



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

## DETERMINACIÓN DE POTENCIALES CLÚSTERES INDUSTRIALES PARA EL USO DE RELAVES EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

VALENTINA PAZ RIVERA LÓPEZ

PROFESORA GUÍA:  
ANDREINA GARCIA GONZALEZ  
PROFESORA CO-GUÍA:  
ELENA MORENO GONZÁLEZ

COMISIÓN:  
EMILIO CASTILLO DINTRANS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:  
Corporación Alta Ley

SANTIAGO DE CHILE  
2024

## **DETERMINACIÓN DE POTENCIALES CLÚSTERES INDUSTRIALES PARA EL USO DE RELAVES EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN**

Chile, un importante productor de minerales estratégicos como el litio y el cobre, enfrenta en la actualidad una serie de desafíos entorno a la producción de este último debido al agotamiento gradual de las leyes del metal, el aumento de las restricciones ambientales y una transición hacia una minería prioritariamente subterránea a altas profundidades, la cual genera aún más residuos, especialmente los relaves del proceso de flotación. La gestión de estos residuos es crucial para una minería sostenible. Chile deposita alrededor de 540 millones de toneladas de relaves al año y se proyecta un aumento a 1,000 millones de toneladas en el próximo siglo para satisfacer la demanda global de cobre, por lo que uno de los desafíos más importantes hoy en día para la industria minera se trata de la posibilidad de valorizar relaves, como por ejemplo; en la industria de la construcción (cemento, hormigón, ladrillos ecológicos), paneles solares flotantes, reprocesamiento para obtener metales valiosos, entre otras iniciativas, lo que no se encuentra ajeno a desafíos técnicos y legales.

De los relaves existentes en Chile, el 86% de ellos no se encuentra activo, en su mayoría se encuentran inactivos o abandonados, por lo que se busca identificar oportunidades para su aprovechamiento. Bajo esta línea, el objetivo del presente trabajo se enfoca en la elaboración y aplicación de una metodología para determinar potenciales clústeres industriales de relaves que sean económicamente viables para su uso en la construcción y generar un mapa nacional de relaves, cementeras y hormigoneras de las 4 principales empresas productoras de clinker, cemento y hormigón (Cementos Bio Bio, Cementos Melón, Cementos Polpaico y Unicon).

El trabajo analiza el potencial de negocio entre la industria minera y la cementera, destacando beneficios económicos y ambientales para ambas y para el país. Se enmarca dentro de los objetivos de la Política Nacional Minera 2050, que busca gestionar los relaves abandonados, considerados un problema de seguridad social y ambiental. El estudio técnico-económico evalúa tres escenarios: en el peor caso, la cementera compra el relave a un costo del 10% del producto, sin incluir transporte, equivalente a 6.5 USD/m<sup>3</sup>; en el caso base, el relave se entrega sin costo, con la cementera asumiendo solo el transporte; y en el mejor caso, la minera paga a la cementera 2.5 USD/m<sup>3</sup> para retirar el relave, debido a los costos de mantenimiento que implica. La implementación del mapa permite comprender el escenario nacional en torno a la saturación de relaves primordialmente en la zona centro-norte del país, con 790 depósitos de relaves, de los cuales el 54% se encuentra dentro de un clúster industrial con oportunidad de ser utilizado como materia prima de la industria de la construcción.

El mapa interactivo se encuentra disponible en [www.chilepolimetalico.cl](http://www.chilepolimetalico.cl), este permite visualizar la distribución de relaves y cementeras a nivel nacional. Se identifican 60 clústeres industriales con potencial uso en la construcción, concentrados principalmente en las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso. Cementos Melón se posiciona como líder en este negocio.

*Hoy en día los relaves comienzan a ser conocidos como los yacimientos del futuro.  
Son las nuevas generaciones quienes se harán cargo de los errores del pasado.*

*V.R*

# Agradecimientos

Quiero dedicar esta memoria a todos aquellos que me acompañaron durante este proceso:

A mi mamá, mi abuela, la Beggie, Daniela y Barbara, mi familia, por siempre preocuparse y estar ahí para mí.

A mis amigos de carrera y Universidad, Belén, Catalina, Constanza, Esteban y María Ignacia, con quienes tuve el placer de vivir este largo y difícil proceso. Espero que la vida nos mantenga unidos muchos años más.

A Gloria, por siempre ayudarme con cada duda y consejo a lo largo de la carrera.

A Juan Luis, Andreina y Emilio, por creer en mí, darme la oportunidad de formar parte de sus equipos docentes y apoyarme en la realización de esta memoria.

A la familia Alta Ley, en particular a Elena, David, Guillermo y Grecia, por confiar en mí y orientarme cada vez que me abrumaba el proceso.

A Pablo Vásquez de Cementos Melón, por interesarse en el tema y estar siempre dispuesto a ayudar.

A Soledad, mi jefecita, por permitirme trabajar con ella sin abrumarme durante el período de memoria.

Finalmente, gracias a todos quienes fueron parte de este proceso universitario: mis amigos, mis jefes y quienes me dieron la oportunidad de crecer personal y laboralmente. Especialmente a Nicolás, Dante y Brandon, muchas gracias por la ayuda y compañía durante el proceso de memoria.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Alcances del trabajo . . . . .	3
1.4. Estructura del trabajo de memoria . . . . .	3
<b>2. Revisión de la literatura</b>	<b>4</b>
2.1. Relave . . . . .	4
2.1.1. Componentes estructurales de un relave . . . . .	4
2.1.2. Tipos de relaves . . . . .	5
2.1.3. Métodos de construcción de relaves . . . . .	5
2.2. Composición de los relaves . . . . .	7
2.2.1. Composición química y mineralógica . . . . .	7
2.2.2. Composición granulométrica . . . . .	8
2.2.3. Densidad y humedad . . . . .	8
2.3. Relaves en Chile . . . . .	10
2.3.1. Distribución geográfica de relaves en Chile . . . . .	10
2.3.2. Metales pesados . . . . .	11
2.4. Oportunidades de aprovechamiento de los relaves . . . . .	12
2.4.1. Reprocesamiento . . . . .	12
2.4.2. Geopolímeros . . . . .	13
2.4.3. Ladrillos ecológicos . . . . .	14
2.4.4. Otras iniciativas . . . . .	15
2.5. Uso de relaves en la industria de la construcción . . . . .	16
2.5.1. Industria de la construcción en Chile . . . . .	16
2.5.2. Problemática actual: Áridos naturales . . . . .	16
2.5.3. Productos de la industria cementera . . . . .	17
2.5.3.1. Clínker . . . . .	17
2.5.3.2. Cemento . . . . .	18
2.5.3.3. Hormigón . . . . .	18
2.5.4. Beneficios del uso de relaves . . . . .	19
2.5.5. Ejemplos de uso de relaves en construcción . . . . .	20
<b>3. Metodología</b>	<b>21</b>
3.1. Brechas del uso de relaves en la industria de la construcción . . . . .	21

3.2.	Requerimientos para el uso de relaves en construcción . . . . .	21
3.3.	Composición geoquímica de los relaves en Chile y su clasificación . . . . .	22
3.3.1.	Composición geoquímica . . . . .	22
3.3.1.1.	Selección de representatividad . . . . .	22
3.3.1.2.	Geoquímica de relaves . . . . .	23
3.3.1.3.	Metales pesados . . . . .	24
3.3.1.4.	Compuestos de interés . . . . .	24
3.3.2.	Clasificación de los relaves . . . . .	24
3.3.2.1.	Potenciales usos de los relaves . . . . .	24
3.3.2.2.	Criticidad . . . . .	25
3.4.	Metodología técnico-económica . . . . .	25
3.5.	Mapa geo-referencial . . . . .	28
3.5.1.	Coordenadas . . . . .	28
3.5.2.	Ingreso de las bases de datos . . . . .	28
3.5.3.	Delimitación de los clústeres industriales en el mapa . . . . .	29
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>31</b>
4.1.	Normativa limitante del uso de relaves en la construcción . . . . .	31
4.1.1.	Entidades regulatorias . . . . .	31
4.1.2.	Normas y decretos . . . . .	32
4.1.3.	Modificación de la Norma Chilena N°163 . . . . .	34
4.2.	Requerimientos para el uso en construcción . . . . .	35
4.3.	Composición química y clasificación de los relaves . . . . .	36
4.3.1.	Potenciales usos de los relaves . . . . .	37
4.3.2.	Criticidad de los relaves . . . . .	38
4.4.	Resultados del análisis económico . . . . .	38
4.5.	Clústeres industriales de relaves . . . . .	39
4.5.1.	Panorama general de Chile . . . . .	41
4.5.2.	Distribución de los clústeres industriales por región . . . . .	43
4.5.2.1.	Región: Antofagasta . . . . .	45
4.5.2.2.	Región: Atacama . . . . .	46
4.5.2.3.	Región: Coquimbo . . . . .	47
4.5.2.4.	Región: Metropolitana y Valparaíso . . . . .	48
4.5.2.5.	Región: O´Higgins . . . . .	50
4.5.2.6.	Región: Maule . . . . .	51
4.5.3.	Caso particular - Copiapó . . . . .	52
<b>5.</b>	<b>Discusión</b>	<b>56</b>
5.1.	Brechas del uso de relaves en la industria de la construcción . . . . .	56
5.2.	Requerimientos para el uso en construcción . . . . .	57
5.3.	Composición química y clasificación de los relaves . . . . .	57
5.4.	Análisis económico . . . . .	58
5.5.	Clústeres industriales de relaves . . . . .	59
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>61</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>



# Índice de Tablas

2.1.	Elementos químicos en relaves[18]. . . . .	7
2.2.	Relaves por región. Fuente: Elaboración propia[8]. . . . .	10
3.1.	Elementos químicos y compuestos en relaves[18]. . . . .	24
4.1.	Entidades regulatorias involucradas en el uso de relaves en Chile. . . . .	31
4.2.	Uso de relaves en construcción Fuente: Elaboración propia. . . . .	36
4.3.	Relaves por región . . . . .	36
4.4.	Tonelaje de relaves por región . . . . .	37
4.5.	Distancias económicas para cada escenario. . . . .	38
4.6.	Productoras de cemento y hormigón en las regiones de Chile . . . . .	42
4.7.	Cantidad de Clústeres industriales por empresa en las regiones de Chile . . . . .	42
4.8.	Relaves en clústeres industriales; usos y criticidad por región . . . . .	43
4.9.	Porcentaje de uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Bío Bío. . . . .	52
4.10.	Uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Melón. . . . .	54
.1.	Criticidad por regiones, Relaves en clústeres y fuera de clústeres, y Porcentaje. . . . .	66
.2.	Potencial uso de relaves por regiones. . . . .	66

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema Tranque de Relave Convencional[12]. . . . .	4
2.2.	método de construcción aguas abajo[11]. . . . .	6
2.3.	método de construcción eje central[11]. . . . .	6
2.4.	método de construcción Aguas arriba[11]. . . . .	7
2.5.	elementos en un relave. . . . .	8
2.6.	Densidad en función de la profundidad en un relave[22]. . . . .	9
2.7.	Metales pesados encontrados en Taltal[28]. . . . .	12
2.8.	Flowsheet reprocesamiento de relaves en MVC[32]. . . . .	13
2.9.	Discos de geopolímeros[35]. . . . .	14
2.10.	Proceso de creación de ladrillos poliméricos[36]. . . . .	14
2.11.	Inputs y outputs proyecto TailingR32Green[37]. . . . .	15
2.12.	Mercado del cemento en Chile[9]. . . . .	16
2.13.	Proceso de producción de clínker[44]. . . . .	18
2.14.	Hormigón[47]. . . . .	19
2.15.	Resultados de hormigón y geopolímeros por T2CM[50]. . . . .	20
3.1.	Buffer en QGIS. . . . .	29
3.2.	Mapa en QGIS. . . . .	30
4.1.	Noticia de la modificación de la NCh 163[58]. . . . .	34
4.2.	Estado de los relaves con mayor porcentaje de óxido de calcio. . . . .	37
4.3.	Potenciales usos de relaves en Chile. . . . .	37
4.4.	Clasificación de criticidad de los relaves. . . . .	38
4.5.	Clasificación de criticidad de los relaves. . . . .	38
4.6.	Mapa nacional de Clústeres industriales de relaves para su uso en la industria cementera en Chile. . . . .	39
4.7.	Criticidad de relaves en el mapa nacional de Clústeres industriales de relaves para la industria cementera en Chile. . . . .	40
4.8.	Visualización de la información dentro del mapa para el usuario. . . . .	41
4.9.	Clasificación de criticidad de los relaves. . . . .	41
4.10.	Industria de la construcción en Chile. . . . .	41
4.11.	Distribución de Clústeres industriales por empresa en Chile. . . . .	43
4.12.	Caracterización de relaves en clústeres industriales. . . . .	44
4.13.	Clústeres industriales en la región de Antofagasta. . . . .	45
4.14.	Relaves en clústeres industriales región de Antofagasta. . . . .	45
4.15.	Clústeres industriales en la región de Atacama. . . . .	46
4.16.	Relaves en clústeres industriales región de Atacama. . . . .	46
4.17.	Clústeres industriales en la región de Coquimbo. . . . .	47
4.18.	Relaves en clústeres industriales región de Coquimbo. . . . .	47
4.19.	Clústeres industriales en las regiones Metropolitana y Valparaíso. . . . .	48

4.20.	Caracterización de relaves en clústeres industriales en las regiones de Valparaíso y RM. . . . .	49
4.21.	Clústeres industriales en la región de O´Higgins. . . . .	50
4.22.	Caracterización de relaves en clústeres industriales. O´Higgins. . . . .	50
4.23.	Clústeres industriales en la región del Maule. . . . .	51
4.24.	Relaves en clústeres industriales región del Maule. . . . .	51
4.25.	Mapa del caso de estudio - Provincia de Copiapó. . . . .	52
4.26.	Porcentaje de uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Bío Bío. . . . .	53
4.27.	Estado de los relaves con mayor porcentaje de óxido de calcio. . . . .	53
4.28.	Estado de criticidad de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Bío Bío. . . . .	53
4.29.	Porcentaje de uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Melón . . . . .	54
4.30.	Estado de los relaves con mayor porcentaje de óxido de calcio. . . . .	54
4.31.	Estado de criticidad de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Melón. . . . .	54

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto

De la mano de la transición energética, el mundo ha comenzado a demandar mayores cantidades de minerales denominados “estratégicos”, los cuales permiten el almacenamiento de energía limpia en grandes cantidades[1]. Algunos de estos son el litio y el cobre, sobre los cuales Chile posee grandes reservas y es un productor crucial en el mercado de estos commodities. La mayoría de las proyecciones de expertos indican que la demanda y oferta del cobre deben aumentar significativamente para dar abasto al requerimiento energético a nivel mundial[2].

Sin embargo, Chile se encuentra en un contexto de agotamiento paulatino de las leyes de cobre, lo que es perjudicial para el objetivo de aumentar la producción del metal[3]. De la mano de esto, se inicia en la industria una época de transición hacia una minería mayoritariamente subterránea a grandes profundidades, la que trae consigo múltiples desafíos técnicos y ambientales. Al producirse mayores cantidades de cobre a una menor ley, sumado al cambio mineralógico de la transición de una minería de óxidos a sulfuros, los residuos generados en el procesamiento de minerales aumentan significativamente para lograr la meta de producción del metal[3].

La gestión de residuos mineros es uno de los principales desafíos de esta “nueva minería”, la cual apunta hacia el desarrollo de una industria más sostenible, procurando por el menor impacto ambiental posible[4]. Pese a los esfuerzos de la minería por hacer más eficientes sus procesos, existe una pérdida de recursos minerales en uno de los principales residuos mineros, los relaves[3]. Los relaves se posicionan como el pasivo ambiental minero (PAM) más masivo y de mala percepción ciudadana del sector, esto debido a la gran cantidad de desastres ambientales que su construcción y mala gestión ha generado en algunos países[5]. Un ejemplo de esto es lo que ocurrió en Brasil con *La rotura de la presa de Brumadinho* en 2019, donde se generaron pérdidas de vidas humanas y grandes consecuencias ambientales.

En Chile, se depositan cerca de 540 Mt anuales, es decir, cada 30 horas se deposita un volumen equivalente al cerro Santa Lucía[6]. Además, las proyecciones indican que dentro del próximo siglo, dado el objetivo de satisfacer la demanda mundial de cobre manteniendo a Chile como uno de los principales actores del mercado, la producción de relaves alcanzaría las 1.000 Mt anuales[7]. Según el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN),

las regiones de Coquimbo y Atacama concentran un total de 564 relaves de los 764 registrados en Chile, mientras que la region de Antofagasta y la región Metropolitana concentran el mayor tonelaje de relave depositado en el país debido a la presencia de faenas pertenecientes a la gran minería[8]. Estos números posicionan a Chile en el tercer lugar a nivel mundial de los países con la mayor cantidad de relaves, superado únicamente por China y EEUU[6].

Con respecto a la totalidad de relaves existentes hoy en día en el país, el 86 % esta categorizado como inactivos, abandonados o en construcción, solo el 14 % de ellos se encuentran activos, por lo que es necesario identificar las oportunidades de aprovechamiento y uso[8]. Algunas iniciativas que se destacan en torno a la economía circular son; la utilización de relaves en la industria de la construcción para la producción de cemento u hormigón, ladrillos ecológicos, shotcrete para fortificación, relleno de piques y excavaciones abandonadas o en desuso, el reprocesamiento para la obtención de metales valiosos, entre otras iniciativas[7]. Si bien la implementación de estas iniciativas no resuelve en su totalidad el problema de los relaves, la industria de la construcción se identifica como una de las principales oportunidades de uso de relaves debido a la alta demanda de materiales que genera en Chile[9].

Dado lo anterior, este trabajo de investigación se centra en la elaboración de una propuesta y aplicación de una metodología para determinar potenciales clústeres industriales de relaves que sean técnico y económicamente viables en términos de transporte para su uso en la industria de la construcción, lo que podría generar grandes beneficios ambientales, económicos y sociales al permitirles trabajar en conjunto a estas 2 grandes industrias, ayudando a resolver la escasez de materia prima y altos precios por parte de la industria de la construcción con el aprovechamiento de los residuos masivos mineros. El uso de los depósitos conlleva importantes desafíos técnicos y legales, los cuales serán analizados también en este estudio para la incorporación del relave en cemento y otros productos de esta industria.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Propuesta y aplicación de una metodología para determinar clústeres industriales de relaves en Chile con potencial técnico-económico para su uso en la industria cementera.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Los objetivos específicos del trabajo se describen a continuación:

1. Identificar las principales brechas legales y los requerimientos técnicos a cumplir por los relaves para su uso en clinker, cemento y hormigón en la industria de la construcción.
2. Clasificar los relaves de Chile según su composición geoquímica y nivel de criticidad para recomendar su uso en la construcción.
3. Plantear y resolver la problemática recurso-destino en función de los costos de transporte del relave en torno al contexto nacional.
4. Elaborar un mapa de clústeres industriales de relaves y cementeras en Chile, identificando áreas con alto potencial técnico-económico en distintas regiones del país, utilizando el software QGIS.



### **1.3. Alcances del trabajo**

El alcance de esta investigación se limita al uso de relaves como crudo en el caso de clínker, aditivo en el caso del cemento y árido fino en el caso del hormigón, excluyendo otros usos posibles. Para esto, en primer lugar, se identifica la composición química de los relaves en Chile mediante el catastro público de SERNAGEOMIN actualizado hasta el 01 de abril del 2024, sin realizar pruebas de laboratorio. Luego, se determinan las limitantes regulatorias que no permiten el uso de los relaves en la industria cementera, identificando las principales brechas que atraviesan los proyectos relacionados a la reutilización de este material.

Para definir los criterios de selección sobre los requerimientos que debe cumplir un relave para ser utilizado en la industria cementera, se utiliza la información en las normas chilenas 148, 160, 161 y 163, junto con el Decreto Supremo 148 respectivamente. Si bien el parámetro más relevante para garantizar la calidad y el uso de los residuos es la granulometría de cada relave, esta información no se encuentra declarada de manera transversal en el país, por lo que los estudios para evaluar la real viabilidad de cada uno de los relaves identificados como de interés deben ser realizados por la empresa interesada.

La información base para la construcción del mapa nacional es el catastro público geo-químico y espacial de relaves proporcionado por SERNAGEOMIN, sumado a información recopilada directamente desde Cementos Melón, Cementos Bio Bio, Cementos Polpaico y unicon Chile. Por último, debido a la escasa información pública sobre el precio de cada uno de los insumos necesarios en cada empresa, se tomará como principal y único costo el de transporte, basándose en la recomendación de Cementos Melón.

Finalmente, esta memoria no pretende dar solución total al problema de saturación de relaves en Chile, sino, más bien, evidenciar y fomentar un negocio en el cual se pueden ver mutuamente beneficiadas la industria de la minería y la construcción, minimizando el impacto ambiental de ambas industrias, en vías hacia una economía circular para el procesamiento de minerales en el país.

### **1.4. Estructura del trabajo de memoria**

Capítulo 1: En este capítulo, se presenta la introducción a la problemática, junto con los objetivos y alcances de la memoria.

Capítulo 2: Se presenta la revisión de la literatura en torno a la problemática de relaves y su uso en otras industrias.

Capítulo 3: Describe la metodología.

Capítulo 4: Se presentan los resultados obtenidos.

Capítulo 5: Presenta la discusión de los resultados, junto con el análisis en contraste con la revisión de la literatura.

Capítulo 6: Resume el resultado del trabajo realizado mediante las conclusiones.

# Capítulo 2

## Revisión de la literatura

### 2.1. Relave

El relave es un sólido finamente molido mezclado con agua y otros compuestos provenientes de la industria minera, cuya granulometría y composición (mineralógica y química) se caracterizan por ser heterogéneas dentro del depósito[10]. En Chile, la minería extrae grandes cantidades de rocas (comúnmente sulfuros de cobre) del yacimiento que se explota, sólo una pequeña fracción del total corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar (menos del 1%). Para iniciar el proceso de obtención del metal, se debe moler la roca y posteriormente concentrar el commodity mediante procesos de flotación, del cual se obtiene un concentrado con un porcentaje más alto en cobre (entre 20 y 30%), que se puede vender o seguir procesando para obtener un resultado de alta pureza (hasta un 99,9%) por medio de un proceso de fundición. El resto del material resultante de la flotación, muy pobre en cobre, se denomina “relave”, y se deposita en embalses de manera que se asegure la estabilidad fisicoquímica del residuo, respetando también las normativas ambientales[11].

#### 2.1.1. Componentes estructurales de un relave

Un tranque de relave posee una serie de componentes para su construcción, los principales se describen brevemente basándose en el esquema a continuación.

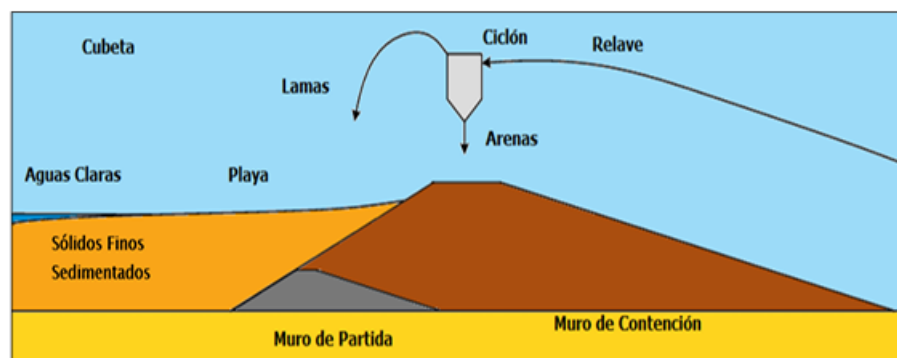


Figura 2.1: Esquema Tranque de Relave Convencional[12].

1. Lamas: Fracción de granulometría fina del relave (20–5 $\mu$ m) que es depositada dentro de la represa[13].
2. Arenas: Fracción de granulometría gruesa del relave (200- 20 $\mu$ m), de la cual comúnmente

es construido el muro de contención[13].

3. Muro: Permite contener los residuos sólidos que se descargan, delimitando la cubeta. Se inicia su construcción con un muro inicial de material de empréstito y posteriormente se construye con las arenas del relave[11].
4. Cubeta: Abarca todo el volumen físico disponible para el depósito de relaves[11].
5. Laguna de Aguas Claras: Es la laguna que se forma en la superficie de la cubeta debido a la sedimentación de las partículas finas en capas inferiores del relave[11].
6. Coronamiento: Es la parte superior del muro de contención, muy cercano a la horizontal[11].
7. Playa activa: Zona donde se descargan los relaves en la cubeta, usualmente esta seca en la superficie y se asemeja a una playa de arenas finas[11].

### **2.1.2. Tipos de relaves**

Existen 5 tipos de relaves según el Decreto Supremo 248 “Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relave”. Los cuales son descritos a continuación[10].

1. Embalse: El muro de contención del depósito se construye con material de empréstito y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. También se le llama embalse de relave a aquellos que están ubicados en alguna depresión del terreno en que no requieren la construcción de un muro de contención.
2. Relave convencional: El muro de contención del depósito es construido con la fracción más gruesa (arenas) y su humedad ronda el 50 %.
3. Relave espesado: Es sometido a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminando parte del agua que contienen, por lo que debe contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente. La humedad de este relave alcanza cerca del 30 %.
4. Relave filtrado: Antes de ser depositado, pasa por un proceso de filtración, donde se asegura que la humedad sea menor a un 20 %.
5. Relave en pasta: Presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el filtrado, corresponde a una mezcla de relaves sólidos y agua -entre 10 y 25 % de H<sub>2</sub>O - muy similar a una pulpa de alta densidad y se deposita sin necesidad de compactación.

### **2.1.3. Métodos de construcción de relaves**

Los proyectos mineros en Chile por ordenamiento jurídico deben pasar por una Evaluación de impacto ambiental. Pueden ingresar a la evaluación como una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) dependiendo del daño que puede significar la implementación del proyecto en el ecosistema, donde se le exige a la empresa asegurar las condiciones fisicoquímicas del depósito de relaves durante y después de la operación. Además se debe hacer cargo de este residuo dentro de su plan de cierre con un monitoreo constante y otras medidas necesarias una vez culmina la etapa operativa del proyecto.

En torno a la regulación, existen 3 métodos de construcción en la normativa internacional de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos, los cuales se describen brevemente a continuación[14].

## 1. Aguas Abajo

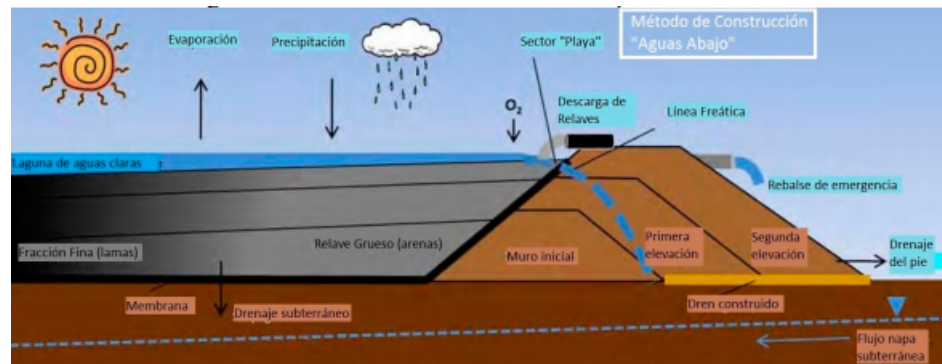


Figura 2.2: método de construcción aguas abajo[11].

El método más seguro es el llamado “aguas abajo”. Su implementación consiste en depositar las arenas de manera que el coronamiento del muro se vaya expandiendo hacia afuera a medida que crece el tranque, mientras que la fracción fina se deposita aguas arriba, lo que culmina con una obra estable frente a movimientos como temblores o terremotos. A grandes rasgos, la construcción con las arenas cicloneadas se va apoyando sobre las depositadas anteriormente que tienen un menor contenido de agua, por lo que el muro es más resistente[15].

## 2. Eje Central

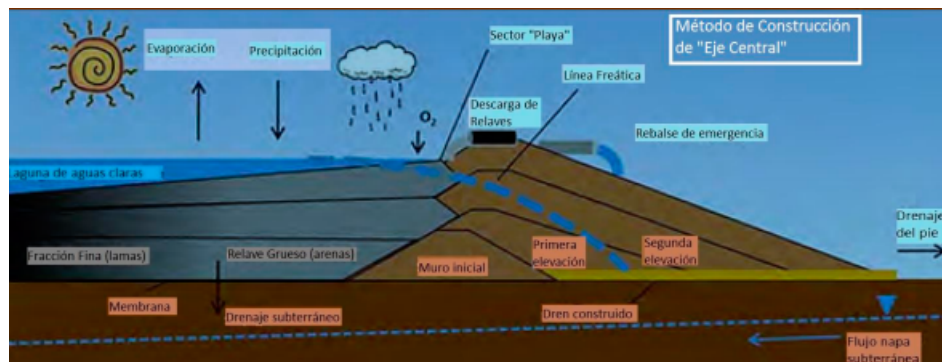


Figura 2.3: método de construcción eje central[11].

En este método las arenas cicloneadas se depositan hacia el lado de aguas abajo y las lamas en la zona de aguas arriba. Una vez completado el vaciado correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el plano vertical de partida de la berma del coronamiento del muro de partida, lo que permite lograr que el eje se mantenga en vertical[16].

### 3. Aguas Arriba

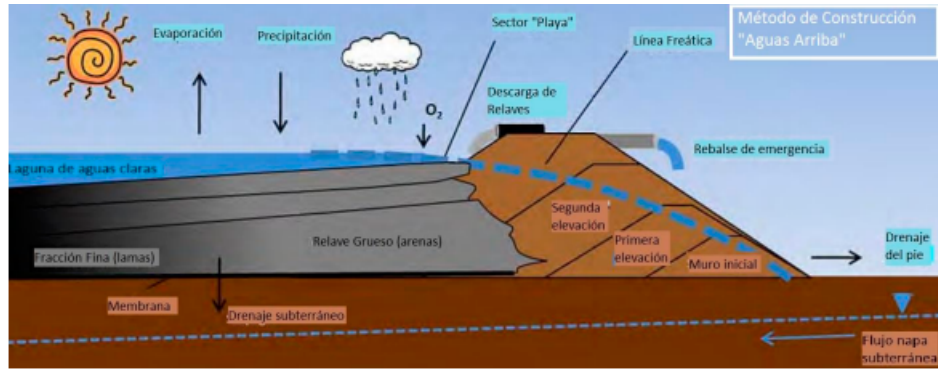


Figura 2.4: método de construcción Aguas arriba[11].

La arena se deposita junto al muro inicial, mientras las lamass se depositan hacia el centro del tranque en un punto mas alejado del muro, de modo tal que se va creando la playa de aguas claras al decantar las partículas más pesadas. El agua escurre formando el pozo de sedimentación o laguna de sedimentación, la que una vez libre de fragmentos en suspensión es evacuada mediante un sistema de estructura de descarga, o bien, se utilizan bombas montadas sobre una balsa flotante[16]. El método de "Construcción Aguas Arriba" está prohibido en Chile desde 1970 debido a la gran cantidad de colapsos a nivel mundial de este tipo de construcciones, ejemplo que se ha seguido progresivamente en los demás países con vocación minera[11].

## 2.2. Composición de los relaves

Los relaves poseen una composición diversa y heterogénea entre depósitos y en el mismo relave, ya que su contenido depende directamente del yacimiento del que se extrae la roca y cada uno es único geológicamente hablando[17]. La química, granulometría y la mineralogía tienen un rol crucial para evaluar la viabilidad de estos yacimientos en su uso en otras industrias. Así, un depósito que no cumpla la normativa vigente puede contaminar su entorno si los metales contenidos en los sólidos se disuelven, por ejemplo, a través del drenaje ácido[11].

### 2.2.1. Composición química y mineralógica

Basándose en el catastro con datos de Geoquímica de Depósitos de Relaves de Chile, publicado por SERNAGEOMIN, estos son diversos química y mineralógicamente.

Tabla 2.1: Elementos químicos en relaves[18].

Símbolo	Elemento	Símbolo	Elemento	Símbolo	Elemento	Símbolo	Elemento
Cu	Cobre	V	Vanadio	Cr	Cromo	Co	Cobalto
Ni	Níquel	Zn	Zinc	Rb	Rubidio	Sr	Estroncio
Y	Itrio	Zr	Circonio	Nb	Niobio	Ba	Bario
Pb	Plomo	Sc	Escandio	Cs	Cesio	Hf	Hafnio
Ta	Tántalo	Th	Torio	U	Uranio	As	Arsénico
Mo	Molibdeno	Sb	Antimonio	Sn	Estaño	Ag	Plata
Cd	Cadmio	Bi	Bismuto	W	Wolframio	S	Azufre

Los cuales se encuentran caracterizados públicamente en el país, aún así, se ha encontrado la presencia de otros elementos menos comunes y de alto valor, como lo son las tierras raras (REE) en las regiones de Atacama y Coquimbo, por lo que pueden presentar una oportunidad de negocio que se debe evaluar[19].

Relaves con Valor, un programa de Investigación y Desarrollo de la cartera de Programas Tecnológicos y Estratégicos de CORFO, define un relave como “un potencial yacimiento de origen minero secundario, residual, proveniente de un yacimiento geológico de minerales que han sido explotados para recuperar algunos elementos abundantes en Chile, como cobre (Cu), hierro (Fe), plata (Ag), oro (Au), plomo (Pb), molibdeno (Mo) y zinc (Zn), entre otros”. Iniciativas de revalorización han potenciado el reprocesamiento de este residuo, sin embargo, solo un 1 % aproximadamente del depósito tendría un interés económico, por lo que el reprocesamiento no viene a dar solución al otro 99 % de la problemática actual[20].

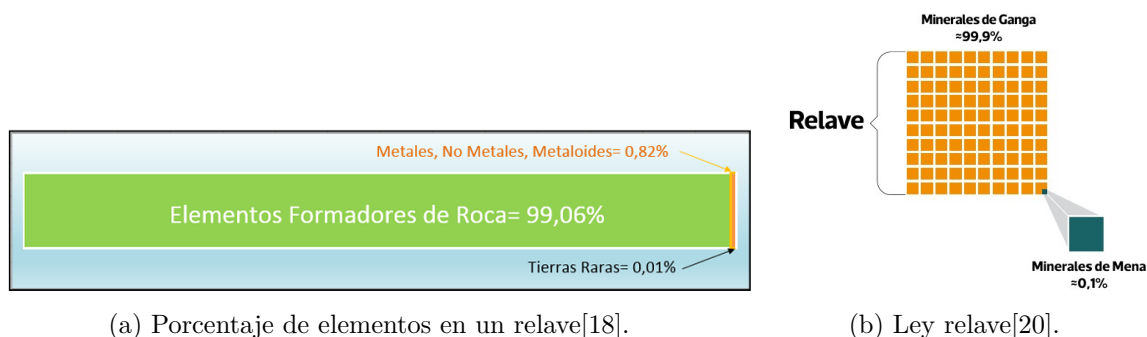


Figura 2.5: elementos en un relave.

Como se logra observar en la figura anterior, la mayor cantidad de elementos en un relave son “formadores de rocas”. Estos corresponden a los doce elementos mayores que forman a los minerales, en cuya mineralogía se destaca los óxidos como el silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), titanio ( $\text{TiO}_2$ ), hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), calcio ( $\text{CaO}$ ), magnesio ( $\text{MgO}$ ), manganeso ( $\text{MnO}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y azufre ( $\text{SO}_3$ ), además de otros compuestos perdidos por calcinación (Carbonatos)[18], por lo que es crucial poder identificar sus oportunidades de uso ya que representan cerca del 99 % del contenido de depósito.

### 2.2.2. Composición granulométrica

Si bien el tamaño de partícula no se encuentra caracterizado de forma pública a nivel país, según cómo haya sido el procesamiento de material que generó los relaves en cada una de las mineras, estos pueden contener una variada granulometría que generalmente va desde 1-2 mm hasta 1-10  $\mu\text{m}$ . Se entiende por fracción gruesa al conjunto de partículas con tamaño por sobre las mallas Ty #200 (75  $\mu\text{m}$ )[21]. En el Decreto Supremo 248 se indica que para la construcción de un muro de arenas, la fracción gruesa debe tener como mínimo el 80 % de sus partículas sobre la malla Ty #200, es decir que el depósito presenta en general una granulometría fina menor a 75  $\mu\text{m}$ [10].

### 2.2.3. Densidad y humedad

Otras características importantes a considerar de los relaves son la densidad y la humedad que presenta el depósito. Es fundamental conocer estos parámetros si se desea evaluar usos alternativos para el residuo.

El Decreto Supremo 248 determina que la densidad relativa es el grado de compactación que tiene el relave, el cual se puede calcular por la siguiente fórmula[10]:

$$Densidad\ relativa(Dr) = \frac{\gamma_{max}}{\gamma_{nat}} \times \frac{\gamma_{nat} - \gamma_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \times 100; \% \quad (2.1)$$

En que:

$\gamma_{max}$  = peso unitario máximo determinado por el método propuesto por ASTM para suelos granulares, u otro que pruebe ser más efectivo.

$\gamma_{min}$  = peso unitario mínimo, determinado por el método propuesto por ASTM.

$\gamma_{nat}$  = peso unitario del suelo in situ.

Tanto la densidad como el porcentaje de humedad depende del tipo de relave y la cantidad de agua con la que el material es depositado, por lo que esta varía según el depósito que se desea estudiar. Estos parámetros influyen directamente en la estabilidad del depósito de relaves.

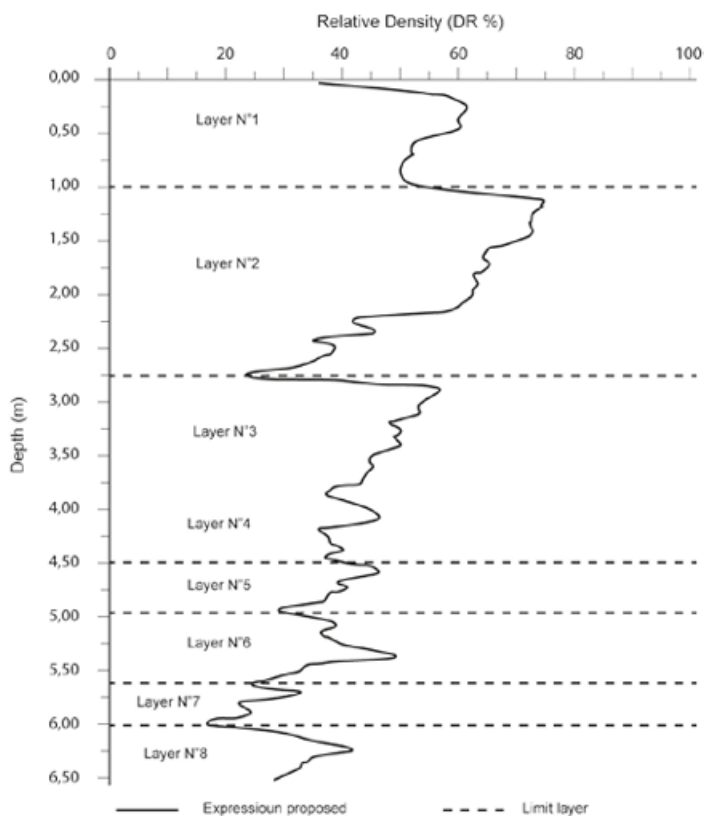


Figura 2.6: Densidad en función de la profundidad en un relave[22].

Se puede observar en la figura anterior que la densidad relativa de los relaves varía con la profundidad de la construcción, la que tiende a disminuir a medida que la profundidad aumenta. La variación proporciona información sobre el comportamiento mecánico y la susceptibilidad a la licuación bajo cargas sísmicas[22]. En términos generales, después de ser filtrado y compactado alcanza una densidad entre 1.85 y 2.80 toneladas por metro cúbico y una humedad inferior al 20% al depositarse[23]. Su consistencia casi sólida facilita su

transporte mediante correa transportadora y garantiza la estabilidad física del depósito. Posteriormente, el agua extraída se dirige de nuevo al proceso para su reutilización, alcanzando humedades cercanas al 10 % una vez es drenada[24].

Garantizar el adecuado manejo de los relaves es de vital importancia puesto que, a pesar de no estar catalogado como residuo peligroso según el Decreto Supremo 148 “Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos”[25], su traslado en caso de accidente puede provocar grandes consecuencias para el medio ambiente y las comunidades.

## 2.3. Relaves en Chile

Es esencial conocer el monitoreo existente y la situación actual de Chile en torno a los relaves. además de la tendencia sobre la demanda del commodity principal que lo genera (el cobre), para estimar las proyecciones de producción del residuo en un futuro cercano.

### 2.3.1. Distribución geográfica de relaves en Chile

Chile posee un total de 764 relaves actualmente construidos a lo largo del país, los cuales se concentran principalmente en cantidad y tonelaje depositado en la zona centro - norte, mientras que las regiones del sur, en general, no presentan depósitos, tal como se logra apreciar en la siguiente tabla[8].

Tabla 2.2: Relaves por región.  
Fuente: Elaboración propia[8].

Región	Tonelaje total de relaves Mt)	Tonelaje total autorizado (Mt)	Nº de relaves
Tarapacá	940	2,280	8
Antofagasta	4,400	10,138	52
Atacama	1,277	3,473	172
Coquimbo	1,321	2,701	392
Valparaíso	381	642	80
Metropolitana	2,624	6,432	26
O'Higgins	491	654	19
Maule	1	1.6	6
Aysén	14	19	9
Total	11,453	26,343	764

En cuanto a cantidad de relaves, la mayor presencia se concentra en la zona norte del país alcanzando un 82 % con 624 depósitos (concentrados en la Región de Atacama y Coquimbo principalmente). Sin embargo, son las regiones de Antofagasta y Metropolitana las que presentan el mayor tonelaje de relaves depositados (61 %), debido a la presencia de la gran minería, específicamente de empresas como La Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) y Anglo American. Según lo observado, la cantidad de tonelaje autorizado a depositar en el país es más del doble del que se encuentra actualmente en los tranques. Las regiones de Arica y Parícuta, Bio Bio, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Magallanes no poseen relaves.

Respecto del estado de los relaves, solo un 14 % de ellos se encuentra activo, un 62 % inactivo, un 23 % abandonado y un 1 % en construcción y revisión. Además, los relaves de tipo



convencionales como traques y embalses representan 85,5 % del total[7]. Al tener un 62 % de relaves inactivos (es decir, que no se encuentran operativos) representa un gasto significativo para los dueños de estos mismos, ya que deben mantener el monitoreo principalmente de la estabilidad fisicoquímica del depósito a pesar de haber culminado el proyecto, sumado al riesgo que representa para las comunidades aledañas la construcción. El 2020 el Ministerio de Minería puso en marcha un “Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible”, donde se realizó una priorización de los desechos abandonados e inactivos, en la cual se obtuvo un total de 102 residuos prioritarios[4].

Bajo esta misma línea, el Advanced Mining Technology Center (AMTC) y el Center for Mathematical Modeling (CMM) realizaron un sistema de monitoreo de riesgo en torno a depósitos de relaves, donde se priorizaron 12 de estos residuos inactivos y en abandono dentro del país. Se destacan los antiguos construidos con la técnica “aguas arriba”, la cual la legislación chilena actual prohíbe debido a la alta inestabilidad y potencial roturas que posee este tipo de construcción[26]. Algunos de los criterios aplicados fueron:

- Depósitos con una superficie mayor a 2 [ha].
- Depósitos con cercanía a infraestructura crítica.
- Depósitos con cercanía a elementos naturales críticos para la conservación

De los 12 depósitos críticos, 8 se encuentran en la región de Atacama en la comuna de Copiapó, 2 están en la Metropolitana (RM) y 2 en la región de Coquimbo, comuna Andacollo. Cabe destacar que ninguno de los seleccionados posee laguna de aguas claras, pero 8 de ellos han sido construidos con el método de construcción aguas arriba[26]. Junto con la necesidad de hacerse cargo de los relaves que amenazan la seguridad de las comunidades, una de las principales urgencias de tomar acciones concretas en vías a su uso es el aumento de la demanda de commodities como el cobre.

### 2.3.2. Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que poseen una densidad alta. En general, se trata de elementos tóxicos para los seres humanos, y los más susceptibles de encontrar en el agua son el mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo[27]. La diversidad de composición química entre relaves permite que existan “limpios” o libres de metales pesados, mientras que otros puedan contener cantidades significativas capaces de contaminar de manera importante los suelos y recursos hídricos de las fuentes cercanas.

En Taltal, región de Antofagasta, Chile, se pueden observar los efectos de la contaminación debido a la alta presencia de relaves en las playas de la ciudad. Estudios evaluaron la cantidad de Cu, Pb, Zn, As, Cr, Mo, V, Sb, Ni, Mn, Co, Hg y Cd obteniendo como resultado para las zonas S1, S2 y S3 (que se encuentran cercanas a depósitos abandonados cercanos a la costa) altas concentraciones de arsénico y cobre, además del resto de elementos que de igual forma exceden el promedio mundial de suelos, los que se explican por la influencia antropogénica de los desechos mineros abandonados en aquellas zonas. Esto implica un alto riesgo para la salud humana debido al material encontrado en los suelos superficiales que rodean los sitios, ya que, según el estudio, la población puede experimentar efectos no cancerígenos y cancerígenos[28].

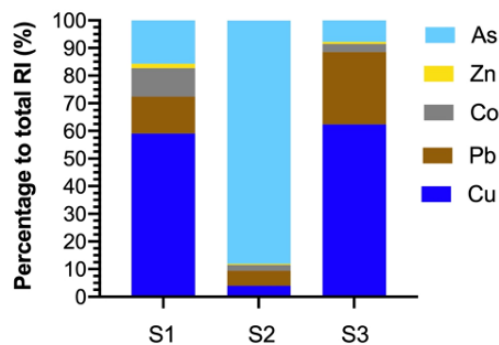


Figura 2.7: Metales pesados encontrados en Taltal[28].

La presencia de metales pesados es una de las principales amenazas cuando hablamos del reuso de los residuos, debido a que su potencial toxicología puede ser riesgosa para la salud humana, como se describió anteriormente. Afortunadamente, existen métodos de encapsulamiento de metales pesados dentro del relave, que permiten que se mantengan aislados e inofensivos. Dos de estos son brevemente descritos a continuación:

- Encapsulamiento: Conocido también como fijación química, es un proceso a través del cual se inmoviliza e insolubiliza a los metales pesados, lo que se logra por medio de una reacción entre los componentes de los metales en la matriz del relave[29].
- Microencapsulación con sílice: Convierte los metales pesados a una forma inerte y segura mediante el recubrimiento con sílice y es particularmente efectivo para arsénico, cadmio, mercurio, cobre, plomo, zinc y cromo[29].

## 2.4. Oportunidades de aprovechamiento de los relaves

Chile es el tercer país con la mayor cantidad de depósitos del mundo, superado únicamente por China y EEUU[6], lo que ha llevado a que se cuestione no solo el “qué hacemos” con los ya existentes, si no, un cambio en la mirada de los futuros relaves por depositar hacia la búsqueda de nuevos métodos que impacten en menor medida al ecosistema, sin dejar de lado la gama de iniciativas que han nacido a nivel nacional como una respuesta al problema actual. Algunas de las alternativas más destacadas son; el reprocesamiento para la extracción de metales de interés, la creación de ladrillos ecológicos basándose en relaves, el uso como relleno de piques y minas no operativas, la formación de geopolímeros con relave, su uso en la industria cementera, entre otros usos.

### 2.4.1. Reprocesamiento

Avanzar hacia una minería circular con foco en la recuperación de elementos de valor posee varias ventajas relacionadas con el valor añadido en términos económicos, productivos y el aporte medioambiental que genera, lo que ofrece a la industria una oportunidad para seguir creciendo en forma sostenible[30]. Estudios realizados por instituciones como SERNAGEOMIN y COCHILCO evidencian la presencia de diversos elementos químicos de interés en los relaves, desde los más tradicionales (Cu, Mo, Au, Ag y Fe), hasta poco comunes y de alta valorización económica y estratégica (Co, Cr, V y Tierras Raras). Debido a esto, dentro del último siglo se han impulsado una serie de iniciativas que buscan fomentar el reprocesamiento

para la obtención de estos minerales, ya sea mediante un proceso de lixiviación o flotación, como se observa en la siguiente figura[31].

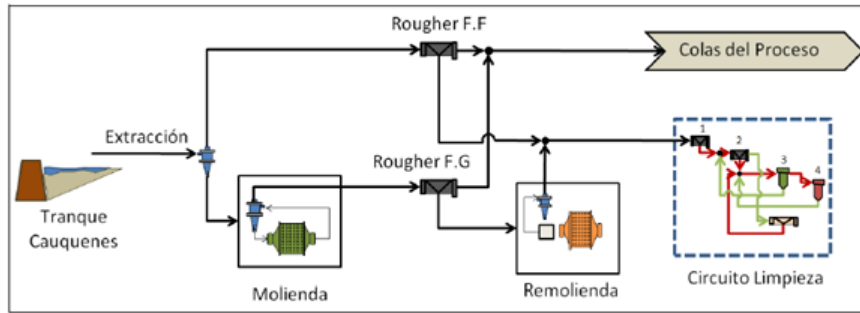


Figura 2.8: Flowsheet reprocesamiento de relaves en MVC[32].

En Chile, se destacan varios proyectos de investigación, como por ejemplo, Relaves con Valor, el cual forma parte de la cartera de Programas Tecnológicos y Estratégicos de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), quienes crearon 2 manuales de uso público sobre cómo reprocesar y valorizar un relave[31]. También se destaca el programa Relaves Sustentables liderado por CODELCO Tech, co-ejecutado por AMTC, Minera Valle Central y Solvay, el que se encuentra finalizando su primera etapa, donde se hizo un estudio comercial de los elementos críticos presentes en los pasivos mineros en el país y se estudiaron métodos de concentración, recuperación y estabilización, además de utilizar técnicas de muestreo y caracterización en relaves[33].

Un ejemplo del reprocesamiento es Minera Valle central (MVC), la cual posee su propio programa denominado “Identificación, cuantificación y extracción (bio) tecnológica de minerales/elementos de valor contenidos en depósitos” donde el objetivo es recuperar elementos de valor de los depósitos de las compañías mineras productoras de cobre. A su vez, MVC lleva cerca de 30 años recuperando cobre y molibdeno desde relaves provenientes de la División El Teniente de CODELCO Chile, obteniendo una ley de 0,12% de cobre total a partir de relaves frescos (en menor proporción) y antiguos que fueron depositados en el Embalse Colihues entre 1977 y 1987[34].

## 2.4.2. Geopolímeros

Los geopolímeros son materiales cementicios que se crean en función de otros materiales (no necesariamente afines a la industria de la construcción) que tienen características y propiedades potencialmente aptos para su uso y generan menos emisiones de contaminantes en su producción, por lo que se les considera componentes alternativos al cemento y afines. La fabricación se basa en la formación de un polímero inorgánico a partir de la activación de una fuente de alúmina ( $Al_2O_3$ ) y sílice ( $SiO_2$ ) mediante la adición de una solución a base de un álcali y por lo general un curado en horno a temperaturas mucho menores a las usadas en materiales tradicionales del cemento[35].

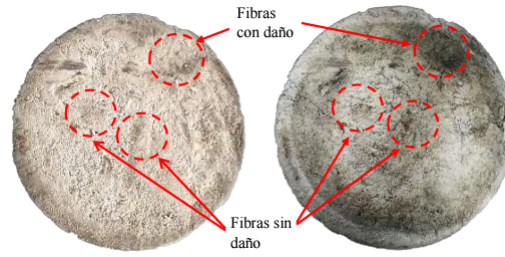


Figura 2.9: Discos de geopolímeros[35].

El proceso le otorga a los geopolímeros propiedades altamente valoradas por la industria de la construcción, como por ejemplo: resistencia al fuego y por ende a altas temperaturas, a la erosión del agua y mayor durabilidad en algunos casos[35].

### 2.4.3. Ladrillos ecológicos

Desde CODELCO hasta universidades se han visto atraídos a proyectos de creación de ladrillos ecológicos a base de relaves mineros. El proyecto “Desarrollo de un prototipo de ladrillo ecológico geopolimérico a partir de relaves de cobre y agua de mar” está liderado por un equipo de investigadores de la Universidad de Antofagasta en colaboración con profesionales de la Universidad de Kajaani (Finlandia), y en asociación con empresas constructoras de Tocopilla que buscan desarrollar nuevos materiales geopoliméricos para su uso como materiales de construcción y absorbentes para el tratamiento de aguas en minería mediante el proceso que se presenta a continuación[36].

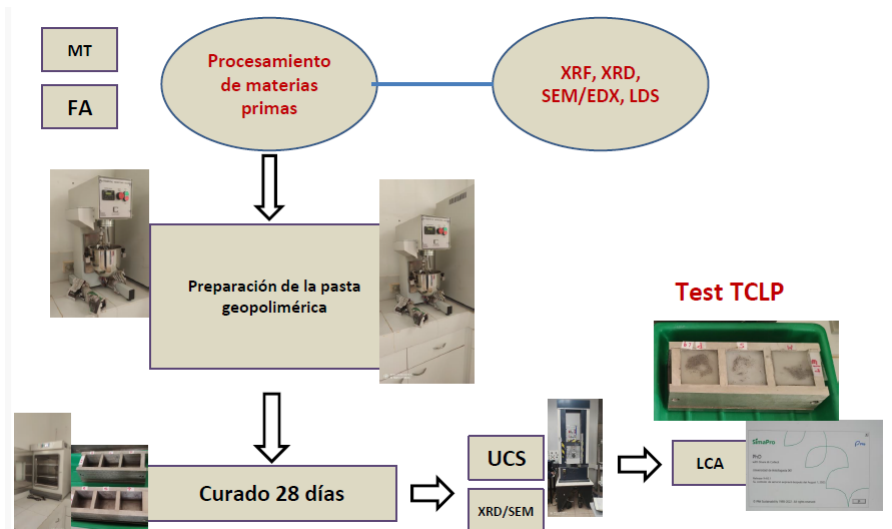


Figura 2.10: Proceso de creación de ladrillos poliméricos[36].

Los insumos utilizados son un activador de propiedades cementicias, relaves, agua de mar y cenizas volantes que permiten obtener como resultado un ladrillo que cumple con las pruebas de resistencia y calidad pertinentes exigidas por las empresas constructoras de Tocopilla.

De forma transversal, el proyecto TailingR32Green en España busca desarrollar un nuevo modelo de negocio basado en conceptos de economía verde mediante el establecimiento de un enfoque sostenible circular, de bajo riesgo y no tóxicos para la revalorización, reutilización y

reducción de riesgos de los relaves mineros, El relave es procesado inicialmente mediante una biolixiviación para la extracción de minerales críticos (REE o Co), y el relave resultante es procesado para la creación de geopolímeros, ladrillos ecológicos y materiales para la industria de la construcción. Posteriormente son utilizados en la misma mina, avanzando hacia una economía circular de los residuos[37].

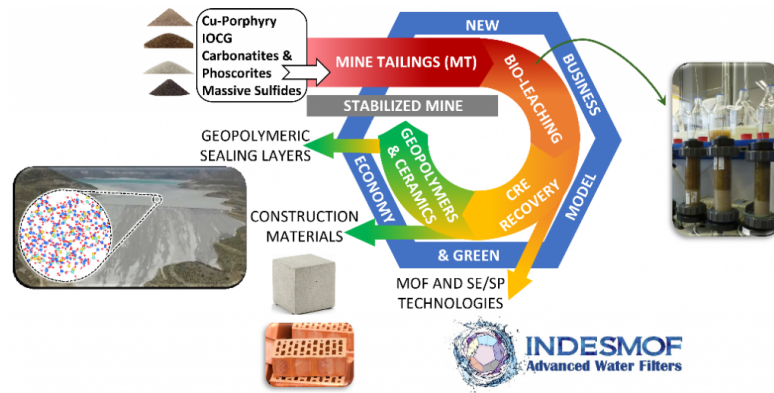


Figura 2.11: Inputs y outputs proyecto TailingR32Green[37].

#### 2.4.4. Otras iniciativas

En Chile, algunos usos alternativos que se han destacado por su potencial utilización dentro de la industria minera son el relleno de piques y minas no operativas con relave, para liberar de esta forma el uso de suelo de los depósitos del residuo. Particularmente, la división El Teniente de CODELCO se encuentra desarrollando un proyecto liderado por el área de Innovación en Sustentabilidad para el relleno de piques utilizando este residuo, lo que ha pasado las pruebas preliminares de calidad, indicando así la gran oportunidad de uso. También se ha probado su reutilización en shotcrete con un 2.5 al 5 % de relaves en su composición para fortificación de la mina subterránea, el que ha alcanzando resultados favorables y de la calidad y resistencia requeridas[38].

A nivel internacional, se han identificado diversas iniciativas relacionadas con el uso de relaves en la industria de la construcción. Un ejemplo destacado es el proyecto Ecomud en Brasil, que ha desarrollado un material para la pavimentación de calles. Este material no solo aprovecha grandes cantidades de relaves, sino que también mejora la resistencia de las superficies pavimentadas. Además, contribuye a la reducción del polvo y elimina la formación de barro en los caminos durante la temporada de lluvias[39].

Por otro lado, el Tailings Reduction Roadmap del Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) es una estrategia integral destinada a mitigar los riesgos y reducir la generación de relaves mineros a nivel global. Esta hoja de ruta pone un fuerte énfasis en la innovación tecnológica y en un cambio de paradigmas dentro de la industria minera. A través de proyectos colaborativos en países como Australia, Canadá y otros, la iniciativa busca no solo disminuir los riesgos asociados con los depósitos de relaves, sino también promover su uso sostenible en diversas industrias[40].

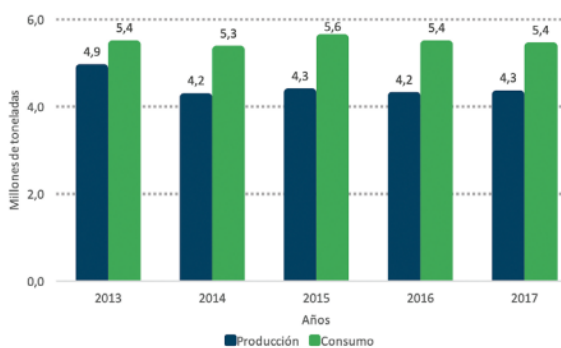
## 2.5. Uso de relaves en la industria de la construcción

Para identificar el uso de los relaves en la industria de la construcción como una de las principales oportunidades para el residuo en Chile es necesario contextualizar sobre la relevancia de la industria de la construcción.

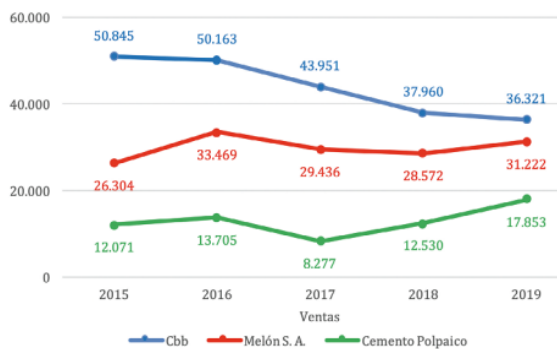
### 2.5.1. Industria de la construcción en Chile

La construcción en Chile, tal como a nivel global, es una industria vital para la economía del país y su desarrollo, además de tener gran importancia en la creación de empleos en el rubro siendo el sexto empleador a nivel nacional y concentrando el 63 % de la inversión nacional. A pesar de su importante participación en el mercado, se encuentra estancada en crecimiento desde en los últimos 20 años. Se destaca la innovación como una de las principales oportunidades de crecimiento en este rubro[41].

En Chile, los principales productos de la industria de la construcción son el cemento y el hormigón. Este rubro cuenta con tres grandes participantes: Melón S.A, Cemento Polpaico S.A y Cementos Bío Bío S.A, empresas productoras e importadoras de clinker, cemento y hormigón. Durante la última década, el consumo de cemento en Chile se ha mantenido estable en torno a los 5,4 millones de toneladas anuales, por sobre la producción nacional del producto que rodea los 4,3 millones de toneladas anuales. Entre 2008 y 2009, alrededor del 25 % del cemento producido en el país se hizo con cemento o clínker importado desde países como Tailandia, Perú y Argentina hasta alcanzar en 2018 un 60 % de participación debido a la escasez de producción nacional en un contexto de falta de materia prima y altos costos de producción[9].



(a) Producción y consumo de cemento en Chile.



(b) EBITDA de los principales competidores en millones de pesos.

Figura 2.12: Mercado del cemento en Chile[9].

### 2.5.2. Problemática actual: Áridos naturales

La Ley N° 19.300, Bases del Medio Ambiente, considera que toda extracción de áridos que se desea realizar debe someterse a un procedimiento de evaluación ambiental. Los áridos naturales son principalmente grava, gravilla y arenas, y en Chile se emplean anualmente cerca de 12 millones de metros cúbicos. Sin embargo, a pesar de la alta demanda de áridos naturales existentes en el país, la directora del Departamento de Ingeniería en Obras Civiles de la Universidad de la Frontera (UFRO), Viviana Letelier, quien lleva más de una década

investigando sobre áridos alternativos, explica que el país particularmente se encuentra en un escenario de escasez de áridos naturales, que ya se visualiza en las cercanías de las regiones industrializadas[42].

Lo anterior, sumado al contexto medioambiental que provee un aumento en las restricciones de emisiones de efecto invernadero por las empresas, pueden impulsar a futuro la necesidad de materiales alternativos a los áridos naturales como insumo para la línea productiva de la industria de la construcción. En la sección 4.2 se presenta una tabla resumen de los requerimientos de los relaves para cada uso en particular según información recopilada directamente desde Cementos Melón, pioneros en el uso de relaves en construcción en Chile, la cual es utilizada como información base para el desarrollo de la memoria.

### **2.5.3. Productos de la industria cementera**

A continuación, se describen los principales productos; clinker, cemento y hormigón en los cuales se identifica una oportunidad. En el caso de la industria de la construcción, un producto resulta ser el insumo de otro, por lo que es crucial que se realicen bajo las proporciones de cada una de las empresas para cumplir con los estándares de calidad esperados.

#### **2.5.3.1. Clíinker**

El primer paso para la creación de cemento es la obtención y preparación de las materias primas necesarias para la producción de clíinker. Este se compone principalmente de cal y arcillas quemadas (más conocido como crudo) para la obtención de un material granular de alta resistencia. Los óxidos que componen el crudo y que pueden ser encontrados en los relaves son:

- 60 - 69 % de Óxido de Calcio “Cal” ( $\text{CaO}$ )
- 18 - 24 % de óxido de Silicio “Sílice” ( $\text{SiO}_2$ )
- 4 - 8 % de óxido de Aluminio “Alúmina” ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- 1 - 8 % de óxido de Hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

Posteriormente, el crudo pasa por un proceso de molienda para que las reacciones químicas en la cocción en el horno se realicen de forma adecuada. Luego, el material (puede ser procesado vía seca, semi-seca o semi-húmeda) en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los  $1450^\circ$ , el cual es enfriado bruscamente al salir del horno en enfriadores planetarios o de parrillas produciéndose de esta forma el clíinker. Como resultado se obtienen 4 componentes (disilicato cálcico, trisilicato cálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrita tetracálcica), los cuales determinan las propiedades del cemento resultante[43]. El proceso a grandes rasgos se presenta en la figura 2.13 a continuación.



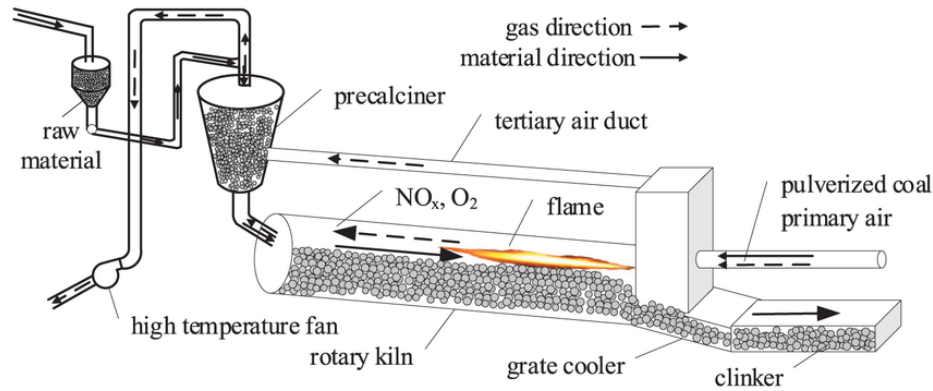


Figura 2.13: Proceso de producción de clínker[44].

### 2.5.3.2. Cemento

El cemento es una sustancia en polvo hecha de clínker mezclada con agua y arena para mortero o con agua, arena y grava para hacer hormigón. El resultado final de la mezcla se endurece cuando se seca[45]. El proceso de fabricación termina con la molienda conjunta de clínker, yeso y otros materiales denominados “adiciones” con el fin de conferirle diferentes propiedades, dentro de los cuales podría entrar el relave solo o en conjunto con escoria (para ingresar como un aditivo calcareoarcilloso). La molienda se realiza en equipos mecánicos en los que la mezcla es sometida a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas. Una vez obtenido el cemento se almacena en silos para ser cargado a granel o mediante sacos[43].

Existen varios tipos de cementos, que se diferencian por distintas concentraciones de los elementos químicos principales que lo componen. Por ejemplo, el cemento tipo Portland es el utilizado mayormente a nivel mundial, pero Cementos Melón SA ocupa el método de fabricación del cemento Portland Puzolánico, el cual presenta un tiempo de fragüe mayor con el objetivo de aumentar la resistencia a la compresión, por lo que las proporciones descritas en la tabla 4.2 se basan en torno a este tipo de cemento[46].

### 2.5.3.3. Hormigón

Finalmente se produce hormigón, el cual es un material de construcción formado por una mezcla de cemento, arena, piedra (árido) y agua que se endurece hasta formar una masa pétreo[45]. Debido a la gran variedad de aditivos que puede tener y las diferentes proporciones que lo componen, el hormigón puede adquirir diversas propiedades y escala de resistencias. De forma general, la receta del hormigón se compone de[47]:

- 1 parte de cemento.
- 1 parte de agua.
- 3 partes de arena.
- 4 partes de grava.

Las propiedades del hormigón varían dependiendo del estado del mismo, que puede ser fresco (para ser manipulado) o endurecido (no puede manipularse debido a su rigidez). Algunos de los hormigones que se pueden generar son; Hormigón fresco, endurecido, autocompactante,



proyectado con fibras, de alta resistencia, ligero, excavable, drenante, translúcido, antibacteriano, entre otros, los cuales varían en resistencia, apariencia, fluidez y durabilidad variando los componentes y aditivos que se le agrega a la mezcla según la función que este debe cumplir. El resultado final más común del hormigón se presenta a continuación en la Figura 2.14.



Figura 2.14: Hormigón[47].

El uso de relaves en la industria de la construcción puede tener varios beneficios tanto para la minería como para la cementera, el medio ambiente y las comunidades. Algunos de ellos podrían ser los siguientes:

#### 2.5.4. Beneficios del uso de relaves

1. Menores costos para ambas industrias. De manera particular en el caso de la industria minera, esta se ve beneficiada debido a que se reducen los costos de cierre de monitoreo y construcción del relave, mientras que en la industria de la construcción se pueden reducir los de transporte en el caso de encontrar un relave que pueda servirles a una distancia menor de la planta de extracción de áridos.
2. Liberación de terrenos para otros usos. La disminución de los relaves existentes puede dar cabida a una habilitación de uso de suelo en donde se encontraban estas construcciones, las cuales en muchas ocasiones superan el kilómetro de extensión, sumado a las grandes alturas que alcanzan lo que podría recuperarse en valor paisajístico para las comunidades.
3. Disminución del impacto ambiental de la extracción de áridos, la cual lleva consigo una serie de problemáticas para las canteras de los ríos en donde se afecta no solo el caudal de los mismos, si no también a la topografía, impactando negativamente a flora y fauna que habitan estos espacios. Además, disminuye la tasa de consumo de CO<sub>2</sub> de los ríos debido a la pérdida de velocidad del caudal[48]. Por otro lado, según los especialistas, los impactos ambientales que provocaría la sobre explotación de áridos se relaciona con efectos nocivos a la salud humana y al medio ambiente en general, entre ellos, una menor calidad del aire por emisiones de material particulado, pérdidas de suelos de alto valor, deterioro de la salud y calidad de vida de las personas que viven cerca de las faenas y riesgos potenciales de contaminación de napas subterráneas[49].

A pesar de que los posibles beneficios a obtener son claros, es el escenario económico el que desalienta principalmente el uso de estos residuos de manera transversal en las empresas de

construcción, sin embargo, la situación actual en Chile de áridos naturales puede dar cabida al uso del residuo.

### 2.5.5. Ejemplos de uso de relaves en construcción

En los últimos años, múltiples organizaciones han descubierto el potencial de los relaves para ser utilizados como materias primas en la creación de productos cementicios ya existentes (clinker, cementos u hormigón) o en nuevos materiales que prometen revolucionar la industria (geopolimeros, ladrillos ecológicos, etc...) tal y como se dio a conocer en la sección 2.4. La gran mayoría de estas investigaciones se encuentran aún bajo confidencialidad de las empresas mandantes, por lo que aspectos técnicos en detalle no se presentarán como antecedentes en esta sección.

Hoy en día es un hecho la viabilidad de utilizar el relave para el reemplazo de las arcillas o su uso como materia prima en cemento y hormigón. Claros ejemplos al respecto son los resultados de la empresa Tailings to construction materials (T2CM) proyecto de la Universidad católica (UC) que logró resultados de cementos con un porcentaje de relave de hasta un 40% de su composición[50], y el proyecto exitoso de CODELCO en la división El Teniente con el uso de relaves para cemento en la producción de shotcrete con resultados de la calidad esperada de más de 2 años de eficacia[38].



Figura 2.15: Resultados de hormigón y geopolímeros por T2CM[50].

A pesar de la evidencia que demuestra la viabilidad técnica del uso de relaves en productos cementicios, en Chile, existe una regulación habilitante que imposibilita el uso de estos residuos mineros para otras industrias. Por otra parte, en la industria de la construcción existe una reglamentación sobre los materiales, sus características, ensayos y procedimientos dentro de las Normas Chilenas, de las cuales el Instituto Nacional de Normalización(INN) se encarga de su elaboración, dentro de las cuales no se incluyen a los relaves como materia prima para esta industria.

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología propuesta se centra en evaluar el potencial de los relaves mineros en la industria de la construcción, considerando sus limitaciones, requerimientos específicos y composición geoquímica. En primer lugar, se identifican las barreras técnicas y normativas que restringen el uso de relaves. Posteriormente, se establecen los requerimientos necesarios para su implementación segura y efectiva. Además, se realiza un análisis detallado de la composición geoquímica de los relaves en Chile. Finalmente, se incorpora un análisis de técnico-económico y la elaboración de un mapa georreferencial que delimita clústeres industriales claves para la utilización de estos materiales.

### **3.1. Brechas del uso de relaves en la industria de la construcción**

En primer lugar, se recopilaron y estudiaron los proyectos de uso de relaves en la industria de la construcción ejemplificados en la sección 2.5.5. Una vez entendido el contexto y la factibilidad técnica del uso del residuo, se analizaron las limitantes existentes en la regulación chilena que obstaculizan su uso, extracción y transporte. Para el caso particular de los relaves como áridos naturales, se vieron involucradas una gran cantidad de autoridades, las cuales se identifican en la tabla 4.1 lo que dilata aún más el proceso de aprovechamiento del residuo.

Para legalizar su uso y extracción masiva, se iniciaron reuniones con el Instituto Nacional de Normalización (INN) para la inclusión de los relaves en la norma chilena 163 de áridos y morteros, dentro de la nueva categorización de “árido artificial” mediante la recolección de antecedentes nacionales e internacionales teóricos y prácticos de su uso como materia prima, donde se destaca el apoyo, entrega de información y participación de Cementos Melón, CODELCO, AMTC, Proyecto T2CM, TailingR32Green, Universidades, otras organizaciones y expertos en el tema que hicieron posible su implementación y participan activamente del desarrollo técnico de la norma en cuestión. Luego, se trabajó en la elaboración y requisitos de la industria cementera para el clinker, cemento y hormigón.

### **3.2. Requerimientos para el uso de relaves en construcción**

Con el objetivo de determinar los requerimientos que deben cumplir los relaves para su uso, se llevaron a cabo reuniones con la empresa Cementos Melón, CODELCO, el ICH y

T2CM, donde se discutieron los requisitos básicos. Basándose en pruebas previas exitosas de Cementos Melón con el uso de relaves, la normativa existente y el criterio de expertos, se identificaron los requisitos necesarios para su uso y funcionamiento adecuado, así como la cantidad de relave que puede incorporarse en cada una de las etapas de la línea productiva de la empresa, cumpliendo con los estándares esperados. Una vez obtenida toda la información para la elaboración de los clústeres industriales, se procedió al procesamiento de datos.

### **3.3. Composición geoquímica de los relaves en Chile y su clasificación**

Para identificar la composición química de los relaves y poder clasificarlos en función de sus potenciales usos en la industria de la construcción, se procede a crear la base de datos de relaves en la industria nacional. A continuación, se describe el proceso de tratamiento de datos realizado.

#### **3.3.1. Composición geoquímica**

Con respecto a la base de datos de relaves, la información visualizada dentro del mapa se basó en las necesidades de la industria hormigonera, la cual posee requisitos de composición química (contenido de calcio), distancia, granulometría, tonelaje y densidad. Sin embargo, de acuerdo con la información que se posee en las bases de datos desde SERNAGEOMIN, en el mapa se representa lo siguiente:

- Empresa
- Nombre faena
- Nombre instalación
- Estado
- Método de construcción
- Región
- Ciudad
- Coordenadas
- Tonelaje
- Metales pesados
- Compuestos de interés
- Potenciales usos
- Criticidad

Para armar la base de datos de los 764 relaves, fue necesario cruzar el catastro de depósitos con los datos de geoquímica. El catastro de depósitos posee una única representación, mientras que la geoquímica de los depósitos presenta entre 2 y 5 mediciones distintas para algunos relaves. Por lo tanto, fue necesario establecer una metodología de representatividad única para la base de datos.

##### **3.3.1.1. Selección de representatividad**

Con el objetivo de representar de la mejor manera posible a los relaves en el mapa, se consideraron los siguientes supuestos:

- Se asumió un mismo volumen de la muestra que representa cada uno de los puntos.
- Se consideró la misma densidad y profundidad de las muestras extraídas.

Luego, para la selección del punto representativo se siguió la siguiente metodología:

1. Para los relaves que tienen un único registro, se tomó esa medición para representarlo, independiente del origen de la muestra extraída.

2. En el caso de múltiples mediciones en diferentes zonas de un mismo relave, debido a que el material a extraer en mayor proporción es el que se encuentra depositado dentro de la cubeta y el que se extrae al final del mismo es el muro, se priorizó la medición según la siguiente secuencia:

Muestra Cubeta > Muestra muro

3. Si existen diversas mediciones de la misma zona preferencial de la muestra, se optó por utilizar un promedio de las composiciones.
4. Con respecto a las coordenadas para representar las múltiples muestras en el relave dentro del mapa, la “coordenada representativa” que posee aquella composición promedio se calculó basándose en el centro de masa del polígono que genera las coordenadas.

Las fórmulas para calcular la posición del centro de masa ( $X_{CM}, Y_{CM}$ ) de un polígono en dos dimensiones en términos de la masa son:

$$X_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i x_i, \quad y \quad Y_{CM} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i y_i,$$

Donde  $M$  es la masa total del polígono y  $m_i$  es la masa asociada al vértice  $i$ -ésimo. En este caso, como la masa es la misma para cada una de las muestras, la obtención de las coordenadas del centro de masa queda expresado como:

$$X_{CM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad y \quad Y_{CM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

donde  $x_i$  y  $y_i$  representan cada una de las  $n$  coordenadas.

Una vez lista la base de datos con representaciones únicas de los relaves, se procede a completar la base de datos de geoquímica de depósitos de relave con la información del catastro de relaves, la información faltante entre el cruce de ambas bases de datos se le asigna el valor S/I referente a “Sin información” en las categorías respectivas.

Ya con la base de datos completa, se procede a identificar la presencia de metales pesados dentro de los relaves, así como los elementos de interés para la industria de la construcción. Para finalmente clasificar los relaves según su potencial uso basándose en su composición y finalmente, clasificarlos en torno a su condición de criticidad.

### 3.3.1.2. Geoquímica de relaves

La base de datos geoquímica de relaves contiene datos referente a elementos (presentados en la tabla 2.1, así como también de compuestos mineralógicos en el mismo, los cuales se presentan a continuación.

Tabla 3.1: Elementos químicos y compuestos en relaves[18].

Símbolo	Compuesto	Símbolo	Compuesto	Símbolo	Compuesto
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titanio	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Hierro	CaO	Óxido de Calcio
MgO	Óxido de Magnesio	MnO	Óxido de Manganeso	Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sodio
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potasio	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Fósforo	LOI	Pérdida por Calcinación
SiO <sub>2</sub>	Dióxido de Silicio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Aluminio	SO <sub>3</sub>	Trióxido de Azufre

### 3.3.1.3. Metales pesados

Basándose en lo descrito en la sección 2.3.2 se identifican los siguientes metales pesados presentes en la base de datos de relaves: Cu, V, Cr, Co, Ni, Zn, Pb, As, Mo, Sb, Ag, Cd y Au. Los cuales son unificados en una sola sección de “Metales pesados” para su representación dentro del mapa. Luego, se realiza lo mismo para la determinación de los componentes de interés.

### 3.3.1.4. Compuestos de interés

Para identificar los elementos de interés bajo la mirada de la industria de la construcción, basándose en los compuestos metalúrgicos presentes en el relave y aquellos con potencialidad de ser identificados como elementos cementicios según lo visto en la sección 2.4.2 y más adelante en la sección 4.2 se identifican como componentes de interés, los siguientes compuestos: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO. Los cuales se representan dentro del mapa en una misma categoría de “Compuestos de interés”.

## 3.3.2. Clasificación de los relaves

Los relaves se clasifican según el uso que podrían tener dentro de los productos cementicios y basándose en su nivel de criticidad basado en parámetros sociales centrados en la seguridad de la instalación (estado y método de construcción).

### 3.3.2.1. Potenciales usos de los relaves

Se clasifican los potenciales usos de los relaves mediante los requisitos necesarios para que estos puedan ser utilizados de forma exitosa dentro del proceso productivo (las cuales se describen en la sección 4.2). Los usos potenciales para los relaves en el mapa son: crudo para clinker, Aditivo, árido fino y arena correctora, los cuales se categorizan conforme a los requisitos propios que poseen cada uno de los productos cementicios (clinker, cemento y hormigón) descritos en la tabla 4.2. Los usos identificados para los relaves finalmente se describen en una misma categoría de “Potenciales usos”. Los requisitos de asignación del uso del relave se describen a continuación:

1. Clinker: Todo relave que contenga 25 % o más de CaO.
2. Aditivo: Todos los relaves pueden ser utilizados como aditivos basándose en la normativa NCh160 y NCh161.
3. Árido fino y arena correctora: Se toma como supuesto que todos los relaves cumplen con los requisitos granulométricos descritos en la tabla 4.2 basado en la NCh163.

### 3.3.2.2. Criticidad

Por último, se procede a asignar a los relaves según su criticidad en las siguientes categorías: Muy alta, alta, media y baja según los siguientes criterios:

1. Muy Alta: Se le asigna a todos los relaves en estado de abandono y que han sido construidos bajo el método de Aguas arriba.
2. Alta: Asignada a todo relave construido bajo el método de aguas arriba que no se encuentren en estado de abandono y a todos los relaves en estado de abandono independientemente de su método de construcción.
3. Media: Esta categoría se asigna a todo relave cuyo método de construcción es desconocido y se encuentra bajo el parámetro “S/I”.
4. Baja: Asignado a todo aquel relave que no posea las condiciones de las categorías anteriores.

Con todas las categorías necesarias, se procede a avanzar hacia la etapa de identificación de clústeres de relaves con potencial técnico-económico para su uso en la industria de la construcción.

## 3.4. Metodología técnico-económica

En primer lugar, para conocer la viabilidad técnico económica del escenario de relaves en Chile, se debe plantear el problema de optimización, debido a que se puede plantear como un problema de asignación recurso - destino, de la siguiente forma:

1. Sea  $D$  el conjunto de destinos y  $R$  el conjunto de relaves. Definimos  $C_d$ ,  $d \in D$  como la capacidad del destino “d” y  $P_r$ ,  $r \in R$  al volumen de relave “r”. Denotamos como  $A$  al set de todos los pares ordenados  $(r,d)$  tal que exista un camino que conecte el relave “r” con el destino “d”. Conocemos la distancia  $d_{rd}$  y el costo unitario de transportar una unidad de relave “r” en el destino “d”  $W_{rd}$ . El ingreso neto asociado al procesamiento de una unidad de relave “r” en el destino “d” es denotada por  $G_{rd}$ .

De esta forma, definimos la variable  $X_{rd}$  como el flujo de material del relave “r” enviado al destino “d”.

La función objetivo es:

$$Max \sum_{(r,d) \in A} G_{rd} \cdot X_{rd} - \sum_{(r,d) \in A} W_{rd} \cdot X_{rd} = \sum_{(r,d) \in A} (G_{rd} - W_{rd}) \cdot X_{rd} \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{r \in R} X_{rd} \leq C_d \quad \forall d \in D \quad (3.2)$$

$$\sum_{d \in D} X_{rd} \leq P_r \quad \forall r \in R \quad (3.3)$$

$$X_{rd} \geq 0 \quad \forall (r, d) \in A \quad (3.4)$$

Para su resolución, se trabaja en 3 escenarios posibles para el mercado del relave, con el objetivo de que los costos de utilizar relave en los productos no exceda el precio de utilizar árido natural, para identificar una real oportunidad dentro del negocio de las cementeras:

1. Caso base: El relave es entregado a costo 0 a la cementera y esta debe costear únicamente los costos de transporte del material desde el relave hasta la planta.
2. Worst case: La cementera debe comprar el relave. A un precio estimado sería competitivo con el árido natural, se aproxima a un 10% del costo del producto (sin transporte incluido) que se desea elaborar, lo que equivale a 6.5 USD/m<sup>3</sup>.
3. Best case: La minera le paga a la cementera para que retire el relave debido a los costos de mantenimiento que le significa poseer el relave a la minera a un supuesto precio de 2.5 USD/m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que este valor puede ser otorgado por el estado en el mismo escenario, para potenciar la utilización de relaves que posean una criticidad alta.

A continuación, se definen los supuestos para la resolución del problema de optimización. La determinación de cada uno de los supuestos se basa en la lógica de la problemática de relaves y a recomendaciones de estimación de precios recomendados por una de las empresas cementeras que se ve representada en el mapa.

1. No hay restricción de capacidad  $C_d = \text{infinito}$ . Esto permite resolver el problema de forma local (greedy) y obtener el óptimo global.
2. Se opta por modelar la problemática en torno al producto que ofrece el mayor aprovechamiento posible, aunque también es el más costoso de elaborar: el uso del relave en hormigón como árido fino y arena correctora. Para su correcta utilización en este producto, las arenas deben ser solubles y lavadas. Según los requisitos identificados, el relave constituye un 22% de la formulación del hormigón.
3. El precio del hormigón es de 2.5 UF/m<sup>3</sup> + iva. Lo que se traduce en 102 USD/m<sup>3</sup> + iva (considerando 40.8 USD/UF).
4. El transporte del relave hacia la planta se realiza mediante camiones de capacidad de tolva de 20m<sup>3</sup>. Sin embargo, debido a la ley de transporte existente en Chile, los camiones no pueden transportar cargas superiores a 30 toneladas, por lo que esta será la carga máxima a considerar.
5. El costo de transporte representa un 35% del precio total del producto.
6. El beneficio y las ganancias del proceso de el hormigón son confidenciales y únicos para cada una de las cementeras. por lo que solo realizaremos la optimización en torno a los costos del producto. Es decir, se resuelve el problema minimizando la siguiente función objetivo de costos:

$$\text{Min Costos} = \sum_{(r,d) \in A} W_{rd} \cdot X_{rd} \quad (3.5)$$

7. Los costos a considerar para la optimización del problema son: Costos de extracción del relave, costos de transporte y finalmente, costos de tratamiento/procesamiento que requiere el material previo uso. Debido al alcance de este trabajo, solo trabajaremos en



función del valor de transporte. Ya que aún se desconocen los precios de extracción y tratamiento de este tipo de materiales en el proceso productivo.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, se desarrolla el problema para el caso más simple a estudiar, es decir, la minimización de costos para un único relave con un flujo unitario de  $1\text{m}^3$ . La ecuación de costos se plantea de la siguiente manera:

$$\text{Costos [USD]} = (\text{Costo de transporte [USD/m}^3] + \text{Costo relave [USD/m}^3]) \cdot \text{Volumen [m}^3] \quad (3.6)$$

En primer lugar, se resuelve la ecuación de la izquierda de la función de costos, lo que basándose en los supuestos previamente mencionados, se desarrolla de la siguiente forma:

$$\text{Costos[USD]} = \text{Porcentaje del Costo de transporte [\%]} \cdot \text{Costo hormigón [USD/m}^3] \cdot \text{porcentaje del relave en el hormigón [\%]} \cdot \text{Volumen [m}^3] \quad (3.7)$$

Para que pueda ser aplicado correctamente al negocio, los costos del uso del relave no pueden superar el 35 % de los costos de transporte,

$$\frac{\text{Costos [USD]}}{\text{Volumen [m}^3]} \leq 35 \% \cdot 102 \text{ [USD/m}^3] \cdot 22 \% \quad (3.8)$$

Luego, se despeja el componente a la derecha de la ecuación 3.6 siguiendo la misma lógica de que el uso de relaves no supere los costos de reemplazo del árido natural, se tiene:

$$\frac{\text{Costos [USD]}}{\text{Volumen [m}^3]} \geq \text{Costo de transporte [USD/m}^3] + \text{Costo relave [USD/m}^3] \quad (3.9)$$

luego, despejamos el valor del transporte en torno a las variables conocidas,

$$\frac{\text{Costos [USD]}}{\text{Volumen [m}^3]} \geq \frac{\text{Costo de transporte [USD/km]} \cdot \text{distancia [km]}}{\text{Capacidad de balde [m}^3]} + \text{Costo relave [USD/m}^3] \quad (3.10)$$

reemplazando con los valores de los supuestos, se obtiene:

$$\frac{\text{Costos [USD]}}{\text{Volumen [m}^3]} \geq \frac{3 \text{ [USD/km]} \cdot \text{distancia [km]}}{20 \text{ [m}^3]} + \text{Costo relave [USD/m}^3] \quad (3.11)$$

En consiguiente, se igualan las ecuaciones 3.8 y 3.11, obteniendo como ecuación final:

$$35 \% \cdot 102 \text{ [USD/m}^3] \cdot 22 \% \geq \frac{3 \text{ [USD/km]} \cdot \text{distancia [km]}}{20 \text{ [m}^3]} + \text{Costo relave [USD/m}^3] \quad (3.12)$$

Finalmente, se despeja la distancia de la ecuación 3.12.

$$\text{Distancia [km]} \leq \frac{(35 \% \cdot 102 \text{ [USD/m}^3] \cdot 22 \% - \text{Costo relave [USD/m}^3]) \cdot 20 \text{ [m}^3]}{3 \text{ [USD/km]}} \quad (3.13)$$

Donde la única incógnita es la distancia, la cual se logra determinar para cada una de las situaciones (caso base, worst case y best case). Un último factor importante a considerar, es que el transporte por la empresa constructora se realiza en ida y vuelta, por lo que el valor del radio para determinar los clústeres industriales quedara designado por:

$$\frac{\text{Distancia [km]}}{2} \leq \frac{(35 \% \cdot 102 \text{ [USD/m}^3\text{]} \cdot 22 \% - \text{Costo relave [USD/m}^3\text{]}) \cdot 20 \text{ [m}^3\text{]}}{2 \cdot 3 \text{ [USD/km]}} \quad (3.14)$$

## 3.5. Mapa geo-referencial

Ya con las áreas de viabilidad económica, se procede a determinar los clústeres industriales. Se consideró como clúster industrial a la existencia de potenciales relaves dentro del radio definido por las distancias económicamente factibles a una planta cementera. El procedimiento para la elaboración del mapa mediante el software QGIS se describe a continuación.

En primer lugar, mediante una búsqueda en cada una de las paginas web de cementos Bio Bio, cementos Melon, Polpaico y Unicon, se buscan las direcciones y las coordenadas de las productoras mediante Google Maps. Luego, se solicitó que cada una de las empresas interesadas compartieran la ubicación georeferenciada de cada una de sus productoras de cemento y hormigón para completar la base de datos del mapa nacional. Para el caso de las cementeras, la información incluida en cada uno de los puntos en el mapa es:

- Empresa
- Ciudad
- Coordenadas
- Nombre
- Dirección
- Tipo de instalación

Ya recopilada la información, se procede a visualizar las productoras en un mapa de Chile, notando errores de tipeo en la base de datos, por lo que se procede a corregir las coordenadas entregadas por google maps.

### 3.5.1. Coordenadas

Una vez listas las bases de datos, se procedió a ingresar ambas (cementeras y relaves) en el Software QGIS para identificar la presencia de datos anómalos y realizar la conversión de las unidades de medida a un mismo lenguaje de coordenadas. Con el objetivo de garantizar una precisión universal y evitar complicaciones del uso de coordenadas UTM en relación a si el dato se encuentra en el HUSO 18 o el HUSO 19, se elige el uso de coordenadas WGS 84 para ambas bases de datos.

### 3.5.2. Ingreso de las bases de datos

Una vez listas las bases de datos, se divide la información en diferentes capas, donde se genera una capa para la información más relevante a visualizar:

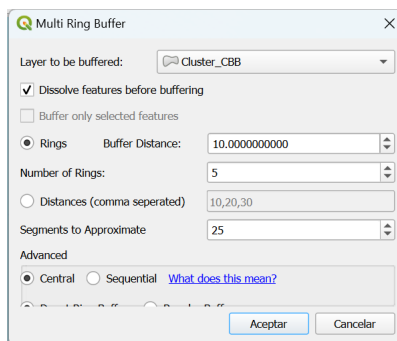
- Potenciales usos de relaves
- Cementos Bio Bio
- Cementos Polpaico
- Criticidad de relaves
- Cementos Melón
- Cementos Unicon

Por último, se procede a la última etapa de elaboración del mapa, donde se generan los clústeres industriales para delimitar el negocio nacional en torno al uso de relaves en la industria de la construcción.

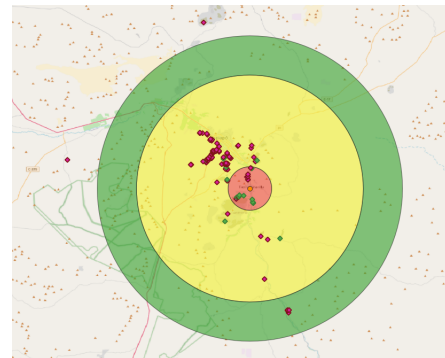
### 3.5.3. Delimitación de los clústeres industriales en el mapa

Para incorporar las distancias económicas en las productoras de cemento y hormigón dentro del mapa, se decide incorporar una capa de buffers, el cual es una zona de influencia alrededor de un objeto geográfico (cementera y hormigoneras), como un punto, línea o polígono. Se utiliza para analizar la proximidad y el impacto de características geográficas dentro de un área específica. Para su implementación, se instala el complemento “Multi ring buffer”.

El complemento Multi Ring Buffer en QGIS es una herramienta especializada que permite crear múltiples zonas de influencia (buffers) concéntricas alrededor de características geográficas (puntos, líneas o polígonos). A continuación se describe su uso, ventajas y aplicación. El complemento, permite ingresar las distancias para los anillos en la sección “Distancias”. Se agregan múltiples distancias separadas por comas (por ejemplo, 5, 26, 35 para anillos a 5 km, 26 km y 35 km que en grados, son 0.045, 0.234 y 0.315). Por último, se define el número de segmentos para los anillos. Un mayor número de segmentos hará que los anillos sean más suaves y precisos, pero también aumentará el tiempo de procesamiento. Para efectos prácticos, se trabaja con 20 segmentos.



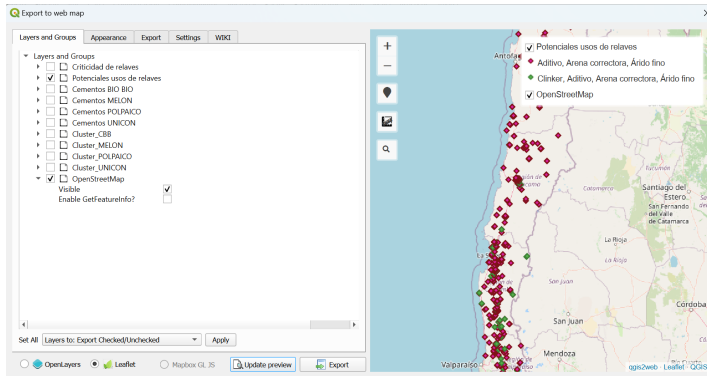
(a) Menu de configuración de multi ring buffer.



(b) Visualización de los clústeres industriales.

Figura 3.1: Buffer en QGIS.

Por último, para crear el mapa web, se instala el complemento “qgis2web”. La herramienta permite la exportación de proyectos QGIS a mapas web interactivos. Utiliza las bibliotecas de JavaScript Leaflet y OpenLayers para crear mapas web que se pueden ver en cualquier navegador web. En qgis2web -> Create web map se abre una ventana de configuración para ajustar las opciones de exportación, donde se seleccionan todas las capas y sus atributos respectivos que se desean visualizar en el mapa. Se seleccionan los atributos de las capas, la simbología, el buscador, entre otros. Por último, se exporta el mapa web, donde se genera el archivo en formato HTML para la web.



(a) Menu de configuración de qgis2web.



(b) Visualización de atributos en el mapa.

Figura 3.2: Mapa en QGIS.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Normativa limitante del uso de relaves en la construcción

El principal desafío en torno al uso de los relaves en la industria de la construcción se presenta en la regulación habilitante. En Chile, esta define los componentes y condiciones que deben cumplir los materiales para poder ser utilizados en construcción. A continuación, se presenta un breve resumen de las entidades implicadas en las leyes y normas relacionadas con los residuos, encontradas mediante el estudio de la normativa. Las autoridades involucradas en el manejo y transporte de los residuos están regidas por diversas normas y decretos.

#### 4.1.1. Entidades regulatorias

Tabla 4.1: Entidades regulatorias involucradas en el uso de relaves en Chile.

Entidad	Sigla	Como se involucra
Dueño del relave	-	Decide el valor del relave y participa en la negociación
Municipalidad	-	Otorga los permisos de extracción y el cobro de las patentes municipales.
Ministerio de Salud	MINSAL	Otorga los permisos de transporte garantizando la salud de las personas.
Ministerio de Minería	MINMINERÍA	Diseña, ejecuta y evalúa políticas públicas en la minería
Ministerio de Obras Públicas	MOP	Planifica, gestiona, supervisa y ejecuta obras públicas y de infraestructura.
Ministerio de Medio Ambiente	MMA	Vela por la protección y conservación del medio ambiente
Ministerio de Vivienda y Urbanismo	MINVU	Diseña, implementa y supervisa políticas y programas de vivienda, desarrollo urbano y planificación territorial.
Instituto Nacional de Normalización	INN	Desarrolla las normativas.
Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile	ICH	Apoya en el desarrollo de normativas relacionadas a la construcción.
Servicio Nacional de Geología y Minería	SERNAGEOMIN	Fiscaliza los relaves a través del Departamento de Depósitos.
Servicio de Evaluación Ambiental	SEA	Otorga la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) a nuevos proyectos.

Cada una de las entidades identificadas en la Tabla 4.1 se involucra de distinta manera en el proceso de incorporación de los relaves en la normativa chilena de materiales de construcción. Por lo tanto, es de gran importancia entender las normas y leyes que imposibilitan su uso y que requieren modificaciones para permitir el uso de este residuo.

#### 4.1.2. Normas y decretos

Se identifica como las principales limitantes para el uso de relaves a las normativas en torno a la categorización del relave como residuo, así como también las normativas específicas de la construcción que determinan qué puede o no ser utilizado en cada producto del proceso del hormigón.

Los permisos para operar de las mineras incluyen un plan de cierre, que debe cumplir con la ley 19.300, la cual establece las bases generales del medio ambiente. Un proyecto que puede afectar al medio ambiente debe ser revisado en detalle antes de obtener la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) que le permite operar. Este proceso está a cargo del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), sobre la base de un Estudio o Declaración de Impacto Ambiental, determina si el impacto ambiental de una actividad o proyecto se ajusta a las normas vigentes. Dentro de la evaluación se encuentra el plan de construcción, mantención y cierre de los depósitos de relaves de un proyecto, el cual debe cumplir con las normativas relacionadas con la seguridad y la construcción. A continuación, se describen brevemente las normativas involucradas en el uso de relaves en la industria de la construcción[51].

- **Decreto Supremo 132 - “Reglamento de seguridad minera”**

Se establece que todo proyecto minero debe poseer un plan de cierre, el cual debe incluir información sobre el manejo de residuos, incluyendo los relaves, en caso de haberlos. También se refiere a la implementación de medidas de reparación del impacto ambiental una vez que cese la operación minera[52].

- **Decreto supremo 594 - “Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo”**

El decreto exige que la acumulación, tratamiento y disposición final de estos residuos cuenten con autorización sanitaria. Además, el transporte de residuos peligrosos debe realizarse de manera segura y conforme a las normativas específicas para evitar riesgos a la salud y al medio ambiente[53].

- **Decreto 148 - “Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos”**

Si bien el relave no está considerado como residuo peligroso según la clasificación del decreto, la autoridad competente, si lo considera necesario, podrá exigir el procedimiento de caracterización de los residuos mineros masivos. En este proceso, podrá realizar muestreos, análisis y caracterizaciones para determinar la peligrosidad de dichos residuos según lo estime oportuno. Para la caracterización de la toxicidad extrínseca de los residuos masivos mineros, se requerirá un test de “Lixiviación por Precipitación Sintética”[25]. Por otro lado, es importante destacar que la clasificación del relave como residuo en lugar de producto o subproducto conlleva la necesidad de implementar una serie de procesos y obtener permisos que pueden obstaculizar e impedir la extracción masiva de más de una tonelada de material para estudios.

- **Decreto 248 - “Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves”**  
Prioriza la protección de la salud y seguridad de las personas, así como la preservación del medio ambiente y de los recursos naturales utilizados. Las técnicas de construcción de la estructura que contiene a esta clase de residuos que se pueden utilizar en Chile se mencionan en la sección 2.1.3 descrita anteriormente en este trabajo[10].
- **Norma Chilena NCh 148 - “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”**  
La norma establece los términos empleados para los cementos, su clasificación y las especificaciones generales de los cementos Portland, Siderúrgicos, Puzolánico y con Agregado Tipo A. Según esta normativa, hasta un 3 al 5 % del contenido de cemento puede consistir en materiales extraños, entre los cuales puede incluirse el relave. Sin embargo, estos materiales deben cumplir con ciertas condiciones, como no exceder un tercio de cloruro de calcio o sales similares, y no pueden contener sulfato de calcio hidratado[54].
- **Norma Chilena NCh 160 - “Agregado tipo A para uso en cementos - especificaciones”**  
El “Agregado tipo A” o “calcáreo arcilloso” debe tener un índice de resistencia mecánica igual o superior a 4 ( $IR > 4$ ) y una finura tal que la cantidad retenida en el tamiz 15 (0.074mm) no exceda el 12 %. En este contexto, el relave puede representar hasta un 30 % de la proporción del cemento siempre que se mezcle con un material calcáreo, como la escoria de cobre, lo que abre una oportunidad para otros desechos mineros[55].
- **Norma Chilena NCh 161 - “Puzolana para uso en cementos - Especificaciones”**  
Se especifica el uso de materiales para determinar la puzolana que se encuentran en relaves, como el óxido de calcio y el óxido de magnesio, cuya granulometría debe retenerse en el tamiz 18 (0.044mm) en un máximo del 12 %[56].
- **Norma Chilena NCh 163 - “Aridos para mortero y hormigones - Requisitos generales”**  
Finalmente, la norma asegura áridos satisfactorios para la mayoría de morteros y hormigones, especificando los requisitos y características necesarios para su uso en hormigón. En términos generales, esta norma aplica a áridos con densidad real entre 2,000 y 3,000  $\text{kg}/\text{m}^3$ , rangos en los cuales los relaves se encuentran incluidos según lo observado en la sección 2.2.3. Sin embargo, la norma actual no aborda la posibilidad de utilizar áridos artificiales provenientes de origen minero, lo que constituye **la principal brecha legal** en el uso de relaves para este propósito.

Por lo tanto, esta memoria es un precedente para promover la incorporación de residuos mineros en la normativa, recopilando datos técnicos y teóricos con la colaboración de expertos de CODELCO y el IDIEM para considerar los relaves como áridos artificiales dentro de la norma. Independientemente de su clasificación, los relaves deben cumplir con los mismos requisitos que los áridos naturales para poder ser utilizados en hormigón, los cuales son[57]:

- **Árena (árido fino):** Árido que pasa por el tamiz de abertura nominal de 5mm y es retenido en el de 0.080mm.

- Grava (árido grueso): Árido que es retenido por el tamiz de abertura nominal de 5mm.
- Según la norma 1444 - “Aridos para morteros y hormigón - Determinación de cloruros y sulfatos”, debe contener valores adecuados de cloruros según el tipo de hormigón que se desea emplear, además de contener valores adecuados de sulfatos solubles en agua y sulfuros oxidables.
- Cantidad de carbón y lignito según lo presentado en la NCh163.
- Resistencia a la desintegración y al desgaste según lo especificado en la NCh163.
- Absorción de agua según el tipo de árido.
- Coeficiente volumétrico medio según el tipo de árido.
- Requisitos granulométricos según la función que se desea potenciar.

A estos requisitos se suma la realización de ensayos que garanticen los resultados bajo la calidad necesaria según la finalidad del hormigón, es decir, si es de uso estructural para personas, maquinarias, etc.

### 4.1.3. Modificación de la Norma Chilena N°163

Debido a que la norma actual no aborda la posibilidad de utilizar áridos artificiales provenientes de origen minero, se identifica la NCh 163 como la principal limitante legal en el uso de relaves para este propósito.

Se ha propuesto la modificación de la misma, incorporando a los relaves bajo la caracterización de “árido artificial”, junto con las características y requisitos que deben cumplir para su uso como materia prima dentro de la industria constructora. Para llevar esto a cabo, se ha propuesto la formación de una mesa técnica compuesta por especialistas tanto de la industria minera como de la construcción.

Dicha mesa se encuentra trabajando desde el último trimestre del año 2023.

## **Actualización de la NCh163: Un paso indispensable para disminuir pasivos ambientales y reducir extracción de áridos naturales**

La industria del hormigón y el rubro de la construcción en general, están a la espera de las modificaciones a la norma técnica que establece los requisitos de los “Áridos para morteros y hormigones”, cuya revisión se inició hace más de dos años. Según adelantan los especialistas Claudio Olate, del IDIEM, Viviana Letelier, de la UFRO, y Augusto Holmberg, del ICH, en la nueva normativa se incluirá el uso de áridos reciclados y de áridos artificiales, lo que abre la puerta a una economía circular que dará uso productivo a materiales que hasta ahora eran considerados residuos.

Figura 4.1: Noticia de la modificación de la NCh 163[58].



## 4.2. Requerimientos para el uso en construcción

La determinación de los porcentajes de participación que puede llegar a alcanzar el relave dentro de los productos cementicios, se basó en las siguientes normativas:

1. Clinker: No se encontró una normativa específica para establecer los porcentajes de relave como posible materia prima del crudo, por lo que su porcentaje de uso se determina principalmente basándose en la cantidad de óxido de calcio (CaO) requerido para su correcta elaboración y propósito. Aunque el crudo también necesita contenido de óxidos de sílice, aluminio y hierro, los cuales están presentes en el relave, la industria de la construcción declara abundancia de estos compuestos. Por lo tanto, el interés en utilizar relave para este fin se centra en el óxido de calcio, el cual no supera el 20 % del clinker. Para que el relave sea interesante de procesar, debe contener más del 25 % de CaO desde el punto de vista de la industria de la construcción.
2. Cemento: La normativa que define las proporciones y requisitos para la materia prima del cemento es la Norma Chilena 148. Esta norma indica que entre un 3 % y un 5 % de la materia prima del cemento puede ser de libre composición y origen. Es decir, el relave puede ser utilizado como aditivo en estas proporciones y está libre de requisitos de composición o granulométricos. Las NCh 160 y 161 indican los posibles agregados al cemento y se identifica otra oportunidad con el agregado calcáreo-arcilloso. En combinación con escorias, el relave podría llegar a representar hasta un 20 % del cemento. Sin embargo, dado que el alcance de esta memoria se centra exclusivamente en los relaves, se determina una participación del 5 %.
3. Hormigón: La NCh 163 define los requisitos y el porcentaje de participación de manera más estricta que otros productos mencionados previamente, ya que esta norma restringe la composición química en cuanto a la cantidad de cloruros y sulfatos que puede contener la materia prima y su granulometría. En este caso, el relave podría llegar a reemplazar al árido fino y a la arena correctora como un “árido artificial” mediante la modificación de la normativa. Según esta norma, el árido fino y la arena correctora tienen un porcentaje de participación del 17 % y el 5 % dentro del hormigón. Con respecto a la granulometría del relave, la norma indica que el árido fino no puede superar los 10mm, mientras que la arena correctora los 2mm. Como desconocemos el tamaño de tamiz para cada relave (no se declara en ninguno de los catastros de SERNAGEOMIN), debido a la granulometría usual del relave, vista en la sección 2.2.2 el relave posee una gama de diferentes granulometrías, por lo que para efectos de este trabajo, se considerará que el relave cumple con este requisito.

A modo resumen, se elabora la siguiente tabla que detalla los requisitos y el potencial porcentaje de uso de relaves para cada producto específico.

Tabla 4.2: Uso de relaves en construcción  
Fuente: Elaboración propia.

Categoría	Clínker	Cemento	Hormigón
Uso del relave	Crudo: CaO SiO <sub>2</sub> -OxAl-OxFe	Adiciones	Árido fino (AF) Arena correctora (AC)
Porcentaje de uso	~20 %	<5 %	17 % como AF 5 % como AC
Requisitos	>25 % CaO	-	AF < 10mm AC < 2mm
Norma asociada (NCh)	-	148, 160 y 161	163

Para que los relaves puedan ser utilizados adecuadamente en el proceso productivo de los productos, es crucial que sean arenas solubles y lavadas. Todos los posibles escenarios de participación de los relaves descritos en la tabla han sido probados en Cementos Melón, demostrando cumplir con los estándares de calidad requeridos para los productos. Debido a la naturaleza confidencial de la información de ensayos y pruebas, se debe solicitar directamente a Cementos Melón de manera privada.

### 4.3. Composición química y clasificación de los relaves

Se obtiene como resultado una base de datos con 790 relaves en total. Es decir, 26 relaves más que el registro nacional de relaves publicado por SERNAGEOMIN[8]. Los cuales se deben debido a embalses de emergencia, relaves auxiliares y a relaves cercanos de una misma empresa que el catastro declaraba como uno solo, que la base de datos de composición geoquímica si declara como depósitos individuales con diversa composición. A continuación, se resume la estadística de la base de datos:

Tabla 4.3: Relaves por región

Región	Relaves				
	Activo	Inactivo	Abandonado	En construcción	Total
I - Tarapacá	2	1	5	0	8
II - Antofagasta	15	34	10	0	59
III - Atacama	33	133	13	6	185
IV - Coquimbo	41	323	30	1	395
V - Valparaiso	12	63	4	0	79
RM - Metropolitana	7	20	2	0	29
VI - L.B.O'Higgins	0	18	0	0	18
VII - Maule	5	1	0	0	6
XI - Aysén del Gral C.I.C	2	7	2	0	11
<b>Totales</b>	<b>117</b>	<b>600</b>	<b>66</b>	<b>7</b>	<b>790</b>

Donde se obtiene un total de 790 relaves distribuidos en 9 regiones de Chile. Es importante destacar las regiones de Atacama y Coquimbo, las cuales son las regiones que poseen la mayor cantidad de relaves en Chile. Sin embargo, la gran mayoría de estos relaves se deben a pequeños depósitos de la mediana minería, por lo que es importante analizar el tonelaje del residuo por región.

Tabla 4.4: Tonelaje de relaves por región

Región	Tonelaje de Relaves (Mt)				
	Activo	Inactivo	Abandonado	En construcción	Total
I - Tarapacá	1,240.00	0.00	0.01	0.00	1,240.01
II - Antofagasta	9,479.18	519.26	0.28	0.00	9,998.72
III - Atacama	1,606.84	574.57	0.15	88.87	2,270.43
IV - Coquimbo	2,194.74	495.09	1.95	0.00	2,691.79
V - Valparaiso	196.16	180.91	1.79	.00	378.86
RM - Metropolitana	4,067.05	381.31	0.00	0.00	4,448.36
VI - L.B.O'Higgins	0.00	654.72	0.00	0.00	654.72
VII - Maule	1.37	0.31	0.00	0.00	1.68
XI - Aysén del Gral C.I.C	10.74	6.90	0.04	0.00	17.68
<b>Totales</b>	<b>18,796.07</b>	<b>2,813.07</b>	<b>4.22</b>	<b>88.87</b>	<b>21,702.23</b>

Al hablar de tonelaje depositado, son las regiones de Antofagasta y Metropolitana que poseen la mayor cantidad de este residuo depositado, debido a la presencia de depósitos de la gran minería, donde ambas regiones concentran el 66.57 % del tonelaje total de relaves en Chile. A continuación, se analizan los relaves en torno a sus clasificaciones.

### 4.3.1. Potenciales usos de los relaves

Se presentan los resultados obtenidos en base a los criterios de composición geoquímica y la clasificación de los relaves en torno a los potenciales usos de relaves en Chile. Obteniendo como resultado:

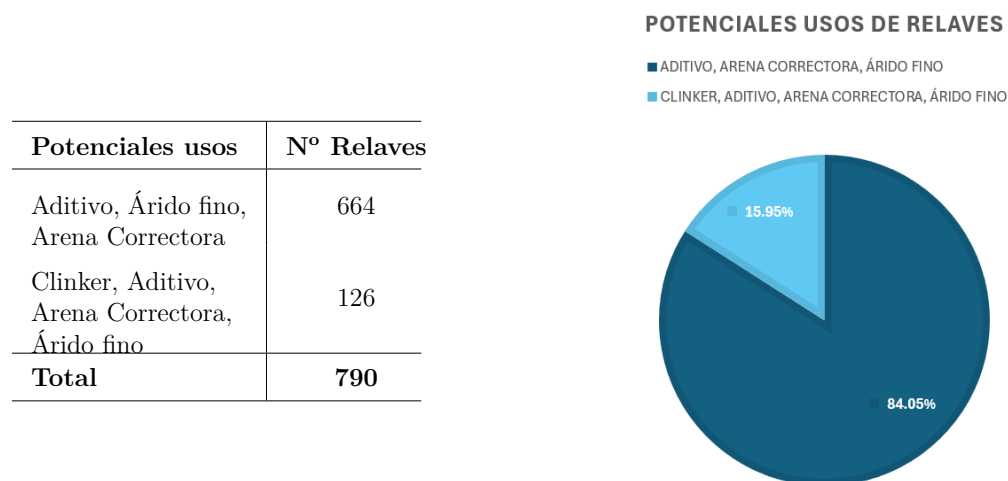


Figura 4.3: Potenciales usos de relaves en Chile.

Se observa que del universo de 790 relaves existentes en Chile, el 100 % de los relaves puede ser utilizado en cemento y hormigón, del cual el 16 % de los relaves puede ser utilizado en productos como el clinker debido a sus composiciones y características en base en la metodología propuesta. Con respecto a la criticidad se obtiene lo siguiente:

### 4.3.2. Criticidad de los relaves

Se tienen 4 categorías en torno al análisis descrito en la metodología, los cuales son: Muy alta, Alta, Media y Baja. Obteniendo como resultado:

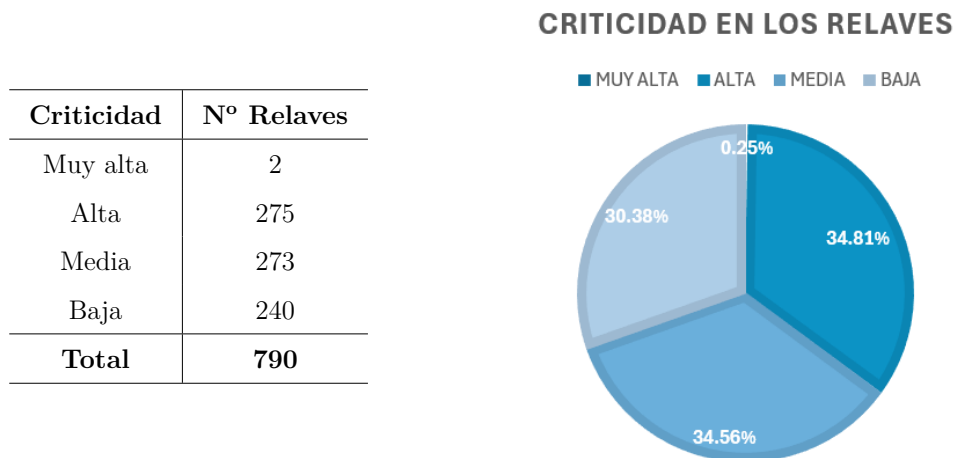


Figura 4.5: Clasificación de criticidad de los relaves.

El 35.06 % de los relaves se encuentra bajo las categorizaciones de criticidad Muy alta y Alta. A continuación, se presentan los resultados para definir que relaves poseen viabilidad económica para su uso en la industria de la construcción.

## 4.4. Resultados del análisis económico

Con respecto al planteamiento matemático para poder determinar los clústeres industriales. Al despejar la distancia de la ecuación 3.13, se obtiene el siguiente resultado de costos sin iva incluido para los siguientes escenarios:

Tabla 4.5: Distancias económicas para cada escenario.

Escenario	Costo relave [USD/m <sup>3</sup> ]	Radio de distancia máxima [km]
Base case	0	26
Worst case	6.5	5
Best case	-2.5	35

En otras palabras, cada productora de cemento y hormigón tendrá tres áreas económicas concéntricas con radios de 5 km, 26 km y 35 km respectivamente. Dentro de estas áreas, se encuentran los relaves que son técnicamente y económicamente factibles de utilizar. Todo relave fuera de estas áreas no será económicamente viable para su uso en la industria de la construcción, dado que el costo de transporte excederá el máximo calculado.

## 4.5. Clústeres industriales de relaves

Ya con los clústeres industriales en función de las distancias listos para implementar, se obtienen los siguientes mapas nacionales:

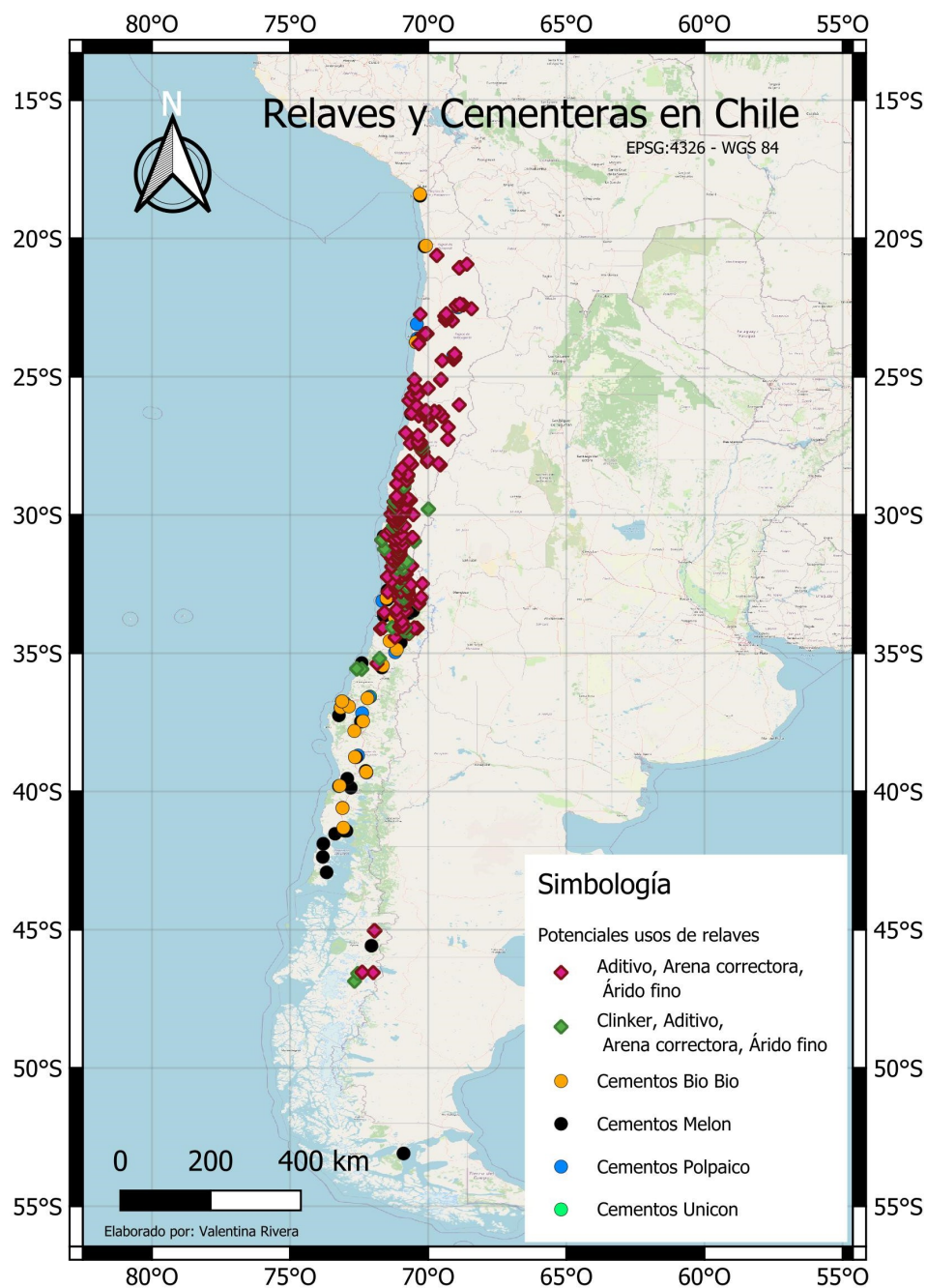


Figura 4.6: Mapa nacional de Clústeres industriales de relaves para su uso en la industria cementera en Chile.

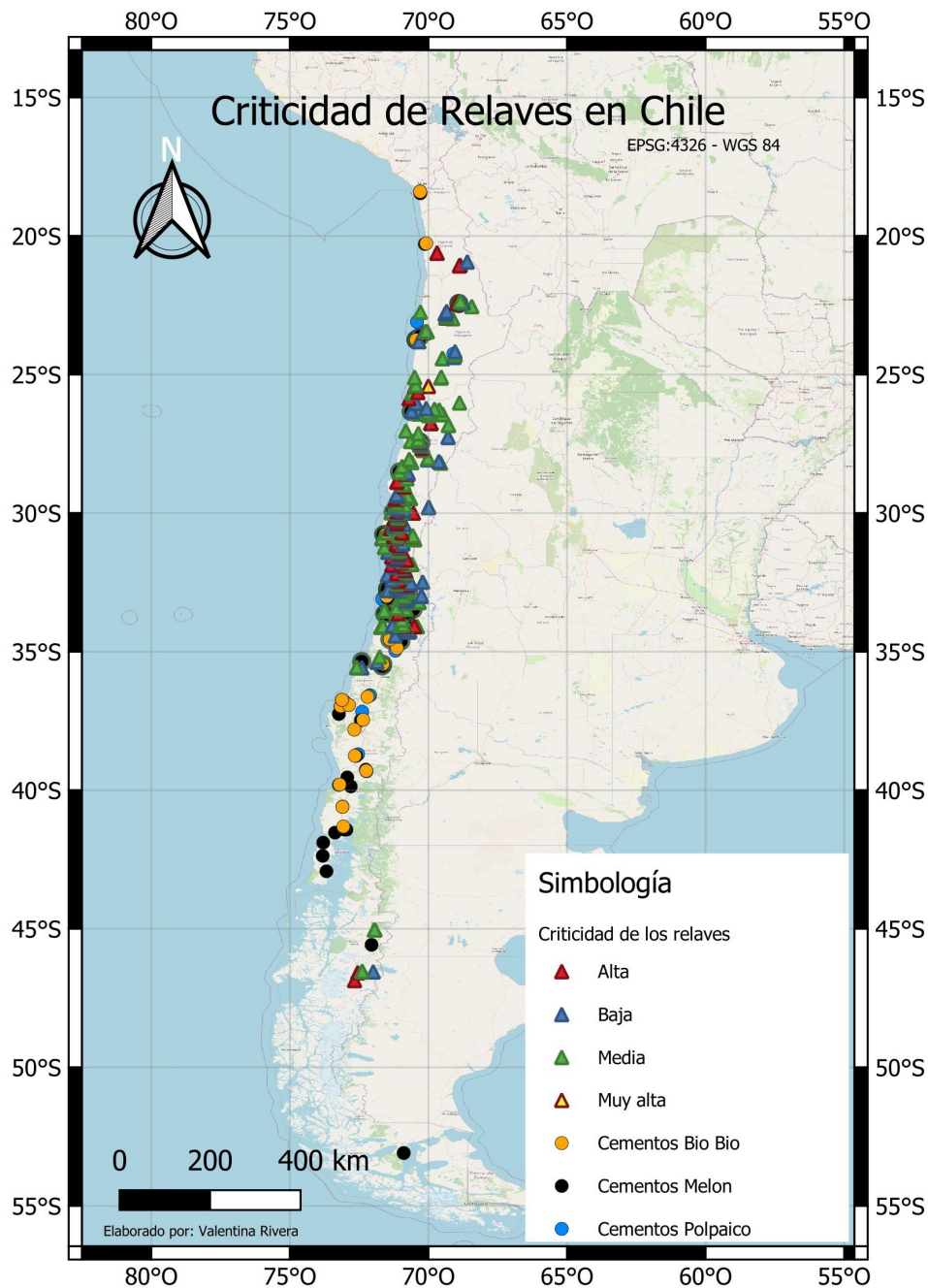
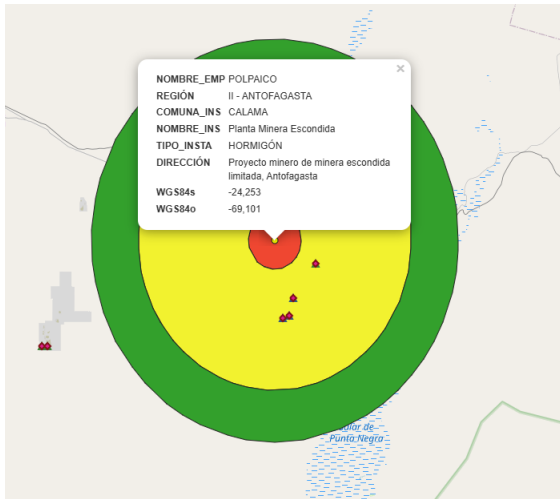
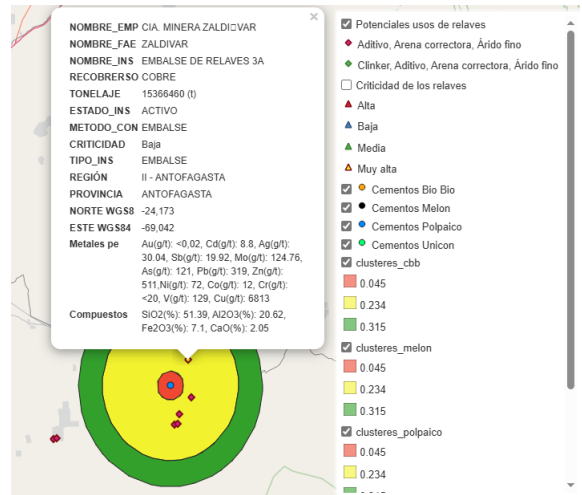


Figura 4.7: Criticidad de relaves en el mapa nacional de Clústeres industriales de relaves para la industria cementera en Chile.

Para su visualización en un mapa web, se incluyen las capas con las categorizaciones de relaves (las tablas en las que se basaron los gráficos de torta se encuentran en el Anexo 6), la información de las cementeras y con las áreas que delimitan los clústeres industriales. Las capas permiten que el cliente vea la información de su planta productora, los relaves dentro de sus clústeres y las plantas productoras de la competencia. A continuación, se muestra una imagen de la visualización del mapa.



(a) Visualización de la información de las cementeras en el Mapa.



(b) Visualización de la información de los relaves en el Mapa.

Figura 4.8: Visualización de la información dentro del mapa para el usuario.

Donde se logra observar la información que se despliega una vez el receptor seleccione una cementera o un relave. Donde se encuentra la información de interés para las plantas cementeras. A continuación, se presenta la información que se despliega de los mapas presentados.

#### 4.5.1. Panorama general de Chile

Del mapa nacional, se puede extraer información tanto sobre las cementeras como sobre los relaves con potencial de uso a nivel nacional. En términos generales, las plantas de cemento y hormigón en Chile se distribuyen de la siguiente manera:

Cementeras	N° Plantas productoras
Cementos Bio Bio	25
Cementos Melon	45
Cementos Polpaico	26
Cementos Unicon	12
<b>Total</b>	<b>108</b>

#### INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN EN CHILE

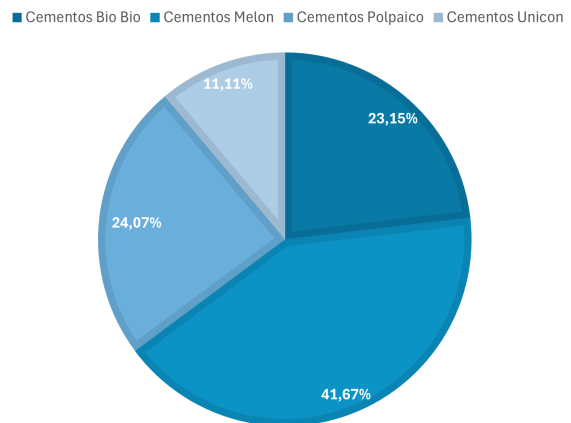


Figura 4.10: Industria de la construcción en Chile.

A nivel nacional, la industria de hormigón se ve dominada principalmente por la empresa Cementos melón, la cual posee cerca del 43.67% de las plantas de construcción en el país. Estas plantas están distribuidas en diversas regiones de Chile de la siguiente manera:

Tabla 4.6: Productoras de cemento y hormigón en las regiones de Chile

Región	Cementeras				
	Bío Bío S.A	Melón S.A	Polpaico S.A	Unicon Chile S.A	Total
I - Tarapacá	1	2	0	0	3
II - Antofagasta	3	2	4	0	9
III - Atacama	1	3	0	0	4
IV - Coquimbo	0	2	1	1	4
V - Valparaíso	1	9	4	4	18
RM - Metropolitana	1	5	6	4	16
VI - L.B.O'Higgins	1	2	2	2	7
IX - La Araucanía	3	2	2	0	7
VII - Maule	3	2	2	0	7
VIII - Bío Bío	5	3	3	0	11
X - Los Lagos	2	7	0	0	9
XI - Aysén del Gral C.I.C	0	1	0	0	1
XII - Magallanes y la A.C	0	1	1	0	2
XIV - Los ríos	1	3	0	0	4
XV - Arica y paranicota	2	1	0	0	3
XVI - Ñuble	1	0	1	1	3
<b>Totales</b>	<b>25</b>	<b>45</b>	<b>26</b>	<b>12</b>	<b>108</b>

La industria de la construcción cuenta con plantas a lo largo de las 16 regiones de Chile, siendo las regiones de Valparaíso y la Metropolitana que concentran la mayor cantidad de plantas productoras. A continuación, para concentrar la oportunidad de negocio existente en estas regiones, se presenta un breve resumen de los clústeres industriales identificados con potencial técnico-económico en Chile.

Tabla 4.7: Cantidad de Clústeres industriales por empresa en las regiones de Chile

Región	Clústeres industriales				
	Bío Bío S.A	Melón S.A	Polpaico S.A	Unicon Chile S.A	Total
II - Antofagasta	2	2	3	0	7
III - Atacama	1	3	0	0	4
IV - Coquimbo	1	2	1	1	5
V - Valparaíso	1	9	3	4	17
RM - Metropolitana	1	5	6	4	15
VI - L. B. O'Higgins	1	2	2	2	6
VII - Maule	1	2	1	0	4
<b>Totales</b>	<b>8</b>	<b>25</b>	<b>16</b>	<b>11</b>	<b>60</b>

De la tabla 4.7 se deduce que en base en los radios económicos encontrados, se presentan un total de 60 clústeres industriales de cementeras y relaves, los cuales están distribuidos en 7 regiones del país, destacando a las regiones de Valparaíso y Metropolitana con la mayor cantidad de clústeres para las cementeras. Las estadísticas se presentan a continuación:



### CLÚSTERES INDUSTRIALES DE RELAVES EN CHILE

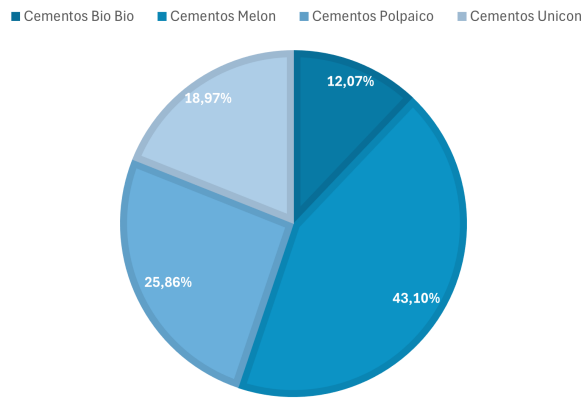


Figura 4.11: Distribución de Clústeres industriales por empresa en Chile.

De los 60 clústeres encontrados, el 43.1% pertenecen a oportunidades para la empresa Cementos Melón S.A, un 25.9% a Cementos Polpaico S.A, un 19.0% a Cementos Unicon S.A y un 12.0% a Cementos Bío Bío.

#### 4.5.2. Distribución de los clústeres industriales por región

Con respecto a los relaves dentro de los clústeres, se detallan los resultados regionales que se obtienen para las 7 regiones del país.

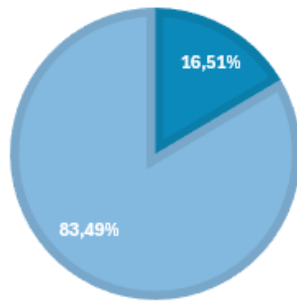
Tabla 4.8: Relaves en clústeres industriales; usos y criticidad por región

Región	Uso clinker	No clinker	Critic. Alta	Critic. Media	Critic. Baja	Total
Antofagasta	0	17	3	7	7	17
Atacama	22	116	33	52	53	138
Coquimbo	24	142	92	51	23	166
Valparaíso	9	52	16	18	27	61
RM	4	17	2	11	8	21
L.B.O'Higgins	6	9	5	1	9	15
Maule	5	1	0	3	3	6
<b>Totales</b>	<b>70</b>	<b>354</b>	<b>151</b>	<b>143</b>	<b>130</b>	<b>424</b>

En resumen, dentro de los 60 clústeres industriales identificados, se localizan 424 relaves con posible uso en la industria de la construcción, lo que corresponde al 53.67% de los relaves en Chile. Las regiones que poseen una mayor cantidad de depósitos con potencial uso en la industria cementera son las regiones de Atacama y Coquimbo. Para categorizar los relaves dentro de los clústeres se presenta la siguiente distribución nacional:

### USO DE RELAVES EN CLÚSTERES EN CHILE

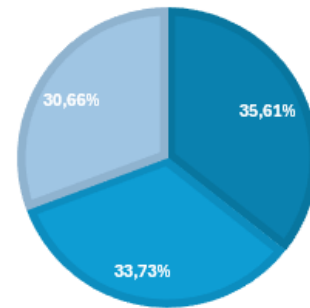
■ Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino  
■ Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales.

### CRITICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES EN CHILE

■ Alta ■ Media ■ Baja



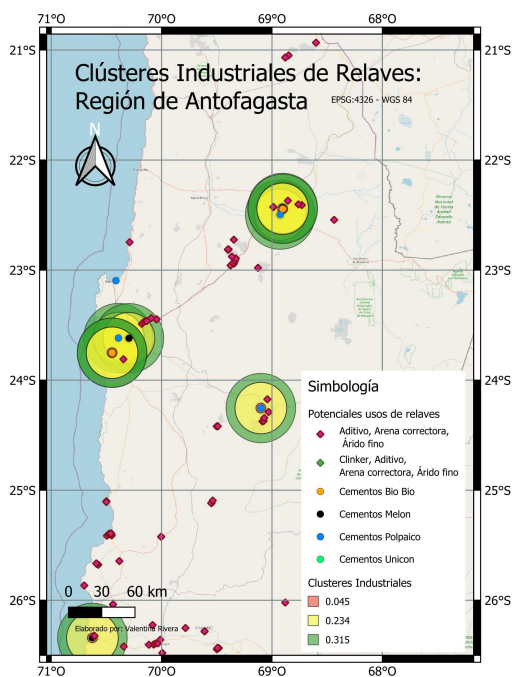
(b) Distribución del estado de criticidad de relaves en los clústeres industriales.

Figura 4.12: Caracterización de relaves en clústeres industriales.

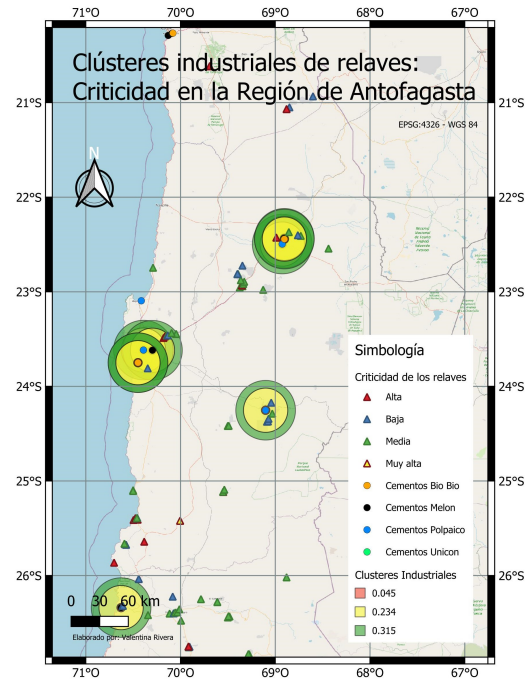
De los 424 relaves con potencial técnico-económico, 70 se identificaron con posible uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, representando el 16.51 %. Además, 151 relaves están clasificados como de alta criticidad, lo que equivale al 35.61 % de los relaves dentro de los clústeres industriales y al 54.90 % a nivel nacional.

A continuación, se presenta un acercamiento al mapa para visualizar correctamente los clústeres industriales dentro de las regiones de Chile. Se incluyen un total de 16 mapas que reflejan los distintos escenarios para las 7 regiones con potenciales negocios para las cementeras.

#### 4.5.2.1. Región: Antofagasta



(a) Uso de relaves en clústeres industriales Región de Antofagasta.

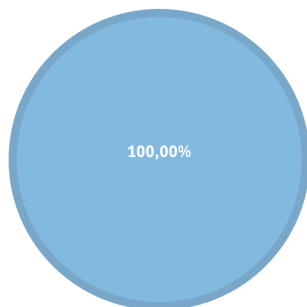


(b) Criticidad de relaves en clústeres industriales Región de Antofagasta.

Figura 4.13: Clústeres industriales en la región de Antofagasta.

#### ANTOFAGASTA: USO DE RELAVES EN CLÚSTERES

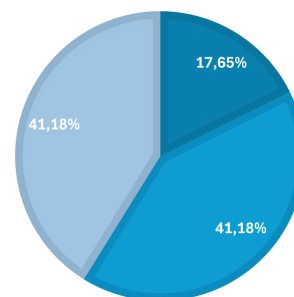
- Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino
- Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en Antofagasta.

#### ANTOFAGASTA: CRITICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES

- Alta
- Media
- Baja



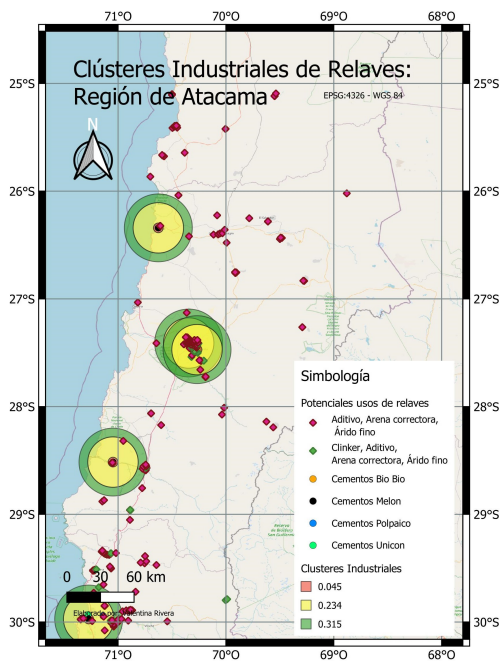
(b) Criticidad de relaves en clústeres industriales en Antofagasta.

Figura 4.14: Relaves en clústeres industriales región de Antofagasta.

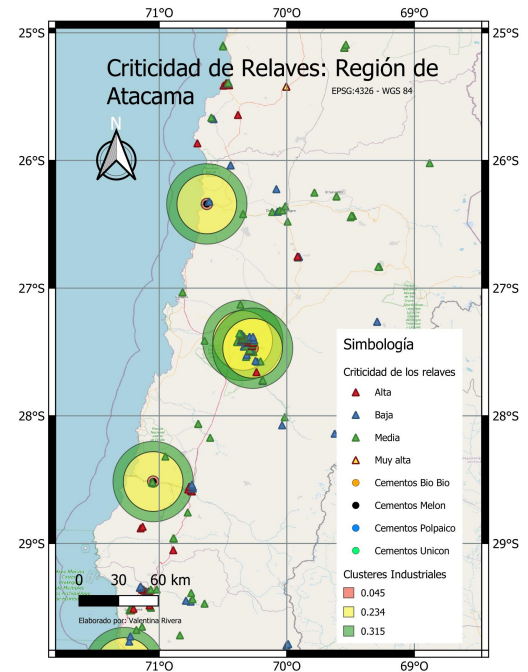
De los 17 relaves con potencial técnico-económico en esta región, ninguno se identificó para uso en Clinker, mientras que el 100 % se identifica para su uso en Aditivo, Arena correctora

y Árido fino. Además, 3 relaves están clasificados como de alta criticidad, representando el 17.65 % de los relaves dentro de los clústeres industriales y el 20 % a nivel regional.

#### 4.5.2.2. Región: Atacama



(a) Mapa de uso de relaves en clústeres industriales Región de Atacama.

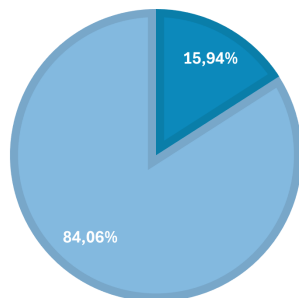


(b) Mapa de criticidad de relaves en clústeres industriales Región de Atacama.

Figura 4.15: Clústeres industriales en la región de Atacama.

#### ATACAMA: USO DE RELAVES EN CLÚSTERES

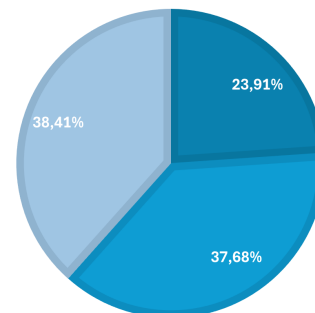
- Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino
- Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en Atacama.

#### ATACAMA: CRÍTICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES

- Alta
- Media
- Baja

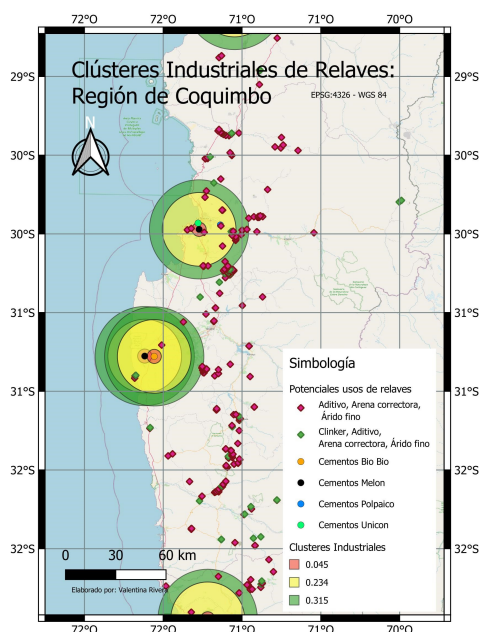


(b) Críticidad de relaves en clústeres industriales en Atacama.

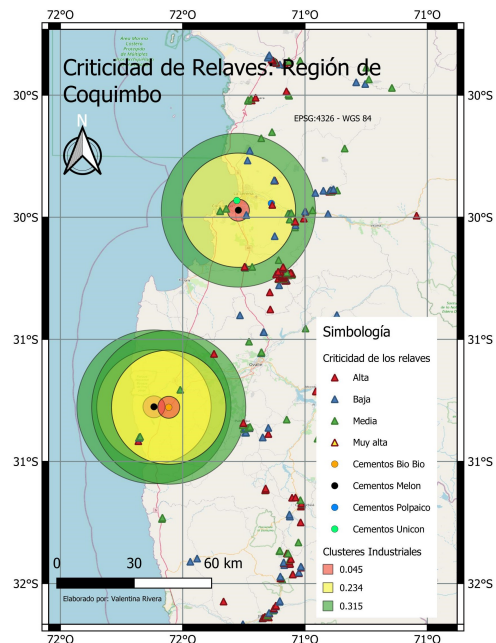
Figura 4.16: Relaves en clústeres industriales región de Atacama.

De los 138 relaves con potencial técnico-económico en esta región, 22 se identificaron para uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, lo que representa un 15.94%. Además, 33 relaves están clasificados como de alta criticidad, lo que corresponde al 23.91% de los relaves dentro de los clústeres industriales y al 82.50% a nivel regional.

#### 4.5.2.3. Región: Coquimbo



(a) Mapa de uso de relaves en clústeres industriales Región de Coquimbo.

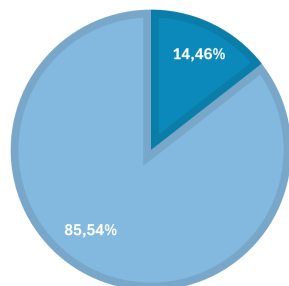


(b) Mapa de criticidad de relaves en clústeres industriales Región de Coquimbo.

Figura 4.17: Clústeres industriales en la región de Coquimbo.

#### COQUIMBO: USO DE RELAVES EN CLÚSTERES

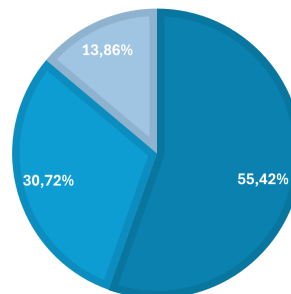
- Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino
- Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en Coquimbo.

#### COQUIMBO: CRITICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES

- Alta
- Media
- Baja



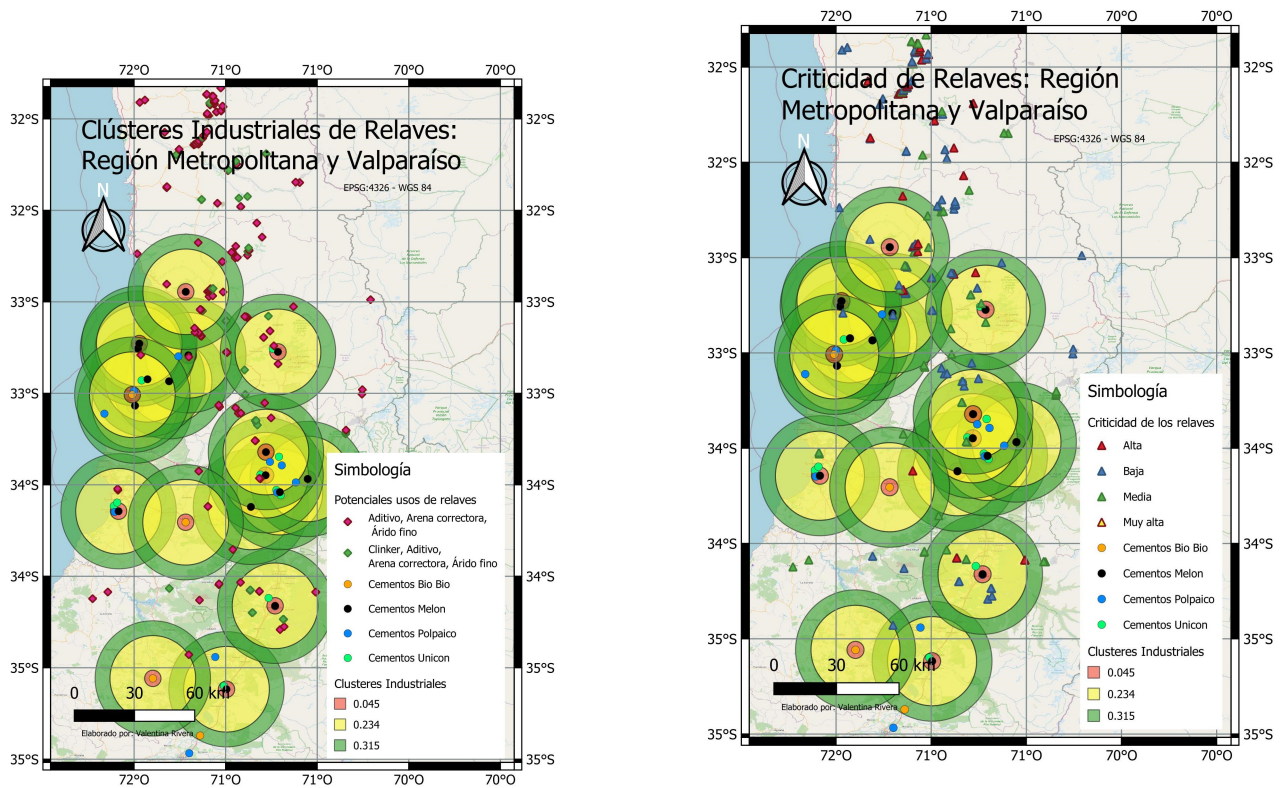
(b) Criticidad de relaves en clústeres industriales en Coquimbo.

Figura 4.18: Relaves en clústeres industriales región de Coquimbo.

De los 166 relaves con potencial técnico-económico en esta región, 24 se identificaron para posible uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, lo que representa un 14.46%. Además, 92 relaves están clasificados como de alta criticidad, correspondiendo al 55.42% de los relaves dentro de los clústeres industriales y al 48.68% a nivel regional, de un total de 189 bajo esta categorización.

#### 4.5.2.4. Región: Metropolitana y Valparaíso

A continuación, se presenta el mapa de clústeres industriales de relaves para su uso en la industria cementera de las regiones de Valparaíso y la Metropolitana.



(a) Mapa de uso de relaves en clústeres industriales en la Región metropolitana y Valparaíso.

(b) Mapa de criticidad de relaves en clústeres industriales en la Región metropolitana y Valparaíso.

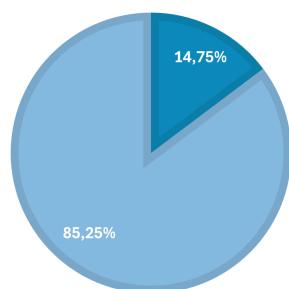
Figura 4.19: Clústeres industriales en las regiones Metropolitana y Valparaíso.

Los relaves dentro de los clústeres industriales dentro de esta región se representan a continuación.



### VALPARAÍSO: USO DE RELAVES EN CLÚSTERES

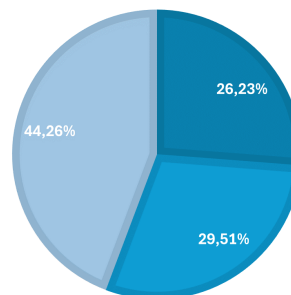
■ Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino  
 ■ Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en Valparaíso.

### VALPARAÍSO: CRITICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES

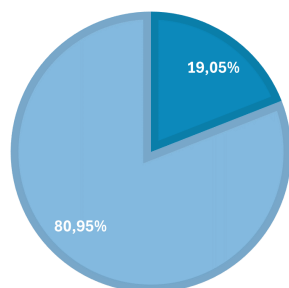
■ Alta ■ Media ■ Baja



(b) Criticidad de relaves en clústeres industriales en Valparaíso.

### RM: USO DE RELAVES EN CLÚSTERES

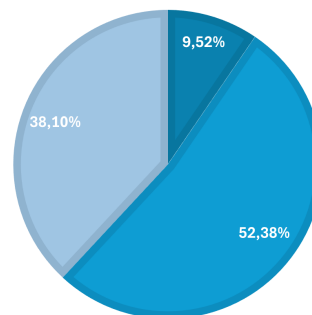
■ Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino  
 ■ Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(c) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en RM.

### RM: CRITICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES

■ Alta ■ Media ■ Baja



(d) Criticidad de relaves en clústeres industriales en RM.

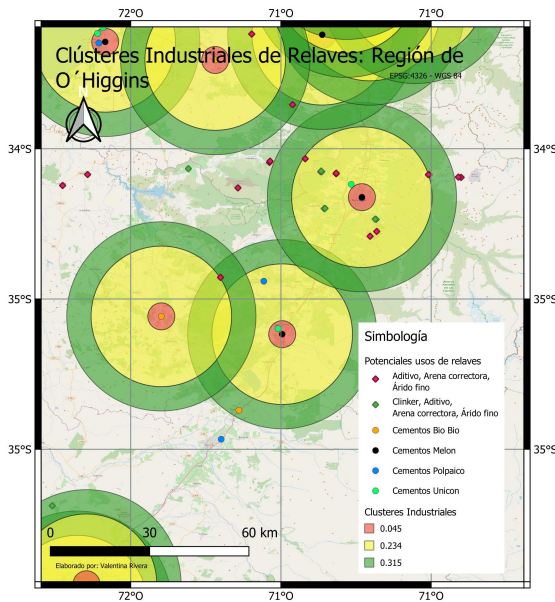
Figura 4.20: Caracterización de relaves en clústeres industriales en las regiones de Valparaíso y RM.

En la región de Valparaíso, de los 61 relaves con potencial técnico-económico, 9 se identificaron para posible uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, lo que representa un 14.75 %. Además, 16 relaves están clasificados como de alta criticidad, correspondiendo al 26.23 % de los relaves dentro de los clústeres industriales y al 94.12 % a nivel regional, de un total de 17 bajo esta categorización.

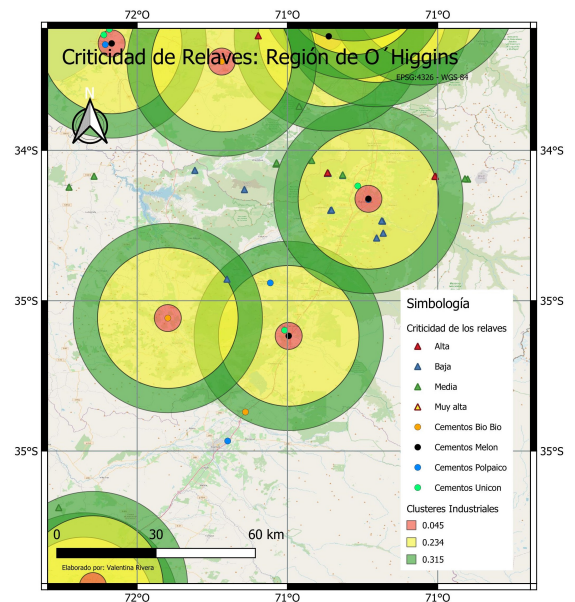
En la región Metropolitana, de los 21 relaves con potencial técnico-económico, 4 se identificaron para posible uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, lo que representa un 19.05 %. Además, 2 relaves están clasificados como de alta criticidad, correspondiendo al 9.52 % de los relaves dentro de los clústeres industriales y al 100 % a nivel regional.

#### 4.5.2.5. Región: O´Higgins

A continuación, se presenta el mapa de clústeres industriales de relaves para su uso en la industria cementera de la región de O´Higgins.



(a) Mapa de uso de relaves en clústeres industriales Región de O´Higgins.

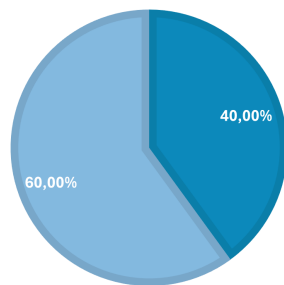


(b) Mapa de críticidad de relaves en clústeres industriales Región de O´Higgins.

Figura 4.21: Clústeres industriales en la región de O´Higgins.

#### O´HIGGINS: USO DE RELAVES EN CLÚSTERES

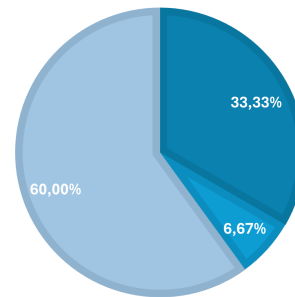
- Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino
- Aditivo, Arena correctora, Árido fino



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en O´Higgins.

#### O´HIGGINS: CRÍTICIDAD DE RELAVES EN CLÚSTERES

- Alta
- Media
- Baja



(b) Críticidad de relaves en clústeres industriales en O´Higgins.

Figura 4.22: Caracterización de relaves en clústeres industriales. O´Higgins.

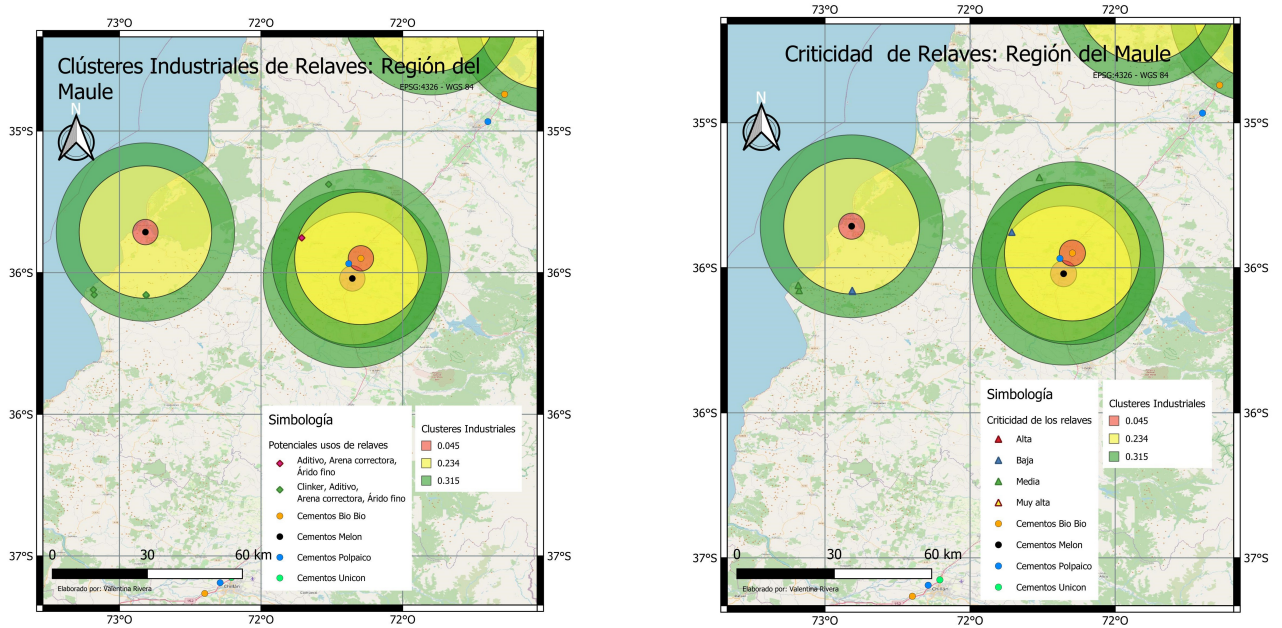
Hay 15 relaves dentro de los clústeres industriales. De estos, 6 se identificaron para posible uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, lo que representa un 40 %. Además,



5 relaves están clasificados como de alta criticidad, es decir, el 33.33 % de los relaves dentro de los clústeres industriales y el 100 % de los relaves bajo esta categorización en la región.

#### 4.5.2.6. Región: Maule

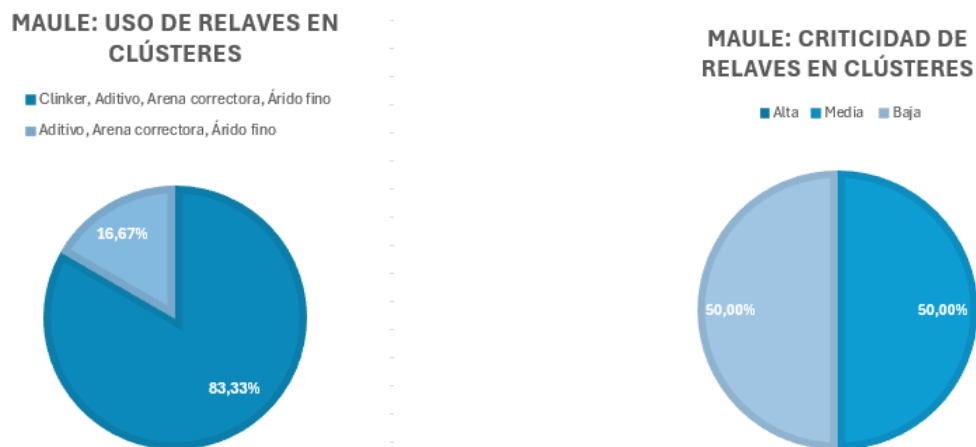
Se presenta el mapa de clústeres industriales de la región del Maule y su distribución.



(a) Mapa de Uso de relaves en clústeres industriales Región del Maule.

(b) Mapa de criticidad de relaves en clústeres industriales Región del Maule.

Figura 4.23: Clústeres industriales en la región del Maule.



(a) Distribución del uso de relaves en los clústeres industriales en El Maule.

(b) Criticidad de relaves en clústeres industriales en El Maule.

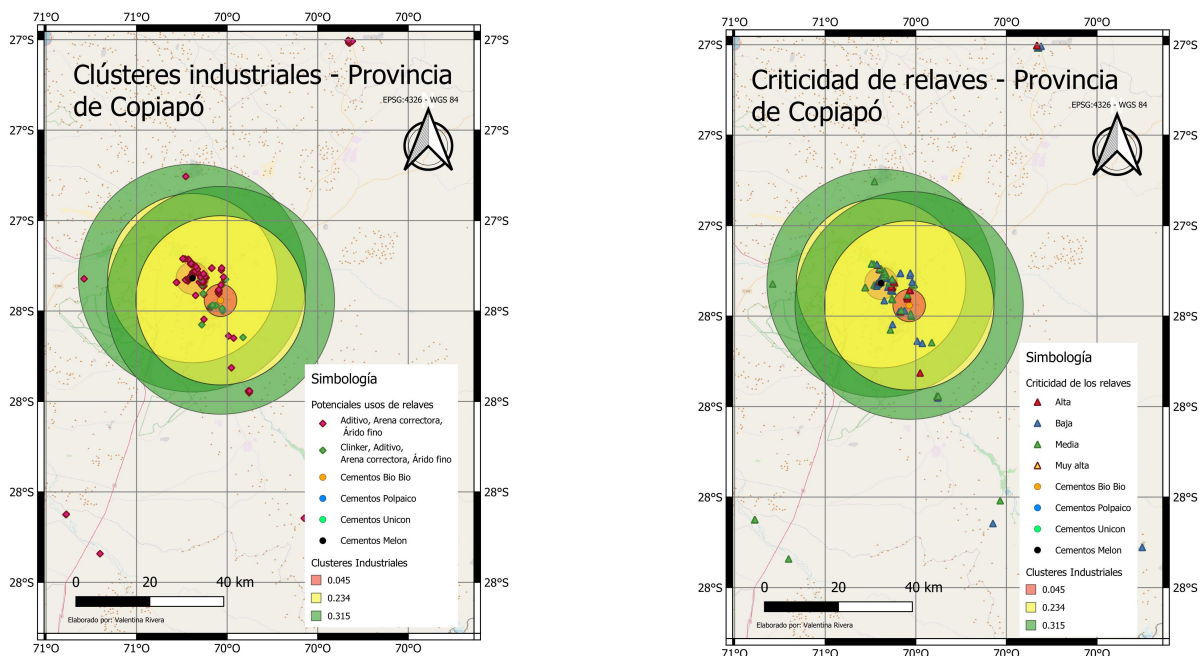
Figura 4.24: Relaves en clústeres industriales región del Maule.

De los 6 relaves con potencial técnico-económico en esta región, 5 se identificaron para posible uso en Clinker, Aditivo, Arena correctora y Árido fino, lo que representa un 83.33 %.

Además, no se encontró ningún relave clasificado como de alta criticidad, lo que corresponde al 0% de los relaves dentro de los clústeres industriales.

### 4.5.3. Caso particular - Copiapó

Se desglosa la información en torno al caso particular de la ciudad de Copiapó, debido a su controversial situación actual por la presencia de una gran cantidad de relaves de mediana minería, los cuales se encuentran localizados incluso dentro de la ciudad, con poca seguridad y alta peligrosidad para los habitantes. Se estudian los relaves dentro de esta ciudad con respecto a su potencial uso y su categorización de criticidad.



(a) Mapa del uso de relaves en caso de estudio - Provincia de Copiapó.

(b) Mapa del estado de criticidad de relaves en caso de estudio - Provincia de Copiapó.

Figura 4.25: Mapa del caso de estudio - Provincia de Copiapó.

Como se logra observar en la figura 4.25, en Copiapó existen 2 clústeres industriales de relaves, uno perteneciente a la empresa Cementos Bío Bío y otro a Cementos Melón. Para el correcto entendimiento del escenario, se analizan ambos clústeres por separado.

#### Cementos Bío Bío

Para Cementos Bío Bío se obtiene la siguiente distribución de relaves:

Tabla 4.9: Porcentaje de uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Bío Bío.

Uso de los relaves	Nº Relaves	Tonelaje (Mt)
Aditivo, Árido fino, Arena Correctora	99	638.82
Clinker, Aditivo, Árido fino, Arena Correctora	19	655.04
<b>Total</b>	<b>118</b>	<b>1293.86</b>

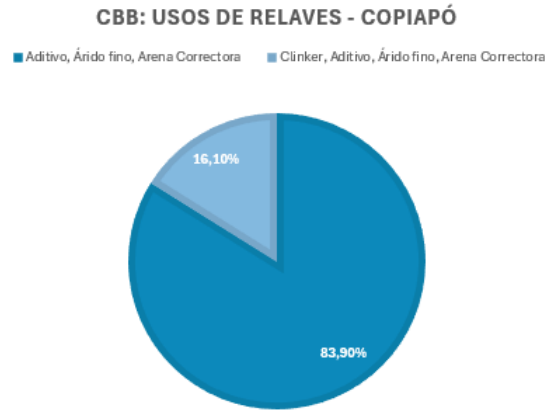


Figura 4.26: Porcentaje de uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Bío Bío.

Existen más de 1,293 millones de toneladas de relaves que pueden ser utilizados por la planta de hormigón de Copiapó de Cementos Bío Bío. Dentro de los cuales el 16.10 % puede ser utilizado para producir clinker, cemento y hormigón.

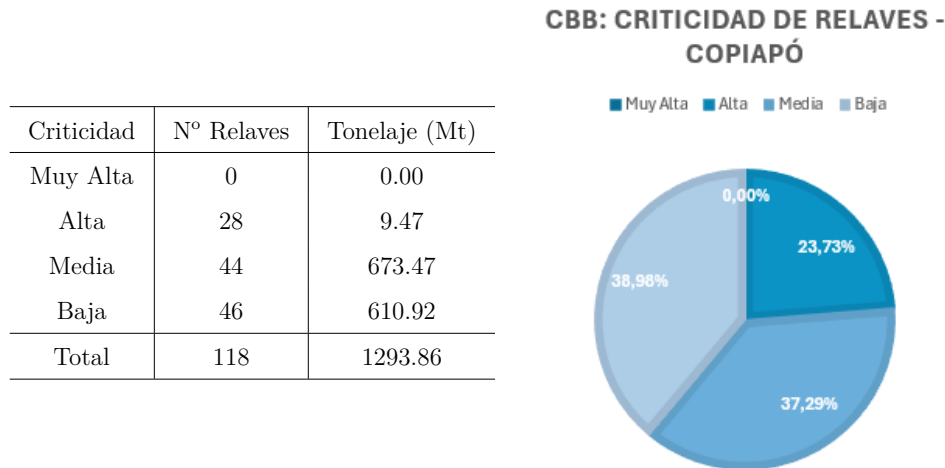


Figura 4.28: Estado de criticidad de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Bío Bío.

De las 1,293.86 millones de toneladas de relave, aproximadamente 9.47 millones de toneladas se clasifican como de alta criticidad, lo que representa el 23.73 % de los relaves dentro del clúster. Al analizar detalladamente la figura 4.25, se observa que la mayoría de los relaves en el clúster de Cementos Bío Bío están en el escenario económico del caso base, donde son factibles de utilizar sin pagar para la cementera (Costo relave = 0 USD/m<sup>3</sup>). En caso de que el relave tenga un valor asociado, la cantidad de relaves en el peor escenario se reduce significativamente (solo 16 de los relaves se encuentran en esta área), lo que indica que este negocio es altamente sensible a las condiciones y demandas de las mineras.

## Cementos Melón

Para Melón se obtiene la siguiente distribución de relaves:

Tabla 4.10: Uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Melón.

Uso de los relaves	Nº Relaves	Tonelaje (Mt)
Aditivo, Árido fino, Arena Correctora	97	735.34
Clinker, Aditivo, Árido fino, Arena Correctora	19	655.04
<b>Total</b>	<b>116</b>	<b>1,390.38</b>

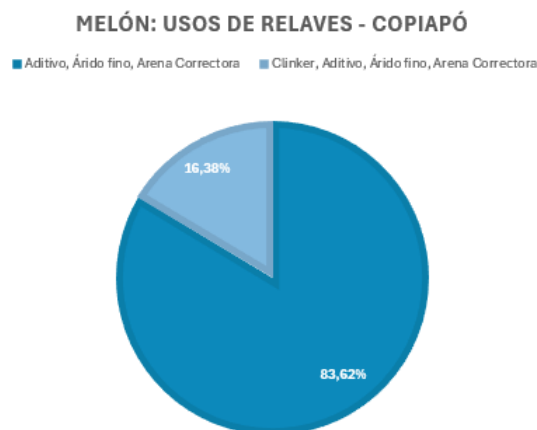


Figura 4.29: Porcentaje de uso de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Melón

Existen más de 1,390.38 millones de toneladas de relaves disponibles para ser utilizados en la planta de hormigón de Copiapó de Cementos Melón. De estos, aproximadamente el 16.38 % puede ser utilizado para la producción de clinker, cemento y hormigón.

### MELÓN: CRITICIDAD DE RELAVES - COPIAPÓ

Criticidad	Nº Relaves	Tonelaje (Mt)
Muy Alta	0	0.00
Alta	27	8.12
Media	44	773.32
Baja	45	608.94
<b>Total</b>	<b>116</b>	<b>1,390.38</b>

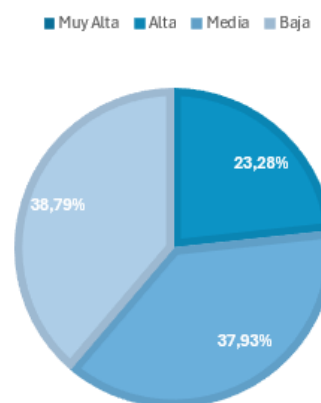


Figura 4.31: Estado de criticidad de relaves en el caso de estudio - Provincia de Copiapó. Cementos Melón.

Con respecto al estado de criticidad de estos relaves, de las 1,390.38 millones de toneladas de relave, aproximadamente 8.12 millones de toneladas se encuentran bajo esta categoría, lo que representa el 23.28 % de los relaves dentro del clúster.

Para Cementos Melón, al analizar detalladamente la figura 4.25, se observa que la mayoría de los relaves en el clúster se encuentran en el escenario económico del peor caso (62 relaves de los 116). Esto significa que son factibles de utilizar incluso si la planta debe adquirir el relave a un precio de 6.50 USD/m<sup>3</sup>. Este escenario indica que el negocio potencial tiene una menor sensibilidad al precio del relave, lo que posiciona a Cementos Melón en una ventaja comparativa con respecto a Cementos Bío Bío dentro de este clúster.

# Capítulo 5

## Discusión

Al no existir una metodología previa para identificar clústeres industriales de relaves en Chile en el contexto de la industria cementera, se propone la metodología ya descrita. Esta considera aspectos técnicos recomendados por expertos en el área (composición geoquímica y granulometría) y información normativa disponible. A continuación, se presenta el análisis de los resultados obtenidos, junto con una revisión bibliográfica del contexto que rodea esta problemática.

### 5.1. Brechas del uso de relaves en la industria de la construcción

En base en lo estudiado, el proceso de utilización de relaves en la industria de la construcción involucra una cantidad importante de actores, desde especialistas hasta autoridades públicas, además del pago de patentes. Una de las principales limitantes es su categorización como residuo en términos legales, ya que esta regulación abarca todo el manejo de estos materiales en aspectos de seguridad y medioambientales. Esto obstaculiza y encarece el proceso de utilizarlos como materia prima. Sin embargo, si los relaves adquirieran la categoría de subproducto dentro de la industria minera, se podrían agilizar los procesos de reprocesamiento o reutilización en otras industrias, facilitando su integración y aprovechamiento.

Por otro lado, la Norma Chilena 163 se identifica como el mayor obstáculo para el uso de relave en hormigón, debido a que esta ley especifica detalladamente qué materiales pueden ser materia prima para este producto. La modificación en curso de esta normativa y con ello la nueva categorización de los relaves como “árido artificial” representan avances significativos. Esta oportunidad cobra gran relevancia al permitir el uso de este residuo en otras aplicaciones, no solo en la producción de clinker, cementos u hormigón, sino también como shotcrete, impulsando una economía circular en la minería. Además, podría ser utilizado para el relleno de piques en minas antiguas, contribuyendo al cierre seguro de minas, y para la creación de geopolímeros a base de relaves. Estas iniciativas prometen ser una oportunidad real para Chile y avanzar en la gestión de residuos mineros, especialmente aquellos en estado de abandono y métodos de construcción aguas arriba, evitando tragedias como las de Brumadinho en 2015 y 2019, que cobraron vidas humanas.

## 5.2. Requerimientos para el uso en construcción

En términos técnicos, al no ser un material con propiedades puzolánicas (es decir, no es un material cementicio que se endurece al contacto con el agua, sino que forma una pasta)[54], su uso en la industria de la construcción se ve limitado a los porcentajes presentados en la tabla 4.2 para los diferentes productos. Además, el desconocimiento de la granulometría para cada uno de los relaves puede dificultar la utilización de mayores volúmenes de este residuo en Chile. A pesar de esto, los relaves suelen cumplir en gran medida con los requisitos normativos para las materias primas de los productos, evidenciando el gran potencial de estos residuos para su uso en construcción. Es responsabilidad de la empresa interesada solicitar información detallada y realizar estudios y pruebas que verifiquen el correcto uso y calidad esperada del producto utilizando este nuevo material.

La posibilidad de utilizar los relaves puede reducir significativamente el impacto ambiental de ambas industrias, cumpliendo con las normativas ambientales existentes en el país y enfrentando la crisis de escasez de áridos naturales, que se extraen de los cauces de los ríos. Esto se reflejaría en la disminución del impacto ambiental, el aumento del valor paisajístico del sector y la minimización de la inseguridad de las ciudades aledañas a los depósitos.

El mapa nacional realizado se basa en el análisis económico del transporte del hormigón, que representa la mayor oportunidad de participación del relave dentro de los productos estudiados (17 % como árido fino y 5 % como arena correctora, entregando una participación final del 22 %). Además, el hormigón es el producto más caro, lo que permite acceder a un mayor rango de distancia y, por ende, a una mayor cantidad de relaves. Para los casos del clinker y del cemento, debido a que son productos de menor precio, los radios de distancia serán menores y deben calcularse basándose en la información detallada de cada una de las empresas interesadas en evaluar este negocio.

## 5.3. Composición química y clasificación de los relaves

El trabajo se basa en la composición geoquímica de los relaves utilizando la información pública proporcionada por SERNAGEOMIN. Esta información proviene de un muestreo puntual y superficial de los relaves, donde algunos depósitos cuentan con un único punto de caracterización. Desde una perspectiva minera, es necesario complementarla con estudios para determinar con precisión el contenido geoquímico total del depósito. Por lo tanto, los datos presentados en el mapa deben considerarse como un levantamiento preliminar de información. Basándose en esto, la industria de la construcción debe realizar pruebas adicionales para comprobar los componentes de interés dentro de los relaves (óxido de calcio, cloruros, sulfatos y granulometría).

Por otro lado, el mapa no especifica el margen de error inherente a la metodología utilizada, tanto para las coordenadas como para la composición geoquímica. Este es un factor importante para entender la desviación de los datos en depósitos con más de un punto de representación, los cuales han sido promediados para reflejar la composición del mismo y entender la confiabilidad que poseen las representaciones dentro del mapa. Lo que se sumado a la desviación de precisión del software (entre 100 a 500m) es importante al considerar la ubicación de los depósitos dentro del mapa.

Con respecto a la clasificación de los relaves para su uso, el 100 % de los relaves pueden ser utilizados como aditivos, árido fino y arena correctora, mientras que aproximadamente un 16 % de estos relaves pueden ser utilizados para clinker según la metodología propuesta, la cual implica únicamente a los relaves con composición de CaO mayor al 25 % para ser considerados como materia prima en clinker. Considerando el caso del árido fino, se requiere una granulometría entre 10 a 2 mm, donde se presume que todos los relaves poseen material en dicho rango granulométrico. En la práctica, el relave puede poseer una granulometría bajo la requerida para árido fino y podría ser apto solo como arena correctora. Este uso específico debe evaluarse en la práctica por la hormigonera en terreno. De los 126 relaves identificados para uso en clinker, un 55 % se encuentra dentro de un clúster industrial, lo cual es bastante interesante para las hormigoneras que los tengan en sus cercanías.

Con respecto a la criticidad, esta se basa principalmente en decisiones de seguridad. Desde 1970, se ha prohibido el método de construcción de aguas arriba en Chile debido a su mayor inestabilidad. Además, es necesario hacerse cargo de los relaves en estado de abandono, ya que se encuentran en desconocimiento de su estabilidad física y química. Estos relaves podrían llegar a presentar riesgos de licuefacción, falta de control sobre los efectos de filtraciones de drenaje ácido y otros contaminantes.

Este criterio podría complementarse con factores geoquímicos que consideren la toxicidad de los elementos, su cercanía a ciudades, reservas naturales, ecosistemas, playas, acuíferos, entre otros, para evidenciar de manera más detallada el nivel de contaminación y estabilidad que presentan estos residuos para su entorno. Aproximadamente el 55 % de los relaves en estado de criticidad alta (151 relaves) se encuentran dentro de los clústeres industriales, lo que abre la posibilidad de su uso en la industria de la construcción.

## 5.4. Análisis económico

Para el escenario económico del uso de relaves en construcción, se desconocen la mayor parte de los costos, como los valores de patentes municipales, extracción del relave del depósito y del posible tratamiento que requiera el material para eliminar contaminantes que afecten la calidad esperada del producto. Estos valores pueden incidir directamente en el negocio retratado en el mapa, ya que el rango económico está fuertemente influenciado por el precio del relave. Esto se traduce en una mayor área de viabilidad económica siempre y cuando los costos de utilizar el relave disminuyan para la planta cementera, con respecto al material que se desea sustituir (el árido natural).

Con respecto a la viabilidad económica, se identificó un área para cada escenario. En el mejor caso, la minera paga a la cementera 2.5 USD/m<sup>3</sup> para que retire el relave del depósito y el radio económico alcanza una distancia máxima de 35km, esto puede ocurrir en caso de que los costos de cierre de la instalación excedan el precio a pagar a la cementera, o porque el estado decide subsidiar el negocio de relaves en construcción si la criticidad del depósito es alta y representa un peligro para la sociedad, donde los costos sociales de mantenerlos son mayores. En el caso base, donde la minera entrega el relave a costo cero a la cementera, esta solo debe costear el transporte, lo que permite que el radio de transporte se extienda por 26 km. Por último, en el peor caso, la cementera deba pagar 6.5 USD/m<sup>3</sup>



de relave, la distancia máxima que la cementera puede recorrer para transportarlo es de 5 km.

Con los relaves ya identificados para cada planta, la cementera debe evaluar los precios efectivos de su negocio para determinar el verdadero escenario en torno a estos depósitos. Por otro lado, al utilizar las coordenadas WGS 84 (World Geodetic System 84), se representa la tierra por medio de un elipsoide, que es un cuerpo geométrico más regular que la Tierra y es más preciso que las coordenadas cartesianas (UTM) que miden distancia. Sin embargo, dentro de los clústeres existen caminos para llegar a los relaves, los cuales en la mayoría de los casos no se recorren en línea recta. Esto implica que las distancias recorridas para llegar a los relaves aumentan, convirtiéndose en otro factor a evaluar por las hormigoneras en su viabilidad económica.

## 5.5. Clústeres industriales de relaves

El mapa web está disponible en [www.chilepolimetalico.cl](http://www.chilepolimetalico.cl), en la sección “Mapas interactivos”. Cuenta con capas que pueden visualizarse según la preferencia del usuario, donde está disponible la información sobre las cementeras, sus clústeres industriales y los relaves clasificados según su uso y criticidad.

A nivel nacional, se presentan 60 clústeres industriales de relaves con potencial uso en la industria de la construcción. De estos, aproximadamente el 43 % pertenecen a la empresa Cementos Melón, posicionándola como la cementera líder en este negocio en Chile, seguida por Cementos Polpaico con cerca del 25 % de los clústeres. En comparación, Cementos Bío Bío, la mayor competidora de Cementos Melón en producción nacional, solo alcanza un 12 % de participación en estos clústeres. Esto representa un diferenciador importante para Cementos Melón en su negocio.

Dentro de los clústeres industriales se localizan 424 relaves a lo largo de Chile, representando el 54 % de los relaves a nivel nacional. Estos relaves están distribuidos en las regiones de Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O’Higgins y El Maule. Entre estas 7 regiones, Atacama, Coquimbo y Valparaíso concentran el 86 % de los relaves dentro de los clústeres industriales, identificándose como las regiones con mayor potencial para la industria de la construcción.

El 35 %, es decir, 151 relaves dentro de los clústeres industriales, se categorizan con criticidad alta, lo cual equivale al 54 % de los relaves bajo esta categorización a nivel nacional. Esto refleja un gran potencial para Chile, permitiendo su uso en construcción y reduciendo así los riesgos asociados a estos depósitos en las ciudades cercanas. Del total de relaves, el 100 % pueden ser empleados en cemento y hormigón, mientras que el 16.5 % pueden ser utilizados para clinker (relaves con una composición de  $\text{CaO} > 25 \%$ ).

En términos regionales, el panorama en la zona centro-norte del país es similar al nacional, con aproximadamente un 16 % de relaves aptos para uso en clinker y un 35 % con criticidad alta dentro de los clústeres industriales. Mientras que en el sur el escenario cambia. En el centro-norte del país, se priorizan relaves con menor cantidad de  $\text{CaO}$  y en estado de criticidad alta. En cambio, en el sur, aumenta el porcentaje de relaves para uso en clinker entre el 40 % y el 80 %, y predomina el estado de criticidad baja, pero su cantidad de relaves es menor.

Finalmente, el caso particular de Copiapó ofrece una visión sobre el funcionamiento del mapa, donde interactúan Cementos Melón y Bío Bío con clústeres industriales en escenarios económicos similares. La principal diferencia radica en la distribución de los relaves dentro de sus clústeres. En el caso de Melón, 62 relaves (más del 53%) se localizan en el área del peor caso, mientras que para Cementos Bío Bío, los relaves dentro de su clúster se posicionan principalmente en el área del caso base (Solo el 15% de ellos se encuentran en el peor caso). Esto se traduce en un negocio más seguro para Melón, ya que incluso si deben pagar por el relave, sigue siendo rentable para la empresa.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Se logró cumplir con los objetivos esperados, entregando como resultado final un mapa interactivo web, el cual se encuentra disponible en [www.chilepolimetalico.cl](http://www.chilepolimetalico.cl) y proporciona una herramienta útil para visualizar la distribución de relaves y cementeras a nivel nacional. Con respecto a la propuesta de una metodología para identificar clústeres industriales de relaves en Chile, esta combina aspectos técnicos recomendados por expertos e información normativa principalmente, para un resultado más preciso se requiere incorporar información más robusta sobre la composición de los relaves, su granulometría, el cálculo de las distancias vía caminos y robustecer a un escenario económico para cada uno de los productos de forma individual. Además, los costos asociados al manejo de relaves son una variable crítica que influye directamente en la viabilidad económica del negocio.

En relación a las limitaciones legales y normativas, la posibilidad de reclasificar los relaves como subproductos y la modificación en curso de la normativa para permitir su uso como “árido artificial” son pasos cruciales para avanzar hacia una economía circular en la minería.

Aunque los relaves no presentan propiedades puzolánicas, tienen un considerable potencial para su aplicación en la construcción. En particular, pueden ser utilizados como aditivos, áridos finos y arena correctora. Esto es especialmente relevante para aquellos relaves que contienen menos del 25 % de CaO, los cuales constituyen el 84 % de los relaves en Chile. Su implementación podría disminuir el impacto ambiental de la minería y la construcción, contribuyendo además al cierre seguro de relaves abandonados (el 35 % de los relaves dentro de los clústeres son identificados en estado de criticidad alta). El análisis de los clústeres industriales revela una oportunidad significativa para la industria cementera en Chile, con Cementos Melón como la empresa más favorecida en el sector con más del 43 % de los 60 clústeres de relaves existentes y con 424 relaves dentro de estos. Los relaves dentro de los clústeres se concentran en más del 86 % en las regiones de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, lo que destaca el potencial de estas regiones para el desarrollo de la construcción.

Finalmente, la utilización de los relaves en la industria de la construcción no solo contribuye a la sostenibilidad, sino que también, en conjunto a otras iniciativas de uso de relaves, pueden ayudar a prevenir desastres similares a los de Brumadinho. Si bien esta iniciativa no resuelve el estado de saturación de pasivos ambientales mineros en Chile, resaltan la importancia de una gestión eficiente y sostenible de los relaves mineros en Chile, promoviendo su uso en la industria de la construcción y contribuyendo al desarrollo económico y ambiental del país.

# Bibliografía

- [1] Agencia Internacional de Energía (IEA). (2024). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Executive summary. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>
- [2] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2022). Demanda de cobre a partir de la transición energética
- [3] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2022). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2022
- [4] División de Desarrollo Sostenible Ministerio de Minería. (2020). Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible
- [5] Global Tailings Review. (2024). Global Industry Standard on Tailings Management. <https://globaltailingsreview.org/global-industry-standard/>
- [6] Tapia Maritza. (2022). Investigación plantea que en el país cada 30 horas se depositan relaves equivalentes al cerro Santa Lucía. <https://uchile.cl/noticias/183124/investigacion-u-de-chile-aborda-la-realidad-de-los-relaves-en-el-pais#:text=En%20Chile%20existen%20m%C3%A1s%20de%20China%20y%20Estados%20Unidos>.
- [7] Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2022). Monitoreo del estado de los relaves mineros en Chile Dirección de estudios y políticas públicas.
- [8] Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). (2022). Catastro de Depósitos de Relaves en Chile 2019. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- [9] Briones, A et al. (2020). Industria del cemento en Chile: CBB y su miada al futuro. <https://doi.org/10.5354/0719-0816.2020.58179>
- [10] Ministerio de minería. (2007). Decreto 248: Aprueba reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=259901>
- [11] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). Depósito de Relaves. Preguntas frecuentes sobre relaves: ¿Qué es un relave?. <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- [12] Osorio, B. (2009). “Resistencia Estática y Cíclica de Relaves Integrales”, Memoria para Optar al Título de Ingeniero, Universidad de Chile.
- [13] García, A. (2022). “Gestión Sustentable de Relaves”, MI5160, Medio Ambiente y comunidades, Universidad de Chile.

- [14] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2018). "Estudios de normativas internacionales de diseño, construcción, operación, cierre y post cierre de depósitos de relaves"
- [15] Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). (2023). "Construcción y operación de tranques de relaves". Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería
- [16] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). "Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves"
- [17] Parodi, M et al. (2022). "Estudio comparativo de factores de emisión en relaves abandonados e inactivos y su contribución al inventario de PM10: el caso Andacollo, Región de Coquimbo, Chile "
- [18] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- [19] Ecometales. (2023). Recuperan tierras raras desde relaves en Coquimbo y Atacama. <https://ecometales.cl/ecometales/difusion/noticias/recuperan-tierras-raras-desde-relaves-en-coquimbo-y-atacama>
- [20] Relaves con valor. (2019). Manual de Uso Público 1. Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves. <https://relavesconvalor.cl/material-descargable/>
- [21] Relaves con valor. (2019). Manual de Uso Público 2. Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor D288-MAN-GN-P2-001. <https://relavesconvalor.cl/material-descargable/>
- [22] Villavicencio, G, et al. (2014). Evaluación del potencial de licuefacción en tranques de arena de relaves empleando una interpretación probabilística de la densidad relativa estimada in-situ. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2016000200001>.
- [23] Cacciuttolo Vargas, Carlos, and Giovene Pérez Campomanes. (2022). "Practical Experience of Filtered Tailings Technology in Chile and Peru: An Environmentally Friendly Solution" *Minerals* 12, no. 7: 889. <https://doi.org/10.3390/min12070889>
- [24] Proyecto relave filtrado Planta de Pellets. (2023). 45 Preguntas de la comunidad sobre el proyecto. <https://www.proyectorelavefiltrado.cl/index.php/encuesta/#:::text=El%20relave%2C-%20una%20vez%20filtrado,4>.
- [25] Ministerio de salud. (2004). Decreto supremo 148: "Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos." Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- [26] Advanced Mining Technology Center (AMTC), Advanced Mining Technology Center (CMM). (2023). Sistema de monitoreo de riesgo en torno a depósitos de relave.
- [27] Hidronor. (2018). ¿Qué son los metales pesados?. <https://www.hidronor.cl/los-metales-pesados/>
- [28] Reyes Arturo, et al. (2021). Distribution of potentially toxic elements in soils surrounding abandoned mining waste located in Taltal, Northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.108653>.

- [29] Romero, Alfonso. Flores, Silvana. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
- [30] Corporación Alta Ley. (2021). Minería Verde, Oportunidades y Desafíos. <https://www.corporacionaltaley.cl/publicaciones/>
- [31] Relaves con valor. (2023). Relaves un recurso minero. <https://relavesconvalor.cl/>
- [32] Díaz Mauricio.(2019). “La minería secundaria y la sustentabilidad: Nuevos desafíos para Chile. FONDEF
- [33] Guía Minera de Chile.(2023). Programa “Relave Sustentable” pone acento en economía circular y recuperación de valor. <https://www.guiaminera.cl/programa-relave-sustentable-pone-acento-en-economia-circular-y-recuperacion-de-valor/>
- [34] Minera Valle Central. (2022). Reporte de sustentabilidad 2020-2021.
- [35] Salirrosas Jorge. (2020). Geopolímeros en la industria de la construcción: Aplicaciones con celiza volante y puzolana natural.
- [36] Reyes Arturo. (2023). Uso de residuos mineros como precursores para la síntesis de geopolímeros: Su aplicación como materiales de construcción y adsorbentes en el tratamiento de aguas en minería
- [37] TailingR32Green. (2023). Mine tailings reprocessing, revalorization and risk reduction connecting innovations in metal recovery, geopolymerization, ceramics & sealing layers. <https://tailingr32green.eu/projects/>
- [38] CODELCO. (2023). Trabajadores de El Teniente desarrollan proyecto que crea hormigón a base de arena de relaves. <https://www.codelco.com/trabajadores-de-el-teniente-desarrollan-proyecto-que-crea-hormigon-a>
- [39] Bnamericas. (2023). Pavimentando el camino para resolver el problema de los relaves mineros en Brasil. <https://www.bnamericas.com/es/entrevistas/pavimentando-el-camino-para-resolver-el-problema-de-los-relaves-mineros-en-brasil>
- [40] Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM). (2022). Tailings Reduction Roadmap. <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/innovation/2022/tailings-reduction-roadmap>
- [41] Camara Chilena de la Construcción (CCHC). (2020). Estudio de productividad: Impulsar la productividad de la industria de la Construcción en Chile a estándares mundiales.
- [42] Maldonado, C. (2023). Actualización de la NCh163: Un paso indispensable para disminuir pasivos ambientales y reducir extracción de áridos naturales. País Circular. <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/actualizacion-de-la-nch163-un-paso-indispensable-para-disminuir-pasivos-ambientales-y-reducir-extraccion-de-aridos-naturales/>
- [43] Medina Romero, L. (2006). 6. Proceso de fabricación del hormigón. Universidad Politécnica de Cataluña. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-8.pdf>
- [44] Wang, Meiqi & Chen, Enli & Liu, Pengfei & Guo, Wenwu. (2020). Multivariable nonlinear predictive control of a clinker sintering system at different working states by combining artificial neural network and autoregressive exogenous. Advances in Mechanical Enginee-

- ring. 12. 168781401989650. 10.1177/1687814019896509.
- [45] Alsop, Philip A. (2019). The Cement Plant Operations Handbook for Dry-Process Plants. International cement review. Tradeship Publications Ltd
- [46] Naranjo, O. (2017). Modelamiento geológico y estimación de recursos, yacimiento La Niña, Tongoy, Cementos Melón SA. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148670/Modelamiento-geologico-y-estimacion-de-recursos-yacimiento-La-Ni%C3%B1a-Tongoy%20Cementos%20Mel%C3%B3n.pdf?sequence=1>
- [47] Byond. (2023). ¿Qué tipos de hormigón hay y como seleccionar el más indicado?. <https://www.byond.es/blog/tipos-de-hormigon/>
- [48] Peña, A. (2023). Clase 11: Hablemos de Carbono. Curso Introducción a la Sustentabilidad en la Ingeniería. IQ3451-2 - Primavera 2023. Universidad de Chile.
- [49] Trafilaf, S. (2015). Los peligros de la extracción masiva de áridos. Diario y Radio Universidad Chile. <https://radio.uchile.cl/2015/02/08/los-peligros-de-la-extraccion-masiva-de-aridos/>
- [50] Tailings to Construction Materials(T2CM). (2023). Materiales posibles y aplicaciones. <https://t2cm.cl/proyecto/>
- [51] Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) . (2023). ¿Qué es el SEIA?. <https://www.sea.gob.cl/que-es-el-seia-0>
- [52] Ministerio de Minería. (2022). Decreto 132. Aprueba reglamento de seguridad minera.
- [53] Ministerio de Salud. (2000). Decreto 594. Aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.
- [54] Instituto Nacional de Normalización(INN). (1969). “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. Norma chilena oficial”.
- [55] Instituto Nacional de Normalización(INN). (1962).“Agregado tipo A para uso en cementos - especificaciones”.
- [56] Instituto Nacional de Normalización(INN). (1969).“Puzolana para uso en cementos - especificaciones”.
- [57] Instituto Nacional de Normalización(INN). (1979). Aridos para morteros y hormigones - Requisitos generales.
- [58] País Circular. (2024). Actualización de la NCh163: Un paso indispensable para disminuir pasivos ambientales y reducir extracción de áridos naturales. <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/actualizacion-de-la-nch163-un-paso-indispensable-para-disminuir-pasivos-ambientales-y-reducir-extraccion-de-aridos-naturales/>

# Anexo

## Clasificación de relaves en clústeres industriales - Regiones

Se presentan las estadísticas regionales de distribución de los relaves dentro del mapa.

Tabla .1: Criticidad por regiones, Relaves en clústeres y fuera de clústeres, y Porcentaje.

Criticidad por regiones:	Alta	Media	Baja	Relaves en clústeres	Relaves fuera de Clústeres	Porcentaje (%)
II - Antofagasta	3	7	7	17	42	28.81
III - Atacama	33	52	53	138	47	74.59
IV - Coquimbo	92	51	23	166	229	42.03
V - Valparaíso	16	18	27	61	18	77.22
RM - Metropolitana	2	11	8	21	8	72.41
VI - L. B. O'Higgins	5	1	9	15	3	83.33
VII - Maule	0	3	3	6	0	100.00
<b>Totales</b>	<b>151</b>	<b>143</b>	<b>130</b>	<b>424</b>	<b>347</b>	<b>53.67</b>

Tabla .2: Potencial uso de relaves por regiones.

Potencial uso por regiones:	Clinker, Aditivo, Arena correctora, Árido fino	Aditivo, Arena correctora, Árido fino	Total relaves
II - Antofagasta	0	17	17
III - Atacama	22	116	138
IV - Coquimbo	24	142	166
V - Valparaíso	9	52	61
RM - Metropolitana	4	17	21
VI - L. B. O'Higgins	6	9	15
VII - Maule	5	1	6
<b>Totales</b>	<b>70</b>	<b>354</b>	<b>424</b>