticas, planificar, diseñar y establecer objetivos de desempeño, gestionar el cambio, identificar y asegurar los recursos adecuados (personal experimentado y/o calificado, equipo, programación, datos, documentación y recursos financieros), realizar evaluaciones de desempeño y evaluaciones de riesgos, estableciendo e implementando controles para la gestión de riesgos, auditando y revisando para la mejora continua, implementando un sistema de gestión con responsabilidades personales (accountabilities) y responsabilidades claras, preparando e implementando el manual de Operaciones y Preparación – Respuesta ante Emergencias. El SGR, y sus diversos elementos, deben interactuar con otros sistemas, como (SGAS, el sistema de gestión de toda la operación y el sistema reglamentario. Esta interacción de sistemas es fundamental para la implementación efectiva de la norma.

Sistema de Gestión Ambiental y Social (SGAS): Un enfoque metodológico que se basa en los elementos del proceso establecido del “Planificar, Hacer, Revisar, Actuar” y es utilizado para gestionar los riesgos ambientales y sociales e impactos de una forma estructurada, a corto y largo plazo. Un SGAS efectivo, adecuado a la naturaleza y escala de la operación, promueve un desempeño ambiental y social sólido y sostenible, y también conduce a mejorar los resultados financieros. El SGAS ayuda a las empresas a integrar los procedimientos y objetivos para la gestión de los impactos sociales, ambientales (y, económicos locales) dentro de las operaciones principales de negocios, a través de una serie de procesos replicables claramente definidos. Un SGAS es un proceso dinámico y continuo, iniciado y respaldado por la gerencia, e involucra el compromiso entre el Operador, sus empleados y contratistas, personas afectadas por el proyecto, y de corresponder, otras partes interesadas. La interacción del SGAS con el SGR facilita el alineamiento de las decisiones sobre la instalación de relaves con el contexto social, ambiental y económico local cambiante y refleja el hecho que una instalación de relaves está situada dentro de un ambiente local y global, complejo y dinámico.

En consideración de lo anterior, se construyen los Mapas Integrados del Sistema de Gestión de Relaves, y el Sistema de Gestión Ambiental y Social que viene a integrar los Mapas existentes con los establecidos en el Estándar Global de Relaves, los que se presentan en las Figura 6 y Figura 7.

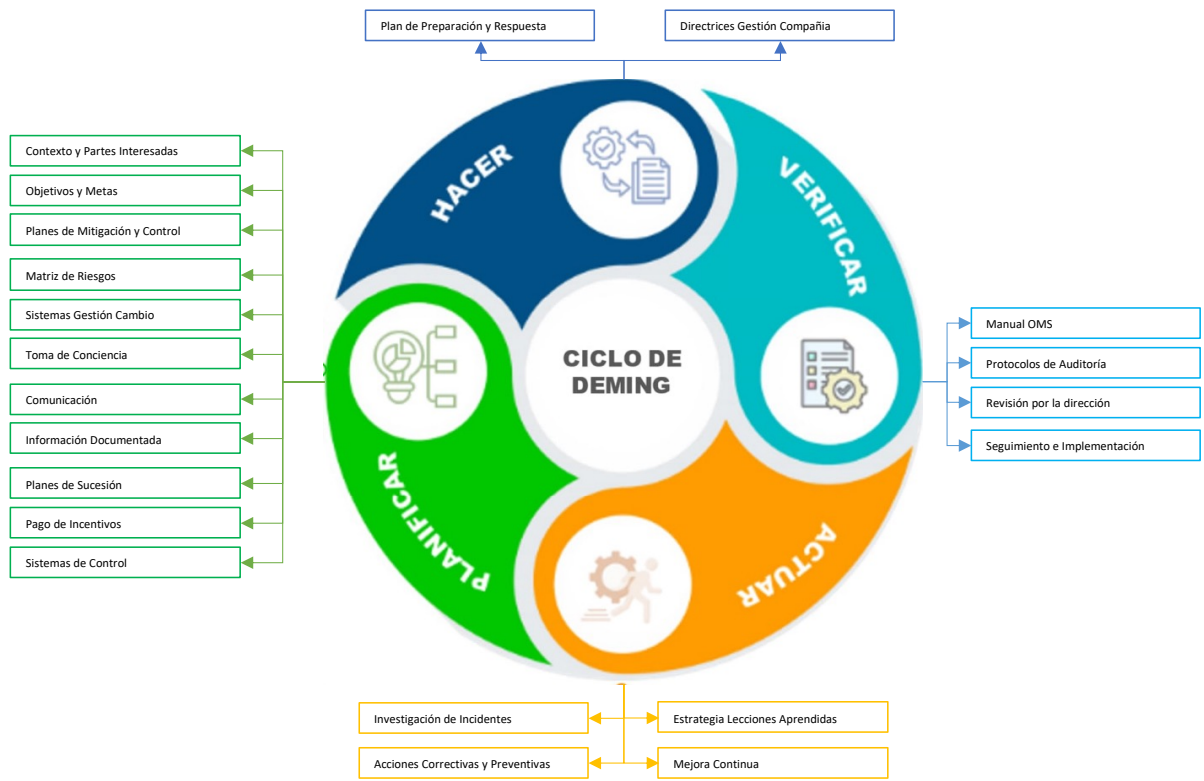


Figura 6: Mapa Integrado Gestión de Relaves CMDIC

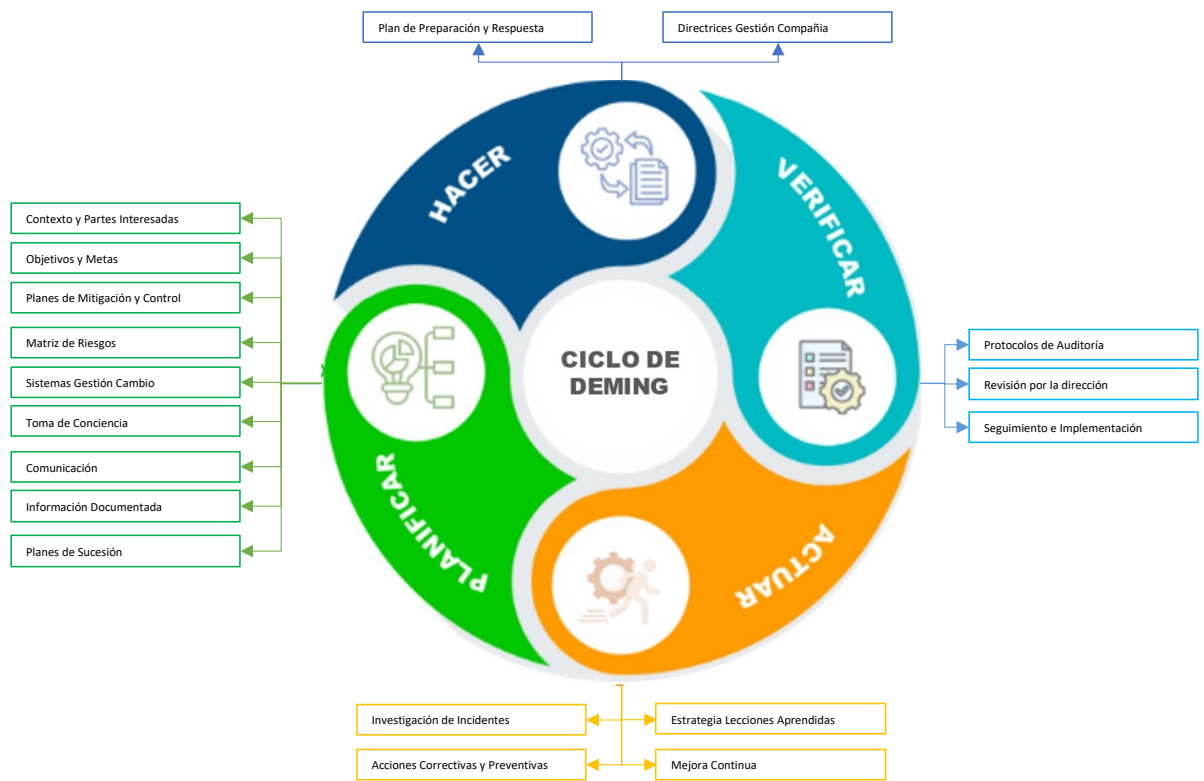


Figura 7: Mapa Integrado Gestión Ambiental Social CMDIC

Donde las Directrices Gestión Compañía da a lugar al Ciclo de Vida de la Instalación, el cual se presenta en detalle en la Figura 8.

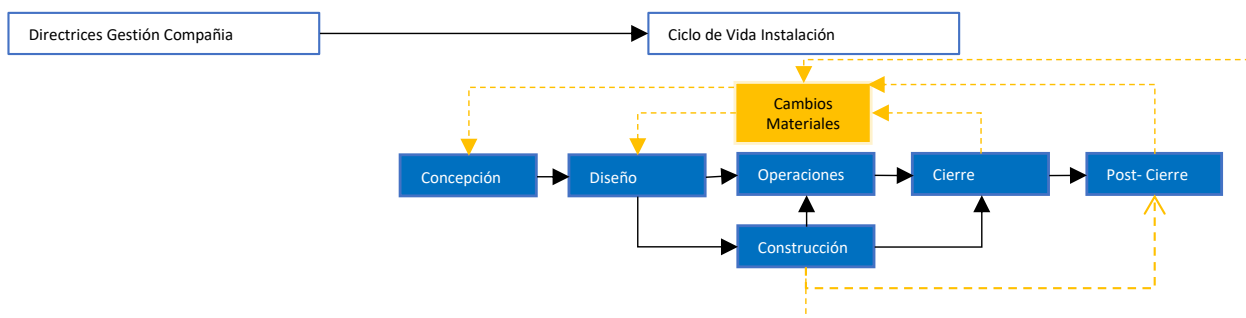


Figura 8: Detalle Directrices Gestión Compañía

Responsabilidades y Roles

La responsabilidad y roles del personal se encuentran establecidas en cada uno de los instructivos y procedimientos de trabajo, así como también de forma inherente en el rol que cada una de las personas entiende que debe hacer. Como parte de la mejora del SGR, se propone que toda organización para su funcionamiento debe establecer claramente los atributos de cada integrante, para lo cual en el caso práctico de CMDIC se establece la construcción de una matriz RACI, la cual es una herramienta de gestión de proyectos y procesos que se utiliza para definir y comunicar roles y responsabilidades dentro de un equipo u organización. De la naturaleza de que significa RACI, este es un acrónimo que representa cuatro roles claves:

- Responsable R: es la persona encargada de llevar a cabo la tarea o actividad. Son responsables de su ejecución y de asegurarse de que se complete de manera adecuada y oportuna.
- Aprobador A: es la persona que tiene la responsabilidad final y la autoridad para tomar decisiones sobre la tarea o actividad. Son responsables de dar el visto bueno o la aprobación final.
- Consultado C: las personas en este rol se involucran en el proceso y pueden proporcionar información, asesoramiento o consejo relacionado con la tarea. A menudo, se espera que den su opinión, pero no tienen la responsabilidad final de la ejecución ni de la toma de decisiones.
- Informado I: las personas en este rol son aquellas que deben mantenerse informadas sobre el progreso y los resultados de la tarea, pero no están directamente involucrados en su ejecución ni en la toma de decisiones. Pueden ser interesadas o personas que necesitan conocer el estado de la actividad.

Para efectos del SGR en elaboración se establecen las matrices presentadas en la Tabla 1 y Tabla 2, en donde se tiene:

Proceso	Actividades OMS (Operación, Mantenimiento y Control)	Roles											
		Sernageomin	SMA	Accionistas	Comité Ejecutivo	Vicapresidente Ejecutivo de Operaciones	Ejecutivo Responsable (Gte GTAM)	Profesional Competente (SI Op. Tranque)	Ingeniero Procesos Senior Tranque	Jefe de Turno Operaciones Tranque	Ejecutivo Gestión Procesos (Finanzas)	Ejecutivo Planificación Mina	Ejecutivo Operación Mina
O	Transporte y Deposición de Relaves (O)												
	Operación Cajón 4001						I	A//C	S	R			
	Operación Tubería 1600						I	A//C	S	R			
	Operación Canaleta Hormigón					I	I	A//C	S	R			
	Operación Cajón 1302						I	A//C	S	R			
	Operación Cajón 192						I	A//C	S	R			
O	Deposición de Relaves												
	Operación Descarga 0						I	A//C	S	R			
	Operación Descarga 0,5						I	A//C	S	R			
	Operación Descarga Línea 1000 mm						I	A//C	S	R			
	Operación Descarga PD08						I	A//C	S	R			
	Operación Línea de Lavado						I	A//C	S	R			
O	Manejo Laguna Tranque												
	Control Operacional Laguna Aguas Claras (Forma)						I	A//C	S	R			
	Control de Instalación de Loquetas						I	A//C	S	R			
	Manejo Llenado Empréstitos						I	A//C	S	R			
	Manejo Aguas Lagunas Parasitas						I	A//C	S	R			
	Control Canales Contorno						I	A//C	S	R			
S	Aseguramiento de Calidad Depósito de Relaves (QaQc)												
	Control de Avance en Terreno Diario							I//S	A//C	I		I	I
	Control de Avance Semanal					I	I	I//S	A//C	I		I	I
	Procesamiento de Información Topográfica						I	I//S	A//C	I		I	I
S	Ingeniería de Soportes - EoR												
	Ingeniería de Registro						I	I	I//C	A//C			
	Definición de Plan Mensual						I	I	I//C	A//C			
	Definición de Plan Anual					I	I	I	I//C	A//C			
	Seguimiento e Implementación Estándar Global						I	I//C	A//C				
	Seguimiento e Implementación D535 Propuesto						I	I//C	A//C				
	Reportabilidad E700						I	A	R	S			
S	Control Calidad Suelos												
	Ensayos en Terreno							I	A//C	I		I	I
	Ensayos en Laboratorio							I	A//C	I		I	I
O	Construcción Muro												
	Carga, descarga y recorte de material para capas de corona						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Carga, descarga y recorte de material para capas de espaldón						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Carga, descarga y recorte de material para capas de muro auxiliar						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Carga, descarga y recorte de material para capas de transición						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Carga, descarga y recorte de material para capas de berma						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Endentado del muro						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Limpieza de relaves sector tranque						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Mantenimiento y reparación en áreas de tranque y mina						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Saneamiento Sector Lacustre						I	A//C	S//C	S//C		S//C	S//C
	Liberaciones de Areas Ambientales - Arqueológicas		I				I	I	A			S	S
M	Mantenimiento Integral Depósito de Relaves												
	Mantenimiento de equipos y herramientas							I	A//C				
	Piping							I	A//C				
	OCCC							I	A//C				
	Geosintéticos							I	A//C				
	Gestión de Residuos							I	A//C				
S	Gestión Operacional Tranque												
	Entrega equipos mantención							A	S	R			
	Conducción interior y exterior faena							A	S	R			
	Operación sala de control							A	S	R			
	Implementación Estándar Global					I	I	I	I//C	A//C			
	Implementación Estándar Collahuasi					I	I	I	I//C	A//C			
	Reportabilidad Monitoreo de Aguas							I	A	S			
	Reportabilidad procesos GTAM							I	A	S	R		
O	Topografía Especializada												
	Levantamiento topográfico							I	A//C				
O/M/S	Instrumentación Geotécnica												
	Mantenimiento Instrumentación Piezómetros - Acelerógrafos - Inclinómetros							I//C	A//C				
	Operación Instrumentación Piezómetros - Acelerógrafos - Inclinómetros							I//C	A//C				
	Revisión Nueva Instrumentación Piezómetros - Acelerógrafos - Inclinómetros							I//C	A//C				
	Monitoreo Satelital							I	I				I
	Monitoreo Radar							I	I				I
S	Control Procesos Tranque												
	Control Capex						I	I	A	R	S		
	Activación Capex						I	I	A	R	S		
	Control Board Paper						I	I	A	R	S	C//S	S
	Activación Board Paper						I	I	A	R	S	C//S	S
	Control Opex						I	I	A	R	S		
	Gestión Provisiones - Forecast						I	I	A	R	S		
	Control Proyectos						I	I	A	R	S		
	Control Documental						I	I	A	R	S		
	Control Procesos Unitarios						I	I	A	R	S		
	Control Plan Matriz						I	I	A	R	S		
	Control Repuestos						I	I	A	R	S		
	Avance Financiero Contratos						I	I	A	R	S		
	Gestión Personal Contrato						I	I	A	R	S		
	Gestión Licitaciones						I	I	A	R	S		

Tabla 1: Matriz RACI Depósito CMDIC

Proceso	Actividades OMS (Operación, Mantenimiento y Control)	Jefe Turno Mina	Ingeniero Principal Geotecnia	Ejecutivo Mantenimiento Tranque	Ejecutivo Proyectos	Ingeniero Recursos Hídricos	Ingeniero Monitoreo Ambiental	Supervisor Relacionamento con el entorno	Ingeniero de Registro (WSP)	Especialista Qa/Qc (R&Q)	Especialista Obras Civiles (Emin)	Especialista Topografía (Geosupport)	Especialista Instrumentación (Geomediciones & Geoblast & TRE/Altamira)	Especialista Mecánica de Suelos (Cesmec)
O	Transporte y Depositación de Relaves (O)													
	Operación Cajón 4001													
	Operación Tubería 1600													
	Operación Canaleta Hormigón													
	Operación Cajón 1302													
	Operación Cajón 192													
O	Depositación de Relaves													
	Operación Descarga 0													
	Operación Descarga 0,5													
	Operación Descarga Línea 1000 mm													
	Operación Descarga PD08													
	Operación Línea de Lavado													
O	Manejo Laguna Tranque													
	Control Operacional Laguna Aguas Claras (Forma)		S											
	Control de Instalación de Losetas													
	Manejo Llenado Empréstitos		S											
	Manejo Aguas Lagunas Parásitas													
	Control Canales Contorno						I							
S	Aseguramiento de Calidad Depósito de Relaves (Qa/Qc)													
	Control de Avance en Terreno Diario	I	I					I	R					S
	Control de Avance Semanal	I	I					I	R					S
	Procesamiento de Información Topográfica	S	I					I	R					
S	Ingeniería de Soportes - EoR													
	Ingeniería de Registro								R					
	Definición de Plan Mensual								R					
	Definición de Plan Anual								R					
	Seguimiento e Implementación Estándar Global		S			S	S	R	R					
	Seguimiento e Implementación DS35 Propuesto								R					
	Reportabilidad E700								S					
S	Control Calidad Suelos													
	Ensayos en Terreno	I//S	I//S											R
	Ensayos en Laboratorio	I//S	I//S											R
O	Construcción Muro													
	Carga, descarga y recorte de material para capas de corona	R												
	Carga, descarga y recorte de material para capas de espaldón	R												
	Carga, descarga y recorte de material para capas de muro auxiliar	R												
	Carga, descarga y recorte de material para capas de transición	R												
	Carga, descarga y recorte de material para capas de berma	R												
	Endentado del muro	R												
	Limpieza de relaves sector tranque	R												
	Mantenimiento y reparación en áreas de tranque y mina	R												
	Saneamiento Sector Lacustre	R												
	Liberaciones de Áreas Ambientales - Arqueológicas	S			I//C		R							
M	Mantenimiento Integral Depósito de Relaves													
	Mantenimiento de equipos y herramientas			S							R			
	Piping			S							R			
	OQCC			S							R			
	Geosintéticos			S							R			
	Gestión de Residuos			S							R			
S	Gestión Operacional Tranque													
	Entrega equipos mantención			I//C							I			
	Conducción interior y exterior faena													
	Operación sala de control													
	Implementación Estándar Global		S			S	S	R	R					
	Implementación Estándar Collahuasi		S			S	S	R	R					
	Reportabilidad Monitoreo de Aguas					S	R							
	Reportabilidad procesos GTAM		S	S		S	S	S	S	S	S	S	S	S
O	Topografía Especializada													
	Levantamiento topográfico		S									R		
O/M/S	Instrumentación Geotécnica													
	Mantenimiento Instrumentación Piezómetros - Acelerógrafos - Inclínómetros		A											R
	Operación Instrumentación Piezómetros - Acelerógrafos - Inclínómetros		A											R
	Revisión Nueva Instrumentación Piezómetros - Acelerógrafos - Inclínómetros		A					S	S					R
	Monitoreo Satelital		A					S						R
	Monitoreo Radar		A					S						R
S	Control Procesos Tranque													
	Control Capex					C//S								
	Activación Capex					C//S								
	Control Board Paper		C//S											
	Activación Board Paper		C//S											
	Control Opex													
	Gestión Provisiones - Forecast													
	Control Proyectos					C//S								
	Control Documental													
	Control Procesos Unitarios													
	Control Plan Matriz						R							
	Control Repuestos						R							
	Avance Financiero Contratos		R											
	Gestión Personal Contrato		R											
	Gestión Licitaciones		R											

Tabla 2: Matriz RACI Depósito CMDIC

En donde se definen actores claves dentro del SGR que son:

- Comité Ejecutivo de CMDIC

El Comité Ejecutivo de CMDIC, adoptará y hará pública una política o un compromiso respecto de la gestión segura del depósito de relaves, la preparación y respuesta ante emergencias, y la recuperación después de una falla.

El Comité Ejecutivo de CMDIC se conforma por los siguientes cargos: Presidente Ejecutivo, Gerente Seguridad y Salud Ocupacional, Vicepresidente Recursos Humanos, Vicepresidente Finanzas y Administración, Vicepresidente Proyectos, Vicepresidente Desarrollo y Sustentabilidad, Vicepresidente Ejecutivo Operaciones, Vicepresidente Procesos, Vicepresidente Mina y Gerente Legal.

- Vicepresidente Ejecutivo de Operaciones

Miembro del Comité Ejecutivo de CMDIC responsable de asegurar los recursos para una gestión adecuada de los relaves, y que reportará directamente al Comité Ejecutivo de CMDIC sobre las actividades y condiciones levantadas por el Ejecutivo Responsable.

- Ejecutivo Responsable

Cargo gerencial y de responsabilidad de la gestión del depósito.

El Ejecutivo Responsable reportará directamente al Vicepresidente Ejecutivo de Operaciones en asuntos relacionados con este Estándar y la seguridad del depósito de relaves. Es responsable, además, de evitar o minimizar las consecuencias sociales y ambientales de una falla en el depósito de relaves. También responde por la capacitación en gestión de relaves y por la preparación y respuesta ante emergencias.

El Ejecutivo Responsable deberá establecer un programa de comunicaciones integral.

- Profesional Competente

Profesional en sitio a cargo de la operación, construcción del depósito, gestión y coordinación de contratistas, ingeniería, proyectos, medidas de seguridad y de conservación del medio ambiente.

El Profesional Competente será escogido y designado por el Ejecutivo Responsable, y deberá tener una formación de Ingeniero Civil, con experiencia de al menos 10 años.

Dentro de sus responsabilidades se encuentran velar por la seguridad de la obra y mantener una comunicación bidireccional frecuente con el Ejecutivo Responsable y asegurar la ejecución, finalización, control y aprobación de documentos asociados al diseño, operación, construcción y gestión del depósito.

- Ingeniero de Registro (IdR)

El IdR es una empresa de ingeniería representada por un Ingeniero con más de 15 años de experiencia en depósitos de relaves.

El IdR es responsable de revisar y verificar que el diseño, construcción y operación del depósito se realicen de acuerdo a las buenas prácticas y en concordancia con las guías, estándares y normativas locales e internacionales.

El IdR y empresa a la que represente será seleccionado por y puede reportar al Ejecutivo Responsable, también pudiendo acudir al Vicepresidente Ejecutivo de Operaciones. Otros sectores de la compañía, como adquisiciones, no tendrán injerencia alguna en dicha decisión, dada la sensibilidad del cargo.

Sistema de Riesgo y Control

Se establecerá e implementará un programa para gestionar la calidad de todo el trabajo de ingeniería, las interacciones entre el IdR, el Profesional Competente y el Ejecutivo Responsable, y la participación de éstos en el ciclo de vida del depósito de relaves, según sea necesario, para confirmar que se cumplen tanto la implementación del diseño como su intención.

Para etapas de construcción, el depósito contará con una supervisión de ésta, a modo de asegurar el cumplimiento de especificaciones técnicas, diseño y condiciones permisológicas. Los reportes y análisis realizados para el aseguramiento y control de la calidad serán revisados y aprobados por el IdR (o su representante), quien confirmará por escrito que la construcción cumple con los criterios y requisitos del diseño.

Realizar revisiones por profesionales calificados, con una periodicidad mínima de tres años del SGR para asegurar la efectividad de este. Documentar e informar los resultados al Ejecutivo Responsable, al Vicepresidente Ejecutivo de Operaciones y otras partes interesadas.

Realizar auditorías internas para verificar la implementación congruente de los procedimientos, las directrices y los requisitos de gobernanza corporativa de la compañía de modo que sean consistentes con el SGR desarrollados para administrar los riesgos del depósito de relaves.

Realizar una Revisión de Seguridad de Presa (RSP), al menos, cada cinco años. La RSP deberá incluir aspectos técnicos, operativos y de gobernanza del depósito de relaves y deberá llevarse a cabo de acuerdo con las buenas prácticas.

Realizar y actualizar las evaluaciones de riesgos con un equipo multidisciplinario idóneo utilizando las metodologías de las buenas prácticas, como mínimo, cada tres años y con frecuencia mayor cada vez que se produzca un cambio importante en el depósito de relaves o en el contexto social, ambiental y de la economía local.

El Ingeniero de Registro (IdR) realizará anualmente Inspecciones de Seguridad del Muro. En su reporte incluirá como mínimo la revisión de la clasificación de consecuencia, un resumen de

los trabajos de construcción o crecimiento del depósito, resultados de QA/QC, instrumentación, resultados del monitoreo, revisión de la estabilidad del muro, reportes de incidentes, entre otros. Adicionalmente, el IdR incluirá recomendaciones para garantizar la seguridad del muro y mejoras operativas.

Todo evento o incidente que pueda afectar la seguridad del depósito será reportado de inmediato al IdR, tomando las medidas de contingencia señaladas en los planes de respuesta y preparación ante emergencias, según sea el caso.

En cuanto a la implementación del programa, se propone la elaboración de un programa maestro, el cual deberá actualizarse año y año, así como también que todas las actividades recurrentes sean cargadas en una herramienta computacional que de forma automática asigne la ejecución de estas a los respectivos responsables (sistematizar el proceso).

Flujo de Comunicaciones

Considerando el nuevo marco de gobernanza, los roles y responsabilidades definidas, los roles claves y el sistema de gestión y control, se propone en la Figura 9 el flujo de comunicaciones en búsqueda de representar las interacciones esperadas en el marco del SGR.

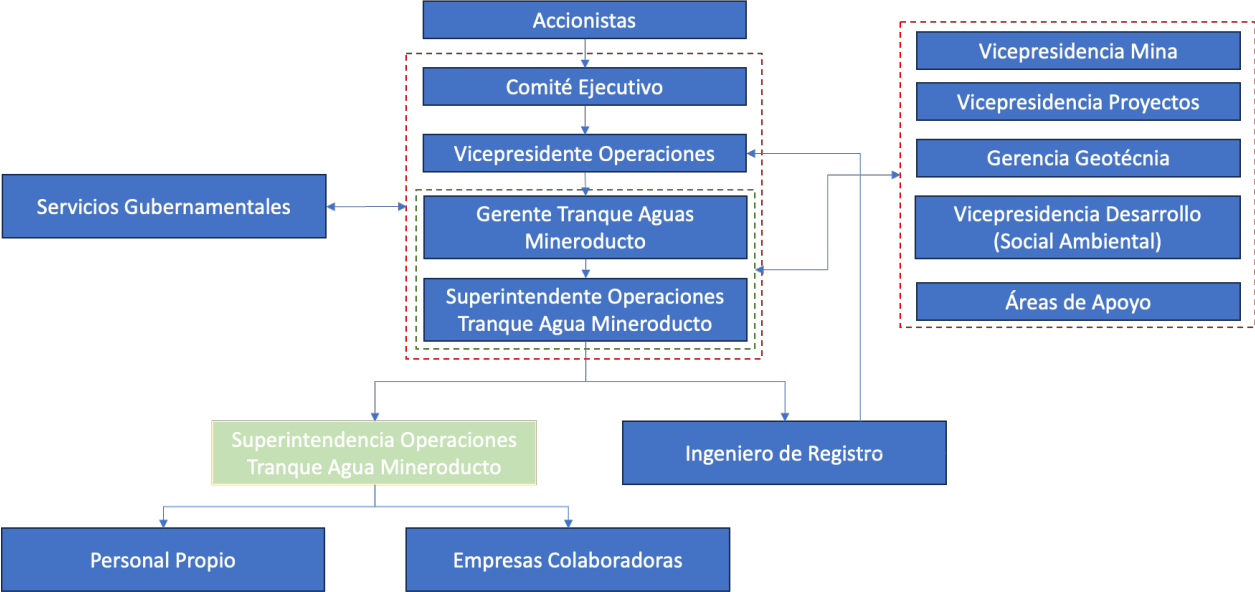


Figura 9: Flujo de Comunicaciones

3.4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente capítulo se comparten los aspectos fundamentales de un nuevo SGR que incorpora las mejoras prácticas de la industria, el cual considera tanto ventajas así como presenta aún algunas deficiencias:

- Importancias de la gestión de relaves: la construcción del SGR debe considerar desde sus inicios el aseguramiento de seguridad de los relaves y las instalaciones que los almacenen con foco en cero impacto a las personas, ambiental, comunitario y a los procesos.
- Enfoque en mejora continua: los sistemas no son estáticos, se establecen etapas de Planificación, Ejecución, Verificación y Conocimiento/Aprendizaje en el núcleo del SGR para que capture e incorpore las mejores prácticas de la industria y experiencias propias en el modelo de gestión mejorando cada vez más.
- Metodología para la gestión de relaves: se presenta una metodología específica para la gestión de relaves, basada en la revisión de normativas nacionales e internacionales, la creación de mapas de procesos, la incorporación de lineamientos de gobernanza la actualización constante mediante un ciclo de mejora continua.
- Enfoque en seguridad y responsabilidad: se refuerza la importancia de la claridad de los roles así como también sus alcances, se debe trabajar en que toda actividad tenga responsables definidos.
- Integración de Procesos: se propone la construcción de mapas integrados dentro de la misma organización, en donde cada uno de los actores se relaciona con el resto mediante relaciones definidas.
- Comunicación efectiva: se destaca la importancia de un flujo de comunicaciones claro y estructurado, considerando los roles y responsabilidades.

En cuanto a los desafíos, se identifica:

- Rol de Ingeniero Competente: se encuentra identificado en múltiples actividades y además tiene una cantidad importante de responsabilidades, la organización debe seleccionar adecuadamente quien cumplirá ese rol y proveer de todos los recursos necesarios para su ejecución.
- Centro Documental: producto de la cantidad de documentos generados por distintos actores, se debe establecer un sistema de gestión documental dinámico que permita el seguimiento y el control de los informes realizados.
- Visión de largo plazo: la gestión de relaves se ha enfocado, en primera instancia, al asegurar la operación a corto plazo de los activos no viendo escenarios futuros.

4 MODELO DE INTEGRIDAD DE RELAVES

4.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de toda administración en la industria minera, es dar confiabilidad a sus sistemas operativos para asegurar la continuidad del proceso, asegurando el cumplimiento irrestricto de la normativa vigente, los compromisos adoptados en los permisos correspondientes y la promesa de negocio a sus dueños.

Para asegurar la confiabilidad de los procesos se han adoptado distintas aproximaciones, sin embargo, la experiencia indica que aun cuando existen mejoras en el proceso, las fallas catastróficas se siguen sucediendo, siendo necesario establecer una solución distinta a lo ya realizado.

En el marco de lo establecido en el Estándar de Gestión de Relaves del ICMM, en donde se busca con paso firme el no tener fallas fatales en la administración de los relaves, se requiere sistematizar y coordinar los procedimientos operacionales y de mantención, junto con las estructuras de gobernanza y comunicación, para así de esta forma dar nacimiento a un Modelo de Gestión de Integridad, que asegure la continuidad de cualquier activo mediante la identificación temprana de las amenazas potenciales y tomar acción sobre estas antes que se gatille la falla.

Al identificar y definir las amenazas potenciales, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de estas, lo que permitirá gestionar en base al establecimiento de prioridades y planes de acción tanto preventivos como correctivos, las acciones necesarias para asegurar la continuidad operacional del activo sin generar impactos no deseados tanto en el entorno como al negocio.

En el presente tópico, entendiendo la relevancia que tienen los relaves tanto en su componente de muro de contención, como así también en las obras periféricas, se propone la conceptualización y construcción de un Modelo de Integridad de Relaves, que busque que el Depósito de Relaves de CMDIC se encuentre correctamente evaluado y así sostener la promesa realizada a los accionistas sin fallas fatales.

4.2 MÉTODO

Para la elaboración de un Modelo de Integridad, se utilizará al igual que para el SGR, el CGR de CMDIC, el cual es el punto de inicio para la elaboración de cualquier modelo. Adicional al CGR, y tomando las buenas prácticas de otros rubros, se considera la utilización de la ISO 55001 y de la API RP 1173.

- ISO 55001: conjunto internacional de normas que brinda orientación en las mejores prácticas para la gestión de activos, incorporando capítulos de Propósito, Referencias de Estándar, Términos y Definiciones, Contexto Organizacional, Liderazgo, Planificación, Soporte, Actividades de Operación, Evaluación de Sistemas y Mejora Continua.

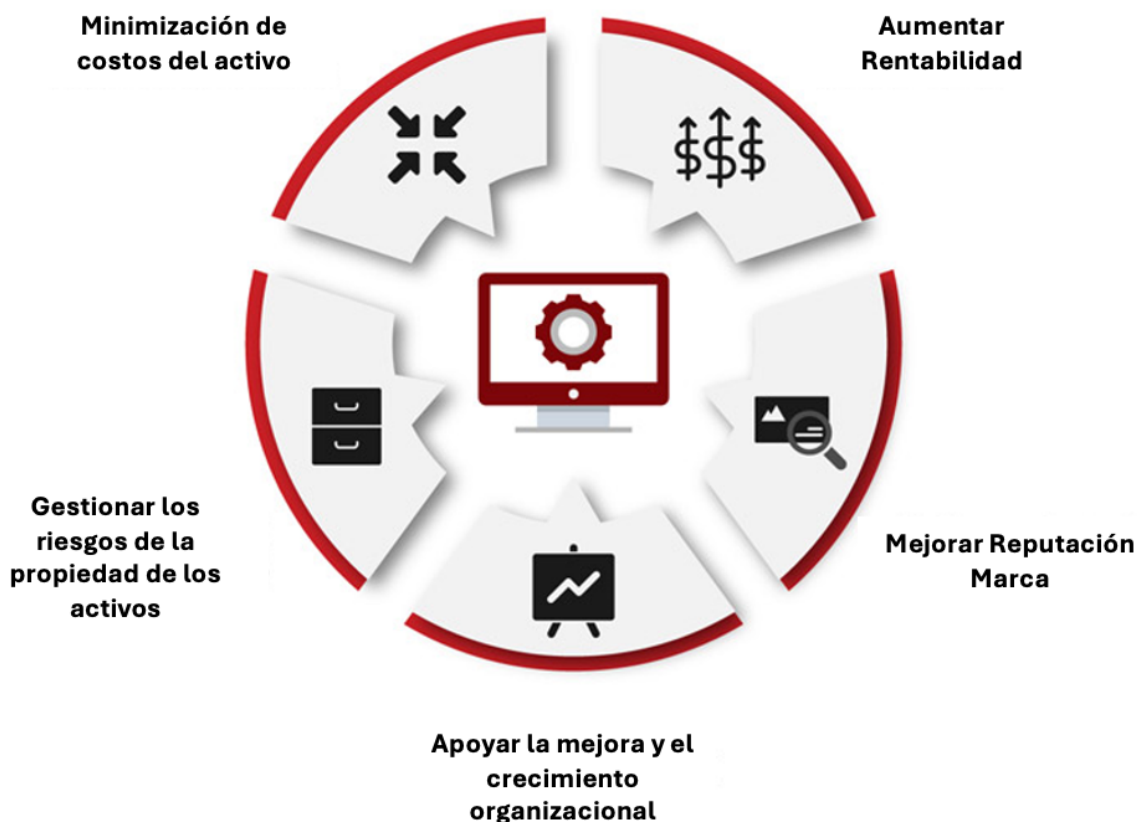


Figura 10: Flujo ISO 55001

- APIT RP1173: norma de origen americana generada por la American Petroleum Institute, presenta un marco a los operadores de petróleo, pero extensible a flujos de alto impacto de como se deben establecer sistemas de administración, proveyendo un marco de gestión de riesgo, cuidado con el entorno y promoviendo prácticas de integridad y cuidado de activos.

Tomando en consideración el CGR, junto con la utilización de la ISO 55001 y la API RP1173, se da forma al Modelo de Integridad de Relaves que considerará las siguientes estructuras:

- Depósito de Relaves
- Sistema de Transporte de Relaves
- Sistema de Depositación de Relaves
- Sistema de Captación de Aguas Claras
- Sistema de Recirculación de Aguas
- Sistema de Bombeo
- Sistema de Pozos de Cortina Hidráulica
- Sistema de Captación de Aguas de Infiltración.

4.3 RESULTADOS

Construcción Sistema de Integridad

Para la construcción del Sistema de Gestión Integridad del Depósito de Relaves (SGIDR), se consideran las distintas instalaciones y el Mapa de Proceso del Depósito ya presentado, identificando las siguientes etapas del SGIDR con sus respectivos objetos (Ausenco, 2022):

- Propósito, Políticas y Objetivos: definir la razón fundamental de la existente del SGIDR, establecer las declaraciones general que proporcionan orientación y límites para la toma de decisiones, y fundar las metas específicas y cuantificables para cada componente.
- Control de Diseño y Construcción: establecer procesos y procedimientos para garantizar que el SGIDR cumpla con los requisitos y normativas establecidas, junto con las medidas que se deben tomar para que las especificaciones definidas se sigan correctamente.
- Integridad de Datos: garantizar que los datos se mantengan precisos, completos y consistentes a lo largo del tiempo, así como también que en el momento de la toma de datos estos cuenten con atributos de exactitud, precisión, completitud,
- Organización: establecer la estructura eficiente y efectiva para implementar y mantener los procesos relacionados con la integridad de datos.
- Sistematización y Procedimientos: desarrollar sistemas y procedimientos adecuados para garantizar la integridad de los datos y la eficiencia de los procesos.
- Evaluación y Gestión de Riesgos: identificar, evaluar y gestionar los riesgos que podrían afectar la integridad de los datos y procesos.
- Adiestramiento y Calificación Personal: proporcionar la formación y la cualificación necesaria al personal para realizar sus funciones de manera competente.
- Monitoreo de Condición: supervisar y evaluar continuamente las condiciones para identificar posibles problemas y tomar medidas correctivas.
- Evaluación del Depósito: Evaluar el sistema integral del Depósito de Relaves compuesto tanto por el muro principal como las obras complementarias.
- Control Operacional: implementar controles y procedimientos operativos para garantizar el cumplimiento de los estándares
- Vigilancia Monitoreo y Detección Fallas: monitorear constantemente los sistemas para detectar cualquier anomalía o falla y responder rápidamente.

- Respuesta ante Emergencias: establecer procedimientos para responder de manera efectiva y rápida en caso de emergencias o incidentes.
- QaQc Contratistas y Vendor: implementar procesos de control de calidad y aseguramiento para contratistas y proveedores externos.
- Gestión del Cambio: Gestionar de manera efectiva cualquier cambio en los procesos, sistemas o personal que pueda afectar la integridad de los datos.
- Auditoría Evaluación Medición y Mejora: realizar auditorías y evaluaciones periódicas, medir el desempeño y realizar mejoras continuar en los procesos y sistemas.

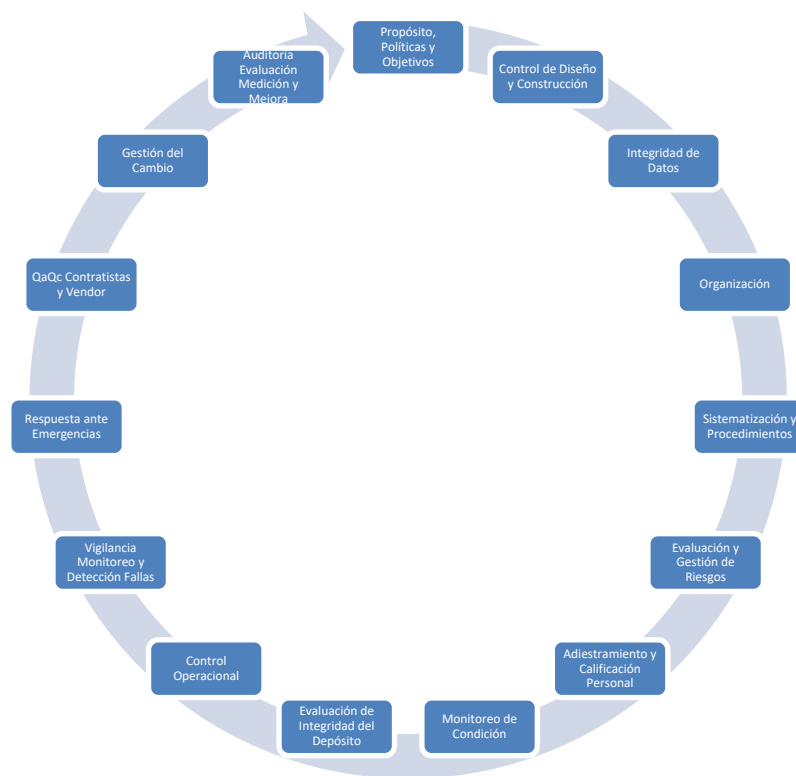


Figura 11: Modelo de Gestión de Integridad del Depósito

En cuanto a la implementación de este Modelo de Gestión Propuesto, se establece la ejecución de 5 etapas las que son descritas a continuación:

- Etapa 1 - Línea Base y Plan de Implementación: recopilar, revisar e integrar los datos necesarios para conocer y entender la condición actual del Depósito de Relaves y sus obras relacionadas, e identificar y localizar las amenazas específicas a su integridad, así como medir el nivel de las consecuencias en caso de una falla del activo en revisión.

Como resultado de esta revisión y conocimiento del estado actual del activo, se genera el plan de implementación del SGIDR, con el objeto de marcar la hoja de ruta para sistematizar y asegurar la gestión de integridad del depósito en toda su extensión.

- Etapa 2 - Documentación del SGIDR: a través de la revisión, actualización y/o desarrollo de todos aquellos documentos que proporcionen un marco de trabajo para la gestión de la integridad del Depósito de Relaves, permitiendo la estandarización, repetibilidad y mejora continua de los procesos, con enfoque en la seguridad del Depósito de Relaves y sus obras anexas, se alimentará el sistema con todos los datos requeridos para su funcionamiento.
- Etapa 3 - Implementación de SGIDR: difusión de modelo a toda la organización. En consideración que el Modelo de Gestión toma como base el Ciclo de Gestión de Riesgos y las prácticas mencionadas en un comienzo, se establecen los siguientes pasos:
 - Puesta en marcha y verificación de cumplimiento de planes desarrollados durante documentación del sistema.
 - Evaluación de la condición del activo.
 - Determinación de las actividades requeridas para mejorar o mantener la condición/evaluación del activo.
 - Ejecución de la condición del activo posterior a la ejecución de las actividades.
 - Evaluación de las medidas de control del activo.
- Etapa 4 - Seguimiento y Mejora SGIDR: Se establece plan de seguimiento de modelo propuesto, actualizando de forma continua y complementando según sea necesario.
- Etapa 5 - Auditoría: Todo modelo debe ser auditado para evaluar su eficacia y nivel de implementación, dentro del plan de trabajo se debe establecer la periodicidad y quien ejecuta la actividad.

En cuanto a la Estrategia de Implementación y haciendo referencia a la Estrategia de Implementación, y con el objeto de segmentar el proceso, se define:

- Corto Plazo:
 - Recopilación de Antecedentes
 - Ordenamiento de Información
 - Revisión y desarrollo de la documentación del SGIRD
- Mediano Plazo:
 - Difusión del SGIRD
 - Análisis de los Activos
 - Revisión y Actualización de los Programas de Inspección
- Largo Plazo
 - Plan de auditoría.

Implementación

El Modelo de Gestión de Integridad del Depósito incorpora tanto el muro principal como sus obras anexas ya mencionadas en el Capítulo 2 (ver Figura 3), las cuales deben ser gestionadas de forma integral evaluando cada uno de las amenazas y riesgos latentes.

Como parte del desarrollo del SGIRD, y evaluando el activo de mayor criticidad después del muro, se define un análisis específico de la tubería de 1600 mm, lo cual servirá como ejemplo de implementación para todas las obras del sistema.

De las características de la tubería, se indica:

- Diámetro externo: 1600 mm
- Diámetro interno: 1480 mm
- Pendiente de plataforma: 0,89%
- Largo: 2.500 m
- Flujo máximo: 17.890 m³/hr
- Flujo mínimo: 1.260 m³/hr
- % de sólido máximo: 61%
- % de sólido mínimo: 56%.

Siendo el trazado el presentado en la Figura 12



Figura 12: Trazado Tubería 1600 mm

De donde se desprende que la tubería, con comienzo en el cajón 4001 descarga espesadores hasta el cajón 1302 descarga cubeta relaves, tiene un recorrido en donde cruza dos caminos principales, y se encuentra inserta en una zona industrial de alta actividad.

En cuanto a su modo de operación, su flujo normal de operación se encuentra en 8.000 m³/hr, por lo que frente a cualquier falla del sistema y suponiendo un caso de colapso total, ese sería el flujo en término promedios que impactaría el entorno con los consiguientes impactos ambientales, comunitarios y operacionales.

En el marco de la implementación del SGIDR, y en línea a los pasos definidos anteriormente, se define

- Propósito, Políticas y Objetivos: se define que, por medio del SGIDR, la tubería de 1600 mm es incorporada al plan de seguimiento teniendo como objetivo tanto un análisis de riesgo del sistema como un programa de cambio en función del desgaste.
- Control de Diseño y Construcción: se establece que el análisis de la tubería de 1600 debe ser realizada con información confiable proveniente de fuentes oficiales, en este caso en particular: ingenierías de diseño, planos as built y mediciones de espesor.
- Integridad de Datos: se establece que el centro de almacenamiento de los datos es el Centro Documental de CMDIC (CDD), plataforma transversal de la organización llamada a almacenar todos los datos generados en la Compañía.
- Organización: se establece que la responsabilidad de monitoreo de los activos es del Ingeniero de Procesos Senior de Integridad, quien debe asegurar el cumplimiento de los planes establecidos en este documento.
- Sistematización y Procedimientos: se establece que toda actividad debe ser gatillada en base a una orden de trabajo periódica que se gatille de forma automatizada.
- Evaluación del Activo: definido el marco de trabajo, en donde se establecieron entre otros las políticas, objetivos, fuentes de información y responsables, se realiza el análisis de riesgo de la tubería.

Para efectos de análisis, la tubería de 1600 mm se separará en distintos segmentos que se representan en una matriz 5x5 correspondiente a la matriz de negocio genérica de CMDIC. Esta matriz permite visualizar y clasificar diversas combinaciones de probabilidad y consecuencia, junto con sus respectivos niveles de riesgo (Figura 13).

		CONSECUENCIAS [C]				
		1	2	3	4	5
P R O B A B I L I D A D	5	11	16	20	23	25
	4	7	12	17	21	24
	3	4	8	13	18	22
	2	2	5	9	14	19
	1	1	3	6	10	15
		RIESGO IN SIGNIFICANTE	RIESGO TOLERABLE	RIESGO INTOLERABLE		

Figura 13: Matriz de Negocio CMDIC

Es importante destacar que los niveles de riesgo no se obtienen de la multiplicación directa del índice de probabilidad por el índice de consecuencia, sino corresponde a la intercepción de estos índices en la matriz anterior.

La escala de clasificación de la probabilidad de falla utilizada para esta evaluación va desde “Raro” hasta “Casi Cierto”, y los detalles con su ponderación se presentan en la Tabla 3.

Ponderación	Sumatorias variables de probabilidad de falla	Clasificación
1	0 – 20	Raro
2	21 – 40	Improbable
3	41 – 60	Posible
4	61 – 80	Probable
5	81 - 100	Casi Cierto

Tabla 3: Ponderación y clasificación de la probabilidad de falla

Igualmente, en la Tabla 4 se presenta la escala con la ponderación de consecuencia:

Ponderación	Sumatorias variables de probabilidad de falla	Clasificación
1	0 – 20	Insignificante
2	21 – 40	Menor
3	41 – 60	Moderada
4	61 – 80	Mayor
5	81 - 100	Catastrófica

Tabla 4: Ponderación y clasificación de la consecuencia de falla

Para el cálculo de la probabilidad de falla, se consideraron las amenazas identificadas en la Tabla 5. En cuanto a la ponderación de las amenazas identificadas, éstas fueron determinar en base a datos históricos recopilados y entrevistas a operadores del sistema, lo que permite evaluar con sustento empírico la probabilidad de falla del sistema.

Amenazas	Índice de Falla (%)
Diseño & Construcción	20%
Abrasión o Erosión	25%
Operación Incorrecta & Mtto	30%
Daños por terceros	15%
Clima	10%

Tabla 5: Identificación e índice de falla por amenaza

El índice de cada amenaza refleja su importancia relativa dentro de la evaluación de riesgos por lo que los porcentajes indican la contribución máxima de cada amenaza a la probabilidad de falla total asociada al transporte de relaves por la tubería de 1600 mm.

En cuanto al análisis de consecuencia, los respectivos factores se presentan en la Tabla 6.

Factores	Índice de Consecuencia (%)
Personas o Terceras partes	20%
Impacto Operacional	40%
Medio Ambiente	40%

Tabla 6: Identificación e índice de consecuencia

Dentro del análisis de consecuencia se valoraron las siguientes subvariables, las cuales permiten evaluar un amplio rango de escenarios que son presentadas en la Tabla 7:

Factor	Variable de Consecuencia
Afectación a personas o terceras partes	Instalaciones cercana
	Tipo de instalación
	Caracterización de las instalaciones o poblaciones
	Densidad poblacional (edificaciones)
	Cercanía de las instalaciones o población
Impacto operacional	Plan de respuesta a emergencia
	Flexibilidad operacional
	Tiempo de retorno al servicio
	Costos indirectos
	Daño a la propiedad
	Impacto financiero
Medio ambiente	Características del producto
	Remediación ambiental
	Accesibilidad al área
	Áreas afectadas

Tabla 7: Identificación de subvariables para la valoración de consecuencias

Definidos los parámetros de interés, se procede a la evaluación de la tubería de 1600 mm como tal, para lo cual se segmentará en distintos tramos productos de su importancia relativa.

- Tramo S1: zona comprendida entre el inicio de la línea de transporte hasta el primer cruce de camino;
- Tramo S2: zona asociada al primer cruce camino;
- Tramo S3: zona que se encuentra entre edificios operativos,
- Tramo S4: cruce camino principal entre el área industrial de procesos y campamentos.
- Tramo S5: zona sin presencia de instalaciones hasta cajón receptor final.



Figura 14: Segmentación tubería 1600 mm

Considerando los tramos y la matriz desarrollada tanto en sus componentes de probabilidad y consecuencia, se llega a los resultados de la Tabla 8:

Segmento					Clasificación de riesgo
	PoF	Σ PoF	CoF	Σ CoF	
S1	2	38	3	53	Tolerable
S2	2	37	3	53	Tolerable
S3	2	36	3	48	Tolerable
S4	2	36	3	53	Tolerable
S5	2	39	3	53	Tolerable

Tabla 8: Resultados evaluación de riesgo

Adiestramiento y Capacitación de personal: realizada la evaluación de riesgos en todo el trazado de la tubería de 1600 mm, la pregunta a responder es si el personal que realiza las inspecciones en terreno cuenta o no con las competencias para la utilización de la técnica. Al revisar el estatus, se detecta que aun cuando el personal sabe realizar la actividad, cada uno de los inspectores tiene sesgos propios del actuar humano en la toma de medida, por lo que se define una actualización del procedimiento de toma de muestras general y la homologación de la técnica de medición.

Monitoreo y Condición: no todas las tecnologías de medición sirven para todos los equipos, algunas técnicas son mejores en un tipo de materialidad y es parte del análisis determinar cual es la mejor forma que puede dar cuenta de responder el objetivo en el plan de integridad definido, en este caso particular, medición de espesores.

Para el proceso de muestreo, se establece la medición en un conjunto de calicatas en todo el trazado identificando un total de 17, ver Figura 15, las cuales son distribuidos de forma prácticamente homogénea. En cuanto al programa de monitoreo, se establece una medición periódica que pueda dar cuenta del comportamiento de espesor de la tubería.

En cuanto a la selección de la metodología, esta responde a la naturaleza misma del fluido y de la tubería, el comportamiento del relave en el trazado es gravitacional, lo que sumado a las características del flujo con un porcentaje de sólido de alrededor de 60%, genera desde la teoría un desgaste mayor en la zona donde se encuentra apoyada la tubería, y menor en el top de esta. Producto de lo anterior la medición no solo tiene un foco en ver la ubicación de una sección en el trazado, sino que también en la misma sección se debe evaluar siguiendo el orden de las manecillas del reloj el desgaste diferencial que se produce en toda la circunferencia.



Figura 15: Identificación de Calicatas

Identificados todos los tramos, para efectos de análisis se considera un conjunto de ellos que son:

- Calicata 1: Punto de inicio de la tubería, es donde descargan los relaves del cajón al sistema.
- Calicata 5: Sector donde la tubería se ubica sobre zonas industriales con tránsito pedestre, en caso de falla impacta la operación de esas instalaciones.
- Calicata 10: Aun cuando no existe interacción con personal más allá de la línea de inspección, aguas abajo se encuentran zonas sensibles desde la componente flora y fauna.
- Calicata 15: Calicata de término, por la ubicación y en caso de falla afecta instalaciones del Depósito de Relave como son los canales de contorno.

Ordenada la información, y determinado los puntos de interés, se construyen 4 gráficos de tendencia de las calicatas (ver Anexo 1 para mediciones), detectando que la que se encuentra sometida a una mayor solicitud es la Calicata 1 que da comienzo a la tubería de relaves, y que las zonas de mayor desgaste son las ubicadas en la parte baja de la tubería (Gráficos 1 al 4).

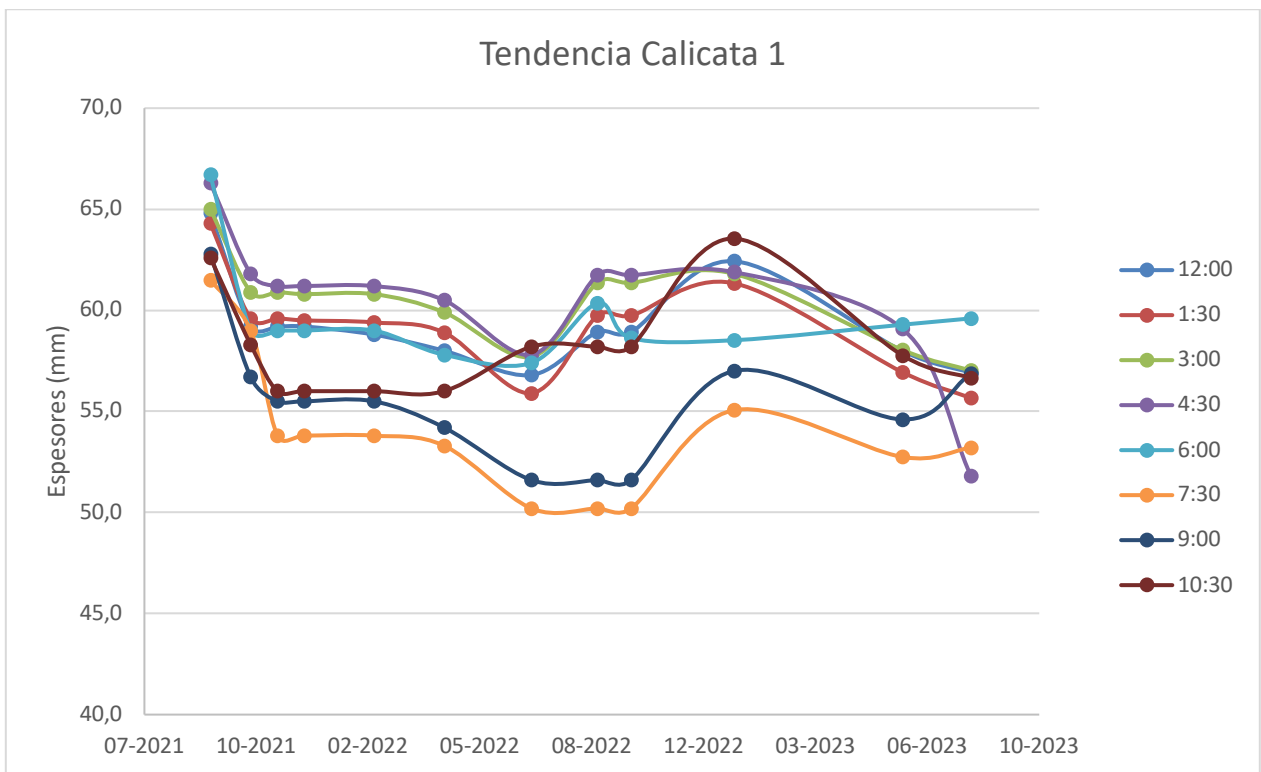


Gráfico 1: Tendencias Calicata 1

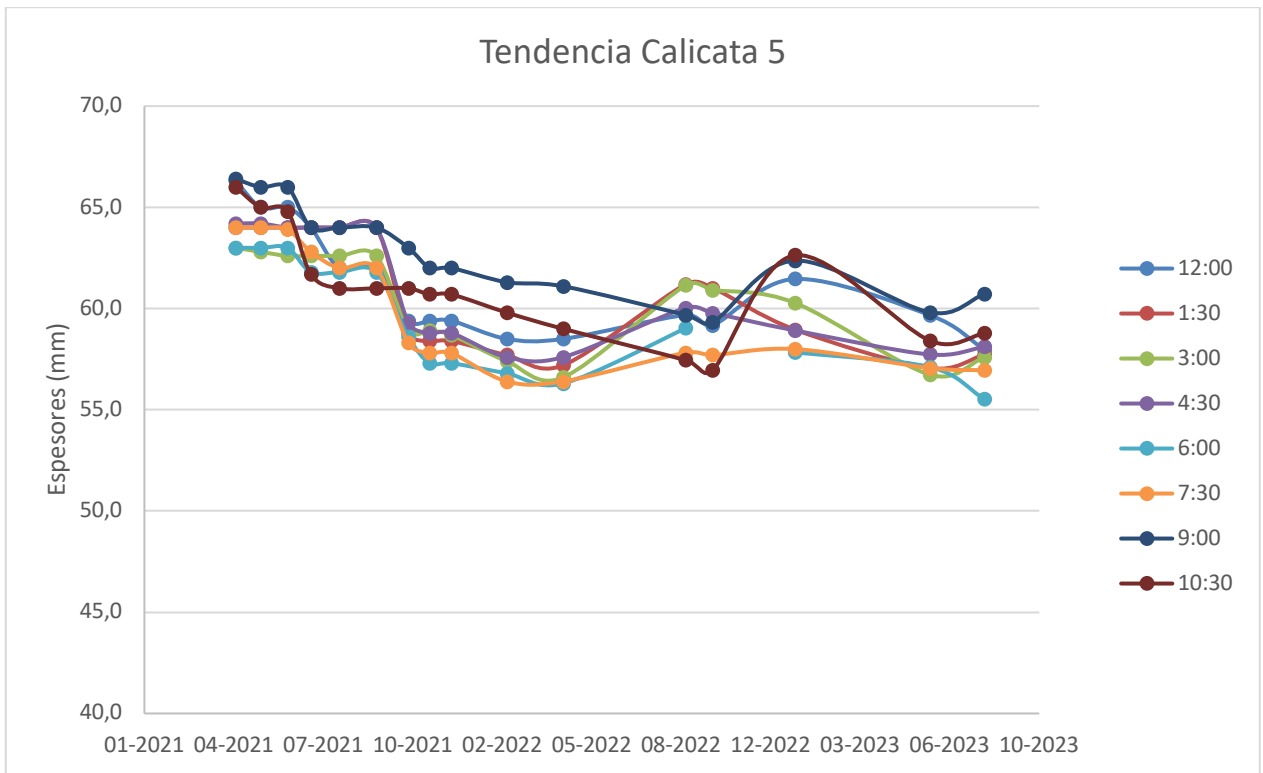


Gráfico 2: Tendencias Calicata 5

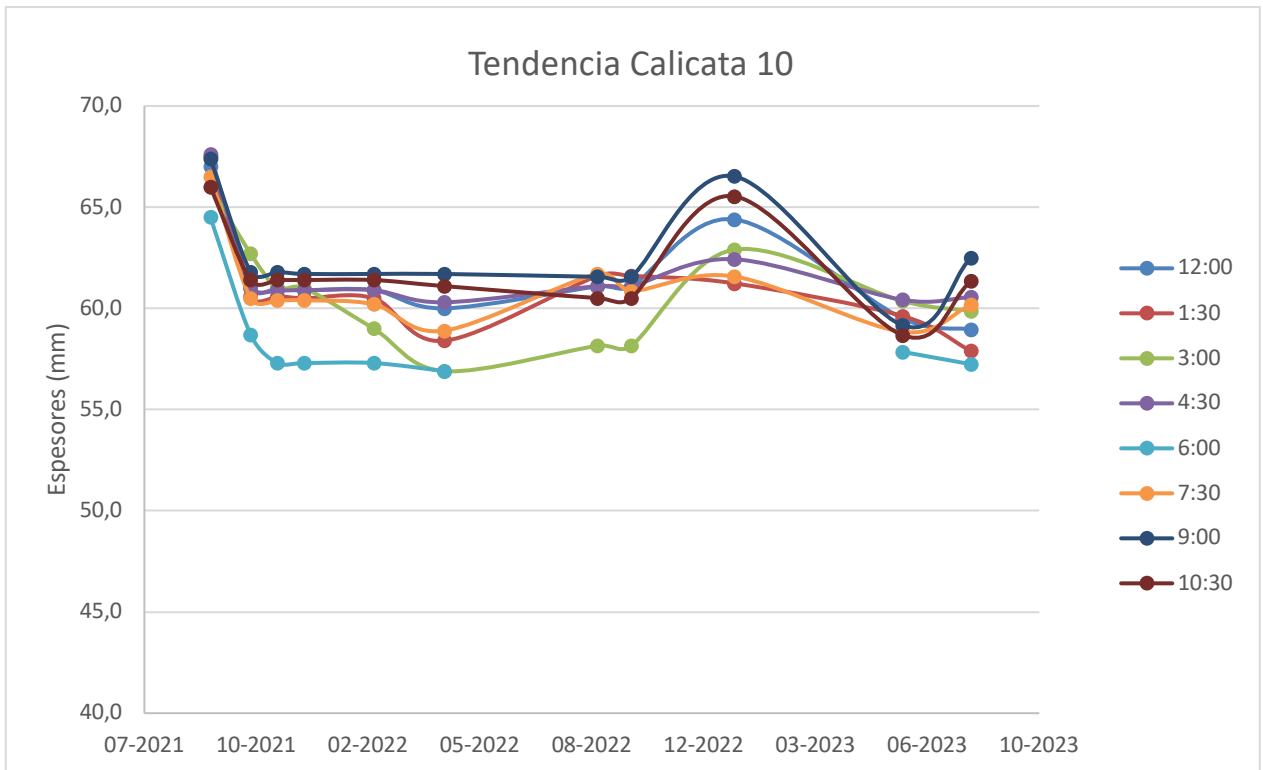


Gráfico 3: Tendencias Calicata 10

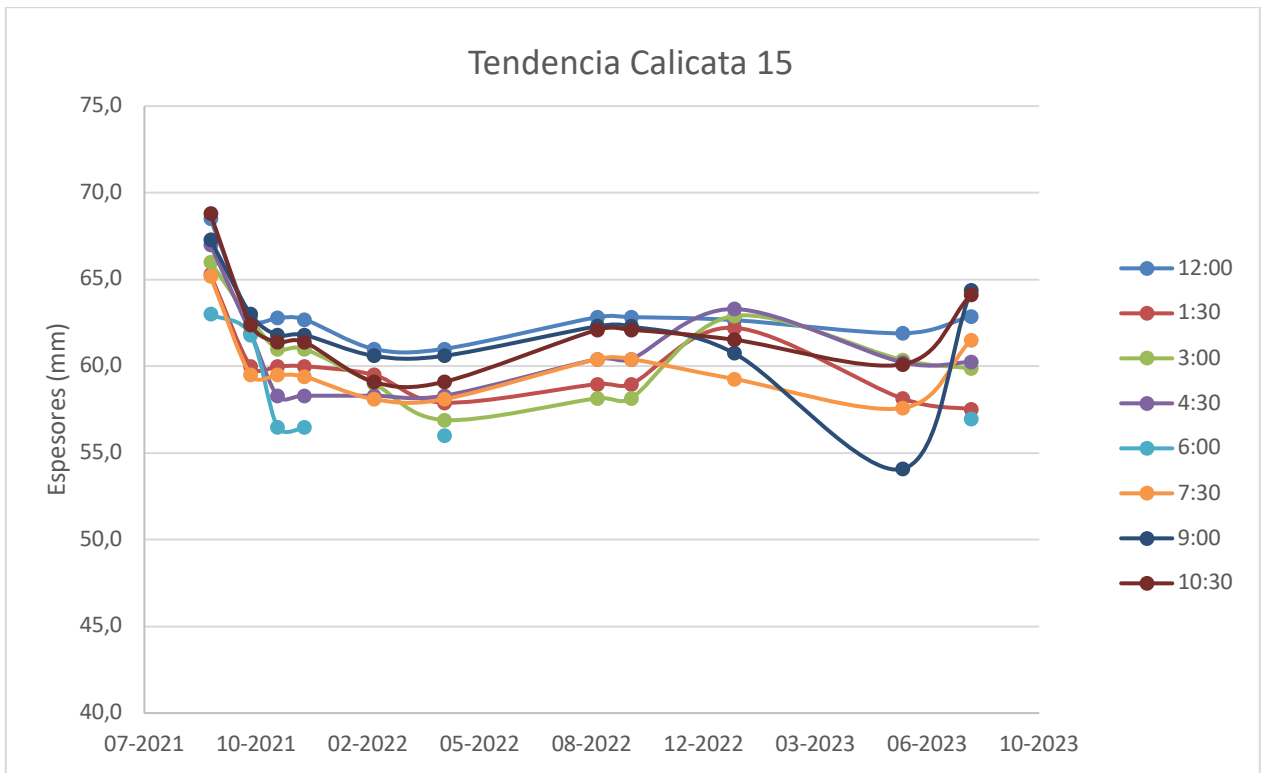


Gráfico 4: Tendencias Calicata 15

Evaluación de Integridad: determinadas las tendencias de las calicatas objetivos, se procede al análisis particular de cada una de las calicatas en su componente de mayor desgaste, llegando a lo presentado en el Gráfico 5:

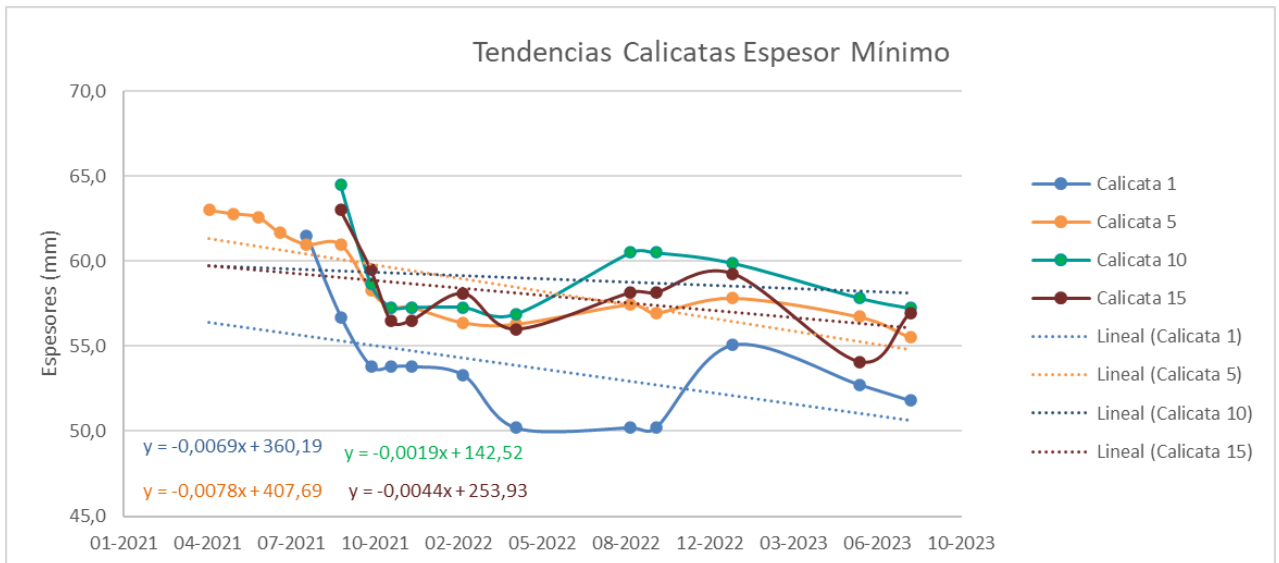


Gráfico 5: Tendencias Calicata Espesor Mínimo

Donde se concluye que la calicata que presenta un mayor desgaste es la calicata 1. Ahora bien, al revisar las tendencias de desgaste específicas de la Calicata 1, se observa un diferencial en el perímetro teniendo un desgaste mayor en la base que en el tope, lo que es esperable considerando el transporte del flujo gravitacional, mayor desgaste en las zonas donde siempre transcurre relaves.

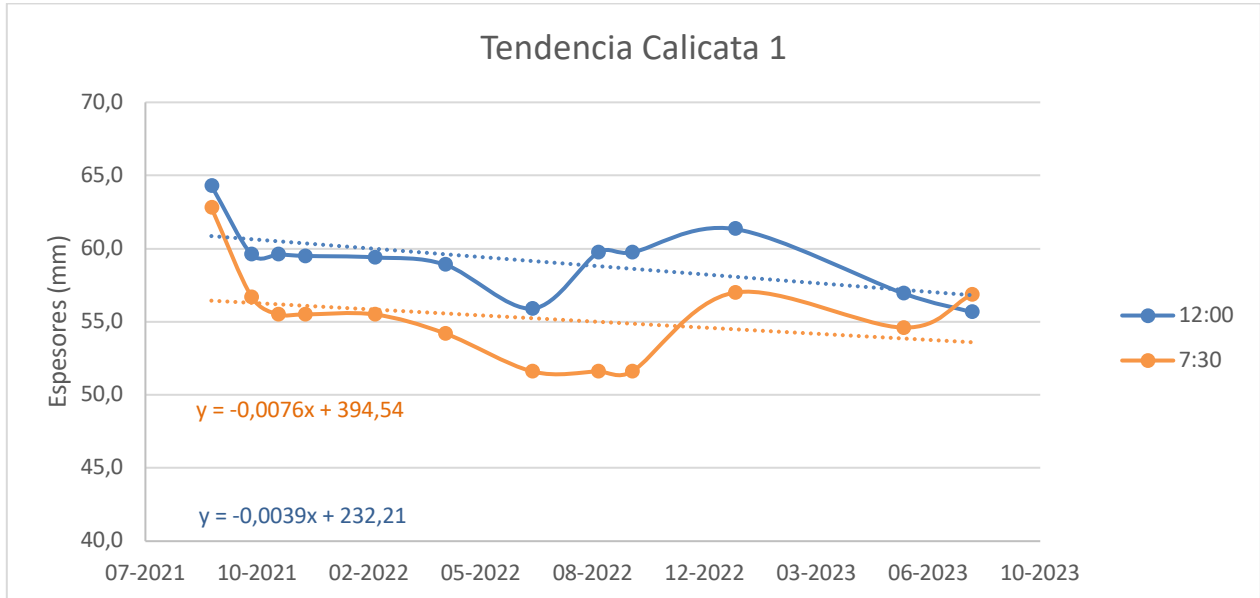


Gráfico 6: Tendencias Calicata 1 Máximo Mínimo

Finalmente, en base a lo levantado y analizado, y considerando el valor de 30 mm como espesor mínimo, se llega a que éste se alcanza con fecha de Enero 2031 considerando el valor a las 7:30.

- Control Operacional: determinado el valor máximo de duración de la tubería, se debe mantener el monitoreo sistemático cargado en pautas de inspección en programa definido, para asegurar el seguimiento del activo. Al analizar la tendencia crítica en el Gráfico 6, se observa un aumento en el espesor de la tubería, lo que no guarda relación con la realidad, la tubería siempre se tiene que ir desgastando, por lo que se debe mantener el monitoreo y el análisis de forma permanente.

4.4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El Modelo de Gestión de Integridad es un sistema que busca asegurar la continuidad de cualquier activo mediante la identificación temprana de las amenazas potenciales y tomar sobre estas antes que se gatille. El modelo subyacente se basa en la sistematización y coordinaciones de los procedimientos operacionales y de mantenimiento, junto con las estructuras de gobernanza y comunicación. Al identificar y definir las amenazas potenciales con su respectiva consecuencia, se puede determinar la probabilidad de ocurrencia de estas, lo que permitirá en base al establecimiento de prioridades y planes de acción tanto preventivos como correctivos, las acciones necesarias para asegurar la continuidad operacional del activo sin generar impactos no deseados tanto en el entorno como al negocio.

A modo de ejemplo, se desarrolló el análisis completo de la tubería de 1600, lo que permitió establecer el nivel de riesgo asociado en caso de una falla, y sistematizar a través del Modelo de Gestión de Integridad los distintos pasos a desarrollar para asegurar el cumplimiento del objetivo, el cual era en última instancia establecer tanto la fecha de cambio por desgaste como implementar un proceso de seguimiento.

En cuanto a las oportunidades específicas de la evaluación de la tubería, se identifican:

- Se debe realizar un análisis particular de cada una de las calicatas y puntos de medición asociados, el ejercicio se centró de forma específica en la calicata que en la actualidad presenta un mayor desgaste, pero existe la probabilidad no nula que otro punto de medición tenga un desgaste menor, tenga una tasa mayor de desgaste.
- Se debe evaluar, considerando que el desgaste no es homogéneo, estrategias de rotación que puedan resultar en postergar la fecha de cambio con respecto a la determinada.
- Se debe incorporar en el análisis factores que influyan en el efecto de desgaste, un cambio en la granulometría del relave o bien cambios de tratamiento en el plan minero.

De las ventajas en la implementación del proceso y los pasos propuestos, se tiene:

- Realizar la evaluación de la matriz probabilidad - consecuencia de todos los activos pertenecientes al Depósito, con ese resultado se pueden priorizar los activos identificando cuales son los que tienen un mayor riesgo inherente.
- Establece una metodología de inspección, se sistematiza el proceso y asegurar la obtención de resultados.
- Una correcta evaluación de integridad evita el sobre-mantenimiento, se tiene pleno conocimiento del comportamiento del activo y se procede al cambio de forma preventiva cuando se encuentra próximo al cumplimiento de la vida útil, la no implementación de una estructura como esta resulta en un aumento de costo ya que los activos se reemplazan anteriormente, o cuando existe una falla que gatilla de forma inmediata su cambio.

5 OPTIMIZACIÓN PROCESO DE DEPOSITACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

El Depósito de Relaves es un consumidor intensivo de Capex, para efectos de crecimiento, aumentar la capacidad de almacenamiento requiere el desarrollo constante de infraestructura, que van desde la construcción del muro así como también el reemplazo de instalaciones que por el crecimiento mismo en altura quedan inundadas.

Desde los planes de crecimiento de CMDIC, han surgido una serie de iniciativas para aumentar la capacidad de procesamiento de mineral, lo cual aumentará el requerimiento de almacenamiento en el Depósito de Relave en el escenario que estos planes se concreten.

Producto de lo anterior, se hace necesaria la revisión de tecnologías existentes en el mercado, siendo una de ellas el Apilamiento Hidráulico Deshidratado (HDS), el cual combina y distribuye la arena generada por la recuperación de partículas gruesas con los estériles de la mina, filtrando y deshidratando los estériles en el proceso, para producir una pila de estériles estable y bien consolidada con un bajo grado de saturación. El sobrenadante liberado y el agua de infiltración se recogen y gestionan por separado para su reutilización en el proceso minero (al capturar el agua en etapas iniciales y no ser depositadas en la cubeta de forma directa, potencialmente se podría reducir el volumen requerido).

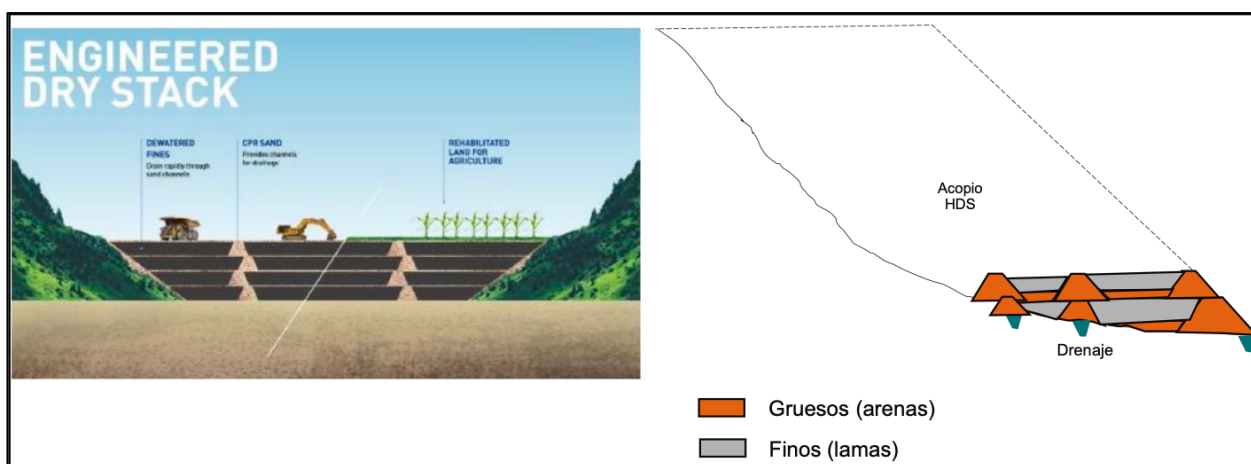


Figura 16: Proceso Constructivo HDS

El alcance del presente análisis es revisar a nivel de prefactibilidad los beneficios de aplicar esta tecnología en el Depósito de Relaves Pampa Pabellón, y evaluar si es atractivo un estudio posterior.

5.2 MÉTODO

El factor crítico de este método es la determinación del agua que queda retenida en los intersticios del relave posterior a su depositación, para lo que se considera dos formas de aproximarse al problema dependiendo de la granulometría que presenta el relave en cuestión.

Para los relaves finos, es aplicable el concepto de “humedad de saturación”, el cual corresponde al agua atrapada en los intersticios de relave cuando éste se encuentra en un estado “saturado”, es decir, cuando todos los espacios vacíos del relave se encuentran llenos de agua.

En el caso de los relaves gruesos, es aplicable el concepto de retención de la humedad que corresponde a un estado no saturado, es decir, que dada la permeabilidad del relave grueso, el agua que queda atrapada es menor al estado de saturación porque parte de esta agua es evacuada por la permeabilidad del relave, en consecuencia, el agua posible de captar es mayor que en el caso de los relaves finos e integral.

5.3 RESULTADOS

- Relaves finos: Humedad de Saturación

El modelo que se plantea en este caso es una simplificación, puesto que, si bien la humedad de saturación depende de la densidad del relave, la que a su vez depende de varios factores, entre ellos, la granulometría del relave, el porcentaje de finos, la presencia de arcillas, etc., en este caso se ha simplificado el modelo de modo de relacionar el índice de vacíos “e” (que está directamente relacionado con la densidad), y el P80 del relave (se define como P80 el tamaño de tamiz que dejar pasar el 80% de las partículas de producto de la muestra).

En cuando el modelo, este se ha construido con datos de relaves de diferentes faenas mineras, tanto en Chile como en Perú, y se presenta en el Gráfico 7.

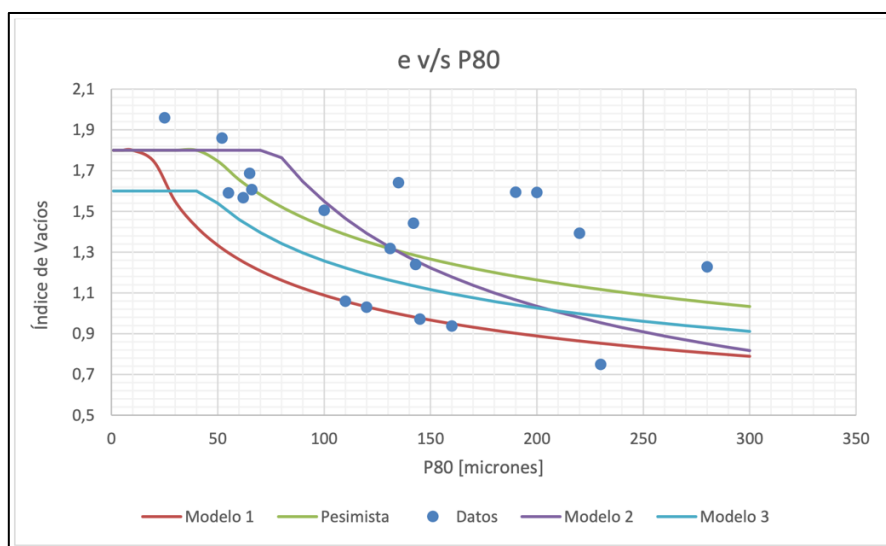


Gráfico 7: Modelos determinación índice de vacíos en función del P80 (Arcadis, 2020)

En la gráfica previa se establecen varios modelos, los cuales se explican a continuación:

- Modelo 1: corresponde a un caso optimista, es decir arroja un menor índice de vacíos, lo cual redunda en una mayor densidad y menor humedad de saturación, es decir, el agua retenida es menor. Esta curva considera que el relave está sedimentado e incluso con una leve consolidación incipiente.
- Modelo 2: este modelo es más representativo de acuerdo con los datos considerados, sin embargo, es demasiado pesimista para relaves finos con un P80 inferior a 150 micrones.
- Pesimista: este modelo corresponde a un caso pesimista, es decir, entrega mayores valores de índice de vacíos, lo que redunda en menor densidad y mayor humedad de saturación, lo que implica que la pérdida por retención de agua es mayor. Este modelo considera que el relave se mantiene en una fase de sedimentación.
- Modelo 3: este modelo corresponde al promedio entre el Modelo 1 (optimista), y el modelo pesimista, limitando a un máximo de 1,6 de índice de vacíos y corresponde a un escenario medio.

Para efectos del presente análisis, se considera como “valor esperado” el Modelo 3, el cual corresponde a un caso medio entre conservador/pesimista y un caso optimista.

- Relaves Gruesos: Retención de Humedad

Para los relaves gruesos, debido a la mayor permeabilidad que presentan al estar formados por partículas de mayor tamaño, es más representativo aplicar el concepto de humedad de retención, la cual es una humedad inferior a la humedad de saturación (ver Gráfico 8).

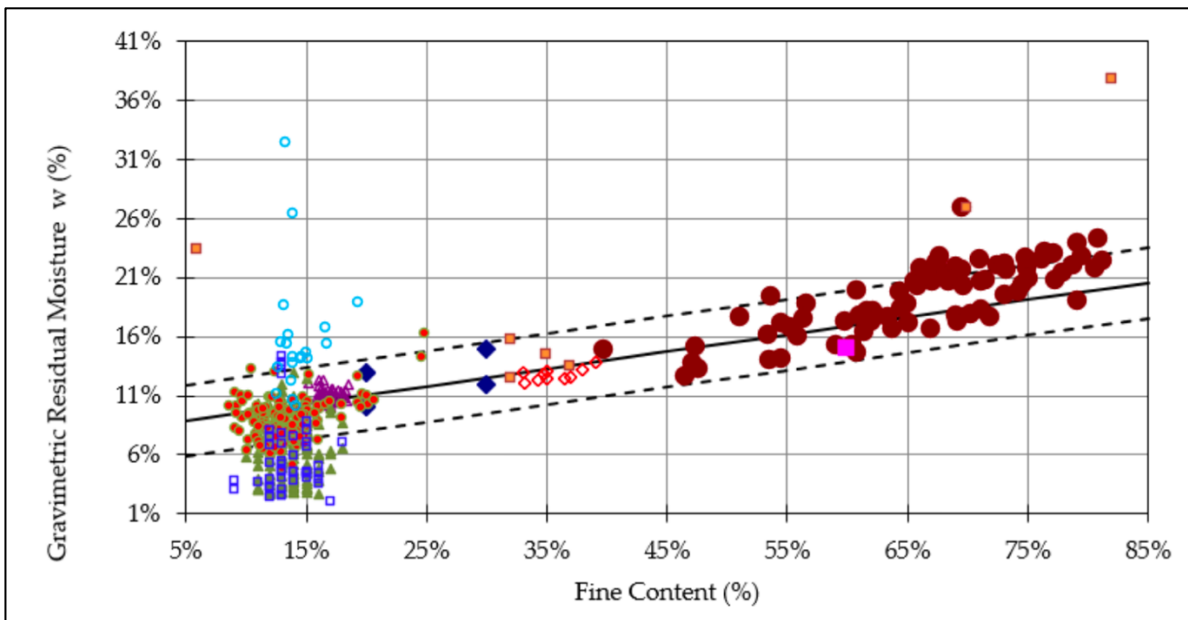


Gráfico 8: Humedad de retención en función del contenido de finos (Arcadis, 2020)

El Gráfico 8 corresponde a un gráfico de dispersión con datos de relaves de distintas fanes mineras, donde se relaciona la humedad de retención con el contenido de finos del relave.

En el caso del relave proyectado en el caso de CMDIC, y acotando la generación de relaves a la producida en un potencial crecimiento, se espera que los gruesos o arenas tengan un contenido de finos del orden de 20% a 22%, puesto que no es una arena para muro, por lo tanto, no es necesario limitar el porcentaje de finos a un menor valor, en consecuencia, de acuerdo a lo expuesto en el Gráfico 8, la humedad de retención estaría entre el 8% y el 14% aproximadamente.

Definidos los rangos entre humedad e índice de vacíos, a continuación se presenta el balance másico y balance de agua para cada alternativa propuesta.

La Tabla 9 entrega un resumen de los parámetros y humedad en cada caso para el desarrollo del balance de agua en cada caso.

Alternativa	Tipo de Relave	P80	Humedad	Índice de Vacíos			Humedad Saturación/Retención		
				Esperado	Optimista	Pesimista	Esperado	Optimista	Pesimista
Caso Base	Finos	244	Saturación	0,968	0,838	1,098	35,9%	31,0%	40,7%
Caso HDS	Arenas	449	Retención	N/A	N/A	N/A	15%	13%	17%
	Finos e HDS	127	Saturación	1,172	1,015	1,329	37,6%	36%	17%
	Finos Cubeta	127	Saturación	1,172	1,015	1,329	43,4%	37,6%	43,4%

Tabla 9: Resultados evaluación de riesgo

En conclusión, y de acuerdo a la información presentada y los flujos esperados en un posible crecimiento, se tiene tanto para el escenario base como para el escenario con HDS (Arcadis,2022):

- Caso Base

- Relave: 110.000 toneladas por día.
- Relave Total: 4772 toneladas por hora.
- % de sólido de relave sin espesar: 30%
- % de solido de relaves con espesamiento: 57%
- Pérdida unitaria relave: 0,472 m³/t

- HDS

- Relave Total: 4990 toneladas por hora por día.
- % de sólido de relave sin espesar: 27%
- % de solido de relaves con espesamiento: 57%
- Pérdida unitaria relave: 0,371 m³/t
- Pérdida unitaria HDS: 0,317 m³/t (humedad de retención de 15% en arenas y 37,5% de humedad de saturación de los finos en HDS).

Considerando los datos anteriores, se llega a un agua adicional recuperada con respecto al caso base de 141 l/s, lo que llevando a un valor anual permite concluir que el agua adicional recuperada de 4.446.576 m³/año.

Obtenido el valor de agua recuperada por año, y utilizando datos de terreno de la operación del Depósito de Relaves al 2023, en donde se estima una densidad de relaves de 1,5 ton/m³, se llega a 6.669.864 ton/añual de almacenamiento que no son utilizadas por efectos de recuperación de agua.

Determinado el valor anual de almacenamiento en el depósito, se tiene un incremental asumiendo un factor de 0,97 de relaves versus el total de tratamiento, de 18.273 ton/d adicionales de tratamiento suponiendo el mismo volumen final de almacenamiento.

5.4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El agua es un componente fundamental de los relaves, dado que por definición este oscila entre un 50% y 70% en peso en relaves de la minería del cobre, explorar tecnologías que permitan la recuperación previo ingreso a la cubeta de almacenamiento supone de forma directa en un aumento en el volumen disponible de recepción considerando el mismo volumen final de diseño.

En el presente capítulo se profundiza en el desarrollo preliminar realizado por Arcadis para una depositación en apilamiento, donde se concluye una potencial tasa de almacenamiento adicional de 18.273 ton/d en caso que se procese la totalidad del relave adicional de un escenario de expansión.

Los valores preliminares son auspiciosos, sin embargo como siguiente paso se debe realizar una evaluación técnica - económica de la solución, la aplicación de esta metodología supone un tratamiento previo, el cual al igual que la infraestructura inicial es intensivo en movimiento de tierra y equipamiento, por lo que a través de una evaluación conjunta se puede determinar si es una solución factible o bien es más atractivo el seguir con el peraltamiento tradicional del Depósito de Relaves.

Como complemento a la discusión anterior, y utilizando el valor actualizado de área de 16.000.000 m², el cual corresponde al área promedio durante el año 2023, el volumen de agua recuperado supone una reducción en el plan de crecimiento de 0,28 mts por año, por lo que suponiendo una vida útil de 50 años, se llega a una reducción en altura de 14 mts de peraltamiento total. La reducción anterior entendiendo las dimensiones del depósito no es menor, sin embargo se debe cruzar con los impactos de la instalación de extracción de agua.

Técnicas como el HDS suponen un avance en la recuperación de agua y disminución de volumen requerido, disminuyendo la cantidad final de relaves dispuestos, sin embargo son tecnologías en desarrollo que deben seguir siendo estudiadas, toda iniciativa que reduzca la cantidad de relaves depositados debe ser evaluada y de esta forma, reducir el potencial impacto frente a una falla.

6 CASO DE NEGOCIO RECUPERACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

La economía circular es un concepto que se ha incorporado paulatinamente a la actividad minera, el cual consiste en incorporar al modelo de gestión la búsqueda de maximizar el uso eficiente de los recursos, minimizando al máximo los desechos y valorizando pasivos para evaluar su tratamiento y transformándolos en activos.

Como se ha presentado anteriormente, los relaves por su naturaleza son los “desechos” que más se producen en la industria minera, se encuentran estrictamente ligados al tratamiento según las pautas convencionales y su acumulación es directamente proporcional al tratamiento, por lo que son sujetos de interés en el marco de la economía circular.

La extracción de minerales a partir de los relaves no solo implica potenciales beneficios económicos al aprovechar recursos que de otro modo serían considerados desechos, sino que también impulsa la responsabilidad ambiental. Convertir los desechos mineros en valiosas fuentes de materias primas disminuye la necesidad de realizar extracciones adicionales de minerales, reduciendo de esta manera la huella ambiental asociada con la actividad minera. Este enfoque integrador de extraer minerales de relaves ya depositados, refleja la transformación en curso de la industria minera hacia prácticas más sostenibles, subrayando la importancia de la innovación en la gestión de los recursos mineras.

Al evaluar el caso negocio de CMDIC, se identifica que la recuperación de minerales no se encuentra evaluada, por lo que en consideración de la vida útil el yacimientos y la posibilidad no nula que se desarrollen tecnologías de recuperación de gran escala, se propone la formulación de un modelo de gestión que permita evaluar de forma sistemática su recuperación año a año.

6.2 MÉTODO

El desarrollo de una metodología eficiente para la gestión y recuperación potencial de minerales desde relaves ya depositados implica una planificación a largo plazo de distintas componentes técnico ambientales. Producto de lo anterior, a continuación se propone una metodología sistemática para evaluar la factibilidad de esta actividad en la vida útil de CMDIC.

- Definición de dueño de proceso: en línea a lo estipulado en el CGR de CMDIC, se debe establecer cuál es el área responsable de coordinar y evaluar sistemáticamente la recuperación de relaves en el caso base de tratamiento.
- Caracterización de relaves: se debe realizar un análisis detallado de los relaves para identificar su composición mineralógica, la presencia de minerales de interés para su posterior extracción y propiedades varias.
- Seguimiento plan de depositación: en el marco de la vida útil de CMDIC, se requiere conocer la ubicación y temporalidad de los relaves dispuestos en la cubeta.

- Diseño de recuperación: se debe desarrollar un marco de revisión y evaluación técnico-económico de la recuperación de minerales desde los relaves, evaluando las mejores prácticas y buscando ejemplos en otras faenas mineras que lo hayan implementado.
- Evaluación caso de negocio: considerando la caracterización de los relaves, el seguimiento del plan de depositación y el diseño de la recuperación, se debe generar los respectivos casos de negocios para la evaluación técnica económica del negocio.

6.3 RESULTADOS

En consideración de la metodología presentada, se propone la siguiente distribución de actividades, dueños de proceso y actividades:

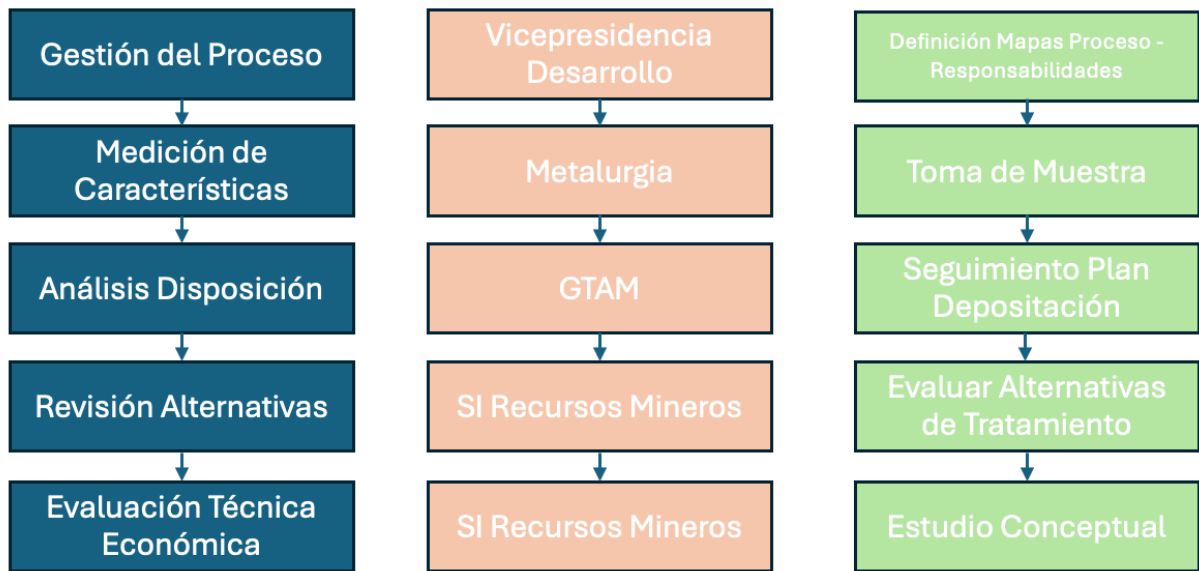


Figura 17: Distribución Actividades – Área - Medida

En donde se tiene:

- Gestión del Proceso: a cargo de la Vicepresidencia de Desarrollo, tiene un rol de articulador de todo el proceso, empujando la incorporación del análisis en cada uno de los mapas de proceso y generando un mapa de proceso integral de revisión del caso de negocio.
- Medición de Características: el área de Metalurgia CMDIC se define como la encargada de medir las concentraciones de cobre y minerales relevantes, por definir, en los relaves dispuestos en la cubeta. La periodicidad de muestra se establece como mínimo 1 semana.
- Análisis Disposición: la GTAM por medio de contratos especializados, es la encargada de identificar la zona de disposición de los relaves tanto espacial como temporalmente. La información es procesada y almacenada en los centros documentales definidos de forma sistemática incorporando las variables metalúrgicas del proceso.

- Revisión de Alternativas: las tecnologías de recuperación se encuentran en desarrollo día a día, es responsabilidad del área de Recursos Mineros identificar operaciones y evaluar su aplicabilidad en CMDIC.
- Evaluación Técnica Económica: en función de los resultados de las alternativas, se calculan los costos de capital y operacional (Capex y Opex respectivamente), para la determinación del VAN de la iniciativa.

6.4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el contexto de la economía circular, la recuperación de minerales desde relaves emerge como una oportunidad estratégica para los proyectos mineros. La recuperación de minerales busca maximizar la eficiencia en el uso de recursos, transformando pasivos en activos y promoviendo la sostenibilidad ambiental en toda la cadena de valor.

El análisis del caso de negocio de CMDIC revela que la recuperación de minerales desde relaves no ha sido debidamente evaluando. Considerando la vida útil del yacimiento y el potencial desarrollo de tecnologías de recuperación a gran escala, se propone la formulación de un modelo de gestión que permita evaluar sistemáticamente la recuperación en cada ejercicio de evaluación de caso de negocio proyectado en la vida útil.

La metodología propuesta se estructura en distintas fases, comenzando con la definición del dueño de proceso en el marco del CGR y la caracterización detallada de los relaves. Se destaca entre los puntos de importancia el seguimiento del plan de depositación en la cubeta, la revisión y diseño de alternativas de recuperación tanto de iniciativas internas como externas, y la evaluación técnico – ambiental del caso de negocio.

Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología sugieren una distribución esperable de responsabilidades y actividades entre diferentes áreas de la empresa, lo que da cuenta que toda iniciativa es un esfuerzo conjunto y ningún área se desarrolla de forma aislada dentro de la estructura de CMDIC.

La evaluación técnico – económica se posiciona como un paso crucial en el desarrollo, donde se calcularán de forma conceptual los Capex y Opex para determinar el VAN de la iniciativa. Este enfoque metodológico refleja la forma de operar de CMDIC, en donde por medio de una visión a largo plazo establece un mecanismo de evaluación sistemático para una iniciativa de recuperación en línea a las temáticas de economía circular que desarrolla la industria minera.

En conclusión, la implementación de esta metodología propuesta no solo puede generar beneficios económicos importantes para CMDIC según lo planteado en su caso de negocio hasta el término de la vida útil, sino que también posiciona y profundiza la imagen corporativa como una organización de vanguardia en las prácticas mineras sostenibles dando un valor económico a los relaves, lo que potencialmente podría cambiar su imagen como desechos dándole una importancia mayor a la que ya tienen en la actualidad.

7 CONCLUSIÓN

La gestión de los relaves es esencial para el desarrollo minero por múltiples razones que abarcan aspectos económicos, ambientales y sociales, ya no son los desechos que son acumulados en el patio trasero de las faenas mineras.

En el transcurso del presente trabajo se ha evaluado, de forma integral, distintas mejoras e iniciativas a implementar en CDMIC, las cuales son:

- **Modelo de Gestión:** los modelos de gestión son herramientas estructurales y sistemáticas que proporcionan un marco para planificar, organizar, dirigir y controlar actividades con el objetivo de alcanzar metas y objetivos específicos. El Modelo de Gestión de Relaves asegura el cumplimiento de lo anterior, por medio de la utilización del CGR se propone un sistema dinámico en el marco del ciclo de mejora continua, en el que por medio de una serie de definiciones se establece un modelo de gestión que permite administrar los relaves en todo su magnitud.

Desde una evaluación del modelo de gestión, es clave la definición de los procesos y los responsables, el éxito de la implementación del modelo se basa en la simpleza de éste y el alineamiento de los procesos, el desconocer las responsabilidades y no realizar lo estipulado supondrá en el fracaso del modelo de gestión poniendo en riesgos el proceso de disposición de relaves en toda su magnitud.

- **Modelo de Integridad:** el atributo de integridad es el parámetro que permite analizar los riesgos de cualquier instalación, y el Depósito de Relaves con sus obras anexas no es la excepción. Como todo modelo de gestión, es una herramienta estructural, en donde la gobernanza del modelo es clave para su implementación.

Considerando el ejemplo realizado, se constata la potencia del modelo, en donde de forma jerárquica se evalúa su aplicación concluyendo tanto en una evaluación de riesgo como en una pauta de control operacional establecido que permite predecir el comportamiento.

- **Análisis de Nuevas Tecnologías de Depositación:** los relaves en el proceso de maduración del ciclo minero han ido tomando cada vez mayor relevancia, producto de lo anterior han surgido propuesta de nuevas tecnologías de depositación a las convencionales como son el HDS.

Todas las tecnologías deben ser revisadas en el marco de la gobernanza imperante, los resultados obtenidos deben seguir siendo profundizados incorporando nuevas variables, sin embargo los resultados preliminares obtenidos a la fecha dan cuenta de una potencial recuperación, lo que permitiría contar con un mayor volumen de almacenamiento, sin embargo queda pendiente la evaluación de costos para analizar su aplicación.

- **Tecnologías de Recuperación:** en línea a la temporalidad de la vida útil de los proyectos, se espera la aparición y desarrollo de minería de los relaves, es parte del proceso organizativo

contar con la información actualizada y evaluar la factibilidad económica de la recuperación de los mineral, por lo tanto para no perder la oportunidad, se establece un marco de responsabilidad y gestión para la evaluación continua de estos componentes.

En conclusión, y según lo desarrollado, se puede aseverar que los relaves han tomado una importancia superlativa dentro de las organizaciones, más aún en la gran minería donde su generación es mayor. Como ejemplo a estos desafíos se presenta CMDIC, en donde se proponen una serie de acciones en distintas temporalidades para hacer frente a este gran desafío, asegurando en primera instancia un marco de gobernanza, para luego continuar con la elaboración de un plan de integridad para terminar en la revisión de un modelo distinto de operación y una estrategia de negocio a largo plazo, los cuales son replicables a toda la industria dado que la falla de un depósito no es solamente un impacto a la empresa dueña, sino a todo el negocio, la única forma de elevar el estándar y asegurar y aprender cada día más, es producto de la colaboración entre todos los actores relevantes a este negocio.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Arcadis (2022). *Estudio Conceptual Depositación de Relaves mediante Hydraulic Dry Stacking*.
- Ausenco (2022). *Implementación Sistema de Gestión de Integridad de Transporte de Fluidos e Integridad de Depósito de Relaves*.
- ICMM (2020, agosto 5). Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera. https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
- Sernageomin (2007, abril 11). Decreto Supremo N°248 Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2023/07/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf

9 ANEXO

Anexo A – Medición de Espesores

FECHA INSPECCION	Menor espesor medido (mm)	MEDICIÓN DE ESPESOR DE RELAVEDUCTO 1600" (mm)							
		12:00	1:30	3:00	4:30	6:00	7:30	9:00	10:30
01-08-2023	51,8	56,9	55,7	57,0	51,8	59,6	53,2	56,9	56,7
01-06-2023	52,7	58,0	56,9	58,0	59,1	59,3	52,7	54,6	57,8
01-01-2023	55,1	62,4	61,3	61,8	61,9	58,5	55,1	57,0	63,6
01-10-2022	50,2	58,9	59,7	61,4	61,7	58,6	50,2	51,6	58,2
01-09-2022	50,2	58,9	59,7	61,4	61,7	60,4	50,2	51,6	58,2
04-07-2022	50,2	56,8	55,9	57,7	57,8	57,4	50,2	51,6	58,2
17-04-2022	53,3	58,0	58,9	59,9	60,5	57,8	53,3	54,2	56,0
13-02-2022	53,8	58,8	59,4	60,8	61,2	59,0	53,8	55,5	56,0
13-12-2021	53,8	59,2	59,5	60,8	61,2	59,0	53,8	55,5	56,0
19-11-2021	53,8	59,2	59,6	60,9	61,2	59,0	53,8	55,5	56,0
26-10-2021	56,7	59,2	59,6	60,9	61,8	59,0	59,0	56,7	58,3
20-09-2021	61,5	64,8	64,3	65,0	66,3	66,7	61,5	62,8	62,6

Tabla 10: Mediciones Calicata 1

FECHA INSPECCION	Menor espesor medido (mm)	MEDICIÓN DE ESPESOR DE RELAVEDUCTO 1600" (mm)							
		12:00	1:30	3:00	4:30	6:00	7:30	9:00	10:30
01-08-2023	55,5	58,0	57,7	57,6	58,1	55,5	57,0	60,7	58,8
01-06-2023	56,7	59,7	57,1	56,7	57,7	57,1	57,1	59,8	58,4
01-01-2023	57,8	61,5	59,0	60,3	58,9	57,8	58,0	62,4	62,6
01-10-2022	57,0	59,2	61,0	60,9	59,8		57,7	59,3	57,0
01-09-2022	57,5	59,7	61,2	61,2	60,0	59,0	57,8	59,7	57,5
17-04-2022	56,3	58,5	57,2	56,6	57,6	56,3	56,4	61,1	59,0
13-02-2022	56,4	58,5	57,7	57,4	57,6	56,8	56,4	61,3	59,8
13-12-2021	57,3	59,4	58,4	58,7	58,8	57,3	57,8	62,0	60,7
19-11-2021	57,3	59,4	58,4	58,9	58,8	57,3	57,8	62,0	60,7
26-10-2021	58,3	59,4	58,8	58,9	59,3	58,6	58,3	63,0	61,0
20-09-2021	61,0	62,0	64,0	62,6	64,0	61,8	62,0	64,0	61,0
10-08-2021	61,0	62,0	64,0	62,6	64,0	61,8	62,0	64,0	61,0
09-07-2021	61,7	64,0	64,0	62,6	64,0	61,8	62,8	64,0	61,7
13-06-2021	62,6	65,0	64,0	62,6	64,0	63,0	63,9	66,0	64,8
14-05-2021	62,8	65,0	64,0	62,8	64,2	63,0	64,0	66,0	65,0
16-04-2021	63,0	66,3	64,0	63,0	64,2	63,0	64,0	66,4	66,0

Tabla 11: Mediciones Calicata 5

FECHA INSPECCION	Menor espesor medido (mm)	12:00	1:30	3:00	4:30	6:00	7:30	9:00	10:30
01-08-2023	57,2	59,0	57,9	58,2	60,6	57,2	60,2	62,5	61,3
01-06-2023	57,9	59,5	59,6	60,3	60,4	57,9	58,8	59,2	58,7
01-01-2023	59,9	64,4	61,2	59,9	62,4		61,6	66,5	65,5
01-10-2022	60,5	61,1	61,6	60,6	61,1		60,9	61,6	60,5
01-09-2022	60,5	61,1	61,6	60,6	61,1		61,7	61,6	60,5
17-04-2022	56,9	60,0	58,4	57,4	60,3	56,9	58,9	61,7	61,1
13-02-2022	57,3	60,9	60,5	59,7	60,9	57,3	60,2	61,7	61,4
13-12-2021	57,3	60,9	60,5	59,7	60,9	57,3	60,4	61,7	61,4
19-11-2021	57,3	61,0	60,6	59,8	60,9	57,3	60,4	61,8	61,4
26-10-2021	58,7	61,0	60,6	59,8	61,1	58,7	60,5	61,8	61,4
20-09-2021	64,5	67,0	67,5	67,5	67,6	64,5	66,5	67,4	66,0

Tabla 12: Mediciones Calicata 10

FECHA INSPECCION	Menor espesor medido (mm)	MEDICIÓN DE ESPESOR DE RELAVEDUCTO 1600" (mm)							
		12:00	1:30	3:00	4:30	6:00	7:30	9:00	10:30
01-08-2023	57,0	62,9	57,5	59,9	60,2	57,0	61,5	64,4	64,1
01-06-2023	54,1	61,9	58,1	60,4	60,2		57,6	54,1	60,1
01-01-2023	59,3	62,7	62,2	62,9	63,3		59,3	60,8	61,5
01-10-2022	58,2	62,8	59,0	58,2	60,4		60,4	62,3	62,1
01-09-2022	58,2	62,8	59,0	58,2	60,4		60,4	62,3	62,1
17-04-2022	56,0	61,0	57,9	56,9	58,3	56,0	58,1	60,6	59,1
13-02-2022	58,1	61,0	59,5	59,0	58,3		58,1	60,6	59,1
13-12-2021	56,5	62,7	60,0	61,0	58,3	56,5	59,4	61,8	61,4
19-11-2021	56,5	62,8	60,0	61,0	58,3	56,5	59,5	61,8	61,4
26-10-2021	59,5	62,8	60,0	62,7	61,9	61,8	59,5	63,0	62,4
20-09-2021	63,0	68,5	65,3	66,0	67,0	63,0	65,2	67,3	68,8

Tabla 13: Mediciones Calicata 15