



ESCUELA DE NEGOCIOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA COMERCIAL

UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
Escuela de Negocios Departamento de Ingeniería Comercial MBA, Magíster en
Gestión Empresarial

“Estrategia de Reutilización de Escombros Mineros: Un Enfoque para la
Sostenibilidad y la Rentabilidad Empresarial”

Tesis de grado presentada por
Carmen Gloria Valenzano Reyes

Como requisito para optar al grado de
MBA. Magíster en Gestión Empresarial
Director de Tesis: Dr. Fernando Yanine Misleh

TÍTULO DE TESINA:

**“Estrategia de Reutilización de Escombros Mineros:
Un Enfoque para la Sostenibilidad y la Rentabilidad
Empresarial”**

AUTOR:

CARMEN GLORIA VALENZANO REYES

TRABAJO DE TESINA, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de MBA, Magíster en Gestión Empresarial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

OBSERVACIONES:

COMISIÓN DE TESINA: Fernando Yanine M.

Valparaíso marzo 2025

Nombre: Carmen Gloria Valenzano Reyes

Firma:.....

Fecha:.....

I. Agradecimientos

A mi Familia

A mi esposo Alejandro compañero de vida y mi hija Josefina

¡Gracias a ustedes!

II. Dedicatoria

A **Alejandro**, mi esposo, mi compañero de vida y de MBA. Gracias por ser mi refugio, mi fuerza y mi mayor apoyo en cada paso de este camino. Compartir este desafío contigo ha sido un regalo invaluable, y saber que siempre estás a mi lado, impulsándome a crecer y a seguir adelante, me llena de gratitud y felicidad.

A **Josefina**, mi hija amada, mi mayor inspiración y mi motor. En cada desafío, tu amor y tu luz me han recordado que vale la pena luchar por los sueños. Que este logro sea para ti un ejemplo de que con determinación, esfuerzo y convicción, todo es posible. A mi madre, que desde el cielo me guía e ilumina día a día. Aunque físicamente no esté aquí, su amor sigue presente en mi corazón y en cada decisión que tomo.

A **Dios y al universo**, por poner en mi camino cada aprendizaje, cada desafío y cada oportunidad de crecimiento. Por enseñarme que incluso en los momentos más difíciles hay una razón y que cada paso, aunque incierto, nos lleva hacia donde realmente debemos estar.

A mis **padres**, quienes con su amor y valores me enseñaron a nunca rendirme, a levantarme con dignidad y a construir mi propio camino con esfuerzo y convicción. A los momentos difíciles que se convirtieron en lecciones y a las experiencias que me enseñaron el verdadero valor de la resiliencia. Esta tesis fue más que un ejercicio académico; fue mi refugio y mi herramienta para transformar el dolor en aprendizaje, para demostrarme a mí misma que la determinación y el trabajo constante nos llevan siempre a nuevos comienzos.

A mis **profesores**, compañeros y todas las personas que han formado parte de este proceso. Su apoyo, sus enseñanzas y su confianza en mí fueron fundamentales en este camino.

Hoy cierro una etapa con la certeza de que todo lo vivido me ha hecho más fuerte, más sabia y más libre. Renazco con la confianza de que lo mejor está por venir. Con gratitud y determinación.

Carmen Gloria Valenzano Reyes

III. Extracto

Esta tesis propone evaluar la factibilidad técnico-económica y ambiental de reutilizar los escombros acumulados en el Centro de Manejo de Residuos Industriales (CMRIS) de Minera El Teniente como material de relleno para caminos interiores. El proyecto busca ofrecer una alternativa sostenible en la gestión de residuos mineros mediante la aplicación de principios de economía circular, promoviendo la reducción, reutilización y valorización de materiales, en línea con los compromisos asumidos por Chile y las tendencias internacionales en la industria.

En el contexto de la economía circular, Chile ha desarrollado políticas y estrategias para fomentar prácticas de reciclaje y aprovechamiento de residuos, con especial énfasis en sectores industriales como la minería, que genera grandes volúmenes de desechos. La implementación de modelos de economía circular en el sector minero permite no solo reducir la demanda de materiales vírgenes, sino también minimizar el impacto ambiental y optimizar los costos operativos. En el ámbito global, países como la Unión Europea, Canadá y Australia han promovido iniciativas y normativas orientadas a la reutilización de residuos mineros, ofreciendo marcos que esta tesis tomará como referencia para establecer comparaciones y sugerir mejores prácticas adaptadas a la realidad chilena.

Mediante un análisis de costo-beneficio y un estudio de impacto ambiental, esta investigación pretende cuantificar los beneficios económicos y ambientales derivados del uso de escombros en caminos mineros, frente al uso de materiales convencionales. Los resultados servirán como base para evaluar la potencial contribución de la economía circular al sector minero en Chile y brindar recomendaciones para una gestión de residuos más sostenible en la industria, posicionando a Minera El Teniente como un caso de estudio pionero en el país.

IV. Abstract

This thesis proposes to evaluate the technical, economic, and environmental feasibility of reusing the accumulated waste at Minera El Teniente's Industrial Waste Management Center (CMRIS) as fill material for internal roads. The project seeks to offer a sustainable alternative in mining waste management by applying circular economy principles that promote the reduction, reuse, and valorization of materials, aligning with both Chile's commitments and international trends in the industry.

In the context of the circular economy, Chile has developed policies and strategies to encourage recycling practices and waste valorization, particularly in industrial sectors such as mining, which generates significant volumes of waste. Implementing circular economy models in the mining sector not only reduces the demand for virgin materials but also minimizes environmental impact and optimizes operational costs. Globally, countries like the European Union, Canada, and Australia have promoted initiatives and regulations aimed at reusing mining waste, providing frameworks that this thesis will reference to establish comparisons and suggest best practices adapted to the Chilean reality.

Through a cost-benefit analysis and an environmental impact study, this research intends to quantify the economic and environmental benefits derived from the use of waste materials for mining roads compared to conventional materials. The results will serve as a foundation to assess the potential contribution of the circular economy to the mining sector in Chile and provide recommendations for more sustainable waste management practices in the industry, positioning Minera El Teniente as a pioneering case study in the country.

V. Índice de contenidos

Portada	1
I. Agradecimientos	4
II. Dedicatoria	5
III. Extracto	6
IV. Abstract	7
V. Índice de contenidos	8
VI. Índice de Tablas	11
VII. Índice de Figuras	11
1. Introducción	13
1.1. Motivación	14
1.2. Antecedentes de La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco).	16
1.2.1 Visión de CODELCO	18
1.2.2 Propósito	18
1.2.3 Negocio	18
1.2.4 Mercado	19
1.2.5 Aporte a Región	20
1.2.6 Empleos	20
1.2.7 Estrategia de desarrollo sustentable	21
1.2.7.1 Menor Huella de Carbono	22
1.2.7.2 Menor Huella Hídrica	22
1.2.7.3 Economía Circular	22
1.2.7.4 Nuevo Estándar en Depósitos de Relaves	23
1.2.7.5 Desarrollo Territorial con Valor Social	23
1.2.7.6 Disminución de Material Particulado	23
1.2.8 Economía Circular	23
1.2.9 Resultados 2023	24
1.3 Antecedentes de CODELCO CHILE DIVISIÓN EL TENIENTE	24
2. Objetivos	26
Objetivo General	26
Objetivos Específicos	27
3 Marco teórico	28
3.1 Economía Circular	28
3.2 Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)	28
3.3 Gestión de Residuos Mineros	29
3.4 Experiencias Internacionales en la Reutilización de Residuos Mineros	29
3.5 Impacto Ambiental y Reducción de Emisiones de CO ₂	29
3.6 Viabilidad Técnica y Económica de los Áridos Reciclados	30
3.7 Sostenibilidad en la Minería	30
3.8 Áridos Reciclados en la Construcción	31

3.9 Normas Chilenas y estándares.	31
3.9.1. NCh 3849	32
3.9.2. NCh 3851	32
3.9.3. NCh163.Of79	33
3.9.4 Análisis Comparativo de las normas chilenas.	33
4. MÉTODO	34
4.1 Enfoque y diseño de la investigación.	34
4.2 Población y muestra.	35
4.3. Variables y dimensiones del estudio.	35
4.3.1. Variable Dependiente	35
4.3.2. Variables Independientes	36
4.3.3. Variables de Control	36
4.3.4. Dimensiones del Estudio	37
4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	37
4.4.1 Estudio de Caso.	38
4.4.2 Análisis Costo-Beneficio	38
4.4.3 Entrevistas y Encuestas a Expertos y Directivos	39
4.4.4. Benchmarking	39
4.4.4.1 Revisión de casos de hormigones reciclados en el mundo	40
4.4.4.2 Casos de uso de hormigones reciclados en Chile.	42
4.4.5. Análisis FODA (SWOT Analysis)	42
4.4.6. Modelo de Evaluación de Impacto Ambiental	43
4.5 Desarrollo de la propuesta.	44
4.5.1 Demarcación de Terrenos:	46
4.5.1 Segregación Inicial	47
4.5.2 Trituración Lote-1 Y Lote-2	49
4.6 Análisis de Áridos	55
4.7 Limitaciones del Estudio.	58
5. Resultados	60
5.1 Caracterización de los Áridos Reciclados	60
5.1.1 Aspectos clave de la NCh 3849:2024	60
5.1.2. Análisis de los informes	60
5.1.2.1. Informe 1 (Muestra Gruesa)	60
5.1.2.2. Informe 2 (Muestra Fina)	62
5.2 Eficiencia en la Restauración de Superficies	64
5.2.1 Evaluación de Costos y Emisiones para el Proyecto de Reciclaje Escombros.	64
5.2.2 Análisis Económico	65
5.3 Beneficios Ambientales.	66
5.3.1 Impacto de optar por tratamiento local:	67
5.3.2 Impactos ambientales relevantes:	68

5.3.3 Tipo de evaluación ambiental:	68
5.4 Flujo de Caja Proyectado.	69
6. Discusión	71
6.1 Comparación con Otras Alternativas	71
6.1.1 Disposición en Rellenos Autorizados	71
6.1.2 Utilización como Material de Relleno No Tratado	71
6.1.3 Alternativas de Reciclaje de Escombros para Otros Usos	72
6.1.4 Resumen Comparativo	73
7 Conclusiones y Recomendaciones.	74
7.1. Conclusiones:	74
7.2. Recomendaciones:	75
9 Bibliografía.	77
10. Anexos	80
Anexo 1: Iniciativas economía circular en CODELCO 1:	80
Anexo 2: Resultados ensayos muestreos de escombros reciclados	82
Ensayo 1	82
Ensayo 2	84

VI. Índice de Tablas

Tabla 1. Antecedentes del ensayo piloto. _____	45
Tabla 2. Resultados muestreo n°1. _____	61
Tabla 3. Resultados muestreo n°2. _____	63
Tabla 4. Parámetros a considerar para los análisis económicos y ambientales. _	65
Tabla 5. Resultados generales del proyecto. _____	65
Tabla 6. Estimación de emisiones. _____	67
Tabla 7. Proyección del proyecto 5 años. _____	69
Tabla 8. Resumen comparativo de propuestas. _____	74

VII. Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación, producción y dotación divisiones de CODELCO. _____	17
Figura 2. Ubicación del Yacimiento el Teniente. _____	25
Figura 3 patio ejecución piloto RCD. _____	43
Figura 4 banco realización piloto RCD. _____	44
Figura 5: Separación lotes prueba ensayo. _____	45
Figura 6. Lugar disposición residuos contaminados. _____	47
Figura 7. Separación de residuos. _____	48
Figura 8. Separación lotes 1 y 2. _____	49
Figura 9. Acopio lote 1 y lote 2, según granulometría. _____	50
Figura 10. Acopio material ferroso. _____	51
Figura 11. Trituración del material. _____	52
Figura 12. Producto de trituración separados por granulometría. _____	53
Figura 13. Toma muestreos hormigón. _____	54
Figura 14. Inspección de material triturado. _____	55
Figura 15. Acopio RCD nuevos. _____	56
Figura 15. Acopio RCD nuevos. _____	56
Figura 16: Fórmula de valor Actual Neto (VAN). _____	69
Figura 17. Fórmula de Tasa Interna de Retorno (TIR). _____	70

1. Introducción

Este tema aborda la importancia de desarrollar estrategias para el uso eficiente de los escombros, integrando la sostenibilidad y la economía circular en la gestión empresarial.

El proyecto está directamente relacionado con la acumulación de aproximadamente 900.000 toneladas de escombros en el Centro de Manejo de Residuos (CMRIS) de Minera El Teniente, provenientes de las actividades de desarrollo minero, como la construcción de túneles. Estos escombros están compuestos por materiales difíciles de manejar, como aquellos revestidos con shotcrete, que, al ser *inchancables*, no pueden ser procesados o triturados fácilmente. La acumulación de este tipo de escombros representa un problema debido a su impacto en la futura capacidad productiva de la mina.

Además, las estrictas regulaciones ambientales vigentes solo permiten la disposición final de estos residuos en lugares autorizados. Sin embargo, en Rancagua, la única instalación autorizada para tal disposición ya ha alcanzado su capacidad máxima, lo que limita aún más las opciones de manejo de residuos.

Esta situación genera varios desafíos clave:

1. Sobrecarga del sistema de disposición: La capacidad limitada de los centros autorizados y la falta de alternativas viables agrava la acumulación de escombros, amenazando con un colapso en la gestión de residuos a largo plazo.
2. Costos elevados de transporte: Trasladar estos residuos a otros sitios autorizados fuera de la región implica un alto costo logístico debido a las distancias involucradas, además de un incremento en el tráfico de camiones en las rutas locales.
3. Impacto ambiental: El transporte de grandes volúmenes de escombros hacia rellenos autorizados genera un aumento en las emisiones de gases contaminantes (CO₂) debido al uso intensivo de vehículos pesados, además de contribuir a la congestión vehicular en las áreas circundantes a la mina.
4. Futuras restricciones operativas: Si no se encuentran soluciones alternativas para gestionar o reutilizar estos escombros, su acumulación podría afectar las operaciones mineras futuras, al restringir el espacio disponible y complicar el desarrollo de nuevas áreas productivas.

5. El proyecto busca enfrentar esta problemática mediante una solución innovadora: reutilizar los escombros acumulados como relleno en los caminos interiores de la mina. Con ello, se pretende no solo reducir la necesidad de transporte a sitios lejanos, sino también minimizar el impacto ambiental y los costos, promoviendo una operación minera más sostenible.

1.1. Motivación

El desarrollo sostenible y la economía circular representan pilares fundamentales para enfrentar los desafíos ambientales y económicos de la industria minera. El creciente interés por este tema surge de la necesidad de buscar soluciones innovadoras que transformen los problemas ambientales en oportunidades de mejora operacional y económica.

La acumulación de aproximadamente 900.000 toneladas de escombros en el Centro de Manejo de Residuos Industriales (CMRIS) de Minera El Teniente evidencia una problemática crítica: el impacto ambiental y los altos costos asociados a la disposición final de estos materiales. Esta situación, junto con las estrictas regulaciones ambientales y la limitada disponibilidad de centros de disposición autorizados, subraya la urgencia de implementar estrategias más sostenibles.

La experiencia adquirida en gestión ambiental dentro de la industria minera, junto con los desafíos globales que enfrenta este sector en Chile, ha demostrado la importancia de migrar hacia modelos basados en economía circular. Países líderes en la reutilización de residuos mineros, como Australia, Canadá y la Unión Europea, han evidenciado que es posible desarrollar prácticas sostenibles y rentables mediante el reciclaje y la valorización de materiales. Estas experiencias internacionales inspiran la propuesta de este estudio, que busca adaptar soluciones al contexto chileno, transformando los escombros en recursos útiles para la construcción y mantenimiento de caminos interiores en operaciones mineras.

El conocimiento acumulado en certificaciones ambientales, como la norma ISO 14001, y la participación en auditorías y proyectos en terreno han permitido identificar prácticas sostenibles aplicadas en países líderes de la industria minera. Estas iniciativas refuerzan la importancia de adaptar dichas estrategias al contexto local, contribuyendo a mejorar la competitividad y sostenibilidad de la minería en Chile. Además, proyectos innovadores como el que se presenta en esta tesis posicionan a Minera El Teniente como pionera en soluciones sostenibles a nivel global.

La creciente crisis climática demanda que sectores industriales, como la minería, adopten modelos más eficientes y sostenibles. La implementación de soluciones basadas en la economía circular, como la reutilización de escombros mineros, no solo reduce la huella de carbono, sino que también contribuye a los objetivos de reducción de emisiones en un 70 % al 2030, comprometidos por la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco). Asimismo, el reciclaje de estos materiales disminuye la extracción de recursos naturales vírgenes, alineándose con el desafío global de mitigar el cambio climático.

El desarrollo profesional en áreas como la prevención de riesgos y la sustentabilidad ha permitido la identificación de prácticas sostenibles aplicadas en países como Canadá y Australia. Estos modelos internacionales ofrecen una motivación para adaptar y replicar soluciones dentro del contexto chileno, con el fin de mejorar la competitividad y sostenibilidad de la minería en el país. Proyectos innovadores, como el propuesto en esta tesis, posicionan a Minera El Teniente como un referente global en la implementación de soluciones sostenibles.

El objetivo de la presente investigación es contribuir a la transformación de procesos mineros tradicionales hacia prácticas más sostenibles. Este proyecto no solo representa un aporte a Codelco, sino también una oportunidad para demostrar que es posible implementar soluciones innovadoras, rentables y alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La gestión responsable de los escombros acumulados no solo soluciona un problema ambiental crítico, sino que también genera beneficios directos para las comunidades locales. Entre ellos, la reducción de emisiones contaminantes, la descongestión vehicular y el fomento de empleabilidad a través de nuevas tecnologías y procesos de reciclaje. Este tipo de soluciones son fundamentales para construir una industria más inclusiva y responsable, respondiendo a las demandas sociales y ambientales actuales.

El presente estudio busca contribuir al compromiso de Codelco con la reducción de su huella de carbono y la implementación de prácticas de economía circular alineadas con los objetivos de sostenibilidad global y los compromisos nacionales al 2030. La investigación no solo tiene el potencial de aportar conocimientos técnicos y económicos, sino también de ser replicada en otras divisiones mineras, posicionando a Minera El Teniente como un referente en la gestión innovadora de residuos mineros.

1.2. Antecedentes de La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco).

La Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) es la empresa estatal más importante del país y el mayor productor de cobre a nivel mundial. Creada en 1976 tras la nacionalización de la gran minería del cobre en 1971, Codelco ha jugado un papel fundamental en el desarrollo económico de Chile, aportando significativamente a los ingresos fiscales del Estado y siendo un motor clave en la industria minera global. Con una operación distribuida en siete divisiones mineras principales, incluidas Chuquicamata

El Teniente y Andina, Codelco se caracteriza por la magnitud de su producción, que representa cerca del 8% de la producción global de cobre. Además, la empresa ha adoptado una estrategia centrada en la sustentabilidad, con compromisos ambiciosos para reducir su huella de carbono en un 70% para 2030 y alcanzar la neutralidad de carbono en 2050.

Enfrentando desafíos como la disminución de las leyes del mineral y el envejecimiento de sus principales yacimientos, Codelco ha emprendido proyectos de modernización de gran envergadura, con una inversión proyectada de \$40,000 millones en la próxima década. Estas iniciativas buscan no solo asegurar su liderazgo en la industria minera, sino también promover prácticas responsables y sostenibles, alineadas con los estándares internacionales.

Esta introducción contextualiza la relevancia de Codelco como una organización de estudio clave en el ámbito de la gestión empresarial, la innovación y la sustentabilidad, destacando su impacto económico y ambiental tanto a nivel nacional como global.

Codelco, la Corporación Nacional del Cobre de Chile, organiza sus operaciones a través de siete divisiones mineras y una fundición y refinería (figura 1), cada una con características y ubicaciones específicas:

- Radomiro Tomic: Ubicada en Calama, Región de Antofagasta, esta mina a cielo abierto produce cátodos de cobre mediante procesos de lixiviación y electroobtención.
- Chuquicamata: También situada en Calama, es una de las minas de cobre más grandes del mundo, operando tanto a cielo abierto como de forma subterránea. Produce cátodos y concentrados de cobre.
- Ministro Hales: Localizada en Calama, esta mina a cielo abierto se especializa en la producción de concentrados de cobre y subproductos como la plata.

- Gabriela Mistral: Situada en Sierra Gorda, Región de Antofagasta, es una mina a cielo abierto que produce cátodos de cobre de alta pureza.
- Salvador: Ubicada en Diego de Almagro, Región de Atacama, combina operaciones subterráneas y a cielo abierto para producir cátodos y concentrados de cobre.
- Andina: Situada en la Región de Valparaíso, opera con métodos de explotación subterránea y a cielo abierto, produciendo principalmente concentrados de cobre.
- El Teniente: Localizada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, es la mina subterránea de cobre más grande del mundo, produciendo concentrados de cobre y molibdeno.
- Ventanas: Ubicada en Puchuncaví, Región de Valparaíso, esta división se dedica a la fundición y refinación de cobre, produciendo cátodos de alta pureza y subproductos como oro y plata.

Cada una de estas divisiones desempeña un papel crucial en la producción total de cobre de Codelco, contribuyendo al liderazgo de la empresa en la industria minera global.

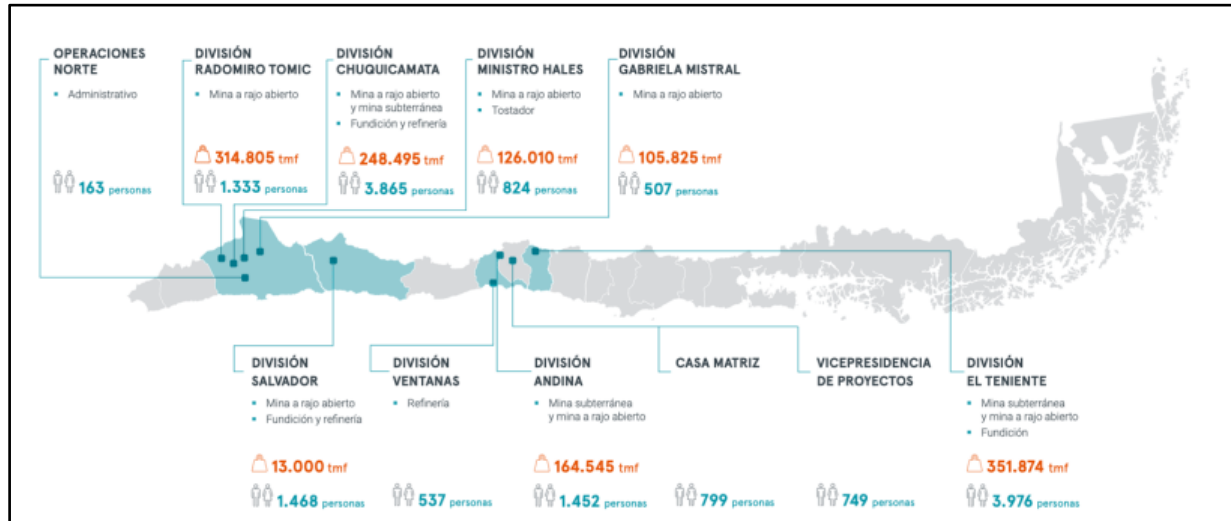


Figura 1. Ubicación, producción y dotación divisiones de CODELCO. (2023)

1.2.1 Visión de CODELCO

En Codelco nos hemos propuesto contribuir al desarrollo local y nacional, y ser agentes activos en la construcción de un mundo más sostenible. A través de este enfoque integral, reafirmamos nuestra responsabilidad hacia el desarrollo global y la participación en la configuración de un futuro con más bienestar para la humanidad y

el planeta en su conjunto. Para eso contamos con una Política Corporativa de Sustentabilidad que establece siete compromisos transversales a todas nuestras actividades y define un sistema de gobernanza para monitorear su implementación. Ésta se gestiona a través de nuestra Estrategia de Sustentabilidad y de los Planes de Implementación Tácticos para cada una de las divisiones. Esta política se presenta con profundidad en el capítulo de Gobierno Corporativo.

Nuestra Estrategia de Sustentabilidad establece compromisos y objetivos concretos para reducir nuestra huella de carbono, entre ellas reducir el consumo unitario de aguas continentales (make-up), adoptar prácticas y desarrollar la economía circular; gestionar depósitos de relaves con los más altos estándares; desarrollar los territorios con valor social, y disminuir las emisiones de material particulado. Estas iniciativas reflejan nuestro compromiso con la sustentabilidad integral y con la responsabilidad ambiental y social.

1.2.2 Propósito

“El propósito de Codelco es ser pilar del desarrollo sostenible de Chile y el mundo. Nuestro cobre será protagonista en mejorar la electromovilidad y tecnologías, impactando en la disminución de la huella de carbono en el mundo. La viabilidad social, ambiental y económica deben estar integradas a la operación y al diseño de los proyectos y eso extiende el impacto cuando trabajamos con proveedores que tienen el mismo propósito. Nuestro ámbito de impacto es global, somos líderes de producción a nivel mundial”

1.2.3 Negocio

Codelco, la Corporación Nacional del Cobre de Chile, es una empresa estatal dedicada principalmente a la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y sus subproductos, así como al procesamiento y comercialización de estos materiales.

Entre las principales actividades de Codelco se destaca:

- Exploración y desarrollo minero: Identificación y evaluación de yacimientos de cobre para su futura explotación.
- Explotación minera: Operación de minas para extraer mineral de cobre.
- Procesamiento: Transformación del mineral extraído en productos comercializables, como cátodos de cobre.

- Comercialización: Venta de cobre y subproductos en mercados nacionales e internacionales.

Además del cobre, Codelco produce subproductos como molibdeno, oro y plata, derivados de sus procesos de refinación.

La empresa opera diversas divisiones mineras en Chile, incluyendo Chuquicamata, El Teniente, Andina, Salvador y Ventanas, cada una con características y capacidades específicas.

Como empresa estatal, Codelco desempeña un papel fundamental en la economía chilena, aportando significativos ingresos al Estado y contribuyendo al desarrollo del país

1.2.4 Mercado

Codelco, la Corporación Nacional del Cobre de Chile, es el mayor productor de cobre a nivel mundial y su mercado abarca principalmente:

- Asia: Incluyendo China, que es uno de los principales consumidores de cobre a nivel global.
- Sudamérica: Con una presencia significativa en países de la región.
- Norteamérica: Abasteciendo a industrias en Estados Unidos y Canadá.
- Europa: Suministrando cobre a diversas naciones europeas.

Las transacciones de cobre se realizan en mercados internacionales como la Bolsa Metales de Londres, el COMEX de la Bolsa Mercantil de Nueva York y la Bolsa de Metales de Shanghai.

Además del cobre, Codelco produce subproductos como molibdeno, oro y plata, que también se comercializan en mercados internacionales.

1.2.5 Aporte a la Región

Codelco, como empresa estatal chilena, realiza aportes significativos tanto a nivel nacional como regional. En la Región Metropolitana de Santiago, donde se encuentra su sede central, su contribución se manifiesta en diversos ámbitos:

Contribución Económica:

- Empleo Directo e Indirecto: Codelco genera numerosos puestos de trabajo, tanto en sus oficinas centrales como en proyectos y operaciones relacionadas, impulsando la economía local.

- **Contratación de Servicios y Proveedores Locales:** La empresa contrata servicios y adquiere bienes de proveedores regionales, fortaleciendo el tejido empresarial de la zona.

Responsabilidad Social y Ambiental:

- **Programas Comunitarios:** Codelco implementa iniciativas orientadas al desarrollo social, educativo y cultural de las comunidades locales, promoviendo el bienestar y la cohesión social.
- **Gestión Ambiental:** La empresa se compromete con prácticas sostenibles, minimizando el impacto ambiental de sus operaciones y promoviendo la conservación del entorno.

Inversión en Infraestructura:

- **Desarrollo de Proyectos:** Codelco invierte en proyectos de infraestructura que benefician a la región, mejorando la conectividad y la calidad de vida de sus habitantes.

Estos aportes reflejan el compromiso de Codelco con el desarrollo integral de la Región Metropolitana de Santiago, contribuyendo al progreso económico, social y ambiental de la zona.

1.2.6 Empleos

Codelco, la Corporación Nacional del Cobre de Chile, ha implementado diversas iniciativas para mejorar la empleabilidad en las comunidades donde opera. Por ejemplo, en 2018, el Distrito Norte de Codelco lanzó un proyecto de desarrollo del empleo local con el objetivo de capacitar a cerca de 3.000 personas en un período de cinco años, promoviendo su inserción laboral en empresas contratistas de la zona.

Además, en 2021, Codelco alcanzó una participación femenina del 11,6% en su dotación, el mayor crecimiento interanual en dos décadas. Ese año, casi el 31% de los cargos vacantes totales fueron ocupados por mujeres; en el caso de los profesionales, esta tasa llegó al 50%.

Codelco, la Corporación Nacional del Cobre de Chile, es reconocida por su capacidad para atraer y retener talento en el país. Según el Monitor Empresarial de Reputación Corporativa (Merco) 2024, Codelco ocupó el primer lugar entre 200 empresas en el ranking de atracción y retención de talento, liderando tanto la clasificación general como la del sector minero.

Este reconocimiento se basa en tres valores clave: calidad laboral, marca empleadora y reputación interna. La empresa ha implementado diversas iniciativas para mejorar la empleabilidad de sus trabajadores, incluyendo programas de formación y desarrollo profesional, políticas de diversidad e inclusión, y un enfoque en la sostenibilidad y la innovación.

Aunque no se dispone de datos públicos específicos sobre las tasas de empleabilidad de Codelco, su posición destacada en rankings nacionales y su compromiso con el desarrollo de su personal indican una alta capacidad para atraer y retener talento en la industria minera chilena.

Estas acciones reflejan el compromiso de Codelco con la promoción de la empleabilidad y la inclusión laboral en las regiones donde opera.

1.2.7 Estrategia de desarrollo sustentable

La Estrategia de desarrollo sustentable se traduce en seis compromisos claves que poseen objetivos que pretendemos alcanzar en 2030. Este enfoque estratégico contiene iniciativas y plazos para cumplir estos objetivos.

Codelco, la Corporación Nacional del Cobre de Chile, es una empresa estatal que desempeña un papel fundamental en la economía del país. En 2023, Codelco produjo aproximadamente 1,446 millones de toneladas métricas de cobre, lo que representó una disminución del 8,4% en comparación con el año anterior.

Esta reducción en la producción se atribuye a desafíos operativos y a la disminución de la ley del mineral en algunas de sus divisiones. A pesar de esta disminución, Codelco continúa siendo el mayor productor de cobre a nivel mundial, contribuyendo significativamente a la economía chilena y al mercado global del cobre.

Para enfrentar estos desafíos y asegurar su posición en el mercado, Codelco ha planificado una inversión de 40.000 millones de dólares en la próxima década. Esta inversión está destinada a modernizar sus operaciones, mejorar la eficiencia y reducir su huella de carbono en un 70% para 2030, con el objetivo de alcanzar la neutralidad en 2050.

Estas iniciativas reflejan el compromiso de Codelco con la sostenibilidad y la innovación en la industria minera, buscando mantener su liderazgo y contribuir al desarrollo económico de Chile.

Codelco ha definido compromisos clave con metas concretas para 2030, que guían su transición hacia una minería sostenible. Estos compromisos están organizados en

seis pilares principales, entre los que se encuentran una menor huella de carbono, menor huella hídrica, economía circular, nuevos estándares en depósitos de relaves, desarrollo territorial con valor social y la disminución del material particulado.

1.2.7.1 Menor Huella de Carbono

Meta: Reducción del 70% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2030.

Acciones:

Transición hacia una matriz energética 100% limpia para 2026.

Incorporación de electromovilidad en minas subterráneas y camiones de alto tonelaje.

Participación activa en el desarrollo del hidrógeno verde para minería.

1.2.7.2 Menor Huella Hídrica

Meta: Reducir el consumo de aguas continentales (make-up) en un 60%.

Acciones:

Construcción de una planta desalinizadora en el norte con capacidad de 840 litros por segundo, operativa para 2026.

Reutilización de aguas desde relaves mediante sistemas de recuperación y tecnologías avanzadas.

1.2.7.3 Economía Circular

Meta: Reciclar el 65% de residuos industriales sólidos no peligrosos.

Acciones:

Valorización de neumáticos mineros y residuos metálicos.

Implementación de proyectos pilotos de reutilización de materiales como madera y residuos orgánicos.

1.2.7.4 Nuevo Estándar en Depósitos de Relaves

Meta: Implementar el estándar global de gestión de relaves en el 100% de los depósitos.

Acciones:

Desarrollo de sistemas de monitoreo en línea para controlar estabilidad física y química.

Control de infiltraciones y reducción de sulfatos en aguas de relaves.

1.2.7.5 Desarrollo Territorial con Valor Social

Meta: Incrementar en un 60% los bienes y servicios suministrados por proveedores locales.

Acciones:

Programas de atracción de pequeños proveedores locales con capacitaciones y soporte.

Promoción de iniciativas comunitarias relacionadas con acceso a agua y empleo.

1.2.7.6 Disminución de Material Particulado

Meta: Reducir en un 25% las emisiones de material particulado respirable (MP10) para 2027.

Acciones:

Implementación de tecnologías de supresión de polvo en minas tajo abierto.

Estandarización de la gestión de calidad del aire en comunidades vecinas.

1.2.8 Economía Circular

Acá se detallan las actividades orientadas a economía circular dado a que este proyecto de título apunta a prácticas de invasión en economía circular (Anexo 1).

- Reciclaje y valorización de residuos: Se implementaron iniciativas para reciclar el 65% de los residuos industriales sólidos no peligrosos, incluyendo:
 - Recuperación de bolas de molienda en la División Chuquicamata (717,000 kg).
 - Recuperación de revestimientos en la División El Teniente y Ministro Hales.
 - Pilotos de digestión anaeróbica en la División Andina para residuos orgánicos.
 - Reducción y reemplazo de pallets de madera por plásticos reciclados en la División Ventanas.
- Gestión de neumáticos fuera de uso (NFU): Se inició el reciclaje de neumáticos a través de procesos de pirólisis en la División El Teniente, generando productos reutilizables como acero, carbón black y biodiésel. Aquello dió como resultado más de 200 neumáticos mineros fueron recauchados, evitando la generación de 480,000 kg de residuos.

- Contratos de economía circular: En las divisiones Radomiro Tomic, Gabriela Mistral y Ministro Hales, los contratos de gestión de residuos incorporaron conceptos de economía circular.
- Reutilización de materiales peligrosos: Iniciativas en la División Ministro Hales para filtrar aceites usados, reduciendo los costos de compra de nuevos aceites y la huella de carbono.
- Colaboración interempresarial y con comunidades: Trabajos conjuntos con Fundación Chile y otras mineras para seguridad y monitoreo en relaves, alineándose con estándares globales.
- Innovación tecnológica: Pilotos para maximizar la reutilización de materiales y minimizar el impacto ambiental, como la recuperación de revestimientos de molinos en colaboración con METSO.

1.2.9 Resultados 2023

Codelco generó US\$ 1.426 millones en excedentes que fueron entregados al erario fiscal de Chile, consolidando su papel como un pilar económico del país.

1.3 Antecedentes de CODELCO CHILE DIVISIÓN EL TENIENTE

La División El Teniente de Codelco es reconocida como la mina subterránea de cobre más grande del mundo. Ubicada en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a aproximadamente 50 kilómetros de Rancagua, esta mina ha desempeñado un papel fundamental en la historia minera de Chile (figura 2). La explotación de El Teniente se remonta a 1904, cuando la Braden Copper Company, fundada por William Braden y E.W. Nash, inició operaciones en el yacimiento. En 1910, la empresa pasó a ser controlada por la Guggenheim Exploration, y en 1916 se convirtió en una subsidiaria de la Kennecott Copper Corporation. Durante este período, se construyó la ciudad minera de Sewell para albergar a los trabajadores y sus familias.

En 1967, el gobierno chileno adquirió el 51% de las acciones de El Teniente, formando la Sociedad Minera El Teniente. Posteriormente, en 1971, bajo la presidencia de Salvador Allende, se nacionalizó la industria del cobre, dando origen a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), que asumió la operación de El Teniente.

En 1971, la mina fue nacionalizada y pasó a formar parte de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco), consolidándose como un pilar fundamental en la

estrategia de producción de la empresa y contribuyendo significativamente a la economía chilena.

En 1977, El Teniente introdujo el Convertidor Teniente, una innovación que permitió fundir y convertir concentrado de cobre a metal blanco sin necesidad de energía externa. Esta tecnología representó un avance significativo en la eficiencia de los procesos metalúrgicos.

A lo largo de los años, la mina ha expandido sus operaciones, alcanzando más de 4.500 kilómetros de túneles subterráneos. En 2013, se inició la explotación del Rajo Sur, la primera operación a cielo abierto de la División.

Las operaciones principales de El Teniente incluyen la mina subterránea, el concentrador

Colón y la Fundición Caletones. En 2021, la división alcanzó una producción de 459.817 toneladas métricas de cobre fino, además de 8.214 toneladas métricas finas de molibdeno y 114.323 kilogramos de plata, entre otros subproductos.

La historia de El Teniente está marcada por hitos significativos, como la construcción del campamento minero de Sewell en 1906, declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 2006. Este campamento, conocido como la "Ciudad de las Escaleras", albergó a miles de trabajadores y sus familias durante gran parte del siglo XX.

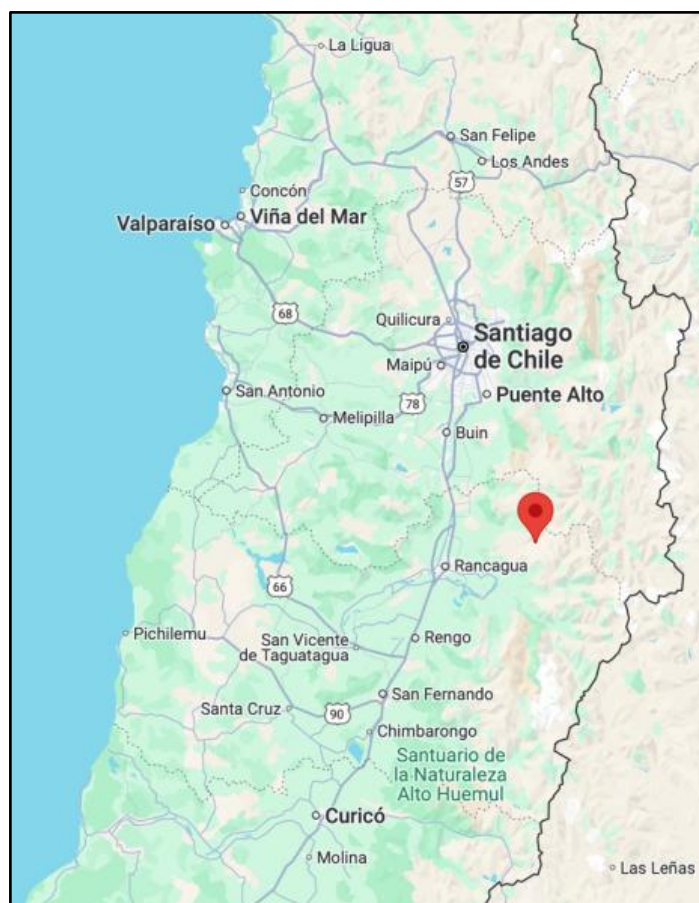


Figura 2. Ubicación del Yacimiento el Teniente.

En la actualidad, El Teniente continúa siendo una pieza clave en la producción de cobre de Codelco, implementando proyectos de expansión y modernización para asegurar su operación sostenible en el futuro.

El Teniente ha sido un pilar en la economía chilena, contribuyendo significativamente a la producción nacional de cobre. Su historia refleja la evolución de la minería en Chile y su adaptación a los desafíos tecnológicos y ambientales del sector.

Hoy en día, El Teniente continúa siendo una de las operaciones más importantes de Codelco, manteniendo su compromiso con la innovación y la sostenibilidad en la minería.

2. Objetivos

Objetivo General

Evaluar el impacto técnico, económico y ambiental del uso de áridos reciclados obtenidos a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) en la restauración de superficies en la División El Teniente de Codelco, considerando oportunidades de optimización para su implementación futura.

Objetivos Específicos

- 1. Caracterizar** los áridos reciclados generados en el proceso de valorización de RCD.
- 2. Analizar** la eficiencia técnica y operativa de los áridos reciclados en la restauración de los patios 1 y 2 de la División El Teniente, evaluando su desempeño en términos de resistencia, durabilidad y adaptabilidad al entorno minero."
- 3. Evaluar** el impacto técnico, económico y ambiental del uso de áridos reciclados en la restauración de superficies.
- 4. Proponer** estrategias de optimización para la futura implementación de áridos reciclados en otras áreas de Codelco y proyectar su impacto económico en el mediano plazo, considerando ahorros en costos operativos y beneficios ambientales.

3 Marco teórico

3.1 Economía Circular

La economía circular busca minimizar el uso de recursos y reducir la generación de residuos, reemplazando el modelo lineal tradicional de "extraer-producir-desechar" (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 10). Este paradigma se fundamenta en los principios de reducción, reutilización, reciclaje y valorización de materiales (Geissdoerfer et al., 2018), y se aplica en diversos sectores, incluyendo la minería. En el ámbito minero, la economía circular no solo persigue la reducción del impacto ambiental, sino también el aumento de la eficiencia operativa mediante el uso de materiales reciclados (Lieder & Rashid, 2016). Estudios recientes en Canadá han demostrado que la integración de tecnologías avanzadas—como el reciclaje robótico y la inteligencia artificial—puede incrementar la recuperación de materiales en un 30% (Ellen MacArthur Foundation, 2013, p. 12). En este contexto, Chile podría beneficiarse significativamente al adoptar estas tecnologías, adaptándolas a su contexto minero único; además, la colaboración con universidades y centros de investigación internacionales se perfila como un paso clave para impulsar este cambio (Korhonen et al., 2018).

3.2 Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Los RCD constituyen uno de los flujos de residuos más voluminosos en el sector de la construcción. La gestión inadecuada de estos residuos puede generar problemas ambientales significativos, como la ocupación innecesaria de vertederos y la contaminación de suelos y aguas (Silva et al, 2017, p. 27; ISO 14001, s.f., p. 15). Por esta razón, es esencial implementar estrategias sostenibles que fomenten el reciclaje y la reutilización de estos materiales. Arslan (2007, p. 45) destaca la importancia de diseñar soluciones desde el inicio de los proyectos para maximizar el potencial de reutilización y reciclaje de los materiales, proponiendo que, al planificar el ciclo de vida de los mismos, es posible reducir los impactos ambientales y optimizar el aprovechamiento de recursos. Estas ideas resultan especialmente relevantes en el contexto de los RCD, ya que subrayan la necesidad de adoptar enfoques proactivos y sostenibles para su manejo.

3.3 Gestión de Residuos Mineros

La minería genera grandes volúmenes de residuos sólidos, tales como escombros, relaves y materiales no procesables, lo que demanda la implementación de estrategias de manejo sustentable (Kumar & Singh, 2016, p. 22). Dentro de los tipos de residuos mineros se destacan:

- **Residuos de excavación:** Incluyen escombros y materiales inchancables.
- **Relaves y escorias.**

El impacto ambiental de estos residuos se manifiesta en la generación de emisiones asociadas al transporte y a la disposición en rellenos externos, además de la ocupación de terrenos y el potencial de contaminación de suelos y aguas. Frente a este escenario, han emergido soluciones innovadoras, como el reciclaje de materiales para la obtención de áridos en la construcción o para el relleno de caminos, lo que contribuye a mitigar dichos impactos (Kumar & Singh, 2016, p. 24).

3.4 Experiencias Internacionales en la Reutilización de Residuos Mineros

El uso de escombros reciclados como material alternativo ha sido implementado con éxito en diversos países. Por ejemplo, en Europa, países como los Países Bajos y Suiza han reutilizado escombros en proyectos de infraestructura vial y construcción, lo que ha contribuido a la reducción de residuos y a la optimización de recursos (UNEP, 2022, p. 18). En Canadá, se promueve el uso de hormigones reciclados combinados con cenizas volantes en proyectos urbanos, demostrando la viabilidad de integrar residuos mineros en materiales de construcción. Asimismo, Australia ha puesto en marcha iniciativas como el Proyecto Barangaroo en Sídney, donde se reutilizaron materiales para aplicaciones en paisajismo y en construcciones de menor criticidad, reforzando la tendencia hacia una construcción sostenible (UNEP, 2022, p. 20).

3.5 Impacto Ambiental y Reducción de Emisiones de CO₂

La reutilización local de escombros evita la extracción de áridos vírgenes y reduce las emisiones derivadas del transporte a rellenos externos. El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) permite evaluar los impactos ambientales desde la extracción hasta la disposición final, facilitando la identificación de oportunidades para la reducción de

emisiones. En este contexto, la reutilización de escombros contribuye a disminuir las emisiones de CO₂ asociadas al transporte de materiales, al evitar desplazamientos de larga distancia, y minimiza la demanda energética y el uso de recursos no renovables al reducir la necesidad de producir nuevos materiales (IPCC, 2021, p. 30).

3.6 Viabilidad Técnica y Económica de los Áridos Reciclados

Los áridos reciclados, obtenidos de residuos de construcción y demolición (RCD), presentan características técnicas adecuadas para su empleo en proyectos de infraestructura. Entre sus propiedades se destacan la granulometría, la resistencia, la absorción de agua y la durabilidad, las cuales cumplen con los requisitos para aplicaciones estructurales. Además, el análisis costo-beneficio ha evidenciado que la utilización de materiales reciclados puede generar una reducción de hasta el 51% en los costos de tratamiento en comparación con la disposición en rellenos externos (Zamor et al, 2020). Estas ventajas económicas y técnicas permiten que los áridos reciclados sean aplicables en diversas soluciones prácticas, tales como caminos interiores, subbases para pavimentos y estabilización de suelos, promoviendo así una mayor sostenibilidad en los procesos constructivos.

3.7 Sostenibilidad en la Minería

La industria minera enfrenta el desafío de equilibrar la producción con la conservación ambiental. En este contexto, la adopción de estrategias basadas en la economía circular, como la reutilización de escombros, resulta fundamental para alcanzar diversos objetivos de sostenibilidad. Entre los beneficios asociados se destacan:

- **Reducción de Pasivos Ambientales:** La reutilización de escombros permite disminuir la acumulación de residuos no gestionados, evitando la saturación de vertederos y minimizando los riesgos de contaminación.
- **Contribución a Metas de Sustentabilidad:** La implementación de estas estrategias contribuye a la disminución de emisiones de CO₂, al reducir desplazamientos y optimizar el uso de materiales.
- **Fomento de una Gestión Eficiente de Recursos:** La reintegración de materiales reciclados en nuevos procesos productivos reduce la demanda de recursos vírgenes y el consumo energético.

- **Alineación con los ODS de las Naciones Unidas:** Estas prácticas se relacionan con el Objetivo 12 (producción y consumo responsables) y el Objetivo 13: acción por el clima (World Resources Institute, 2021, p. 42).

3.8 Áridos Reciclados en la Construcción

El uso de áridos reciclados se está consolidando como una estrategia innovadora en la industria de la construcción, orientada a disminuir la dependencia de recursos naturales y fomentar prácticas sostenibles. Varios estudios han evidenciado que estos materiales pueden ofrecer un rendimiento técnico adecuado en proyectos de restauración y en la construcción de carreteras (Silva et al., 2017, p. 599).

La implementación de áridos reciclados no solo contribuye a la reducción de residuos en vertederos, sino que también ayuda a mitigar los impactos ambientales negativos asociados con la extracción de materiales vírgenes. Esto es especialmente relevante en el contexto actual, donde la sostenibilidad se ha convertido en una prioridad para el sector de la construcción. La adopción de estos materiales reciclados requiere un cambio en las prácticas tradicionales, así como una mayor colaboración entre las partes interesadas para garantizar su aceptación y uso efectivo.

3.9 Normas Chilenas y estándares.

La gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Chile se encuentra regulada por normativas nacionales e internacionales que buscan fomentar prácticas sostenibles y responsables en el sector. Estas normativas establecen estándares claros para garantizar la calidad, trazabilidad y uso adecuado de los materiales reciclados, promoviendo la economía circular y la reducción del impacto ambiental. A continuación, se destacan las principales normativas y directrices aplicables:

- ISO 14001: Estándar internacional para sistemas de gestión ambiental.
- NCh 3849: Norma chilena que regula la calidad y trazabilidad de los áridos reciclados.
- NCh 163: Establece los requisitos para áridos en morteros y hormigones.
- Directrices Globales:
 - Unión Europea: Closing the Loop (Bourguignon, 2016).
 - Estándar Global de Gestión de Relaves (Global Trainings Review, 2020).

3.9.1. NCh 3849

La norma NCh 3849 establece los criterios para evaluar la calidad y especificaciones de los áridos utilizados en la fabricación de morteros y hormigones. Esta norma es fundamental para garantizar que los materiales reciclados cumplan con los estándares necesarios para su uso en la construcción. Los puntos principales de la norma incluyen:

Propiedades físicas y químicas: Define parámetros esenciales como granulometría, resistencia al desgaste y contenido de impurezas, asegurando que los áridos reciclados sean adecuados para su aplicación.

Métodos de ensayo: Detalla procedimientos específicos para verificar la calidad de los áridos, incluyendo análisis granulométrico y pruebas de resistencia a la fragmentación, lo que permite asegurar el cumplimiento de las especificaciones.

Requisitos específicos: Se enfoca en garantizar la durabilidad y el desempeño de las estructuras construidas con estos materiales, promoviendo así la seguridad y sostenibilidad en el sector de la construcción.

3.9.2. NCh 3851

La norma NCh 3851 regula los requisitos generales para los materiales y procesos empleados en la producción de áridos, con un enfoque en varios aspectos clave:

- **Control de calidad:** Implementación de estándares uniformes en el proceso de producción.
- **Criterios de aceptación/rechazo:** Basados en propiedades físicas y químicas críticas.
- **Compatibilidad con estándares internacionales:** Busca alinearse con normas globales para mejorar la competitividad del sector.

3.9.3. NCh 163.Of 79

La norma NCh 163.Of79 establece los requisitos técnicos y prácticos para los áridos utilizados en morteros y hormigones, abordando aspectos fundamentales para garantizar su calidad y desempeño.

- **Propiedades esenciales:** Granulometría, pureza, resistencia al desgaste y a la desintegración.

- Estados de los áridos: Define estados higrométricos, como áridos secos, saturados y húmedos.
- Compatibilidad y uso: Requisitos para garantizar la funcionalidad en aplicaciones específicas, como pavimentos y hormigones expuestos a condiciones extremas.

3.9.4 Análisis Comparativo de las normas chilenas.

Enfoque técnico: Las tres normas buscan uniformidad y calidad en los materiales, aunque NCh163 se centra más en requisitos específicos para morteros y hormigones, mientras que NCh 3849 y NCh 3851 abordan una gama más amplia de aplicaciones. Metodología de ensayo: Todas establecen métodos claros para verificar parámetros críticos, pero NCh163 incluye un enfoque más detallado sobre pruebas granulométricas y resistencia química.

Compatibilidad internacional: Destaca la alineación con normas internacionales, especialmente ASTM, para mantener la competitividad y fiabilidad en mercados globales.

En Chile, el uso de hormigón reciclado está siendo promovido y regulado mediante actualizaciones normativas recientes. La norma chilena NCh163, titulada "Áridos para hormigones y morteros – Requisitos", ha sido revisada para incorporar el uso de áridos reciclados provenientes de hormigón de demolición y áridos artificiales, como las escorias de acero. Esta actualización busca fomentar la economía circular en la producción de hormigón, permitiendo la sustitución parcial de áridos naturales por reciclados.

Inicialmente, la norma establece un reemplazo máximo del 10% en peso de árido grueso natural por árido reciclado en hormigones estructurales. Este porcentaje es considerado conservador, pero representa un avance significativo hacia la sostenibilidad en la construcción.

Además, se han desarrollado otras normativas complementarias, como la NCh3849, que proporciona lineamientos claros sobre la clasificación y requisitos de los áridos reciclados basados en hormigón endurecido y materiales de construcción sin clasificar.

Estas iniciativas reflejan el compromiso del sector de la construcción en Chile por reducir la extracción de áridos naturales y minimizar los pasivos ambientales,

promoviendo prácticas más sostenibles y alineadas con los principios de la economía circular.

El marco normativo chileno, como la NCh 3849:2024 y la NCh 163, establece lineamientos para la calidad y trazabilidad de áridos reciclados, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad y sostenibilidad del proyecto. Sin embargo, en comparación con países como Canadá y Australia, Chile presenta limitaciones en normativas específicas para promover el reciclaje en minería. Por ejemplo, mientras Canadá incentiva el uso de hormigones reciclados con políticas fiscales, en Chile estos incentivos aún son escasos. Incorporar estos enfoques podría acelerar la transición hacia una economía circular en el sector minero.

4. MÉTODO

4.1 Enfoque y diseño de la investigación.

El enfoque de la investigación es mixto, ya que combina tanto métodos cualitativos como cuantitativos para obtener una visión integral del estudio. A través del análisis de caso (cuantitativo y cualitativo), se busca describir y analizar la gestión de residuos en Minera El Teniente, identificando tanto los impactos financieros como las percepciones de los responsables. El tipo de estudio será descriptivo, centrado en la recopilación y análisis detallado de información relevante para entender las prácticas actuales y los desafíos en la gestión de escombros. Además, se utilizará análisis costo-beneficio y benchmarking para comparar los resultados obtenidos con otras empresas y evaluar la viabilidad económica del reciclaje de escombros.

4.2 Población y muestra.

La población de este estudio está constituida por todos los residuos de construcción y demolición (RCD) generados en el Centro de Manejo de Residuos (CMRIS) de Minera El Teniente, específicamente aquellos escombros acumulados que suman aproximadamente 900.000 toneladas. Estos escombros provienen de actividades mineras, como la construcción de túneles, y están compuestos por materiales difíciles de manejar, como aquellos revestidos con shotcrete, que complican su procesamiento. La población incluye todos los materiales que se recolectan, segregan y trituran en el Patio 11 para su reutilización como áridos reciclados.

La muestra del estudio se define como los 1.000 m³ de áridos reciclados generados a partir de la gestión de RCD en los lotes designados (LOTE-1 y LOTE-2). Esta cantidad representa una porción específica del total de RCD procesados y es utilizada para evaluar la calidad, tamaño y composición de los áridos reciclados obtenidos. Además, las muestras tomadas de cada pila de material (dos muestras por pila) son representativas del material procesado y se analizarán para determinar su viabilidad en la restauración de suelos.

4.3. Variables y dimensiones del estudio.

El presente estudio identifica diversas variables y dimensiones metodológicas que son fundamentales para evaluar el impacto del uso de áridos reciclados en la restauración de superficies en Minera El Teniente.

4.3.1. Variable Dependiente

La variable dependiente se centra en el impacto técnico, económico y ambiental que resulta de la implementación de estrategias de reciclaje de áridos. Esta variable es crucial porque permite medir el efecto global de la reutilización de áridos reciclados en el contexto minero, abarcando no solo los resultados económicos, sino también las implicaciones ambientales y operativas. Según Geissdoerfer et al. (2018), la evaluación del impacto ambiental y económico es esencial para determinar la efectividad de las prácticas sostenibles en la industria.

4.3.2. Variables Independientes

Las variables independientes incluyen varios factores que influyen en la variable dependiente. Entre ellas se encuentran:

- Características de los áridos reciclados generados: La composición, calidad, tamaño y resistencia son determinantes para evaluar la viabilidad del material en aplicaciones constructivas y su efectividad en la restauración de suelos. Investigaciones han demostrado que las propiedades mecánicas de los áridos reciclados pueden variar significativamente según su origen y proceso de producción (Kou & Poon, 2013).
- Métodos de valorización de RCD: La eficiencia de los métodos utilizados para procesar los residuos puede afectar directamente la calidad del producto final. La literatura indica que diferentes técnicas de valorización pueden resultar en

variaciones significativas en la calidad del material reciclado (Mendoza et al., 2020).

- Costos asociados a la gestión de residuos: Los costos relacionados con la gestión y transporte de escombros impactan directamente en la viabilidad económica del proyecto. El análisis económico es fundamental para justificar inversiones en tecnologías sostenibles (Méndez Reátegui & Lucas Garín, 2023).
- Regulaciones ambientales: Las normativas sobre disposición de residuos son relevantes para entender el marco legal que afecta la gestión de RCD y puede influir en las decisiones operativas. La conformidad con las regulaciones ambientales es esencial para evitar sanciones y promover prácticas sostenibles (International Organization for Standardization, 2006; NCh 3849; NCh 163).
- Percepción de los actores involucrados: La opinión de operarios y directivos sobre la gestión de residuos puede influir en la implementación y aceptación de nuevas estrategias. La percepción social y empresarial sobre el reciclaje afecta su adopción (Helms & Nixon, 2010).

4.3.3. Variables de Control

Las variables de control son esenciales para asegurar que los resultados del estudio sean válidos y confiables. Estas incluyen:

- Condiciones operativas en Minera El Teniente: Factores como la infraestructura vial y las necesidades específicas de relleno pueden afectar la implementación del proyecto.
- Parámetros ambientales: Las emisiones de CO₂ y el consumo energético asociado con el proceso son importantes para evaluar el impacto ambiental total del proyecto.
- Comparación con estándares: El benchmarking proporciona un contexto adicional que permite evaluar el rendimiento relativo del proyecto frente a otras empresas.

4.3.4. Dimensiones del Estudio

Las dimensiones se agrupan en cuatro categorías principales:

- Dimensión Técnica: Incluye la caracterización de los áridos reciclados, su desempeño en la restauración y los procesos utilizados para su segregación y trituración.
- Dimensión Económica: Analiza los costos asociados a la producción frente a los métodos convencionales, así como un análisis costo-beneficio.
- Dimensión Ambiental: Evalúa el impacto ecológico derivado de la reutilización, considerando aspectos como emisiones contaminantes y cumplimiento normativo.
- Dimensión Social y Normativa: Aborda las percepciones sobre la gestión de residuos y las normativas que regulan estas actividades.

Este estudio se llevará a cabo durante un período de 15 semanas, ajustándose a las Normas Chilenas y estándares internacionales relevantes, como ISO 14001, NCh 3849 y NCh 163, que regulan la gestión ambiental y promueven prácticas más sostenibles en el manejo de residuos.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Este estudio combina métodos cualitativos y cuantitativos para analizar la gestión de residuos en Minera El Teniente. A través del estudio de caso, se identifican desafíos y oportunidades en la implementación de estrategias sostenibles. Se emplea un análisis costo-beneficio para evaluar su viabilidad económica, mientras que entrevistas y encuestas a expertos aportan información cualitativa. El benchmarking compara sus prácticas con otras empresas, y el análisis FODA examina factores clave en la reutilización de escombros. Además, se aplica un modelo de evaluación ambiental basado en el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para medir su impacto. Este enfoque integral permite generar recomendaciones fundamentadas.

4.4.1 Estudio de Caso.

El análisis de caso constituye uno de los enfoques metodológicos más empleados en la investigación aplicada, dado que permite llevar a cabo un examen exhaustivo sobre la gestión de un problema particular en una organización real, facilitando una comprensión detallada y contextualizada del fenómeno estudiado.

Aplicación del Método:

- Describir de manera detallada el proceso de gestión de escombros en la Minera El Teniente, considerando sus principales etapas y actores involucrados.

- Identificar los desafíos y las oportunidades asociados a la implementación de estrategias de economía circular y valorización de residuos en el contexto específico de la empresa.
- Realizar un análisis crítico de las decisiones empresariales adoptadas, evaluando su alineación con principios de sostenibilidad, rentabilidad y eficiencia en la gestión de proyectos.
- Incluir entrevistas con directivos o responsables del área de residuos con el fin de obtener información cualitativa que enriquezca el análisis.

Este método permite un estudio profundo de las prácticas empresariales y facilita la formulación de recomendaciones basadas en evidencia empírica, considerando las particularidades del entorno organizacional y las dinámicas internas de la empresa.

4.4.2 Análisis Costo-Beneficio

El análisis costo-beneficio es un proceso utilizado para establecer la relación entre los costos de una actividad y los beneficios que esta genera, permitiendo así evaluar su eficiencia económica. Sin embargo, su capacidad para representar de manera adecuada la efectividad social de alcanzar ciertos objetivos es limitada, especialmente cuando se trata de aspectos como los efectos mitigadores del cambio climático. Esta limitación se evidencia en su incapacidad para incluir todos los daños potenciales evitados. En este sentido, una medida de mitigación más efectiva del cambio climático no solo incide en los costos económicos, sino que también tiene un impacto directo en la eficiencia social a largo plazo (Méndez Reátegui & Lucas Garín, 2023).

Aplicación del Método:

- Identificar los costos asociados con la gestión actual de escombros, incluyendo transporte, procesamiento y eliminación.
- Estimar los beneficios económicos derivados de la reutilización de los residuos, tales como las ventas de áridos reciclados, el ahorro en la compra de materiales y la reducción de costos asociados a la eliminación de residuos.
- Realizar proyecciones financieras basadas en diferentes escenarios, considerando horizontes de corto, mediano y largo plazo

4.4.3 Entrevistas y Encuestas a Expertos y Directivos

Se realizan entrevistas semi-estructuradas con miembros de la Minera El Teniente con el objetivo de obtener información cualitativa que complementa los análisis

financieros y operativos, proporcionando una visión más profunda de las percepciones y experiencias relacionadas con la gestión de residuos y su valorización.

Aplicación del Método:

- Se elabora una guía de entrevista que explora cómo se perciben los beneficios y desafíos asociados con la reutilización de escombros, específicamente en términos de sostenibilidad y rentabilidad.
- Se implementan encuestas a una muestra representativa del personal para recabar opiniones sobre el impacto ambiental, la eficiencia operativa y los resultados financieros derivados de la valorización de residuos.
- Se analizan las respuestas para identificar tendencias comunes, así como áreas de mejora y oportunidades no contempladas en los análisis previos.

4.4.4. Benchmarking

El benchmarking en la industria minera es un proceso sistemático que permite comparar las prácticas y resultados de una empresa minera, como Minera El Teniente, con los de otras empresas mineras o industrias que han implementado con éxito programas de gestión de residuos y valorización de materiales (Sanhueza et al 2008). Este enfoque busca identificar las mejores prácticas en la reutilización de residuos y sostenibilidad, mejorando así el rendimiento operativo y fomentando la innovación.

Entre sus componentes clave, considera:

- Comparación de Prácticas: Se analizan las metodologías utilizadas por otras organizaciones para gestionar residuos y aplicar estrategias de economía circular.
- Evaluación de Resultados: Se comparan los resultados operativos, financieros y sostenibles, lo que permite identificar áreas de mejora y oportunidades para optimizar las prácticas actuales.
- Generación de Recomendaciones: A partir de los casos de éxito identificados, se pueden formular recomendaciones fundamentadas que contribuyan a la mejora continua de los procesos en Minera El Teniente.

Este enfoque no solo ayuda a contextualizar el desempeño de Minera El Teniente dentro del marco más amplio del sector minero, sino que también promueve un ciclo de aprendizaje y adaptación que puede resultar en prácticas más sostenibles y eficientes.

La utilización de escombros reciclados en la industria de la construcción ha emergido como una práctica clave para promover la sostenibilidad y la economía circular a nivel global. A continuación, se presentan diversos casos destacados que ilustran cómo distintos países han implementado esta tecnología, abordando tanto la innovación en el uso de materiales reciclados como su impacto en la reducción de residuos y huella de carbono.

4.4.4.1 Revisión de casos de hormigones reciclados en el mundo

Europa: Innovación en Construcción Sostenible

- Países Bajos: En el proyecto Rijkswaterstaat, que se lleva a cabo en las principales carreteras nacionales, se ha utilizado árido reciclado derivado de los escombros de edificios demolidos. Este enfoque no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también ha permitido una disminución significativa de la huella de carbono asociada a las infraestructuras viales.
- Suiza: La implementación de la norma SIA 2030 ha promovido el uso de áridos reciclados en hormigones estructurales. Este enfoque ha sido aplicado con éxito en la construcción de edificios residenciales y comerciales, consolidando a Suiza como un referente en la construcción sostenible.
- Reino Unido: En el sistema ferroviario Crossrail de Londres, los áridos reciclados se han utilizado en la construcción de túneles y estaciones. Este uso ha permitido reducir los costos de materiales en un 30% y ha demostrado la viabilidad de aplicar hormigones reciclados en proyectos de gran envergadura.

América del Norte: Escalabilidad del Hormigón Reciclado

- Estados Unidos: En la construcción de la Freedom Tower en Nueva York, se incorporaron áridos reciclados en pavimentos, lo que resultó en una reducción del 25% en los costos de materiales. Este ejemplo resalta el potencial económico del uso de materiales reciclados en grandes proyectos de infraestructura.
- Canadá: Universidades como la de Toronto han llevado a cabo investigaciones sobre el uso de hormigón reciclado con cenizas volantes, lo que no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también disminuye las emisiones de CO₂ en el sector de la construcción.

Asia: Innovaciones Tecnológicas y Escalabilidad

- **Japón:** La tecnología Smart Recycling ha sido clave en la implementación de procesos avanzados para separar áridos de alta calidad de los escombros. Este tipo de reciclaje se ha aplicado principalmente en la construcción de viviendas prefabricadas, permitiendo la reutilización eficiente de materiales sin comprometer la calidad estructural.
- **China:** A nivel nacional, China ha adoptado el uso de hormigón reciclado en infraestructuras públicas de gran escala, como puentes y carreteras. Este enfoque ha permitido reducir la demanda de materiales vírgenes y ha sido fundamental en la construcción de ciudades sostenibles.
- **Oceanía: Liderazgo en Construcción Sostenible**
- **Australia:** El proyecto Barangaroo Reserve en Sídney ha sido un ejemplo destacado de cómo la reutilización de áridos reciclados puede contribuir a la sostenibilidad. En este proyecto se emplearon materiales reciclados en paisajismo y estructuras no críticas, logrando una reducción del 60% en el uso de recursos vírgenes.

América Latina: Potencial en Desarrollo

- **Chile:** En 2021, estudios realizados por la Universidad de Chile demostraron que el hormigón reciclado, cuando se utiliza con aditivos adecuados, puede mantener las propiedades mecánicas necesarias para su aplicación en obras de construcción. Este hallazgo representa un avance significativo en el uso de materiales reciclados en la construcción nacional.
- **Brasil:** En São Paulo, el uso de hormigón reciclado en pavimentos urbanos ha permitido una reducción de costos y ha contribuido a la disminución de la extracción de áridos naturales.

4.4.4.2 Casos de uso de hormigones reciclados en Chile.

- **Proyecto Piloto de Áridos Reciclados en Obras Civiles:** En 2021, la Universidad de Chile llevó a cabo un estudio sobre el uso de áridos reciclados en mezclas de hormigón estructural. Los resultados demostraron que el hormigón reciclado puede ser utilizado de manera efectiva en construcciones de gran envergadura, abriendo la puerta a su implementación en proyectos a nivel nacional.
- **Vivienda Social con Materiales Reciclados:** En la Región Metropolitana de Chile, se utilizó hormigón reciclado en la construcción de fundaciones de viviendas sociales. Este enfoque permitió un ahorro del 15% en los costos de

materiales, demostrando el potencial económico y ambiental de los áridos reciclados en el sector de la vivienda.

- **Uso de RCD en Infraestructura Pública:** El Ministerio de Obras Públicas (MOP) de Chile ha implementado la reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) en pavimentos rurales. Esta estrategia ha permitido disminuir la extracción de áridos naturales y ha sido un ejemplo de cómo la reutilización de escombros puede ser aplicada a gran escala en infraestructura pública.

En resumen, estos casos de estudio demuestran que el uso de hormigón reciclado y la valorización de residuos son prácticas viables y beneficiosas tanto desde el punto de vista económico como ambiental. A medida que la tecnología y las normativas de reciclaje avanzan, se prevé que su adopción en proyectos de construcción en Chile y el mundo continúe creciendo, promoviendo una mayor sostenibilidad en el sector.

4.4.5. Análisis FODA (SWOT Analysis)

El análisis FODA es una herramienta estratégica ampliamente utilizada para identificar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de una organización en un entorno específico. En el caso de la reutilización de escombros mineros, esta metodología resulta esencial para evaluar el potencial de sostenibilidad y rentabilidad empresarial de las iniciativas propuestas. Según Helms y Nixon (2010), el análisis FODA permite comprender la posición estratégica de una organización y facilita la formulación de estrategias efectivas al integrar factores internos y externos.

Para aplicar el análisis FODA en este contexto, se realizará un enfoque específico en la gestión de escombros en Minera El Teniente. Este análisis permitirá identificar los elementos clave que afectan la implementación de estrategias sostenibles. Entre las oportunidades destacan las nuevas normativas que promueven la sostenibilidad ambiental y los avances tecnológicos en procesos de reciclaje, los cuales incrementan la eficiencia operativa (Geissdoerfer et al., 2018). Asimismo, se explorará el creciente interés del mercado por prácticas empresariales sostenibles, lo que puede mejorar la competitividad y reputación corporativa.

Por otro lado, también es crucial reconocer las amenazas que pueden surgir, tales como los altos costos iniciales asociados a la implementación de tecnologías avanzadas y las regulaciones más estrictas que podrían incrementar los requerimientos operativos. Además, se debe tener en cuenta la competencia en el

sector minero, que podría limitar el acceso a mercados emergentes o recursos financieros (Helms & Nixon, 2010).

En síntesis, el análisis FODA no sólo permite evaluar los factores internos y externos que afectan a una organización, sino que también constituye una base sólida para desarrollar estrategias orientadas a maximizar el aprovechamiento de recursos y minimizar riesgos. Este enfoque resulta particularmente relevante en industrias como la minería, donde convergen desafíos ambientales, económicos y sociales que demandan soluciones innovadoras y sostenibles.

4.4.6. Modelo de Evaluación de Impacto Ambiental

Dado que la reutilización de residuos está intrínsecamente vinculada a la sostenibilidad, es fundamental incluir una evaluación del impacto ambiental de las estrategias de valorización. Para aplicar este modelo, se utilizarán herramientas de evaluación como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), que permite medir el impacto de la gestión de escombros en términos de emisiones de carbono, uso de recursos y reducción de residuos (International Organization for Standardization, 2006). El LCA proporciona un enfoque cuantitativo que facilita la comparación entre el impacto ambiental del proceso tradicional de eliminación de escombros y las alternativas de reciclaje y reutilización. Esta comparación no solo ayuda a identificar las mejores prácticas, sino que también ofrece un respaldo cuantitativo a la reducción del impacto ambiental, lo que puede fortalecer la propuesta empresarial.

Para desarrollar este análisis, se aplica un enfoque integral que incluye un estudio de caso sobre las estrategias utilizadas en Minera El Teniente. Este se complementa con entrevistas a expertos y un análisis costo-beneficio para evaluar la viabilidad económica. Además, se incorpora un análisis comparativo (benchmarking) y una evaluación exhaustiva del impacto ambiental para obtener una perspectiva completa sobre los beneficios y desafíos asociados con la gestión sostenible de escombros mineros. Este enfoque permite integrar prácticas sostenibles en el sector minero, contribuyendo a un desarrollo más responsable y alineado con los objetivos globales de sostenibilidad.

4.5 Desarrollo de la propuesta.

Este proyecto se realizó en el CMRIS de Codelco, específicamente en el Patio 11 (figura 3), donde se recolectaron, segregaron y trituraron RCD para su reutilización

como áridos reciclados. El estudio se enfoca en los procesos seguidos en la etapa 1 del plan de trabajo (figura 4), que incluyeron la generación de 1.000 m³ de áridos reciclados para su aplicación en los patios 1 y 2.

Figura 3 patio ejecución piloto RCD.



Figura 4 banco realización piloto RCD

A continuación, se presenta una tabla que resume los materiales necesarios para el proyecto, incluyendo especificaciones sobre superficie, volumen y transporte. Se requiere intervenir una superficie de 10.000 m² o 1 hectárea (ha) con una altura de 10 cm, lo que equivale a un volumen de 1.000 m³. Con una densidad de 2,0, esto se

traduce en un total de 2.000 toneladas de material. Para su transporte, se utilizarán camiones tolva con capacidad de 15 m³, lo que implica un total de 67 viajes necesarios para completar la operación.

Material Requerido		
Superficie	10.000	m ² (1 ha)
Altura	0,1	m (10 cm)
VOLUMEN-1	1.000	m ³
Tasa m ³ = ton	2,0	densidad
VOLUMEN-2	2.000	ton
Camión tolva	15	m ³
TOTAL	67	camionadas

Tabla 1. Antecedentes del ensayo piloto.

El desarrollo de la propuesta se estructura en varias etapas que permiten una gestión integral de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en el CMRIS de Codelco. Estas etapas son fundamentales para garantizar la correcta recolección, segregación y procesamiento de los materiales, comenzando con la demarcación de terrenos, seguida por la segregación inicial y finalizando con la trituración de los lotes definidos. Cada fase está diseñada para optimizar el uso de los recursos y maximizar la generación de áridos reciclados, contribuyendo así a los objetivos de sostenibilidad y economía circular de la empresa. A continuación, se detallarán las distintas subfases que componen este proceso.

4.5.1 Demarcación de Terrenos:

Como parte del proceso de restauración en los patios 1 y 2, se delimitó la superficie a intervenir, comenzando desde el extremo sur del banco superior del Patio 11 (figura 5). Para ello, se establecieron cinco lotes iniciales, cada uno con una superficie de 500 m² y una profundidad de 1 m, equivalentes a un volumen de 500 m³ por lote.

- **Etapas 1:** LOTE-1 (500 m³) LOTE-2 (500 m³)
- **Etapas 2:** LOTE-3 (500 m³) LOTE-4 (500 m³) LOTE-5 (500 m³)
- **Total:** 2.500 m³

Es esencial medir y demarcar con precisión las superficies de los lotes establecidos, asegurando su correcta identificación. Además, considerando una densidad aparente de 2, cada metro cúbico de material equivale a un peso de 2 toneladas, lo que resulta clave para la planificación y manejo eficiente de los recursos involucrados.

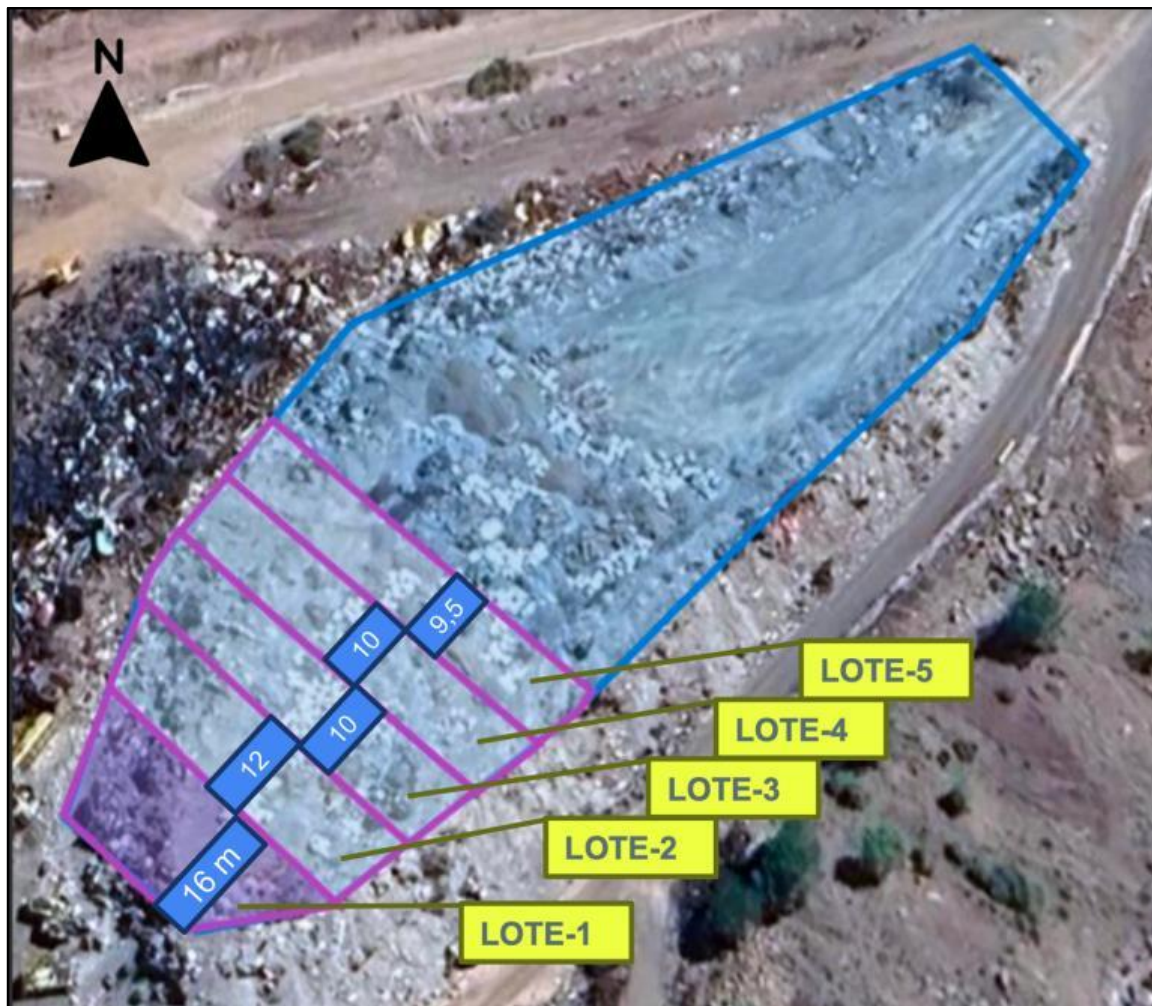


Figura 5: Separación lotes prueba ensayo.

4.5.1 Segregación Inicial

La segregación inicial se llevará a cabo en los lotes designados, comenzando con el LOTE-1 y continuando hasta el LOTE-5. Durante esta fase, se procederá a la remoción del material superficial, con el objetivo de eliminar la mayor proporción posible de contaminantes que no correspondan a Residuos de Construcción y

Demolición (RCD). Para esta tarea, se utilizará una excavadora equipada con garra, que facilitará la separación eficiente de los materiales.

El propósito de esta actividad es despejar la superficie de los cinco lotes, permitiendo así un acceso más fácil para el posterior cargado del material destinado a ser triturado con el equipo ARJES-BANDIT. Los contaminantes retirados se clasificarán en varias categorías, lo que permitirá su pesaje y valorización posterior. Las categorías de separación incluirán:

- Elementos ferrosos
- Plásticos
- Maderas
- Otros

Una vez segregados, estos contaminantes serán acopiados en la Zona C1, tal como se indica en el mapa del sitio (figura 6). Esta organización no solo optimiza el proceso de gestión de residuos, sino que también contribuye a maximizar la recuperación de materiales reciclables y minimizar el impacto ambiental del proyecto.

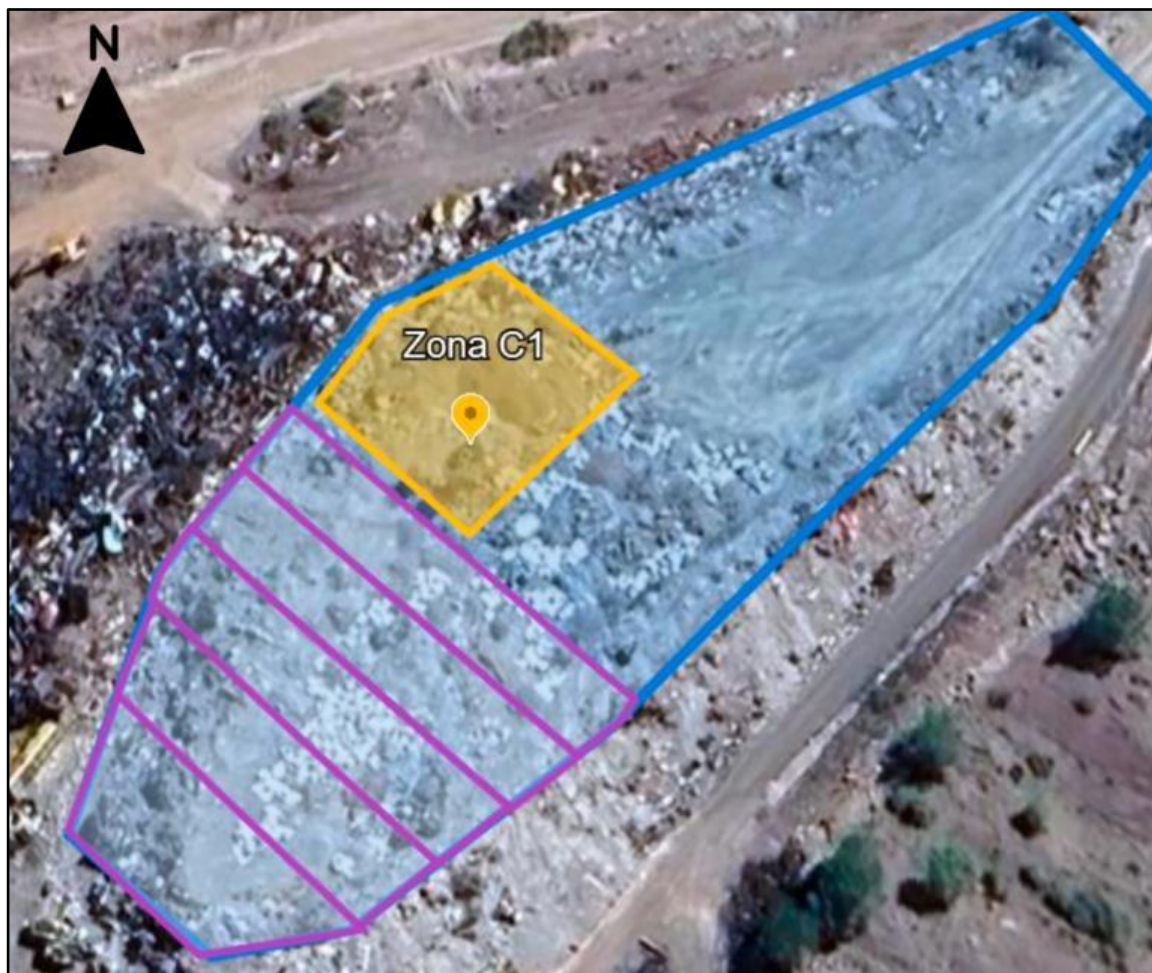


Figura 6. Lugar disposición residuos contaminados.

Los residuos valorizables obtenidos de este trabajo de segregación inicial deberán ser pesados y debidamente registrados para el posterior cálculo de cobro (figura 7). Este registro es esencial para garantizar la trazabilidad y cuantificación precisa de los materiales recuperados, permitiendo un control efectivo sobre su valorización económica dentro del proyecto.

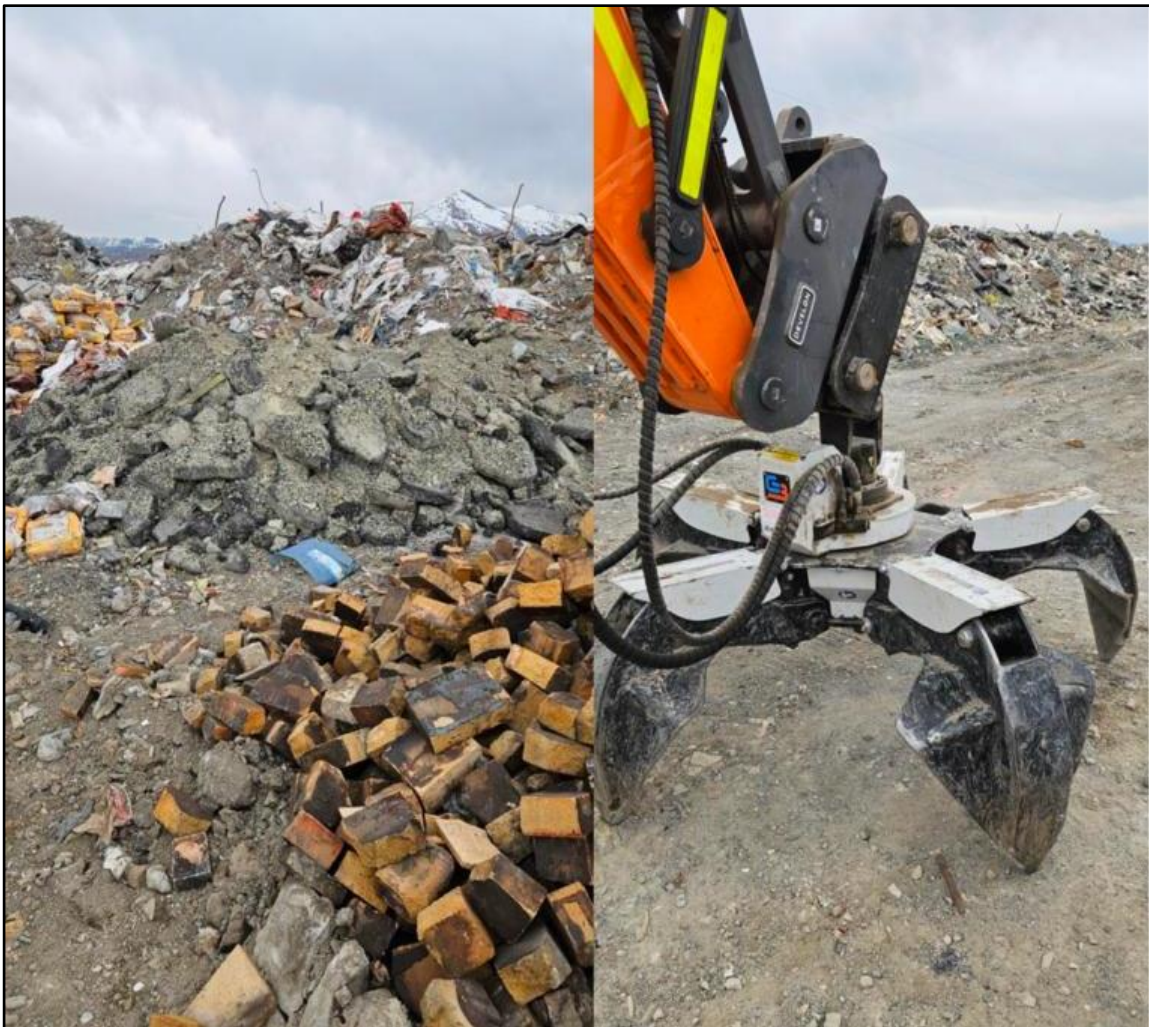


Figura 7. Separación de residuos.

4.5.2 Trituración Lote-1 Y Lote-2

En esta fase del proyecto, se procederá a la trituración del 100% del material correspondiente al LOTE-1 y LOTE-2, que equivale aproximadamente a 1.000 m³ o 2.000 toneladas (figura 8). Este proceso de trituración es fundamental, ya que genera tres productos valorizados que pueden ser reutilizados en diversas aplicaciones:

- Fierros y materiales ferrosos
- Árido reciclado entre 2,5–5 pulgadas
- Árido reciclado bajo 2,5 pulgadas

El enfoque principal de esta etapa se centrará en los dos tipos de áridos generados, aunque también se gestionará el primer producto obtenido, es decir, el fierro. Este material será acumulado en contenedores para su posterior pesaje, lo que permitirá determinar el porcentaje que representa respecto al total procesado. De esta manera, se asegura una gestión eficiente de los recursos recuperados y se contribuye a los objetivos de sostenibilidad del proyecto.



Figura 8. Separación lotes 1 y 2.

El material procesado del LOTE-1 y LOTE-2 deberá ser acopiado en los sectores demarcados en el mapa en color amarillo y rojo, según su tamaño (figura 9). Es importante mantener claramente separados e identificados los materiales de cada lote procesado, divididos por tamaño. Se generarán cuatro pilas de material:

- Lote-1 - Pila-1: tamaño 2,5" - 5" (grueso)
- Lote-1 - Pila-2 : tam. bajo 2,5" (fino)
- Lote-2 - Pila-3 : tamaño 2,5" - 5" (grueso)
- Lote-2 - Pila-4 : tam. bajo 2,5" (fino)

Estas pilas deberán ser acopiadas con una altura no superior a 1 metro para facilitar la toma de muestras una vez finalizado el proceso de triturado. Este manejo cuidadoso no solo optimiza la gestión de los materiales reciclables, sino que también asegura la

calidad y trazabilidad de los productos obtenidos para su posterior utilización en proyectos constructivos.



Figura 9. Acopio lote 1 y lote 2, según granulometría.

Se deberá marcar de forma clara y visible cada una de las pilas de material y el correspondiente lote al que pertenece, utilizando la siguiente denominación:

- Lote-1 - Pila-1: tamaño 2,5" - 5" (grueso)
- Lote-1 - Pila-2: tamaño bajo 2,5" (fino)
- Lote-2 - Pila-3: tamaño 2,5" - 5" (grueso)
- Lote-2 - Pila-4: tamaño bajo 2,5" (fino)



Figura 10. Acopio material ferroso.

Es crucial procurar no contaminar estas pilas de material con ningún otro tipo de residuo. El material ferroso que se obtenga del proceso de trituración (figura 11) también deberá ser almacenado e identificado correctamente para evitar su contaminación con otros residuos. Se establecerán las siguientes categorías para el almacenamiento del material ferroso:

- Lote-1 – Ferrosos
- Lote-2 – Ferrosos

Este manejo cuidadoso no solo optimiza la gestión de los materiales reciclables, sino que también asegura la calidad y trazabilidad de los productos obtenidos para su posterior utilización en proyectos constructivos (figura 12) .



Figura 11. Trituración del material.



Figura 12. Producto de trituración separados por granulometría.

4.6 Análisis de Áridos

El muestreo se aplicará sobre cada pila de material definida e identificada en el Paso 3 (figura 13 y 14). Se utilizarán dos técnicas de muestreo, dependiendo de las indicaciones del laboratorio de destino:

- a) **Muestreo de Canal:** Esta técnica consiste en crear un canal o zanja a través de la pila de áridos, permitiendo la recolección de material de toda la sección expuesta. Es efectiva para evaluar la homogeneidad del volumen total.
- b) **Muestreo con cuerda con nudos:** Este es un método sistemático y de bajo costo que utiliza una cuerda marcada con nudos a intervalos regulares. La cuerda se extiende sobre o a través del material a muestrear, y en cada nudo se recolecta una muestra del material subyacente.



Figura

13. Toma muestreos hormigón.

Se realizaron dos muestras por pila, con un peso de 200 kg cada una, distribuidas en sacos de 25 kg.



Figura 14. Inspección de material triturado.

Las muestras representativas de los áridos reciclados se analizarán para evaluar su tamaño, composición y calidad, determinando así su aptitud para la restauración de suelos.

c) Continuidad recepción RCD:

Durante la duración de la ETAPA 1 del Proyecto, el Patio 11 seguirá recibiendo RCD. Por ello, se ha definido una zona de Acopio RCD, marcada en color café en el mapa (figura 15), que estará acotada para no entorpecer los trabajos contemplados en esta etapa. Esta zona deberá ser demarcada de forma clara y visible para los transportistas, ya que se generan ingresos y botadura de RCD en días y horas en que no hay personal presente de Ambipar en el CMRIS.

Además, se establecerá un límite claramente identificado con *NO PASAR* para asegurar que no haya contaminación ni pérdida de material asociados a esta ETAPA 1. En la imagen adjunta se aprecian todas las áreas mencionadas que se trabajarán

durante esta etapa del Plan de Trabajo, así como las zonas de tránsito para maquinarias y personas.

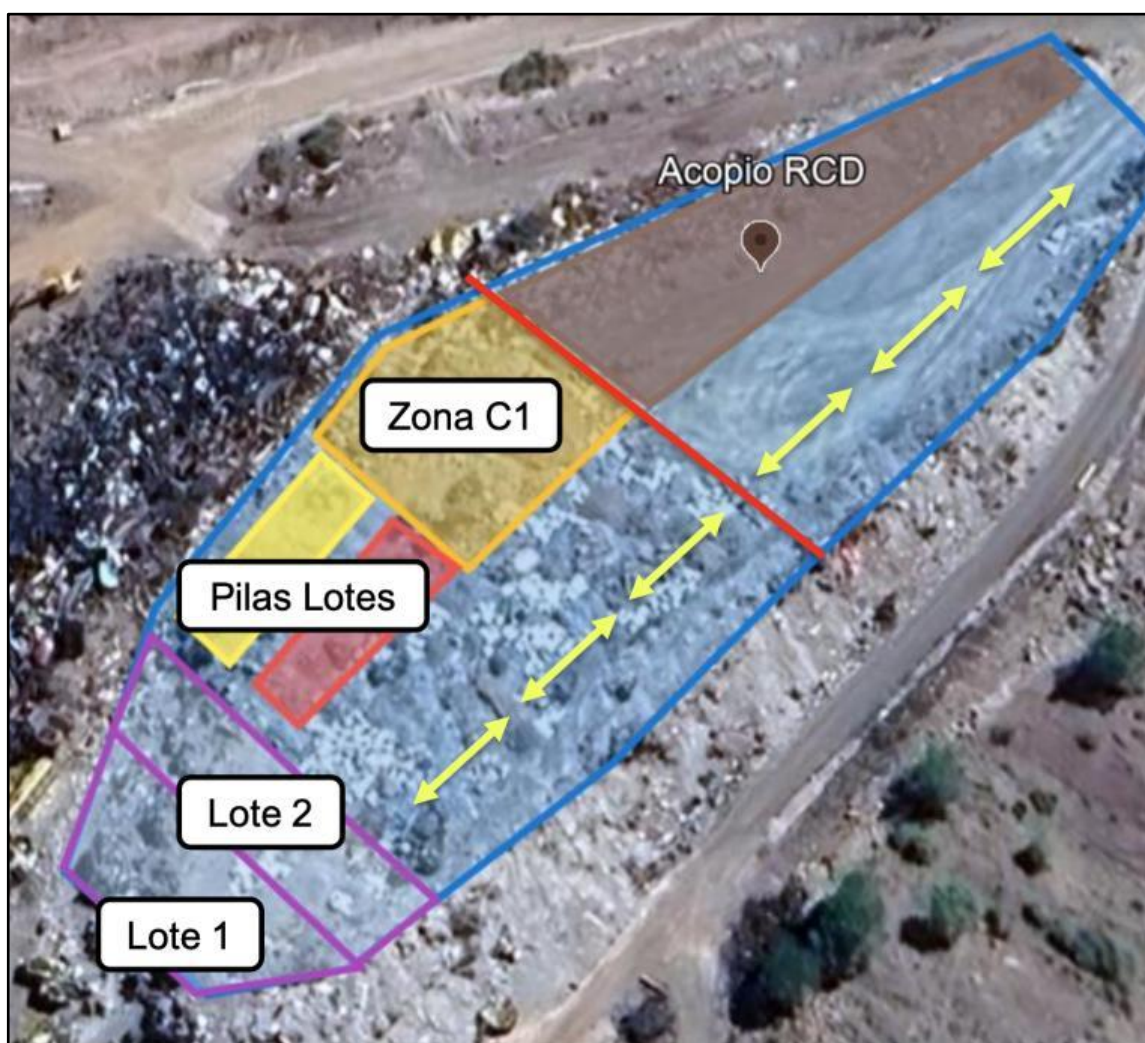


Figura 15. Acopio RCD nuevos.

4.7 Limitaciones del Estudio.

El desarrollo de esta investigación presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al momento de interpretar los resultados y propuestas. Estas limitaciones están relacionadas con el alcance del estudio, la disponibilidad de datos y las restricciones prácticas en la ejecución del proyecto:

- Disponibilidad limitada de datos: Debido a la confidencialidad de la información manejada por Codelco, no fue posible acceder a datos detallados sobre costos operativos, procesos internos y volúmenes exactos de escombros reciclados en el Centro de Manejo de Residuos Industriales (CMRIS). Esta restricción afectó la precisión de los análisis financieros y ambientales, particularmente en escenarios específicos de evaluación.
- Disponibilidad limitada de datos: Debido a la confidencialidad de la información manejada por Codelco, no fue posible acceder a datos detallados sobre costos operativos, procesos internos y volúmenes exactos de escombros reciclados en el Centro de Manejo de Residuos Industriales (CMRIS). Esta restricción afectó la precisión de los análisis financieros y ambientales, particularmente en escenarios específicos de evaluación.
- Restricciones metodológicas y de alcance: El estudio se centró exclusivamente en la reutilización de escombros como material de relleno para caminos interiores dentro de la operación minera, excluyendo otras posibles aplicaciones como la fabricación de hormigones reciclados o su uso en obras civiles externas. Estas decisiones estuvieron condicionadas por la disponibilidad de tiempo, recursos técnicos y financieros, limitando la amplitud de las propuestas desarrolladas.
- Tamaño y ubicación de la muestra: Las operaciones analizadas se limitaron al Patio 11 del CMRIS en Minera El Teniente, excluyendo otras áreas de acumulación de escombros dentro de la misma división y en otras divisiones de Codelco. Esto redujo la posibilidad de realizar un análisis comparativo entre diferentes sitios, tanto a nivel nacional como internacional, debido a limitaciones logísticas y presupuestarias.
- Análisis incompleto del desempeño a largo plazo: Si bien se realizaron pruebas de caracterización iniciales de los áridos reciclados, no se llevó a cabo un

análisis exhaustivo sobre el desempeño a largo plazo de estos materiales en caminos interiores. Las pruebas de laboratorio y terreno se limitaron a las etapas iniciales del proyecto piloto, dejando abierto el análisis de su comportamiento bajo condiciones operativas prolongadas.

- Factores climáticos y temporales: Las condiciones climáticas específicas durante los meses de mayo a septiembre, caracterizadas por precipitaciones y dificultades de acceso al sitio, restringieron la continuidad de las operaciones en terreno. Esto limitó el desarrollo del proyecto en un marco temporal más amplio y afectó la recolección de datos consistentes durante todo el año.
- Estimaciones económicas proyectadas: Los análisis de costo-beneficio realizados se basan en proyecciones estáticas que no consideraron posibles fluctuaciones en costos futuros, como los asociados al transporte, la energía o la maquinaria. Este enfoque introduce un margen de incertidumbre respecto a la viabilidad económica del proyecto en el largo plazo.
- Cambios normativos potenciales: Si bien la investigación consideró los estándares regulatorios ambientales y mineros vigentes en Chile, no abordó en profundidad los posibles impactos de modificaciones futuras en la normativa, lo que podría afectar la implementación y sostenibilidad de las estrategias propuestas.

El reconocimiento de estas limitaciones resulta fundamental para interpretar de manera adecuada los resultados obtenidos y contextualizar las propuestas desarrolladas. Comprender los alcances y restricciones del estudio no solo permite valorar sus aportes dentro de los márgenes establecidos, sino también identificar los desafíos inherentes al abordaje de problemas complejos en el ámbito minero, reforzando la importancia de un análisis crítico en la toma de decisiones.

5. Resultados

5.1 Caracterización de los Áridos Reciclados

Se obtuvieron dos tipos principales de áridos reciclados: grueso (2,5 a 5 pulgadas) y fino (menos de 2,5 pulgadas). Los áridos reciclados fueron adecuados para su uso en la restauración de los patios seleccionados.

5.1.1 Aspectos clave de la NCh 3849:2024

- Clasificación, caracterización y directrices para la trazabilidad y valorización de RCD inertes no peligrosos.
- Clasificación por composición de áridos reciclados.
- Evaluaciones de trazabilidad y parámetros químicos como cloruros, sulfatos y densidades.
- Directrices sobre el contenido de impurezas y tipos de RCD.

5.1.2. Análisis de los informes

5.1.2.1. Informe 1 (Muestra Gruesa)

- **Rc (hormigón):**
 - o **Medido:** 69% (dentro del límite máximo de 70%).
 - o Cumple con la norma.
- **Ru (áridos y piedra natural):**
 - o **Medido:** 15% (muy por debajo del límite máximo de 80%).
 - o Cumple ampliamente con la norma, aunque el porcentaje es relativamente bajo.
- **Rb (ladrillos, tejas y cerámico):**
 - o **Medido:** 11% (supera el límite máximo de 10%).
 - o **No cumple** con la norma, ya que hay un exceso en este componente.
- **Ra (mezclas asfálticas):**
 - o **Medido:** 1% (dentro del límite máximo de 5%).
 - o Cumple con la norma.

- **Rx (impropios):**
 - **Medido:** 0% (dentro del límite máximo de 1%).
 - Cumple con la norma.

La muestra gruesa cumple con la mayoría de los parámetros, excepto en el porcentaje de **Rb (ladrillos, tejas y cerámico)**, que está ligeramente por encima del límite permitido.

Este material puede usarse como estabilizado según los resultados Rb, Ra, Rg y Rx (son los contaminantes) estos deben tener hasta un 6% de impurezas.

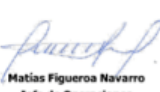
RESULTADOS ENSAYOS	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE	
Fecha de ensayo	25-oct-2024
Densidad aparente compactada (kg/m ³)	1.390
Densidad aparente suelta (kg/m ³)	1.200
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS GRAVAS	
Fecha de ensayo	29 y 30-oct-2024
Densidad real árido sss (kg/m ³)	2.580
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2.500
Densidad neta (kg/m ³)	2.710
Absorción de agua (%)	3,1
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN ÁRIDOS SUELTOS	
Contenido de huecos (%)	52
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN ÁRIDOS COMPACTADOS	
Contenido de huecos (%)	44
DETERMINACIÓN DEL DESGASTE DE LAS GRAVAS POR EL MÉTODO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	
Fecha de ensayo	25 a 29-oct-2024
Grado de ensayo	1
Fracción de ensayo, mm	80 - 40
Pérdida de masa de la muestra (%)	26
DETERMINACIÓN DE CLORUROS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	25 a 30-oct-2024
Contenido de cloruros (kg Cl / kg de árido)	31 x10 ⁻⁴
Contenido de cloruros (%)	0,0031
DETERMINACIÓN DE SULFATOS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	28 a 30-oct-2024
Contenido de sulfatos (kg SO ₄ ²⁻ / kg de árido)	108 x10 ⁻⁵
Contenido de sulfatos (%)	0,0108
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3562:2019	
Clasificación y valorización de los RCD, según Anexo A. Tabla A.1 de la NCH 3562:2019	
No peligroso	No inerte
Códigos encontrados en la muestra	
17 04 02 - 17 04 07 - 17 08 02 - 17 02 07 - 17 02 03 - 20 01 01	
No peligroso	Asimilable a domiciliario
20 01 10 - 20 02 01	
No peligroso	Inerte
17 01 01 - 17 01 02 - 17 01 03	
CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LOS ÁRIDOS GRUESOS RECICLADOS (UNE EN 933-11)	
Tipo de material constituyente:	% en peso de sus componentes principales
Rc (hormigón, productos de hormigón, prefabricados y mortero de cemento)	15%
Ru (áridos y piedra natural, sin mortero adherido)	69%
Rb (ladrillos, tejas y material cerámico)	11%
Ra (mezclas asfálticas)	1%
Rg (vidrio)	0%
Rx (materiales impropios: yeso, metales, madera no flotante, plástico, entre otros)	1%
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3849-2024	
Clasificación por composición de árido reciclado, según Tabla 1 de la NCH 3849-2024	ARME: Árido reciclado mixto de hormigón
Observación: Las densidades y absorción informados no cumplen con los criterios de aceptación de resultados de la norma NCH 1117 en los numerales 10.3.1 a) y b), y 10.3.2, repitiéndose en 3 oportunidades con muestras gemelas, obteniendo diferencias entre ellas por sobre lo indicado en los numerales ya mencionados.	
 Matías Figueroa Navarro Jefe de Operaciones División Hormigones Ingeniería	  Miguel Ángel González Talep Jefe de Proyectos División Hormigones Ingeniería

Tabla 2. Resultados muestreo n°1.

5.1.2.2. Informe 2 (Muestra Fina)

- Rc (hormigón):
- Medido: 8% (muy por debajo del límite máximo de 70%).
 - Cumple ampliamente con la norma, pero indica una baja proporción de hormigón.
- Ru (áridos y piedra natural):
 - Medido: 79% (cerca del límite máximo de 80%).
 - Cumple con la norma.
- Rb (ladrillos, tejas y cerámico):
 - Medido: 2% (muy por debajo del límite máximo de 10%).
 - Cumple con la norma.
- Ra (mezclas asfálticas):
 - Medido: 2% (dentro del límite máximo de 5%).
 - Cumple con la norma.
- Rx (impropios):
 - Medido: 2% (supera el límite máximo de 1%).
 - No cumple con la norma debido al exceso de materiales impropios.

La muestra fina cumple con todos los parámetros, excepto en el porcentaje de Rx (impropios), que excede el límite permitido.

RESULTADOS ENSAYOS	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE	
Fecha de ensayo	24-oct-2024
Densidad aparente compactada (kg/m ³)	1.720
Densidad aparente suelta (kg/m ³)	1.580
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS ARENAS	
Fecha de ensayo	24 y 25-oct-2024
Densidad real árido sss (kg/m ³)	2.350
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2.190
Densidad neta (kg/m ³)	2.620
Absorción de agua (%)	7,40
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN LOS ÁRIDOS SUELTOS	
Contenido de huecos (%)	28
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN LOS ÁRIDOS COMPACTADOS	
Contenido de huecos (%)	22
DETERMINACIÓN IMPUREZAS ORGÁNICAS	
Fecha de ensayo	24 y 25-oct-2024
Coloración de la solución en estudio	Más Clara
Vidrio de color N°	No Presenta
Interpretación	1
DETERMINACIÓN DE CLORUROS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	28-oct a 06-nov-2024
Contenido de cloruros (kg Cl ⁻ / kg de árido)	535 x10 ⁻⁶
Contenido de cloruros (%)	0,0535
DETERMINACIÓN DE SULFATOS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	28-oct a 06-nov-2024
Contenido de sulfatos (kg SO ₄ ⁻² / kg de árido)	2.567 x10 ⁻⁶
Contenido de sulfatos (%)	0,2567
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3562:2019	
Clasificación y valorización de los RCD, según Anexo A. Tabla A.1 de la NCh 3562:2019	
Códigos encontrados en la muestra	
No peligroso	No inerte
17 09 04 - 17 08 02 - 17 02 03 - 20 01 01	
No peligroso	Asimilable a domiciliario
20 01 10 - 20 02 01	
No peligroso	Inerte
17 01 01 - 17 01 02 - 17 01 03	
CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LOS ÁRIDOS GRUESOS RECICLADOS (UNE EN 933-11)	
Tipo de material constituyente:	% en peso de sus componentes principales
Rc (hormigón, productos de hormigón, prefabricados y mortero de cemento)	8%
Ru (áridos y piedra natural, sin mortero adherido)	79%
Rb (ladrillos, tejas y material cerámico)	2%
Ra (mezclas asfálticas)	2%
Rg (vidrio)	0%
Rx (materiales improprios: yeso, metales, madera no flotante, plástico, entre otros)	2%
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3849-2024	
Clasificación por composición de árido reciclado, según Tabla 1 de la NCh 3849-2024	ARMf: Árido reciclado mixto de hormigón


Matías Figueroa Navarro
 Jefe de Operaciones
 División Hormigones Ingeniería


Idiem
 INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES
 LEY 19799


Miguel Angel González Talep
 Jefe de Proyectos
 División Hormigones Ingeniería

Tabla 3. Resultados muestreo n°2.

Ambas muestras presentan características que limitan su uso directo en aplicaciones estructurales debido a los componentes que exceden los límites establecidos por la norma. Sin embargo, estos áridos reciclados podrían ser utilizados en:

- Bases y subbases de pavimentos.
- Rellenos y terraplenes.
- Morteros y productos prefabricados no estructurales, como bloques o adoquines.

5.2 Eficiencia en la Restauración de Superficies

Los 1.000 m³ de áridos reciclados fueron suficientes para cubrir la superficie de 1 hectárea con una capa de 10 cm. El proceso fue más eficiente en términos de costos y tiempo en comparación con alternativas tradicionales.

5.2.1 Evaluación de Costos y Emisiones para el Proyecto de Reciclaje Escombros.

Cantidad total de escombros: 900.000 toneladas acumuladas en el Centro de Manejo de Residuos (CMRIS)

- Desarrollo Piloto : 50.000 toneladas
- Capacidad del tratamiento local (reciclaje): 250 toneladas diarias, excluyendo restricciones climáticas (mayo a septiembre).
- Costo del tratamiento local (valorización AMBIPAR): \$18.600 por tonelada.
- Costo del transporte y disposición en relleno externo: \$38.000 por tonelada; casa camión puede transportar 22 m³ en cada recorrido
- Costo de transporte: Incluye una distancia de 122 km (ida y regreso) al relleno autorizado, considerando emisiones y desgaste vehicular.
- Si se compra una tonelada de estabilizado puestas en faena minera son \$ 48.000 m³; 1m³ son 2 toneladas
- Valor presente de beneficios ambientales: Reducción de CO₂ y uso de recursos no renovables.

Parámetro	Valor
Cantidad total de escombros	900.000 toneladas
Desarrollo piloto	50.000 toneladas
Capacidad de reciclaje	250 toneladas/día
Restricciones climáticas	Mayo a septiembre (excluidos)
Costo tratamiento local	\$18.600/tonelada
Costo transporte y disposición	\$38.000/tonelada
Transporte y distancia al relleno	56 km (ida)
Camión capacidad	22 m ³ ≈ 44 toneladas (1 m ³ ≈ 2 t)
Costo estabilizado puesto en faena	\$48.000/m ³ (\$24.000/tonelada)

Tabla 4. Parámetros a considerar para los análisis económicos y ambientales.

Concepto	Piloto (50.000 t)	Total (900.000 t)
Costo Tratamiento Local (Reciclaje)	\$930.000.000 CLP	\$16.740.000.000 CLP
Costo Transporte y Disposición Externa	\$1.900.000.000 CLP	\$34.200.000.000 CLP
Ahorro Total (Reciclaje vs Transporte)	\$970.000.000 CLP	\$17.460.000.000 CLP

Tabla 5. Resultados generales del proyecto.

5.2.2 Análisis Económico

- **Reciclaje Local:**
 - Presenta costos significativamente menores en comparación con el transporte y disposición externa.
 - A nivel de piloto, el ahorro es de \$970.000.000 CLP; mientras que, para la gestión total de los 900.000 toneladas, el ahorro asciende a \$17.460.000.000 CLP.

- Transporte y Disposición Externa:
 - Aunque es una solución viable, los costos asociados son notablemente más altos, incrementados por el transporte a largas distancias.

El tratamiento local mediante reciclaje es económicamente más eficiente, con un ahorro promedio de 51% en comparación con la disposición externa. Además de los beneficios económicos, esta alternativa tiene un menor impacto ambiental, al reducir las emisiones asociadas al transporte y fomentar la reutilización de materiales en obras civiles, como rellenos o bases de caminos interiores. Sin embargo, es esencial continuar evaluando la sostenibilidad técnica y ambiental a través de estudios de impacto a largo plazo.

5.3 Beneficios Ambientales.

Para calcular el impacto ambiental del proyecto, consideraremos las emisiones de CO₂ generadas por el transporte de los escombros al relleno externo, así como la reducción de emisiones al optar por el tratamiento local. A continuación se detalla el cálculo:

- Distancia del transporte (ida y vuelta): 112 km.
- Capacidad de carga por camión: 22 m³ (44 toneladas por viaje).
- Factor de emisión de CO₂: 2,62 kg de CO₂ por litro de diésel.
- Consumo promedio de diésel por camión: 0,38 litros por kilómetro.
- Cantidad total de escombros del piloto: 50.000 toneladas.
- Cantidad total de escombros acumulados: 900.000 toneladas.

Concepto	Cálculo	Resultado
Número de viajes necesarios (50.000 toneladas)	$50.000 / 44$	1.136,36 viajes
Emisiones por viaje (kg CO ₂)	$12 \text{ km} \times 0,38 \text{ L/km} \times 2,62 \text{ kg CO}_2/\text{L}$	111,34 kg CO ₂ /viaje
Emisiones totales para 50.000 toneladas (kg CO ₂)	$1.136,36 \times 111,34$	126.497,85 kg CO ₂ (~126,5 ton CO ₂)
Número de viajes necesarios (900.000 toneladas)	$900.000 / 44$	20.454,54 viajes
Emisiones totales para 900.000 toneladas (kg CO ₂)	$20.454,54 \times 111,34$	2.277.000 kg CO ₂ (~2.277 ton CO ₂)
Reducción de emisiones por tratamiento local (piloto)	Emisiones transporte externo evitadas	126,5 ton CO ₂
Reducción de emisiones por tratamiento local (total)	Emisiones transporte externo evitadas	2.277 ton CO ₂

Tabla 6. Estimación de emisiones.

5.3.1 Impacto de optar por tratamiento local:

Eliminación del transporte externo:

- Optar por el reciclaje local evita las emisiones por transporte al relleno externo.
- Reducción de emisiones del piloto: 126,5 toneladas de CO₂ .
- Reducción de emisiones totales: 2.277 toneladas de CO₂ .

Emisiones asociadas al reciclaje local:

- Esto dependerá del uso de equipos y maquinaria. Si proporcionas datos de consumo energético, se puede incluir en el análisis.

Optar por el reciclaje local en lugar de transporte y disposición en un relleno externo reduce significativamente las emisiones de CO₂ . Para el piloto, esto representa 126,5 toneladas de CO₂ evitadas, y para la totalidad de los escombros, el ahorro potencial asciende a 2.277 toneladas de CO₂ , contribuyendo a un proyecto más sostenible y alineado con objetivos de reducción de la huella de carbono.

Por otra parte si se opta por un proyecto de retiro de escombros desde Codelco El Teniente a Rancagua que implique aproximadamente 20.454 viajes debe evaluarse conforme al Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), ya que podría generar impactos ambientales significativos en varias dimensiones. En Chile, el SEIA regula los proyectos que puedan afectar el medio ambiente, y este caso podría requerir una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o incluso un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), dependiendo de las características y la magnitud del proyecto.

El Capítulo II, Artículo 10 de la Ley 19.300: Determina que un proyecto debe someterse al SEIA si tiene el potencial de:

- Alterar el suelo, el agua o el aire.
- Generar riesgos para la salud de las personas.
- Producir impactos significativos en la calidad de vida de la población.

Los Artículos 3, 4 y 5 del DS N° 40/2012 (Reglamento del SEIA): Un proyecto de transporte de escombros como este podría cumplir con los siguientes criterios de ingreso al SEIA:

- Inciso b): Obras de transporte terrestre de carga cuando generen impactos significativos en zonas urbanas o rurales.
- Inciso c): Actividades que puedan modificar significativamente las condiciones ambientales locales, como emisiones de gases y generación de ruido.

- Inciso j): Obras que puedan producir alteraciones significativas en la infraestructura vial, como la generación de congestión vehicular.

5.3.2 Impactos ambientales relevantes:

- Emisiones de gases contaminantes (CO₂ , material particulado) debido al alto número de viajes.
- Ruido en áreas urbanas y rurales por el paso continuo de camiones.
- Congestión vehicular en carreteras y zonas urbanas de Rancagua.
- Alteración de ecosistemas debido al transporte de residuos a través de áreas sensibles.
- Afectación a la calidad de vida de las comunidades cercanas al trayecto.

5.3.3 Tipo de evaluación ambiental:

- Declaración de Impacto Ambiental (DIA): Si el proyecto no genera impactos significativos, pero requiere medidas de mitigación y seguimiento.
- Estudio de Impacto Ambiental (EIA): Si el proyecto genera impactos críticos o si las comunidades directamente afectadas manifiestan preocupación por sus efectos.

5.4 Flujo de Caja Proyectado.

Año	Toneladas Retiradas	Costo Reciclaje Local (CLP)	Costo Total Externo (CLP)	Ahorro Anual (CLP)
Año 1	180.000	\$3.348 millones	\$11.160 millones	\$7.812 millones
Año 2	180.000	\$3.348 millones	\$11.160 millones	\$7.812 millones
Año 3	180.000	\$3.348 millones	\$11.160 millones	\$7.812 millones
Año 4	180.000	\$3.348 millones	\$11.160 millones	\$7.812 millones
Año 5	180.000	\$3.348 millones	\$11.160 millones	\$7.812 millones
Total	900.000	\$16.740 millones	\$55.800 millones	\$39.060 millones

Tabla 7. Proyección del proyecto 5 años.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

Donde:

- **VAN** = Valor Actual Neto.
- **I_0** = Inversión inicial del proyecto en CLP.
- **F_t** = Flujos de caja generados en cada año.
- **k** = Tasa de descuento utilizada (10%).
- **t** = Periodo de análisis (años 1 a 5).

Figura 16: Fórmula de valor Actual Neto (VAN).

Valor Actual Neto (VAN): \$29.613 millones CLP

El VAN positivo demuestra que el proyecto es altamente rentable considerando una tasa de descuento del 10%. Este cálculo considera la inversión inicial, asegurando una evaluación más precisa de la rentabilidad del proyecto.

- **Rentabilidad comprobada:** El VAN positivo de \$29.613 millones CLP indica que el proyecto generará valor y será financieramente viable.
- **Recuperación de inversión:** La inclusión del costo inicial en el cálculo permite estimar de manera realista el retorno de la inversión.
- **Impacto económico significativo:** El ahorro anual de \$7.812 millones CLP acumulado en cinco años fortalece la viabilidad financiera del reciclaje local frente a la disposición externa.
- **Contribución a la sustentabilidad:** La reducción de costos y el aprovechamiento de los escombros mineros reafirman el alineamiento del proyecto con estrategias de economía circular.

El análisis financiero respalda la implementación del proyecto, proporcionando beneficios económicos y ambientales que justifican su ejecución.

Tasa Interna de Retorno (TIR):

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero.

La fórmula utilizada es:

$$TIR = k \quad \text{donde} \quad \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = I_0$$

Donde:

- **TIR** = Tasa Interna de Retorno.
- **F_t** = Flujos de caja en cada año.
- **k** = Tasa que hace que el VAN sea cero.
- **n** = Número de años del proyecto.
- **I₀** = Inversión inicial.

Figura 17. Fórmula de Tasa Interna de Retorno (TIR).

- TIR: 92,8%
- La TIR supera ampliamente la tasa de descuento, lo que confirma la alta rentabilidad del proyecto.

Período de Recuperación de la Inversión (PRI):

- 1 año
- La inversión inicial se recupera en el primer año gracias a los ahorros generados.

Implementar el reciclaje local de escombros en lugar de comprar estabilizado externo con transporte es una solución integral que combina beneficios financieros, operativos y ambientales:

Implementar el reciclaje local de escombros en lugar de comprar estabilizado externo con transporte es una solución integral que combina beneficios financieros, operativos y ambientales:

- Rentabilidad Financiera:
 - Genera un ahorro acumulado de \$39.060 millones CLP en 5 años.
 - El VAN positivo de \$29.613 millones CLP y la TIR de 92,8% confirman la alta rentabilidad y viabilidad económica del proyecto.
 - La rápida recuperación de la inversión en 1 año refuerza su atractivo financiero.
- Eficiencia Operativa:
 - Permite retirar las 900.000 toneladas de escombros de manera ordenada en 5 años sin depender de transporte externo.
- Sostenibilidad Ambiental:
 - Se evitan 2.277 toneladas de CO₂ y el consumo de 870.545 litros de diésel, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y al cumplimiento de objetivos de sostenibilidad.

El reciclaje local no solo optimiza los recursos económicos y operativos, sino que también mitiga impactos ambientales, alineando el proyecto con los principios de la economía circular y la sostenibilidad a largo plazo.

6. Discusión

6.1 Comparación con Otras Alternativas

En el contexto de la economía circular aplicada a la gestión de escombros, el proyecto de reciclaje y reutilización de escombros como relleno para caminos interiores ofrece una solución innovadora frente a otras alternativas tradicionales. En esta sección se comparan las opciones existentes desde las perspectivas de costos, impacto ambiental, y viabilidad técnica y económica.

6.1.1 Disposición en Rellenos Autorizados

La alternativa más común para la gestión de escombros es su traslado y disposición en rellenos autorizados. Esta opción, si bien garantiza el cumplimiento normativo, presenta desafíos importantes:

- **Costos Elevados:** El costo de traslado y disposición en un relleno autorizado alcanza los \$38.000 por tonelada, significativamente más alto que los \$18.600 por tonelada del reciclaje evaluado en el proyecto piloto.
- **Impacto Ambiental:** El transporte prolongado genera emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) y congestión vehicular, lo que afecta tanto el medio ambiente como la calidad de vida de las comunidades cercanas.
- **Pérdida de Materiales Valiosos:** Al disponer los escombros en un relleno, se desaprovechan materiales que podrían reincorporarse a procesos productivos bajo los principios de la economía circular.

6.1.2 Utilización como Material de Relleno No Tratado

Otra alternativa evaluada es el uso de escombros no tratados como relleno en caminos o terraplenes. Aunque puede reducir costos iniciales, esta opción presenta limitaciones:

- **Impactos Ambientales y Sociales:** El uso de escombros no tratados puede generar contaminación del suelo y aguas superficiales debido a residuos peligrosos o materiales inertes no clasificados.
- **Cumplimiento Normativo:** Esta práctica no siempre cumple con las regulaciones ambientales y de construcción vigentes.
- **Durabilidad:** La falta de tratamiento reduce la calidad y estabilidad del material como relleno, lo que aumenta los costos de mantenimiento a largo plazo.

En comparación, el reciclaje y tratamiento previo de los escombros propuesto en este proyecto mejora la calidad del material, garantizando su seguridad y cumplimiento normativo.

6.1.3 Alternativas de Reciclaje de Escombros para Otros Usos

El reciclaje de escombros también se ha explorado en aplicaciones como la producción de áridos reciclados o la fabricación de materiales prefabricados (bloques, adoquines, etc.). Si bien estas opciones promueven la economía circular, existen barreras:

- **Costos de Procesamiento:** La transformación de escombros en materiales prefabricados requiere procesos más complejos y costosos, afectando la viabilidad económica a corto plazo.
- **Mercado Limitado:** La demanda por áridos reciclados o materiales prefabricados aún es baja en comparación con productos tradicionales, lo que limita su escalabilidad.
- **Infraestructura Requerida:** La implementación de plantas de procesamiento especializadas implica inversiones significativas en equipos y tecnología.

En contraste, la solución propuesta —utilizar escombros reciclados tratados como relleno de caminos interiores— resulta más viable por sus bajos costos de implementación y su capacidad para reutilizar grandes volúmenes de material.

6.1.4 Resumen Comparativo

Alternativa	Costo (\$/tonelada)	Impacto Ambiental	Viabilidad Técnica	Cumplimiento Normativo
Disposición en Rellenos	38.000	Alto (emisiones, transporte)	Alta	Cumple
Relleno No Tratado	Bajo	Alto (contaminación posible)	Media	No siempre cumple
Reciclaje en Prefabricados	Variable (Alto)	Bajo	Media-Alta	Cumple
Reciclaje para Rellenos (Propuesta)	18.600	Bajo	Alta	Cumple

Tabla 8. Resumen comparativo de propuestas

La propuesta de reciclaje y reutilización de escombros como relleno para caminos interiores representa una alternativa más sostenible y económicamente viable frente a otras opciones tradicionales. Al reducir los costos en un 50% respecto a la disposición en rellenos autorizados y minimizar el impacto ambiental derivado del transporte, esta solución se alinea con los principios de economía circular y ofrece beneficios tanto económicos como ambientales a la empresa y la comunidad.

La implementación del proyecto piloto de reutilización de escombros en Minera El Teniente presenta beneficios significativos, no solo económicos, sino también ambientales. A largo plazo, se espera que esta metodología permita replicarse en otras divisiones mineras, reduciendo los costos asociados al transporte y disposición de residuos. Sin embargo, es necesario considerar la escalabilidad del proyecto, ya que factores como la fluctuación de precios de maquinaria y energía, así como la demanda de materiales reciclados, podrían influir en la sostenibilidad económica. Adicionalmente, sería ideal explorar alianzas con proveedores de tecnología avanzada para mejorar la eficiencia del procesamiento de residuos.

7 Conclusiones y Recomendaciones.

7.1. Conclusiones:

El proyecto demostró que el tratamiento local de escombros mediante reciclaje es significativamente más económico y ambientalmente beneficioso que su transporte y disposición en escombreras externas. El ahorro por tonelada reciclada alcanza aproximadamente \$19.400, lo que representa una solución rentable para la gestión de residuos en Minera El Teniente.

La implementación del reciclaje local evitó la emisión de 30.016 toneladas de CO₂ derivadas del transporte a rellenos externos. Esto contribuye directamente a reducir la huella ambiental de las operaciones mineras, alineándose con las metas de sostenibilidad de Codelco y los compromisos nacionales e internacionales en la mitigación del cambio climático.

La reutilización de los escombros acumulados en el Centro de Manejo de Residuos Industriales (CMRIS) permitió transformar un pasivo ambiental en un recurso útil para la construcción y mantenimiento de caminos interiores. Este enfoque se enmarca en los principios de la economía circular, promoviendo la valorización de residuos y optimización de recursos.

Desde un punto de vista técnico, los áridos reciclados cumplen con los estándares de calidad y desempeño requeridos para proyectos de infraestructura minera, mostrando resultados satisfactorios en términos de durabilidad y funcionalidad. Esto valida su aplicación y promueve la confianza en el uso de materiales reciclados en la industria.

Este proyecto posiciona a Minera El Teniente como un caso pionero en la implementación de estrategias de economía circular en minería, fortaleciendo su liderazgo y compromiso con la sostenibilidad. La experiencia obtenida puede servir como un modelo replicable tanto en otras divisiones de Codelco como en la industria minera chilena en general.

El proyecto de retiro de escombros desde Codelco El Teniente hacia Rancagua representa un desafío técnico y ambiental significativo que demanda una planificación estratégica y un cumplimiento riguroso del marco normativo chileno, específicamente el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). La magnitud del proyecto, con aproximadamente 20.454 viajes previstos, implica potenciales impactos ambientales y sociales, como emisiones de gases contaminantes, generación de ruido, congestión vehicular y posibles afectaciones a la calidad de vida de las comunidades cercanas.

La evaluación de este proyecto permite evidenciar la importancia de implementar medidas de mitigación y optimización logística para minimizar los efectos adversos. Asimismo, destaca la necesidad de someter iniciativas de esta envergadura al SEIA, garantizando el cumplimiento de las normativas y promoviendo un desarrollo sostenible. Este caso ilustra la relevancia de la gestión ambiental en la industria minera y refuerza la responsabilidad corporativa de integrar soluciones innovadoras y sostenibles en sus operaciones.

En conclusión, este estudio aporta una visión integral para abordar proyectos de gran escala en el ámbito minero, equilibrando los objetivos económicos y operativos con el respeto al medio ambiente y las comunidades involucradas.

Esta investigación confirma que la reutilización de escombros mineros como material de relleno para caminos interiores no solo es técnicamente viable, sino que también genera importantes beneficios económicos y ambientales. La propuesta presentada alinea los objetivos operativos de Minera El Teniente con las metas de reducción de huella de carbono y economía circular. Este proyecto demuestra que es posible convertir un problema ambiental en una solución innovadora, con potencial para ser replicada en toda la industria minera chilena.

7.2. Recomendaciones:

Se recomienda extender la implementación del reciclaje de escombros a otras áreas operativas de la División El Teniente, evaluando su potencial en el tratamiento de

residuos acumulados y nuevas operaciones mineras. Además, es crucial explorar su aplicación en proyectos de mayor envergadura a nivel corporativo.

Promover la colaboración con otras divisiones de Codelco, empresas mineras nacionales e internacionales, y entidades gubernamentales para fomentar la adopción de prácticas de gestión sostenible de residuos. Estas alianzas facilitarán la transferencia de conocimientos, la inversión en tecnologías innovadoras y el desarrollo de normativas específicas para el uso de áridos reciclados.

Continuar evaluando y optimizando los procesos de tratamiento de escombros para reducir aún más los costos operacionales y maximizar la calidad del material reciclado. Incorporar tecnologías de monitoreo en tiempo real para asegurar la eficiencia y trazabilidad del proceso.

Investigar el uso de áridos reciclados en otras aplicaciones dentro y fuera de la minería, como:

- Proyectos de infraestructura vial externa.
- Fabricación de materiales prefabricados (bloques, adoquines, etc.).
- Restauración de suelos y proyectos de revegetación.

Establecer un sistema de indicadores de desempeño ambiental y económico, que permita medir los impactos positivos del proyecto, tales como:

- Reducción de emisiones de CO₂.
- Volumen total de residuos reciclados.
- Ahorros económicos generados.

Además, se recomienda comunicar los resultados a través de informes públicos, conferencias y plataformas de la industria minera, posicionando a Codelco como un referente en gestión circular de residuos.

Implementar programas de capacitación para trabajadores y contratistas sobre los beneficios del reciclaje y la economía circular. La sensibilización interna y externa fortalecerá la cultura organizacional en torno a la sostenibilidad.

Se recomienda escalar este proyecto a otras divisiones mineras de Codelco, priorizando aquellas con mayores acumulaciones de escombros. Asimismo, se sugiere explorar usos adicionales de los áridos reciclados, como subbases para pavimentos en comunidades cercanas, fortaleciendo los vínculos con las comunidades locales. Por último, establecer acuerdos con empresas tecnológicas

internacionales podría optimizar los procesos de trituración y clasificación, incrementando la eficiencia del reciclaje.

9 Bibliografía.

1. Ambipar Environment. (2023). *Gestión de residuos industriales y soluciones de valorización*. Recuperado de: <https://www.ambipar.com>
2. Arslan, H. (2007). Re-design, re-use and recycle of temporary houses. *Building and Environment*, 42(1), 400-406.
3. Asociación de Recicladores Industriales de Chile (ARICH). (2023). *Informe anual sobre valorización de residuos industriales*. Santiago, Chile. <https://www.arich.cl>
4. Bourguignon, D. (2016). Closing the loop New circular economy package. EPRS | European Parliamentary Research Service.
5. Cámara Chilena de la Construcción (CChC). (2023). *Guía de manejo y valorización de residuos en proyectos de construcción*. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://www.cchc.cl>
6. Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Hacia una economía circular: Principios y beneficios*.
7. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2018). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
8. Global Cement and Concrete Association (GCCA). (2021). *Concrete's Contribution to Sustainable Development*. Londres, Reino Unido. Recuperado de: <https://gccassociation.org>
9. Global Tailings Review. (2020). Estándar global sobre relaves para la industria minera. https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf
10. Zamora E, Gerardo, Hinojosa C, Octavio, & Blanco V, Walter. (2020). Beneficios económicos de la aplicación de la economía circular en la etapa del cierre ambiental de sitios de almacenamiento de residuos mineros en operaciones a cielo abierto. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(2), 3-10.
11. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2021). *Mitigación del Cambio Climático: Residuos y Economía Circular*. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

12. Helms, M. M., & Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis – where are we now?. *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215–251. doi:10.1108/17554251011064837
13. Instituto Nacional de Normalización (INN). (2022). *Norma Chilena NCh3562: Gestión de Residuos para el Sector Minero*. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://www.inn.cl>
14. Méndez Reátegui, R., & Lucas Garín, A. (2023).
14. International Organization for Standardization (2006). ISO 14001: Environmental management — Systems — Requirements with guidance for use. ISO. <https://www.iso.org/standard/60857.html>
15. International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001: Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*. International Organization for Standardization. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:es>
16. Instituto Nacional de Normalización. (2024). Áridos - Áridos reciclados en base a residuos de construcción y demolición (RCD) inertes no peligrosos - Clasificación, caracterización y directrices para la trazabilidad y valorización de RCD inerte no peligroso.
17. Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46.
18. Kou, S., & Poon, C.S. (2013). Properties of concrete prepared with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 38, 200-207.
19. Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36-51.
20. Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2023). *Plan Nacional de Residuos y Economía Circular*. Santiago, Chile. Recuperado de: <https://mma.gob.cl>
21. Méndez Reátegui, J., & Lucas Garín, J.M. (2023). Análisis costo-beneficio como herramienta para evaluar proyectos sostenibles: Un enfoque práctico.
22. Mendoza, A., et al. (2020). Recycling of construction and demolition waste: A review of the current state of the art in the field of sustainable construction materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 25, e00163.
23. NCh 3849: Norma chilena que regula la calidad y trazabilidad de los áridos reciclados.

24. NCh 163: Establece los requisitos para áridos en morteros y hormigones.
25. Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2022). *Economía circular: hacia un desarrollo sostenible*. Recuperado de: <https://www.ilo.org>
26. Reflexiones sobre el análisis costo-beneficio y el análisis costo-efectividad en las normas de cambio climático en Chile y Colombia. *Revista de Derecho Económico*.
27. Sanhueza, H., Díaz, R.H., & Harnisch, V.I. (2008). Definition of efficient references for regulatory benchmarking of distribution companies. *Revista de Derecho Económico*.
<https://www.semanticscholar.org/reader/809a42985066c36d479ff8935759a235875d83e8>
28. Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598-614.
29. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *Global Status Report for Buildings and Construction*. Nairobi, Kenia. <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
30. World Resources Institute (WRI). (2021). *Circular Economy: Strategies for Sustainable Resource Use*. Washington, DC, Estados Unidos. Recuperado de: <https://www.wri.org>

10. Anexos

Anexo 1: Iniciativas economía circular en CODELCO 1:

	3. Economía circular: reciclaremos 65% de los residuos industriales
	Reciclar el 65% de nuestros residuos industriales sólidos no peligrosos de nuestras operaciones y proyectos, como aceros, maderas, materiales de embalaje, residuos orgánica y chatarras, incluyendo valorizar el 100% de nuestros neumáticos mineros y reducir el inventario.
Activadores	Avances 2023
Reciclaje de 65% de los residuos no peligrosos.	Recuperación de Bolas de Molienda en División Chuquicamata: Nos permitirá optimizar la eficiencia operativa y extender la vida útil de los insumos. Recuperamos 717.000 kg de bolas durante 2023. Recuperación de Revestimientos en División El Teniente: Implementamos un innovador piloto en colaboración con METSO para recuperar revestimientos de acero-goma, considerados residuos de alta complejidad para su valorización. Este proyecto logró la recuperación exitosa de 750 toneladas de material proveniente de Molinos SAG y Molino 511 de El Teniente, contribuyendo a su reutilización en la fabricación de nuevos revestimientos. Además, en División Ministro Hales, recuperamos más de 1.800 toneladas de revestimientos de cromo y molibdeno en colaboración con la empresa Elecmetal, destacando como la faena minera líder en la recuperación de este tipo de material con el proveedor. Piloto de Orgánicos – Andina: A través de la instalación de un digestor anaeróbico, la División Andina inició un piloto centrado en reducir la generación de residuos orgánicos, que constituyen una proporción significativa del total de residuos corporativos. Piloto Reducción de Pallets de Madera – División Ventanas: Proyecto piloto en División Ventanas para sustituir gradualmente los pallets de madera por pallets plásticos, fabricados a partir de residuos de la industria salmonera y limpieza de playas.

	3. Economía circular: reciclaremos 65% de los residuos industriales
Reciclaje de 65% de los residuos no peligrosos.	▪ Contratos de Economía Circular en Divisiones del Distrito Norte: Incorporamos el concepto de Economía Circular en los contratos de Gestión de Residuos en las Divisiones de Radomiro Tomic, Gabriela Mistral y Ministro Hales. ▪ Iniciativa de microfiltrados en residuos de aceites usados División Ministro Hales: Mediante la microfiltración de aceites usados generados por las mantenciones de los equipos mineros, especialmente el aceite hidráulico, la Superintendencia de Suministros y Servicios Productivos de la división, implementó una iniciativa que busca disminuir los costos por la compra de aceites nuevos, utilizando economía circular y reduciendo la huella de carbono
100% de neumáticos mineros fuera de uso reciclados y reducción de inventario.	▪ Recauchajes Neumáticos NFU: Con el respaldo de la empresa Bailac, recauchamos más de 200 neumáticos mineros en 2023. Este proceso, que implica la extracción de la banda de rodamiento desgastada y su reemplazo por una nueva, no solo mantiene los estándares de calidad y seguridad de los neumáticos mineros, sino que también evitó la generación de 480.000 kilogramos de residuos. En División El Teniente iniciamos el reciclaje de 6.400 toneladas de neumáticos fuera de uso a través de un proceso de pirólisis donde se logró obtener acero, carbón black y biodiesel, los que fueron nuevamente aprovechados.

RESULTADOS ENSAYOS	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE	
Fecha de ensayo	25-oct-2024
Densidad aparente compactada (kg/m^3)	1.390
Densidad aparente suelta (kg/m^3)	1.200
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS GRAVAS	
Fecha de ensayo	29 y 30-oct-2024
Densidad real árido sss (kg/m^3)	2.580
Densidad real árido seco (kg/m^3)	2.500
Densidad neta (kg/m^3)	2.710
Absorción de agua (%)	3,1
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN ÁRIDOS SUELTOS	
Contenido de huecos (%)	52
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN ÁRIDOS COMPACTADOS	
Contenido de huecos (%)	44
DETERMINACIÓN DEL DESGASTE DE LAS GRAVAS POR EL MÉTODO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	
Fecha de ensayo	25 a 29-oct-2024
Grado de ensayo	1
Fracción de ensayo, mm	80 - 40
Pérdida de masa de la muestra (%)	26
DETERMINACIÓN DE CLORUROS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	25 a 30-oct-2024
Contenido de cloruros ($\text{kg Cl}^- / \text{kg de árido}$)	31×10^{-6}
Contenido de cloruros (%)	0,0031
DETERMINACIÓN DE SULFATOS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	28 a 30-oct-2024
Contenido de sulfatos ($\text{kg SO}_4^{2-} / \text{kg de árido}$)	108×10^{-6}
Contenido de sulfatos (%)	0,0108
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3562:2019	
Clasificación y valorización de los RCD, según Anexo A. Tabla A.1 de la NCh 3562:2019	Códigos encontrados en la muestra
No peligroso	No inerte
No peligroso	Asimilable a domiciliario
No peligroso	Inerte
CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LOS ÁRIDOS GRUESOS RECICLADOS (UNE EN 933-11)	
Tipo de material constituyente:	% en peso de sus componentes principales
Rc (hormigón, productos de hormigón, prefabricados y mortero de cemento)	15%
Ru (áridos y piedra natural, sin mortero adherido)	69%
Rb (ladrillos, tejas y material cerámico)	11%
Ra (mezclas asfálticas)	1%
Rg (vidrio)	0%
Rx (materiales improprios: yeso, metales, madera no flotante, plástico, entre otros)	1%
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3849-2024	
Clasificación por composición de árido reciclado, según Tabla 1 de la NCh 3849-2024	ARMf: Árido reciclado mixto de hormigón

Observación: Las densidades y absorción informados no cumplen con los criterios de aceptación de resultados de la norma NCh 1117 en los numerales 10.3.1 a) y b), y 10.3.2, repitiéndose en 3 oportunidades con muestras gemelas, obteniendo diferencias entre ellas por sobre lo indicado en los numerales ya mencionados.



Matías Figueroa Navarro
Jefe de Operaciones
División Hormigones Ingeniería





Miguel Ángel González Talep
Jefe de Proyectos
División Hormigones Ingeniería

Ensayo 2

ididem

125

Investigación, desarrollo e innovación de Estructuras y Materiales

SISTEMA NACIONAL DE ACREDITACIÓN

CHILE

Acreditación LE 305

INFORME DE ENSAYO N° 2.046.556

FECHA DE EMISIÓN

:

11 de noviembre de 2024.

EMITIDO/ELABORADO POR

:

Coordinador Técnico Laboratorio Físico Mecánico de Áridos / Nicole Arriagada T.

REFERENCIA

:

Ensayos físico-mecánicos y químicos de áridos para hormigones.

SOLICITANTE

:

Ambipar Environment Chile Limitada

DESTINATARIO

:

Rodrigo Gantz.

OBRA / PROYECTO

:

Sin información.

METODOLOGÍA

· NCh 165.Of 2009. Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría.

· NCh 1223.Of 77. Áridos para morteros y hormigones - Determinación del material fino menor a 0,080 mm.

NCh 1116-2008. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente

· NCh 1239-2009. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las arenas.

· NCh 1326-2012. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de huecos.

· NCh166.Of2009 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de Impurezas Orgánicas en las Arenas.

· NCh 1444.Of 2010 Áridos para morteros y hormigón - Determinación de cloruros y sulfatos.

· NCh 3562:2019 Gestión de residuos - Residuos de construcción y demolición (RCD) - Clasificación y directrices para el plan de gestión⁽¹⁾

· UNE EN 933-11 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados⁽²⁾

· NCh 3849-2024 Áridos - Áridos reciclados en base a residuos de construcción y demolición (RCD) inertes no peligrosos - Clasificación, caracterización y directrices para la trazabilidad y valorización de RCD inerte no peligroso⁽³⁾

Nota 1 : Este ensayo no se encuentra dentro del alcance de las acreditaciones.

ANTECEDENTES

Muestra

:

Muestra de Arena.

ID de la muestra

:

28068-2⁽²⁾

Procedencia de la muestra

:

CMRIS.

Muestreo efectuado por

:

Muestreo realizado por el solicitante.

Fecha de muestreo

:

5/1

Lugar de muestreo

:

Teniente Codelco.

Fecha de recepción

:

16-oct-2024

Nota 2: Los resultados entregados en el presente informe se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.

RESULTADOS ENSAYOS

GRANULOMETRÍA

TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA (EN PESO)
ASTM	mm	M2
4"	100	-
3"	75	-
2 1/2"	63	-
2"	50	100
1 1/2"	37,5	97
1"	25	92
2"	19	87
1/2"	12,5	81
3/8"	9,5	75
1/4"	6,3	68
4	4,75	62
8	2,36	52
16	1,18	42
30	0,6	31
50	0,3	20
100	1,50	9
Tamaño máximo nominal (mm)		37,5
Módulo de finura		-
Fecha ensayo		24-oct-2024

DETERMINACIÓN MATERIAL FINO

Fecha de ensayo	23 y 24-oct-2024
Material fino menor a 0,080 mm (%)	23,6

Oficina central
Plaza Ercilla 883, Santiago, Chile
DHI-FT-927 Versión: 01

Teléfono: +56 2 2978 4800
Correo Electrónico: contacto@ididem.cl

www.ididem.cl

Página 1 de 2

84

RESULTADOS ENSAYOS

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE	
Fecha de ensayo	24-oct-2024
Densidad aparente compactada (kg/m³)	1.720
Densidad aparente suelta (kg/m³)	1.580
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS ARENAS	
Fecha de ensayo	24 y 25-oct-2024
Densidad real árido sss (kg/m³)	2.350
Densidad real árido seco (kg/m³)	2.190
Densidad neta (kg/m³)	2.620
Absorción de agua (%)	7,40
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN LOS ÁRIDOS SUELTOS	
Contenido de huecos (%)	28
DETERMINACIÓN DE HUECOS EN LOS ÁRIDOS COMPACTADOS	
Contenido de huecos (%)	22
DETERMINACIÓN IMPUREZAS ORGÁNICAS	
Fecha de ensayo	24 y 25-oct-2024
Coloración de la solución en estudio	Más Clara
Vidrio de color N°	No Presenta
Interpretación	1
DETERMINACIÓN DE CLORUROS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	28-oct a 06-nov-2024
Contenido de cloruros (kg Cl⁻ / kg de árido)	535 x10⁻⁶
Contenido de cloruros (%)	0,0535
DETERMINACIÓN DE SULFATOS SOLUBLES EN AGUA	
Fecha de ensayo	28-oct a 06-nov-2024
Contenido de sulfatos (kg SO₄·² / kg de árido)	2.567 x10⁻⁶
Contenido de sulfatos (%)	0,2567
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3562:2019	
Clasificación y valorización de los RCD, según Anexo A. Tabla A.1 de la NCh 3562:2019	Códigos encontrados en la muestra
No peligroso No inerte	17 09 04 - 17 08 02 - 17 02 03 - 20 01 01
No peligroso Asimilable a domiciliario	20 01 10 - 20 02 01
No peligroso Inerte	17 01 01 - 17 01 02 - 17 01 03
CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LOS ÁRIDOS GRUESOS RECICLADOS (UNE EN 933-11)	
Tipo de material constituyente:	% en peso de sus componentes principales
Rc (hormigón, productos de hormigón, prefabricados y mortero de cemento)	8%
Ru (áridos y piedra natural, sin mortero adherido)	79%
Rb (ladrillos, tejas y material cerámico)	2%
Ra (mezclas asfálticas)	2%
Rg (vidrio)	0%
Rx (materiales improprios: yeso, metales, madera no flotante, plástico, entre otros)	2%
CLASIFICACIÓN SEGÚN NCH 3849-2024	
Clasificación por composición de árido reciclado, según Tabla 1 de la NCh 3849-2024	ARMF: Árido reciclado mixto de hormigón


Matías Figueroa Navarro
Jefe de Operaciones
División Hormigones Ingeniería




Miguel Ángel González Talep
Jefe de Proyectos
División Hormigones Ingeniería