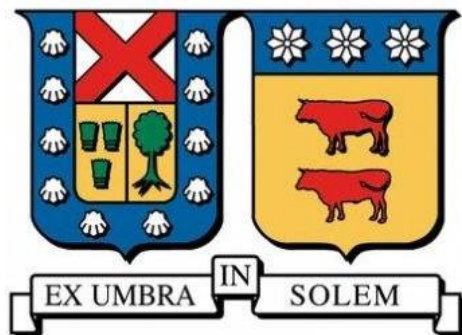




**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**EVALUACIÓN DE UN MODELO DE GESTIÓN, SUMINISTRO Y
ALMACENAMIENTO DE EXPLOSIVOS QUE INCENTIVE LA FORMALIZACIÓN
DE LA PEQUEÑA MINERÍA EN LAS COMUNAS DE PETORCA Y CABILDO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

LUCAS GALLARDO GALLARDO

PROFESOR GUÍA

RAÚL STEGMAIER BRAVO

VALPARAÍSO, 29 DE SEPTIEMBRE, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de un modelo de gestión, suministro y almacenamiento de explosivos que incentive la formalización de la pequeña minería en las comunas de Petorca y Cabildo.

Nombre del candidato(a): Lucas Felipe Ignacio Gallardo Gallardo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa central Valparaíso

Departamento: Dpto. Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA que:**

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

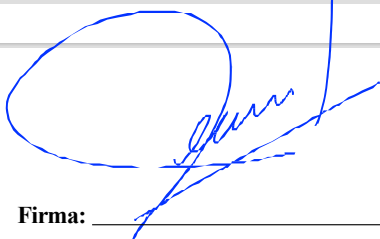
☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29/09/2006

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/09/2006

Firma: 

Resumen

En las comunas de Petorca y Cabildo, Región de Valparaíso, el acceso formal al almacenamiento de explosivos constituye una barrera estructural para la pequeña minería, lo que empuja a una parte significativa de los productores hacia prácticas operacionales informales, con consecuencias en riesgos de seguridad y sobrecostos asociados. Esta memoria de título tuvo como objetivo formular, evaluar la viabilidad técnica y económica de un modelo de gestión, suministro y almacenamiento de explosivos que redujera costos, mitigara riesgos y fomentara la formalización de la pequeña minería en dicha zona.

Para ello, se desarrolló un diagnóstico cuantitativo basado en seis años de datos oficiales de SERNAGEOMIN y DGMN (2020-2025), mediante la construcción de los índices específicos para el estudio, complementado con una serie de test estadísticos y una encuesta a 55 pequeños productores. Las causas raíz de la informalidad se identificaron mediante la triangulación de diagrama de Ishikawa, análisis de los Cinco Porqué, Value Stream Mapping y un modelo de regresión logística. A partir de este diagnóstico, se diseñó mediante metodología de Design Thinking y modelo de negocios Canvas, la propuesta resolutive MODULEX, un modelo de arriendo y venta de módulos de almacenamiento de explosivos relocizables, operado bajo un esquema logístico de abastecimiento directo y cross-docking.

La factibilidad económica del modelo se evaluó mediante dos modelos de optimización, determinando un tamaño mínimo de cartera de 29 clientes para el equilibrio financiero y una mezcla óptima de 21 clientes en modalidad de venta y 34 en modalidad de arriendo. Resultando sobre un horizonte de cinco años y una tasa de descuento de 12%, un Valor Actual Neto (VAN) de \$20.116.550, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 18,38% y un período de recuperación de la inversión de 4,20 años, resultados que se mantienen robustos frente a variaciones en el consumo de explosivo, el precio de venta del módulo y la tasa de descuento.

Índice

1. Problema de Investigación	6
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo General	9
2.2 Objetivos Específicos	9
3. Alcance de la investigación	10
3.1 Escala de productores	10
3.2 Alcance geográfico	10
3.3 Tipos de explosivos y procesos	11
3.4 Periodo de estudio	12
3.5 Limitaciones y exclusiones	12
3.6 Alcance de la intervención propuesta en estudio	13
4. Marco Teórico	14
4.1 Contexto y desafíos de la pequeña y mediana minería en Chile	14
4.2 Características de la zona Cabildo-Petorca	16
4.3 Antecedentes generales de elementos explosivos	20
4.4 Marco normativo para el manejo de explosivos en el sector	23
4.5 Proveedores: Logística y gestión de explosivos en minería	29
4.6 Tecnología emergente en la gestión de insumos explosivos	32
4.7 Esquemas de negocios similares	34
5. Metodología	37
5.1 Recolección de datos	37
5.2 Limpieza y preparación de la data	42
5.3 Fundamentación y selección del modelo estadístico	46
5.4 Formulación de modelos estadísticos	52
5.5 Análisis causal: Herramientas de excelencia operacional	60
6. Resultados	70
6.1 Caracterización de datos oficiales depurados	70
6.2 Resultados de la encuesta a pequeños productores mineros	75
6.3 Resultados de modelos estadísticos	81
6.4 Análisis de mercado y benchmarking normativo	91
6.5 Resultados de análisis causal	94
6.6 Análisis y aplicación de 5 ¿Por qué?	95
6.7 Value Stream Mapping (VSM) actual en la gestión de explosivos	97
6.8 Síntesis integrada del análisis	98
6.9 Aplicación Design Thinking: Empatizar, Definir e Idear	99

7. Propuesta resolutive	110
7.1 Descripción del modelo operativo	111
7.2 Estructura de costos y tarifa desagregada	121
7.3 Mecanismo de incentivo a la formalización	125
7.4 Trazabilidad del diseño respecto del diagnóstico	126
7.5 Estrategia de entrada al mercado y marketing	128
7.6 Mecanismo de financiamiento	129
7.7 Business Model Canvas	130
7.8 Evaluación económica	131
7.9 Escalabilidad comercial	140
8. Conclusiones	141
8.1 Cumplimiento del objetivo general	141
8.2 Cumplimiento de objetivos específicos	142
8.3 Impacto esperado en la industria y población evaluada	147
8.4 Limitaciones del estudio	149
8.5 Líneas futuras de trabajo	150
8.6 Síntesis final	151
9. Referencias	153

1. Problema de Investigación

La minería en su totalidad de categorías junto a su entorno se fija como pilar fundamental de la economía chilena, siendo el principal contribuyente sobre el Producto Interno Bruto (PIB) a nivel país, tal como lo indica explícitamente el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) “La minería nacional se mantuvo, el año 2023, como uno de los principales pilares económicos del país, con una participación de 11,9% en el PIB nacional” (2023,p.5). Esta relevancia macroeconómica hace indispensable analizar las condiciones en que opera la pequeña y mediana minería con ojos hacia el potencial desarrollo futuro de este rubro a distintas escalas.

A nivel regional, la Región de Valparaíso, según Juan Contreras, presidente del Cluster Minero de la Asociación de Empresas Región de Valparaíso (ASIVA) “la minería directa representa el 4,5 % del PIB regional, según cifras del Consejo Minero y el Banco Central de Chile” (2023), identificando allí un importante foco concentrado en faenas de pequeña y mediana magnitud, particularmente en la Provincia de Petorca. El presente estudio se centrará en las comunas de Cabildo y Petorca, seleccionadas estratégicamente por ser zonas históricas mineras con alta densidad en este tipo de operaciones.

Según reportes de datos de caracterización económica estas comunas contienen 78 y 54 empresas formalmente constituidas en el rubro “Explotación de minas y canteras”, respectivamente, representando de forma significativa la fuerza laboral alcanzada de un 4,61% de la población activa de la provincia, que se sostiene sobre el Instituto Nacional de Estadística (INE) y la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional CASEN” (Asociación de Empresas Región de Valparaíso, 2021). Sin embargo, esta actividad a baja escala se desarrolla en un escenario caracterizado por la alta irregularidad, donde en base a registro de catastros y propiedades mineras, se estima que alrededor del 70% de faenas no son reconocidas oficialmente, ni cuantificadas con precisión, incumpliendo a cabalidad con la normativa, lo que abre

ampliamente alternativas de ilegalidad (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2012).

Para estas empresas y faenas, la competitividad está sujeta a la gestión eficiente de sus costos operacionales, donde los ítems de combustibles, transporte interno y externo, equipamiento y mantención, mientras que de manera crítica la adquisición y almacenamiento de explosivos puede representar entre el 25% a 30% del costo total por tonelada producida, lo que se constituye como roca fragmentada, incluyendo tanto mineral comercial como material estéril (Sociedad Nacional de Minería, 2023; Vega, 2015). Específicamente, la gestión de explosivos se posiciona como un factor fundamental regido por normativa estricta, que bajo las faenas consideradas bordean la ilegalidad a menudo representando a su vez un cuello de botella que condiciona toda la operación, manifestándose a través de cuatro dimensiones interconectadas.

Suministro de explosivos y altos costos

El mercado está dominado por dos proveedores principales (DIEXA y FAMESA), lo que limita la competencia, eleva los precios de los insumos y genera cargos de transporte excesivos, sin ofrecer servicios de asesoría que optimicen el consumo.

Barreras legales e infraestructura inaccesible

El estricto marco regulatorio de SERNAGEOMIN y DGMN, aunque necesario para la seguridad, establece requisitos para polvorines fijos y móviles que resultan prohibitivos en costo y complejidad para el pequeño productor. Esto explica que menos del 20% de las faenas cuenten con polvorines legalmente validados, perpetuando la informalidad (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

Ineficiencia operacional y falta de trazabilidad

La ausencia de sistemas de control de inventario en elementos explosivos conduce a un desaprovechamiento de insumos, dificulta la planificación y obstaculiza el cumplimiento de las exigencias de rendición de cuentas en libro de consumo (Perquilaf, 2017).

Riesgo operacional y accidentabilidad

Las condiciones inadecuadas sobre el tratamiento de explosivos aumentan el riesgo de accidentes graves, como lo evidencian los eventos registrados en 2025 bajo la categoría “Alcanzados por tronadura” (Servicio Nacional de Geología y Minería, Julio 2025).

Derivado de lo anterior, esta investigación busca responder a las siguientes preguntas centrales: ¿De qué manera el modelo actual de acceso y almacenamiento de explosivos en las comunas de Cabildo y Petorca limita la productividad, seguridad y formalización de la pequeña minería? ¿En qué medida un modelo de negocio basado en polvorines móviles inteligentes puede constituir una solución viable para reducir costos operacionales, cumplir con la normativa legal y disminuir los riesgos de accidentabilidad?

Los actores detallados con anterioridad se relacionan directamente con ciertas variables centrales a estudiar, definidas como competitividad del minero (variable dependiente, medida a través de costos, formalización y seguridad), y condiciones de acceso y almacenamiento de explosivos (variable independiente negativa actualmente). Frente a esto, esta investigación pretende diseñar un “Modelo de gestión, suministro y almacenamiento de explosivos que reduzca los niveles de informalidad operacional para el pequeño productor minero de las comunas de Petorca y Cabildo” que sea viable bajo las condiciones realistas del mercado actual. Esta solución propone transformar la variable independiente negativa en una con caracterización positiva, ofreciendo una infraestructura segura, regulada y tecnológica que reduzca los costos de transporte y almacenamiento, agilice el cumplimiento normativo de SERNAGEOMIN y provea un sistema de trazabilidad en tiempo real, potenciando así la sostenibilidad, creación y captura de valor perdurable en el tiempo para el sector identificado.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Formular y evaluar la viabilidad técnica y económica de un modelo de gestión, suministro y almacenamiento de explosivos que reduzca, costos, mitigue riesgos y fomente la formalización en la pequeña minería de las comunas de Petorca y Cabildo.

2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual técnica, normativa y económica del uso de explosivos en la zona de estudio, mediante el análisis de datos oficiales de SERNAGEOMIN y DGMN para el periodo 2020-2026.
- Identificar las causas raíz del sobre costo operacional y la informalidad logística en la cadena de suministros de explosivos, mediante herramientas de excelencia operacional y análisis estadístico.
- Diseñar una propuesta de valor y modelo operativo logístico-tecnológico adaptado a la geografía y normativa nacional, mediante metodología de Design Thinking e integración de un modelo de negocios Canvas.
- Evaluar la factibilidad técnica y económica del modelo propuesto, mediante indicadores financieros y análisis de sensibilidad.

3. Alcance de la investigación

El alcance delimita con precisión las fronteras del estudio, estableciendo que dimensiones, actores, territorios y periodos quedan incluidos en el análisis y cuales quedan fuera de él. Esta delimitación es condición necesaria para garantizar la coherencia metodológica y la validez de las conclusiones.

3.1 Escala de productores

El estudio se focaliza exclusivamente a la pequeña minería, entendida conforme a la definición operacional vigente en Chile, como faenas con una producción mensual inferior a las 10.000 toneladas de mineral. Dentro de esta categoría, se incluyen faenas clasificadas activas hasta aquellas en condición de irregular operativa, dado que estas últimas constituyen el grupo con mayor exposición a la problemática estudiada.

Se excluye explícitamente la gran minería, dado que estas categorías cuentan con capacidad financiera, técnica y organizacional para cumplir la normativa vigente sin que ello represente una barrera estructural para su operación, lo que distorsionaría los indicadores de brecha calculados en el modelo a proponer.

3.2 Alcance geográfico

Se circunscribe a las comunas de Petorca y Cabildo, pertenecientes a la provincia de Petorca, región de Valparaíso. Estas comunas fueron seleccionadas como zona de estudio por las siguientes razones:

- I. Concentran una densidad significativa de faenas mineras de pequeña escala con actividad declarada ante SERNAGEOMIN.

- II. Presentan condiciones geográficas características de la minería no metálica y metálica en la zona central de Chile, contando con acceso vial complejo, dispersión territorial de las faenas y distancias a los centros de distribución de explosivos.
- III. Los datos de DGMN disponibles para la investigación están desagregados específicamente a nivel de estas dos comunas, lo que permite un análisis de precisión.
- IV. La zona no ha sido objeto de estudios académicos previos sobre gestión de explosivos en pequeña minería, lo que otorga originalidad y relevancia.

3.3 Tipos de explosivos y procesos

Abarca el ciclo completo de gestión de explosivos en la pequeña minería, desde la autorización administrativa hasta el uso en faena. En cuanto a los tipos de explosivos, el análisis cuantitativo se focaliza en los explosivos principales utilizados en tronadura minera, que son los que requieren almacenamiento en polvorín autorizado y que concentran la mayor parte del costo y el riesgo operacional.

Tabla 1: Tipos de explosivos en estudio.

Tipo de producto	Rol en el estudio
ANFO y variantes (Mexal, Amex)	Explosivo de carga principal, mayor volumen de compras.
Emulsiones encartuchadas (Emulnor, Emultex, Exagel, Senatel, etc.)	Explosivo de carga en faenas con mayor control de granulometría.
Fameplast / Famecorte	Agente de voladura especializado.
APD / Booster (iniciadores de masa)	Iniciadores de carga, masa explosiva significativa.
Detonadores (FANEL, eléctricos, no eléctricos)	Accesorios de iniciación, contabilizados en unidades (Análisis separado).
Mecha lenta / Cordón detonante	Accesorios de conexión, no se almacenan en polvorín principal. (Análisis separado)

En cuanto a los procesos, el alcance cubre las siguientes etapas de la cadena de gestión de explosivos tramitación de autorizaciones ante DGMN (polvorines y licencias de manipulador), proceso de compra a proveedores autorizados, transporte desde proveedor hasta faena, almacenamiento en polvorín, y despacho a punto de uso en tronadura. Se excluye explícitamente el proceso de diseño de tronaduras (ingeniería de voladura), que pertenece al ámbito de la ingeniería de minas y no al de la gestión de operaciones.

3.4 Periodo de estudio

El período 2020-2026 fue seleccionado como horizonte principal del análisis cuantitativo por ser el de mayor completitud de datos en todas las fuentes disponibles. El año 2020 coincide además con el inicio de un período de disrupciones en la cadena de suministro minero a nivel global, lo que otorga relevancia contextual al análisis de tendencia.

3.5 Limitaciones y exclusiones

Tabla 2: Dimensiones excluidas del estudio.

Dimensión excluida	Razón de exclusión
Implementación efectiva del modelo propuesto	La investigación llega hasta la evaluación de viabilidad, la implementación requiere decisiones de política pública e inversión que exceden el alcance de una memoria de título.
Análisis de otras regiones de Chile	Los datos disponibles corresponden exclusivamente a las comunas de Petorca y Cabildo. La extrapolación regional requeriría datos adicionales no disponibles.
Ingeniería de voladura y diseño de tronaduras	Pertenece al dominio de la ingeniería de minas, excede los objetivos propuestos.
Identificación individual de empresas o personas	Por razones éticas y de confidencialidad, todos los datos se presentan en forma agregada. No se identifican operadores individuales.
Evaluación de impacto ambiental	No forma parte del alcance metodológico.
Análisis de explosivos para usos distintos a la minería	El estudio se limita estrictamente al contexto minero, quedan excluidos usos civiles, de construcción o militares de explosivos.
Gran minería	Esta categoría no presenta la problemática estudiada y su inclusión distorsionaría los modelos.

3.6 Alcance de la intervención propuesta en estudio

Una vez identificada la problemática central del objeto de estudio y validada por el marco metodológico, se buscará formular un modelo resolutivo basado en herramientas ingenieriles que permita dar solución viable dentro de las capacidades permitidas de la Ley Chilena, por aquello es relevante esclarecer factores que se puedan o no puedan intervenir realmente, los que funcionarían además como supuestos para el capítulo de Propuesta Resolutiva.

Variables que el modelo no puede intervenir

- I. Plazos legales de tramitación de licencias de manipulador y autorizaciones de polvorín ante DGMN y Autoridad Fiscalizadora.
- II. Contenido de la normativa vigente, incluyendo la ausencia de diferenciación por escala productiva identificada en la industria minera.
- III. Creación de nuevas figuras regulatorias o extensión de funciones no validas.
- IV. Capacidad de fiscalización efectiva del Estado o entes regulatorios.

Variables que el modelo si puede intervenir

- I. Proporcionar disponibilidad de infraestructura certificada de almacenamiento formal.
- II. Costo de acceso a explosivo legal, metodologías de pago o compra agregada.
- III. Tiempo de disponibilidad de una infraestructura lista para operar explosivos en faena.
- IV. Ampliación de la gama de proveedores disponibles para los productores.

4. Marco Teórico

4.1 Contexto y desafíos de la pequeña y mediana minería en Chile

La pequeña y mediana minería en Chile constituye un pilar socioeconómico fundamental para diversas regiones, especialmente en áreas rurales y remotas, pese a operar en un escenario de alta irregularidad y costos operacionales elevados. La Política de Fomento a la Pequeña Minería, impulsada por el Ministerio de Minería, establece un marco estratégico que puede agruparse en cuatro ejes centrales para el desarrollo del sector hacia 2034 (Ministerio de Minería, 2025).

Formalización y propiedad minera

Mediante la promoción de “proyecto minero (PM)” que esta subdividido en exploración y explotación y el Decreto N° 1/2024 del Ministerio de Minería, se insta a los productores a realizar los procesos de declaración minera optimizando una serie de documentación, permisos y cargas administrativas aplicadas al sector, con el objetivo de brindar claramente los criterios técnicos y evaluativos para los titulares que deseen operar este tipo de faenas mineras (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2024, p.4).

Esta Guía para Proyectos Mineros ataca firmemente la alta tasa de ilegalidad en propiedades mineras y todo lo que esto conlleva, ya que cerca de un 70% no se encuentran reconocidas oficialmente, limitando el acceso a financiamiento mediante fondos gubernamentales y asistencia técnica por profesionales del área pública, como lo son por ejemplo las líneas de fomento declaradas por la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) mediante el DS N°76 de 2003 del Ministerio de Minería con los programas “Reconocimiento de Recursos y/o Reservas y Planificación Minera” y por el “Programa de Estudios Distritales” (Ministerio de Minería, 2025, p.11).

Producción y productividad

Las exigencias del mercado actual tanto metálico como no metálico se encuentran en adaptación a la calidad de los recursos naturales existentes, lo que ha provocado una producción general mucha más escasa provocando bajar los niveles de pureza de estos elementos. Por aquello los planes productivos actuales tienden hacia el aprovechamiento total de los minerales, optar por economías circulares y políticas de disminución de desperdicios y contaminantes. Encontrándose como objetivo el mejorar la competitividad mediante la adopción de tecnologías y eficiencias operativas, con métodos de explotación lo más optimizados posible.

Como los ítems de adquisición y almacenamiento de explosivos pueden representar entre el 25% y 30% del costo total por tonelada producida en la mediana minería, para el pequeño productor este porcentaje es aún más crítico debido a las economías de escala inexistentes, siendo un factor determinante en este ámbito posicionándose como un área prioritaria para la implementación de modelos de negocio innovadores que reduzcan esta carga (Sociedad Nacional de Minería ,2023;Vega, 2015).

Sostenibilidad y medio ambiente

La política fomenta la integración de prácticas sostenibles y la reducción del impacto ambiental sobre flora y fauna. Las faenas de la pequeña y mediana minería a menudo carecen de los recursos para implementar sistemas de gestión ambiental avanzados, por esta razón se ha fomentado la inclusión de aportes en este ámbito mediante evaluación técnica de ingenieros ambientales, así como de capitales para invertir en áreas de desecho, descontaminación de suelos, optimización energética y reutilización de aguas, gracias a fondos como el Programa de Transferencia Tecnológica para la Pequeña Minería Artesanal (PAMMA) y Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) que dedican ítems específicos a esta área (Sociedad Nacional de Minería, 2021).

Institucionales

Se refiere a mejorar la coordinación entre los servicios públicos como el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) junto a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) y los productores para una fiscalización más efectiva y un apoyo más directo. Mientras que de forma paralela se promueve la inserción de capital humano especializado e inclusivo con visión en el desarrollo del talento humano mediante certificación en cursos dictados por el Consejo Regional de Seguridad Minera (CORASEMIN) entre otros entes (Sociedad Nacional de Minería, 2021).

De esta forma se definen e informan claramente los objetivos y propósitos nacionales, junto a los desafíos de corto y largo plazo que enfrenta la pequeña minería en un estado realista. Por aquello, resulta fundamental analizar las características específicas del territorio donde se implementará la solución propuesta con esta investigación, en donde las comunas de Cabildo y Petorca representan un caso emblemático de las condiciones operativas que enfrenta este sector a nivel regional.

4.2 Características de la zona Cabildo-Petorca

La Provincia de Petorca se localiza en la Región de Valparaíso, presentando una geografía compleja dominada por la Cordillera de la Costa y valles transversales. Las comunas de Cabildo y Petorca exhiben un relieve marcadamente accidentado, con altitudes que varían entre los 200 y 2,000 metros sobre el nivel del mar. Esta configuración topográfica influye directamente en la accesibilidad a las faenas mineras, generando desafíos logísticos significativos para el transporte de insumos críticos como los explosivos (Instituto Geográfico Militar, 2023).

Figura 1: Atlas de faenas mineras comuna Cabildo.

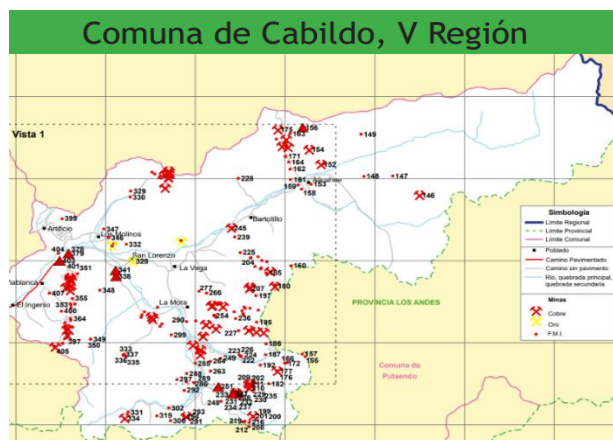
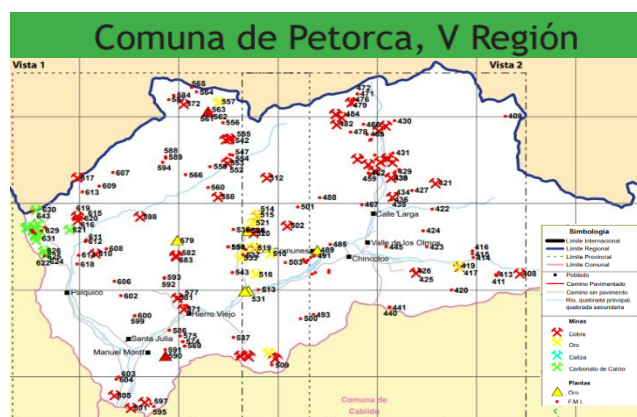


Figura 2: Atlas faenas mineras comuna Petorca.



Demografía y población

Desde la perspectiva demográfica, Cabildo registra una población de 21,435 habitantes, mientras Petorca alcanza los 10,452 habitantes según proyecciones recientes. La densidad poblacional se sitúa en 12.3 hab/km² para Cabildo y 8.7 hab/km² para Petorca, reflejando el carácter predominantemente rural del territorio. La población económicamente activa representa el 42% en Cabildo y 38% en Petorca, constituyendo una fuerza laboral que depende significativamente de las actividades productivas locales, entre las cuales la minería ocupa un lugar destacado (Instituto Nacional de Estadísticas, 2025; Instituto Nacional de Estadísticas, 2021).

Condiciones climáticas

El clima de la zona se caracteriza por una temperatura promedio anual de 15°C, con máximas estivales de 30°C y mínimas invernales de 2°C. Las precipitaciones alcanzan entre 280-350 mm anuales, con humedad relativa que oscila entre 60-80% y vientos predominantes del suroeste. Las condiciones operativas presentan una ventana productiva diaria de 10-12 horas en promedio, con 22-25 días productivos mensuales. Los principales factores limitantes incluyen la niebla invernal y las lluvias estacionales, sumado a la disponibilidad limitada de agua que impone restricciones operacionales significativas (Dirección Meteorológica de Chile, 2023).

Características geológicas y mineralógicas

Geológicamente, el territorio se caracteriza por la predominancia de granodioritas, andesitas y rocas volcánicas terciarias, con mineralización principal en vetas de cuarzo con sulfuros de cobre y oro. La dureza de las rocas, medida en la escala de Mohs, oscila entre 5 y 7, con un promedio de 6.2, mientras el factor de roca se sitúa entre 0.45-0.65 ton/m³. Respecto al consumo de explosivos, las faenas de pequeña minería utilizan entre 80-120 kg/mes por unidad productiva, totalizando un consumo provincial estimado de 18-22 toneladas anuales, donde el ANFO representa el 95% del consumo total, con una relación promedio de 5-7 toneladas de roca fragmentada (mineral y estéril) por kilogramo de explosivo utilizado (Servicio nacional de geología y minería, 2006).

Actividad minera en la provincia

El sector minero en la provincia presenta una estructura caracterizada por la predominancia de la pequeña minería. Según registros formales, Cabildo cuenta con 78 empresas constituidas en el rubro "Explotación de minas y canteras", mientras Petorca registra 54 empresas. Adicionalmente, existen 23 asociaciones mineras registradas y 12 plantas de procesamiento dedicadas principalmente a minerales metálicos como cobre y oro. En términos de empleo, los trabajadores directos en minería representan el 4.61% de la población económicamente activa provincial, donde el 68% corresponde específicamente a trabajadores de la pequeña minería, generando aproximadamente 1,200 empleos indirectos adicionales (Asociación de empresas región de Valparaíso, 2021).

Características de las faenas

La accesibilidad a las faenas mineras presenta desafíos considerables, con distancias promedio que varían entre 25-45 km desde los centros urbanos principales, requiriendo tiempos de desplazamiento de 45-90 minutos. La infraestructura vial muestra que el 60% de los caminos son de ripio, 30% de tierra y solo 10% asfaltados, con una red de caminos mineros que alcanza los 287 km en la provincia. La altitud operacional de las faenas se concentra entre 800-1,500 msnm, con la Ruta E-35 como principal eje conectivo entre Cabildo y Petorca. Durante los meses invernales, aproximadamente el 40% de los caminos se ven afectados por las condiciones climáticas, impactando directamente la logística de suministro (Dirección de Vialidad Región de Valparaíso, 2024). La distribución espacial de las faenas mineras muestra que el 65% se concentra en el sector oriente de la provincia, con una dispersión geográfica que abarca un radio de 35 km desde los centros urbanos principales.

El 70% de las operaciones se localiza entre 600-1,200 msnm, y solo el 45% cuenta con suministro formal de energía eléctrica. Respecto a la infraestructura de almacenamiento de explosivos, existen 18 polvorines registrados con capacidad autorizada total de 2,500 kg, evidenciando una brecha de almacenamiento de las necesidades reales del sector, con solo 2 centros de distribución autorizados para toda la provincia. (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

Esta caracterización integral evidencia las condiciones particulares que enfrenta la pequeña minería en Cabildo y Petorca, destacando la necesidad predominante de soluciones logísticas adaptadas a la complejidad topográfica, dispersión geográfica y limitaciones de infraestructura que caracterizan a esta provincia minera, constituyendo el contexto específico para que la gestión de explosivos surja como uno de los factores críticos que determina la viabilidad de las faenas mineras. Para comprender su impacto, es necesario revisar los fundamentos técnicos de estos insumos y su cadena de suministro.

4.3 Antecedentes generales de elementos explosivos

Definición de explosivos de uso industrial

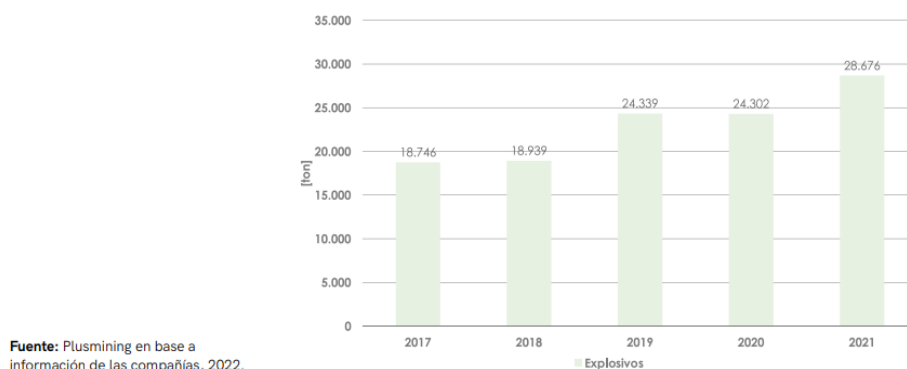
Los explosivos para minería son sustancias o mezclas de sustancias que, por un estímulo externo de impacto, calor u onda de choque, sufren una reacción química exotérmica extremadamente rápida, generando grandes volúmenes de gases a alta temperatura y presión. Esta liberación súbita de energía es la que se aprovecha para fragmentar la roca en las operaciones mineras (Servicio Nacional de Geología y Minería 2018).

Su manejo está estrictamente regulado en Chile, por la Ley N° 17.798 junto a una serie de decretos, definiéndose así los entes legales que controlan su fabricación, importación, comercialización, almacenamiento y transporte, en conjunto con la Dirección General de Movilización Nacional (DGMN) como organismo fiscalizador principal y la Autoridad Fiscalizadora de Carabineros de Chile.

Según Alfonso Domeyko, director nacional del Servicio Nacional de Geología y Minería “El análisis de la pequeña minería se debe realizar desde varios frentes, siendo sin duda el de mayor importancia la seguridad de los trabajadores y las operaciones, vereda desde donde si bien hay grandes brechas, se debe destacar que en los últimos 11 años han disminuido las tasas de fatalidad en más de 75%.” (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2022).

Siendo de total relevancia el análisis del uso explosivo, quienes influyen directamente en aquellas áreas operativas y de seguridad en forma crítica, exigiendo planes de control actualizados y estrictamente normados, aún más significativo frente a la evidencia de un aumento progresivo de consumo en los últimos años en el tipo de empresas de mediana minería llegando a valores de 28.676 [ton/año] para el 2021 como se muestra en la **Figura 3** (Sociedad Nacional de Minería, 2023).

Figura 3: Consumo de explosivos de las empresas de la mediana minería [ton/año].



Cadena de suministro estándar

Para un pequeño productor minero, la cadena de suministro de explosivos **Figura 4** es un proceso generalmente externalizado en su totalidad, con una estructura rígida y de altas barreras burocráticas y logísticas. Por lo tanto, esos factores los suple un proveedor o distribuidor mediante una prestación de servicios y ventas de productos en conjunto (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

Fabricación. El mercado nacional está altamente concentrado en algunos fabricantes como ENAEX, FAMESA, DIEXA Y ORICA. En su mayoría ellos son los responsables de la fabricación, venta y algunos servicios especializados como el transporte y tronadura de los explosivos.

Transporte y almacenamiento en centro de distribución. El explosivo es transportado desde la fábrica hasta un polvorín de distribución. Este transporte debe realizarse en vehículos especiales autorizados y con personal certificado.

Transporte a faena. Los explosivos se trasladan desde el polvorín del proveedor hasta el lugar de almacenamiento del productor o consumidor habitual de explosivos, donde son manipulados por personal calificado.

Almacenamiento en polvorines. Los explosivos deben almacenarse en polvorines que cumplan con exigentes especificaciones técnicas de seguridad, los que se clasifican de distintas formas según su inscripción original (superficiales, subterráneos, enterrados o móviles), siendo recepcionados y manipulados por personal autorizado.

Finalizando con la gestión para las entradas y retiros del polvorín propio del productor minero hasta la movilización en donde se ejecutará la tronadura.

Esta investigación tiene el principal enfoque sobre el transporte y almacenamiento en específico, puntos en donde el productor generalmente no tiene control de variables como lead time, cobertura, trazabilidad de la información, entre otros.

Figura 4: Cadena de suministro estándar.



Clasificación de explosivos

Explosivos primarios o iniciadores. Son los responsables de iniciar la detonación de una masa explosiva, generalmente son utilizados iniciadores a fuego o eléctricos, mientras que otra alternativa son los boosters.

Explosivos secundarios o básicos. Corresponden a masas de carácter explosivo que generan el efecto rompedor del disparo, por ejemplo, las dinamitas y el Anfo siendo de los más comunes.

En resumen, la naturaleza peligrosa de los explosivos, sumada a una cadena de suministro rígida y externalizada, define un escenario operativo de alta complejidad para el pequeño minero, pero con grandes oportunidades de intervención estratégica dentro del entorno sujeto a una estricta regulación. El marco normativo chileno establece requisitos específicos, aunque necesarios para garantizar la seguridad, representan barreras significativas para los pequeños productores.

4.4 Marco normativo para el manejo de explosivos en el sector

La ley chilena clasifica a pequeños productores, asociaciones o sindicatos de pirquineros mineros como consumidores habituales de explosivos, exigiendo por tal condición una serie de requisitos tanto para el transporte y almacenamiento, como para el tratamiento de estos elementos (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

SERNAGEOMIN con el objetivo de dar a conocer en forma clara a estos actores sus responsabilidades frente a la ley, generó oficialmente la “*Guía G3 de operación para la pequeña minería, manejo de explosivos*” la cual contiene todo el contenido presentado a continuación.

Licencia de manipulador de explosivos

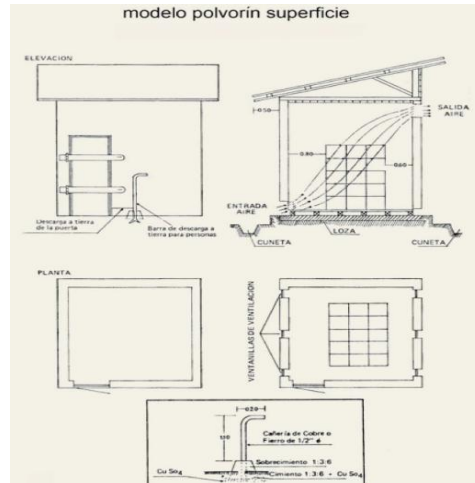
Esta licencia se otorga mediante una solicitud previa aprobada por parte de la autoridad fiscalizadora de carabineros de Chile y la Dirección General de Movilización Nacional (DGMN), la cual valida al personal el vigilar y tratar elementos explosivos de forma legal en instalaciones mineras por una duración de 2 años al interior del territorio nacional, rectificando que posee los requisitos mínimos necesarios de carácter técnico para desempeñar este rol.

Polvorines

Corresponden a recintos físicos previamente autorizados por organismos públicos y municipales para el almacenamiento de explosivos, cumpliendo normas estrictas tales como, alrededores libres de materiales combustibles no inferior a 50 metros, inspección periódica de extintores y aseado, bordes cercados, control de los parámetros de calidad en salidas y entradas de explosivos, así como su registro en “Libro Control de Explosivos”, además de clasificarse según la siguiente tipología:

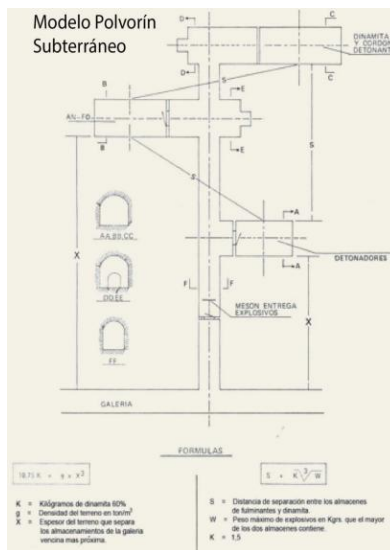
Polvorines de superficie. Estructura construida sobre el nivel del terreno con materiales específicos de baja combustión y aislantes, como zinc, revestimiento de madera y goma, además de cimientos de concreto, con la distribución de la **Figura 5**.

Figura 5: Polvorines Superficiales.



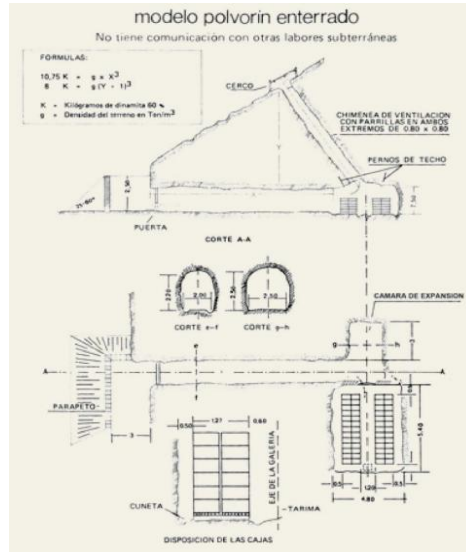
Polvorines subterráneos. Son aquellos construidos en galerías o túneles al interior de minas con conexión a otras galerías de la misma operación, generalmente son utilizados como almacenamiento temporal, deben contener una puerta frontal de fierro o estructura metálica, además de seguir la siguiente disposición de la **Figura 6**.

Figura 6: Polvorines Subterráneos.



Polvorines enterrados. Instalaciones en socavones o labores subterráneas sin comunicación a otras galerías en actividad u operación, su simplificación puede ser una bóveda recubierta de tierra a poca profundidad, **Figura 7**.

Figura 7: Polvorines Enterrados.



Polvorines móviles. Corresponden a aquellos que pueden ser trasladados sobre vehículos de transporte compuestos por 2 cajas con las siguientes dimensiones según su clasificación de explosivos primarios o secundarios. Cajas de fierro de 150 x 60 x 60 centímetros, 1.6 centímetros de espesor, forradas internamente con aislante de madera o goma, mientras que, en el exterior recubierta con pintura antioxidante.

En faena, dichas cajas se deben situar en instalaciones distintas, como casetas de materiales solidos o container debidamente autorizados **Figura 8.**

Figura 8: Polvorines Móviles.



Transporte y carguío

Referente a los vehículos que trasladan las unidades explosivas hacia las faenas, deben cumplir con requisitos estrictos de: optimalidad mecánica y eléctrica, pick up recubiertos de goma o cajones de madera para estos fines, poseer cadena de seguridad a tierra para descarga eléctrica, portar extintores contra incendio, transporte en envases originales y carga máxima de un 80% indicada por fabricantes del vehículo, escoger las rutas más cortas y con menor tráfico con una velocidad máxima de 50 [km/hr] y estrictamente sin transporte de personal.

Manejo de explosivos deteriorados

Directamente como lo expresa SERNAGEOMIN “Los explosivos que, por congelación, exudación, descomposición por pérdida de su estabilizante, o que por cualquier otro motivo aumenten peligrosamente su sensibilidad, deben ser destruidos, previa autorización de la Autoridad Fiscalizadora respectiva, y posterior constancia en Acta revisada por la misma Autoridad” (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

Marco legal

Normativas legales vigentes asociadas al entorno minero que regulan la seguridad minera y el control de explosivos en su totalidad conteniendo decretos y leyes en la pagina oficial de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN, 2025).

Leyes de control general de explosivos.

- i. Ley N° 17.798, control de armas y explosivos: Establece las atribuciones del Ministerio de Defensa Nacional, actuando como Autoridad Central, así como la de sus fiscalizadores oficiales sobre el almacenar y transportar explosivos.
- ii. Ley N° 20.813, control de armas y código procesal penal: Modifica la ley anterior y el Código Procesal Penal, fortaleciendo las medidas de prevención y control, lo que se traduce en requisitos más estrictos para los usuarios legítimos.

Reglamentos para explosivos en minería.

- i. Decreto supremo N° 73, Ministerio de Defensa Nacional: Establece el reglamento especial de normar el derecho a adquirir, almacenar y manipular explosivos por quienes laboran en faenas mineras.

Reglamentos generales de seguridad minera.

- i. Decreto supremo N° 132, Ministerio de Minería: Este reglamento establece los requisitos generales de seguridad para proteger la vida e integridad física de las personas en las faenas mineras.
- ii. Ley 18.248, código de minería: El Código regula en más detalle aspectos cubiertos por la Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras, estableciendo el procedimiento para obtener concesiones de exploración y explotación.

Normativa sobre sustancias peligrosas.

- i. Decreto supremo N° 78, Ministerio de Salud y Subsecretaría de Salud Pública: Este reglamento complementa desde una perspectiva sanitaria y de seguridad pública las condiciones de sustancias peligrosas.

Estas exigencias regulatorias, sumadas a las características del mercado, configuran un escenario de suministro dominado por un reducido grupo de proveedores. La estructura actual de la cadena de valor de explosivos presenta importantes ineficiencias que afectan directamente la competitividad de la pequeña minería.

4.5 Proveedores: Logística y gestión de explosivos en minería

La eficiencia de la cadena de suministro que atienda a cabalidad todos los requerimientos y necesidades de los consumidores habituales de explosivos es clave para la rentabilidad de las faenas. En este punto surge una fusión de responsabilidades compartidas entre ambas partes, tanto de proveedores/fabricantes/distribuidores, como de productores a pequeña escala.

Por lo tanto, para que se mantenga esta competitividad es necesario adentrarse y reconocer cada punto influyente desde la fabricación hasta la puesta en faena de los elementos explosivos, dentro del entorno regulatorio existente.

Marco normativo

Al igual que los productores, las restricciones para distribuidores sobre el almacenamiento y transporte son similares, operando bajo un estricto marco controlado principalmente por la Dirección General de Movilización Nacional (DGMN), dependiente del Ministerio de Defensa, y complementado por la fiscalización de SERNAGEOMIN en las faenas mineras.

El Decreto Supremo N° 72 de Seguridad Minera, que aprueba el Reglamento de Explosivos, es la normativa clave. Este reglamento establece que "el transporte, manejo y almacenamiento de explosivos deberá efectuarse en vehículos e instalaciones que cumplan con las condiciones técnicas y de seguridad que determinadas en la Ley sobre Control de Armas y Explosivos. Además, exige la tramitación de una Guía de Libre Tránsito para cualquier movimiento, un documento que autorizará el transporte de los explosivos desde su origen a su destino (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 1993).

SERNAGEOMIN, por su parte, enfatiza que el almacenamiento de explosivos se deberá realizar en polvorines que cumplan con la normativa de la DGMN (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018, p. 15).

Estructura del mercado

El mercado de distribución está altamente concentrado. A nivel de fabricación, Enaex es el actor dominante a gran escala y nivel nacional, pero su segmento de clientes no tiene enfoque en la cobertura de la pequeña y mediana minería. Mientras que para tal segmento existe una fabricación y distribución directa mediante dos empresas que controlan la mayor parte del mercado DIEXA y FAMESA para las comunas Cabildo-Petorca, limitando con esta concentración la competencia y la capacidad de negociación de los pequeños mineros.

El modelo de negocio de estos proveedores actualmente está orientado a un servicio integral en estado expansivo hacia la gran minería, que incluye el diseño de tronaduras, fabricación, transporte y asistencia técnica en el sitio, mientras que la venta y distribución a pequeña escala no ha innovado ni ha tenido actualizaciones significantes, sin embargo, esto para los productores de interés dentro de la investigación se traduce en un servicio estandarizado, rígido y muchas veces sin soluciones óptimas.

Como señala la Sociedad Nacional de Minería los ítems de "explosivos, accesorios y servicios" representan una porción significativa de los costos, sin que existan ofertas flexibles que se adapten a los volúmenes irregulares y la dispersión geográfica de la pequeña minería (Sociedad Nacional de Minería, 2023).

Flujo logístico

El flujo logístico tradicional que se encuentra altamente relacionado al explicado en la sección de Antecedentes Generales: Cadena de Suministro Estándar, que se puede mapear como fabricante, transporte especializado, polvorín fijo del proveedor y cliente, presenta varios puntos de quiebre en el segmento de interés.

Altos costos de transporte. Los fletes en vehículos que cumplan todos los estándares exigidos son inherentemente costosos y para faenas remotas en zonas como Petorca o Cabildo, este costo se incrementa sustancialmente. Lo valida la Caracterización Económica de la Provincia de Petorca destacando la dispersión y la compleja geografía de las faenas, lo que hace que el costo logístico por unidad de explosivo sea altamente restringido (Asociación de Empresas Región de Valparaíso, 2021).

Lotes mínimos y baja frecuencia. Los distribuidores priorizan pedidos de gran volumen, mientras que los pequeños mineros se ven forzados a realizar compras grandes y poco frecuentes, lo que incrementa el capital inmovilizado en inventario y, por otra parte, los riesgos de almacenamiento por capacidad, la que no es constantemente fiscalizada. Lo mismo ocurre en la adquisición ilegal validando el ciclo de informalidad, ya que almacenar grandes cantidades en un polvorín no certificado es extremadamente peligroso.

Ausencia de trazabilidad post-venta. Una vez que los explosivos son descargados en el polvorín del cliente, la responsabilidad del proveedor termina. La gestión de explosivos se ve frecuentemente obstaculizada por la carencia de sistemas de control de inventario eficaces. Esta situación deriva en un desaprovechamiento de insumos, ya que, sin una trazabilidad clara que priorice el material, se dificulta una planificación operativa eficiente (Perquilaf, 2017).

Asimismo, la falta de registros precisos y actualizados obstaculiza el cumplimiento tanto de las exigencias de rendición de cuentas estipuladas en el Libro Control de Explosivos, documento mandatorio que debe ser presentado a la autoridad fiscalizadora (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018) como del proveedor al planificar reposiciones eficientes y seguras. Frente a estas limitaciones estructurales, las tecnologías emergentes ofrecen oportunidades innovadoras para transformar la gestión de insumos explosivos, considerando la digitalización y automatización de procesos como herramientas que permiten superar muchas de las brechas identificadas en el diagnóstico.

4.6 Tecnología emergente en la gestión de insumos explosivos

La industria minera global experimenta una creciente adopción de tecnologías emergentes para optimizar procesos críticos y de alto riesgo, entre los que se encuentra la gestión de explosivos. Para el segmento de la pequeña y mediana minería, la integración de estas tecnologías representa una oportunidad estratégica para superar las brechas de eficiencia, seguridad y trazabilidad identificadas en el diagnóstico inicial.

La implementación de sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID), códigos QR en los cartuchos de explosivos y sus accesorios permite una trazabilidad en tiempo real desde su fabricación hasta su consumo final. Según un estudio técnico de HID Global sobre trazabilidad en entornos peligrosos, “La tecnología RFID mejora drásticamente la precisión del inventario, alcanzando niveles cercanos al 99% incluso en ambientes industriales de alto riesgo, al proporcionar visibilidad continua sobre la ubicación y estado de los materiales” (HID Global, 2021). Esta capacidad es crucial para cumplir con las exigencias del "Libro Control de Explosivos" estipulado por SERNAGEOMIN, automatizando su llenado y minimizando los errores en los registros manuales, que suelen ser fuente de incumplimiento normativo (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).

Complementariamente, la Internet de las Cosas (IoT) permite el monitoreo remoto de las condiciones ambientales al interior de los polvorines. Sensores que miden temperatura, humedad y vibraciones pueden alertar de manera preventiva sobre condiciones que comprometan la estabilidad de los explosivos, como la exudación o congelación mencionadas en la normativa. Según un estudio del Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (IIMCh) sobre innovación en pequeña minería, “la sensorización de bóvedas de almacenamiento reduce en un 70% los incidentes asociados a la degradación de explosivos, al habilitar una respuesta temprana ante variaciones críticas” (Instituto de ingenieros de minas de Chile, 2023).

A nivel operativo, el desarrollo de plataformas de software de gestión (ERP) especializadas para minería a pequeña escala integra la data de inventario con la planificación de las tronaduras. Estos sistemas pueden recomendar el tipo y cantidad óptima de explosivo según las características geomecánicas del macizo rocoso, optimizando el consumo y reduciendo el desperdicio. En investigaciones anteriores ya se reconoce esta necesidad, afirmando que "la carencia de sistemas de control de inventario eficaces deriva en un desaprovechamiento de insumos" (Perquilaf, 2017).

Hoy, soluciones tecnológicas como las propuestas por Maptek en su sistema de gestión digital de explosivos muestran que la integración de algoritmos de proyección permite estimar el requerimiento de explosivos por faena, reduciendo el stock ocioso y mejorando la reposición programada (Maptek, 2020).

Finalmente, la telemetría aplicada a los polvorines móviles constituye la convergencia de estas tecnologías. Un contenedor móvil inteligente no solo es una estructura física segura, sino un nodo conectado que puede reportar su ubicación GPS, el nivel de stock en tiempo real, el historial de abrir y cerrar la compuerta, y las condiciones internas del almacenamiento. Esto se alinea con la tendencia de "Logística

4.0" que, de acuerdo con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), permite transformar procesos logísticos rígidos en sistemas altamente adaptativos mediante la digitalización, aumentando la eficiencia operacional y posibilitando reducciones significativas en costos logísticos (BID, 2020).

Este enfoque proporciona la viabilidad necesaria para implementar soluciones tecnológicas en contextos mineros, respaldado por múltiples experiencias en sectores industriales análogos, cuyos modelos de negocio han demostrado beneficios concretos que resultan valiosos para el diseño de la presente propuesta.

4.7 Esquemas de negocios similares

La búsqueda de modelos de negocio innovadores para resolver problemáticas de acceso a insumos críticos en industrias reguladas no es exclusiva del sector minero, por aquello es relevante analizar modelos de gestión de activos críticos similares en la industria.

Modelo servicio de energía para minería

Un esquema conceptualmente similar se encuentra en el análisis de flexibilidad operacional para el suministro energético de la industria minera. Según la investigación de la Universidad de Chile sobre "Flexibilidad operacional en la demanda energética de la industria minera de cobre", se propone un modelo de suministro adaptable que permite a las operaciones mineras ajustar su demanda energética según condiciones operativas variables. El estudio demuestra que la implementación de sistemas modulares y descentralizados de suministro genera reducciones de costos del 15-25% y mejora la resiliencia operacional frente a variaciones en la producción y condiciones geográficas adversas (Leiva, 2023).

Logística colaborativa para agricultura

Fuera del ámbito minero, pero enfrentando desafíos similares de fragmentación productiva y altos costos operativos, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) establece en su Estrategia 2023-2030 que los modelos asociativos generan reducciones significativas en costos de adquisición y distribución para pequeños productores. El documento oficial identifica que la articulación de agricultores en esquemas colaborativos permite optimizar entre 20-30% los costos logísticos mediante la consolidación de pedidos, negociación conjunta de precios y planificación eficiente de rutas de distribución. Esta estrategia valida que la agregación de demanda es un mecanismo efectivo para superar las desventajas de escala en sectores fragmentados (Instituto de desarrollo agropecuario, 2023).

Modelo de gestión de activos críticos en equipos mineros

El concepto de externalizar la gestión de activos críticos mediante esquemas de pago por rendimiento encuentra sustento en modelos implementados en la industria minera. La memoria "Implementación de Sistema de Gestión para Reducción de Costos Optimizando el Desempeño por Componentes en Equipos Mineros" demuestra que los sistemas de gestión basados en desempeño permiten externalizar la optimización de activos críticos, donde el proveedor asume la responsabilidad del rendimiento y mantención, logrando reducciones de costos entre 18-25%. Bajo este esquema, el cliente se beneficia del desempeño optimizado del activo sin asumir los riesgos de mantención ni la inversión inicial completa. Este enfoque es directamente aplicable al modelo de polvorines móviles inteligentes, donde el pequeño minero podría pagar por el servicio de almacenamiento seguro y trazable sin la barrera de capital que representa la adquisición del equipo (Bahamóndez, 2017).

La revisión de estos esquemas valida que es posible transformar un insumo crítico, de alto riesgo y costo, en un servicio integral que genere valor compartido. Los modelos analizados demuestran que la combinación de infraestructura modular, digitalización y esquemas de ingresos basados en servicios resuelve problemáticas análogas en diversos sectores productivos. Específicamente, el modelo de polvorines móviles inteligentes puede integrar la aproximación como servicio del modelo de combustible, la agregación de demanda de la logística colaborativa agrícola, y el esquema de activos críticos, creando así una propuesta de valor robusta y adaptada a las particularidades de la pequeña minería en Cabildo y Petorca.

5. Metodología

El presente capítulo expone y explica a detalle el diseño metodológico empleado para el desarrollo de tal investigación, el cual se estructura en una serie de pilares fundamentales, interrelacionados, secuenciales y en congruencia a los objetivos establecidos y problemática inicial planteada.

Considerando que se está desarrollando un tratamiento sobre una situación real de la industria minera, es de carácter esencial dar un enfoque mixto aterrizado a los datos cuantitativos como a las características cualitativas que la componen.

5.1 Recolección de datos

Clasificación de las fuentes de información

La data se comporta como la estructura de un fundamento respaldado y validado bajo la visión investigativa, por lo tanto, la información recopilada puede clasificarse en dos grandes categorías, según su origen y proceso de obtención (Hernández Sampieri et al., 2014; Yin, 2018).

Fuentes de información primaria. Corresponde a aquellas generadas de manera directa por el ente investigador mediante instrumentos de recolección diseñados específicamente para los propósitos de estudio (Creswell, 2014). En la presente investigación, la fuente primaria es una encuesta estructurada, con preguntas estratégicas anteriormente evaluadas, aplicada a pequeños productores mineros de la comuna de Petorca y Cabildo. Se privilegia la información limpia y útil, el cuestionario se diseñó con un carácter anónimo y confidencial, implementándolo a organizaciones de la pequeña y mediana minería como “Asoc. Minera Cabildo”, “Asoc. Gremial de Minería” (70 integrantes), “Asoc. Minera Petorca” (40 integrantes), y productores clave, en donde el contacto y acceso tanto presencial como online a tales faenas es labor del investigador.

Tabla 3: Ficha Técnica Instrumento de Encuesta

Característica	Descripción
Denominación	Estudio sobre la gestión de elementos explosivos en la pequeña minería.
Institución de la investigación	Universidad Técnica Federico Santa María, Alumno Memorista.
Marco muestral	Universo de 110 productores mineros de pequeña escala registrados entre asociaciones e independientes con contacto directo del investigador.
Método de selección	Muestreo no probabilístico, por conveniencia y acceso a través de redes gremiales, dado que no existe un listado público completo y verificado.
Modalidad de aplicación	Presencial en terreno y formulario digital (GoogleForms).
Carácter	Anónimo y confidencial, los datos se procesan exclusivamente de forma estadística agregada.
Tiempo estimado de respuesta	Aproximadamente 5 minutos.
Zona de aplicación	Comunas de Petorca y Cabildo, Región de Valparaíso.
Público objetivo	Pequeños productores mineros con faenas activas o irregulares operativas en la zona de estudio.
Tipología de preguntas	Selección única, selección múltiple y escala Likert (1 a 5).
Nº de productores contactados	Entre contacto presencial y formulario digital 74 productores.
Muestra objetivo	Al menos el 50% del universo de pequeños productores de las comunas Cabildo-Petorca.
Criterios de inclusión	Productor a cargo o responsable de una faena minera activa regular o en condición irregular operativa, con producción mensual estimada inferior a 10.000 toneladas.
Criterios de exclusión	Faenas de mediana o gran minería, faenas no operativas (abandonadas, paralizadas, en cierre).

Nota: Dado que la selección se realizó con el método explicado anteriormente y no mediante un marco muestral probabilístico verificado, los resultados presentados deben interpretarse como hallazgos descriptivos de la muestra efectivamente encuestada y no como estimaciones estadísticamente representativas del universo total de pequeños productores.

El tamaño y distribución de la muestra buscado debe ser coherente con la densidad relativa de faenas activas del catastro Sernageomin y la consideración del total de productores (110 integrantes) de la pequeña minería declarados por los organismos de gobierno en las comunas de estudio (Reporte minero, 2025; Radio Festival, 2025). Los sesgos identificados corresponden a:

- I. Sesgo de autoselección: Quienes aceptaron responder pueden tener mayor motivación para expresar dificultades normativas, lo que podría sobreestimar la complejidad percibida.
- II. Sesgo de accesibilidad geográfica: Las faenas más remotas o en mayor condición de informalidad pueden estar subrepresentadas por ser menos accesibles,
- III. Sesgo de deseabilidad social: Aun con instrumento anónimo, algunos encuestados podrían moderar sus respuestas respecto a prácticas irregulares.

El cuestionario contempla las siguientes variables, las cuales fueron estratégicamente seleccionadas según parámetros no abarcados por la data oficial de las fuentes de información secundaria, sin embargo, no se descarta que exista alta multicolinealidad en sus análisis posteriores.

Tabla 4: Variables capturadas mediante encuesta

Variable	Tipo	Opciones
Rango de producción mensual de la faena	Ordinal	<200 t / 201-1.000 t / 1.001-3.000 t / 3.001-5.000 t / >5.000 t
Frecuencia de compra de explosivos	Nominal múltiple	Semanal / Quincenal / Mensual / Otra
Tiempo de tramitación en autorización de polvorín	Ordinal	<3 meses / 3-6 m / 7-12 m / >1 año
Complejidad del procedo administrativo (licencias y polvorines)	Ordinal (Likert)	1 (muy simple) a 5 (prohibitivo)
Número de proveedores accesibles	Ordinal	1 / 2 / 3 o más
Quiebres de stock o indisponibilidad de producto	Ordinal	Frecuentemente / Ocasionalmente / Nunca
Lead Time desde compra hasta disponibilidad en faena	Ordinal	1-2 días / 3-7 días / 8-15 días / >15 días

Principal limitante para instalación de polvorín	Nominal múltiple	Alto costo infraestructura / Trámites / Limitaciones terreno / No es problema
Impacto del costo de cumplimiento normativo sobre utilidad de faena	Ordinal	Crítico / Moderado / Bajo
Percepción sobre motivos de informalidad	Nominal múltiple	Precio proveedores / Infraestructura / Trámites / Acceso informal / Otro
Evolución percibida del precio de explosivos	Ordinal	Subió mucho / Subió normal / Estable
Medida tentativa de control de informalidad	Nominal múltiple	Polvorines comunitarios / Simplificación trámites / Subsidios / Mayor fiscalización / Otra
Modalidad de traslado de explosivos hasta faena	Nominal	Entrega proveedor / Retiro propio / Servicio externalizado / Otra
Condición técnica del traslado propio	Nominal	Vehículo certificado / Adaptaciones básicas / Vehículo convencional / Otra
¿Cuenta actualmente su faena con un polvorín propio, autorizado y vigente?	Nominal	Si / No

Es pertinente aclarar que las 15 variables capturadas mediante la encuesta cumplen roles analíticos distintos dentro del estudio. Las variables ordinales (1, 3, 4, 5, 6, 7, 9 y 11) se emplean estrictamente para la construcción y regresión del Índice de Barrera Operacional (IBO). Por otro lado, las variables nominales (2, 13, 14 y 15) actúan como calibradores del modelo general, definiendo el N_rot y descriptores logísticos. Finalmente, las preguntas de selección múltiple (8, 10 y 12) alimentan cualitativamente el análisis causal Ishikawa y la posterior etapa de empatía e ideación de la propuesta resolutive.

Fuentes de información secundaria. Corresponden a datos preexistentes generados por instituciones públicas o privadas en el ejercicio de sus funciones regulatorias, fiscalizadoras o comerciales, las cuales pueden estar disponibles directamente o solicitarlas ante el ente encargado. En el contexto del presente estudio, este tipo de fuentes fueron obtenidas mediante solicitudes formales de acceso a información pública, específicamente según organismo de “Transparencia y Acceso”.

Tabla 5: Solicitud de información fuentes secundarias

Organismo	Instrumento de solicitud	Información entregada	Período
SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería)	Solicitud mediante formulario de transparencia	Catastro de instalaciones y faenas mineras en las comunas de Petorca y Cabildo, con clasificación por tipo de instalación y estado operacional (activa, irregular operativa, abandonada, eliminada, paralizada por sanción, entre otras), además de registro de producción mensual ton/mes.	Vigente a 2026
DGMN (Dirección General de Movilización Nacional)	Solicitud mediante formulario de transparencia	Registro de polvorines vigentes por año, clasificados por tipología (permanente/transitorio) y rango de capacidad de almacenamiento (<70 kg, 70–1.000 kg, >1.000 kg) para las comunas de Petorca y Cabildo	2020–2026
DGMN (Dirección General de Movilización Nacional)	Solicitud mediante formulario de transparencia	Registro anual de licencias de consumidores habituales de explosivos vigentes por comuna.	2020–2026
DGMN (Dirección General de Movilización Nacional)	Solicitud mediante formulario de transparencia	Registro transaccional de compras de explosivos e insumos de tronadura, con descripción del elemento, cantidad, mes y año de la transacción, para las comunas de Petorca y Cabildo.	2020–2026

Consideraciones éticas y de confidencialidad

La recolección de información primaria se realizó bajo estrictos principios de anonimato y confidencialidad, lo que significa que ninguno de estos instrumentos contiene campos que permitan identificar individualmente a los encuestados. Mientras que, los datos de información secundaria obtenidos en SERNAGEOMIN y DGMN tampoco presentan el nivel de identificación individual de empresas o personas naturales en los análisis estadísticos, siendo procesados de forma agregada por comuna y periodo.

5.2 Limpieza y preparación de la data

La etapa de limpieza y preparación de datos constituye una fase crítica en este punto de la investigación en donde se realiza un análisis cuantitativo efectivo que respalda todo el estudio en desarrollo, dado que la calidad dependerá directamente de la integridad y consistencia de los datos procesados (Hair et al., 2019). Esta fase contemplará tres procesos diferenciados:

- I. Selección y filtrado de variables relevantes según objetivos.
- II. Estandarización de unidades de medida para el cálculo de variables.
- III. Construcción de variables definitivas que alimenten los modelos estadísticos.

Selección de variables

Dataset de faenas mineras. El registro contiene 3.039 instalaciones mineras pertenecientes a las comunas de Petorca y Cabildo, con 12 clasificaciones de estado. Para efecto del estudio, las instalaciones se agrupan en las siguientes categorías operacionalmente relevantes:

Tabla 6: Clasificación operacional de instalaciones mineras

Categoría para el estudio	Estado Sernageomin	Interpretación
Activa formal	Activa	Operando con cumplimiento normativo declarado
Operativa irregular	Irregular operativa	Operando sin cumplir requisitos normativos, identificación de informalidad
No operativa	Abandonada, Eliminado, Inactiva, Cierre Temporal, Cierre Final, Exploración Finalizada, Paralizada por Sanción, Paralizada por Medida Provisional, Proyectada, En Revisión de Proyecto	Sin demanda activa de explosivos

Se excluyen del análisis cuantitativo principal las instalaciones de tipo campamento, bodega, surtidor de combustible, talleres y maestranza, dado que estas no son instalaciones con demanda directa de explosivos. Se retienen específicamente las instalaciones clasificadas como minas subterráneas, minas de rajo abierto, reconocimientos y exploraciones subterráneas, además de canteras, faenas que si utilizan perforación y tronadura en sus procesos fundamentales.

Dataset de polvorines. El registro entrega datos anuales agregados por comuna (Petorca y Cabildo), tipología de polvorín (Permanente/Transitorio) y rango de capacidad de almacenamiento. Dado que la información se presenta en rangos y no en valores exactos por unidad, se aplica el criterio de punto medio del intervalo como estimador puntual, bajo la siguiente convención:

Tabla 7: Criterio de estandarización de capacidad de polvorines

Rango declarado (Kg)	Valor representativo utilizado (Kg)	Justificación
Menos de 70 kg	35 kg	Punto medio del intervalo [0, 70]
Entre 70 y 1.000 kg	535 kg	Punto medio del intervalo [70, 1.000]
Mayor a 1.000 kg	1.500 kg	Estimador conservador para intervalo abierto, coherente con capacidades típicas de polvorines medianos de la minería chilena

Supuesto declarado: El uso de punto medio como estimador introduce un error de estimación desconocido. Este supuesto se considera aceptable dado que el análisis es de carácter comparativo y relativo (brecha demanda/capacidad), no requiere la exactitud absoluta de los valores individuales, evitando sobreestimar la capacidad formal disponible.

Dataset de consumidores habituales de explosivo. Se utiliza un total anual de licencias vigentes por comuna como indicador de la capacidad habilitante formal del sector para operar con explosivos. Esta variable se incorpora directamente al análisis de series de tiempo sin transformación adicional.

Dataset compras de explosivos. Constituye la fuente de datos más completa del estudio, con 13.981 transacciones registradas entre enero de 2020 y diciembre de 2026, para las comunas bajo estudio. Cada registro contiene: Comuna, año, mes y descripción textual del elemento adquirido (incluyendo cantidad y tipo de producto, en formato no estructurado). La principal complejidad radica en que las cantidades y unidades de medida se presentan en texto libre como uso de inventario (ejemplo: 50 sacos de ando, 4.000 MTS mecha lenta, 11000 KGS Mexal A, etc). Para homologar estos registros a una unidad común de masa (kilogramos equivalentes a explosivo principal), se aplicó el siguiente protocolo de estandarización:

Tabla 8: Factores de conversión aplicados para estandarización de compras a kg equivalentes

Producto / Familia	Unidad pura en data	Factor de conversión	Base técnica	¿Incluido en kg equivalente de explosivo principal?
ANFO / ANFO Premium / MEXAL A	Sacos	25 kg / saco	Estándar industria chilena. El saco de ANFO comercializado por Enaex y fabricantes nacionales pesa 25 kg.	Si
EMULNOR / EMULTEX / EMULSION / TRONEX / SOFTRON	Caja 1×8	~20 kg / caja	Ficha técnica Enaex: cada caja contiene 8 cartuchos de ~2,5 kg c/u = 20 kg/caja	Si
APD / MEXATOLOL (cónicos y cilíndricos)	UDS o Cajas	Variable según tamaño declarado	APD-225: ~0,225 kg/ud. APD-450: ~0,450 kg/ud. Mexatolol 900: ~0,9 kg/ud. Mexatolol 2250: ~2,25 kg/ud.	Si

Detonadores (FANEL, EXEL, Eléctricos, Ctes., No Elect.)	UDS	~0,05 kg / ud.	Peso promedio de detonador no eléctrico tipo FANEL, incluyendo tubo de choque.	No (contabilizado por separado)
Fulminantes N°8	UDS	~0,01 kg / ud.	Referencia técnica estándar.	No (contabilizado por separado)
Mecha lenta / Mecha de seguridad	MTS	~0,04 kg / mt.	Peso lineal promedio de mecha Bickford estándar.	No (accesorios)
Cordón detonante (5 gr, 40 gr, Pentacord)	MTS o UDS	Según gr/mt declarado	Cordón 5 gr/mt: 0,005 kg/mt. Cordón 40 gr/mt: 0,04 kg/mt	No (accesorios)
Cable de conexión IKON	MTS	Despreciable	No es explosivo, elemento de conexión eléctrica	No

Nota: Para efectos del cálculo del Índice de Brecha de Cobertura Formal (IBCF), se consideran exclusivamente los kg equivalentes de explosivos principales (ANFO, emulsiones y agentes de voladura), dado que constituyen el explosivo de carga que requiere almacenamiento en polvorín autorizado. Los accesorios se procesan por separado en el análisis complementario de composición de compras.

Dataset de encuesta a productores. Las respuestas de la encuesta se procesan sin transformación para las variables categóricas nominales. En cuanto a las variables ordinales que ingresan al modelo estadístico, se aplican las siguientes convenciones de codificación numérica:

Tabla 9: Codificación numérica de variables ordinales de la encuesta

Variable	Opciones originales	Código numérico asignado
Tiempo de tramitación polvorín	<3 m / 3-6 m / 7-12 m / >1 año	1 / 2 / 3 / 4
Complejidad administrativa (Likert)	1 a 5	1 a 5 (directo)
Proveedores accesibles	1 / 2 / 3 o más	1 / 2 / 3
Quiebres de stock	Frecuentemente / Ocasionalmente / Nunca	3 / 2 / 1 (invertido: mayor valor = mayor problema)
Tiempo compra–disponibilidad en faena	1-2 días / 3-7 días / 8-15 días / >15 días	1 / 2 / 3 / 4
Impacto en margen de utilidad	Crítico / Moderado / Bajo	3 / 2 / 1 (invertido)
Evolución precio explosivos	Subió mucho / Subió normal / Estable	3 / 2 / 1 (invertido)

Se establece como convención que un valor numérico mayor en variables ordinales representa mayor barrera operacional.

5.3 Fundamentación y selección del modelo estadístico

La selección de herramientas estadísticas en una investigación de ingeniería debe responder simultáneamente a la naturaleza de los datos disponibles, al tipo de relación que se desea estudiar y al tamaño muestral efectivo de cada fuente de información (Montgomery & Runger, 2014). En esta investigación concurren dos tipos de estructuras de datos con características muy distintas:

- I. Serie temporal transaccional (Compras mensuales de explosivos entre 2020 y 2026).
- II. Datos de corte transversal provenientes de encuesta.

Esta dualidad determina el uso de enfoques analíticos diferenciados y complementarios, los cuales se fundamentan en los ítems siguientes.

Justificación del uso de series de tiempo

El análisis de series de tiempo es apropiado cuando se dispone de observaciones de una o más variables registradas a intervalos regulares durante un periodo, el objetivo es describir la evolución temporal del fenómeno, identificar tendencias y cuantificar relaciones entre variables a lo largo del tiempo.

La disponibilidad de registros de compras mensuales de explosivos para el periodo 2020-2026, permite construir series temporales con 72 observaciones mensuales por comuna, lo que es estadísticamente suficiente para el ajuste de modelos de correlación y regresión con múltiples variables independientes (Hair et al., 2019).

A modo de ejemplo se identifica la aplicación de series de tiempo en estudios de gestión de insumos estratégicos en la industria minera con precedentes consolidados en la literatura. Estudios como los de Amponsah-Baah et al (2012) en el contexto de la minería artesanal en Ghana, aplicados a la planificación de suministros en entornos de alta incertidumbre regulatoria, demuestran que el análisis de tendencias temporales en variables de demanda y capacidad instalada constituye un instrumento robusto para cuantificar brechas estructurales en sectores con alta informalidad.

Justificación del uso de regresión logística binaria

La regresión logística binaria es el método estadístico de referencia cuando la variable dependiente es de naturaleza categórica dicotómica como ocurre con Y_{formal} , que solo puede tomar los valores "cuenta con polvorín autorizado" o "no cuenta con polvorín autorizado" y no continua, condición bajo la cual los supuestos de la regresión lineal múltiple (linealidad, homocedasticidad y normalidad de los residuos) dejan de cumplirse, dado que una variable binaria no puede modelarse adecuadamente mediante una recta que admite cualquier valor entre $-\infty$ y $+\infty$. En su lugar, la regresión logística modela la probabilidad de ocurrencia del evento de interés mediante una función logística, que garantiza que las predicciones del modelo se mantengan siempre acotadas entre 0 y 1, un requisito indispensable para que el resultado sea interpretable como una probabilidad real. Este método es ampliamente utilizado en estudios de formalización de actividades económicas informales, en los cuales la variable de interés suele ser precisamente una condición binaria de cumplimiento normativo explicada por un conjunto de barreras percibidas por el agente económico (Hosmer, Lemeshow, & Sturdivant, 2013; Hair et al., 2019).

Justificación del uso índice de brecha de cobertura formal (IBCF)

La construcción de índices compuestos como herramientas de síntesis de múltiples variables en un indicador único es una práctica establecida en la investigación aplicada en ingeniería y gestión (OECD, 2008). Este IBCF propuesto es un indicador que expresa la relación entre el flujo anual de compras de explosivo principal y la capacidad de almacenamiento formal autorizada. Su propósito es cuantificar la magnitud de la brecha entre lo que se demanda operacionalmente y lo que el sistema formal puede absorber.

Un $IBCF > 1$ indica que el flujo de compras supera la capacidad de almacenamiento formal bajo los supuestos de rotación declarados, evidenciando brecha estructural entre demanda y oferta de infraestructura. Lo que no mide directamente es la informalidad en el manejo de explosivos, ni permite establecer relaciones causales entre la brecha detectada y el comportamiento informal.

Su limitante principal es la diferencia de magnitudes entre kg comprados como flujo anual acumulado y capacidad de polvorines como stock instantáneo, la cual se calibra bajo un factor de rotaciones anuales de inventario. Se declara como supuesto metodológico que el indicador se construye sobre una base temporal mensual, homologando el flujo de compras (dato mensual observado) con la capacidad de almacenamiento formal (dato de vigencia anual, constante dentro de cada año calendario). Esta decisión responde a que la granularidad mensual es la de mayor resolución disponible entre las fuentes secundarias utilizadas.

Se propone aplicar una sensibilización del número de rotaciones anuales considerando tres escenarios, para evaluar como varia el IBCF:

Tabla 10: Sensibilización de rotaciones anuales.

Escenario	N_rot	Justificación
Menor rotación	6	Escenario hipotético de compra bimestral, no observado directamente en la encuesta, incluido como cota inferior de sensibilidad.
Base	12	Compra mensual, patrón modal declarado por el 78,8% de los encuestados.
Alta rotación	24	Mayor frecuencia de reposición representa la compra quincenal, es útil como cota superior de sensibilidad.

Justificación del uso de enfoque metodológico mixto

La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos en una misma investigación se conoce como enfoque de métodos mixtos, ampliamente reconocido en la literatura académica como una estrategia con fuerza frente al estudio de fenómenos socioeconómicos complejos donde ni los datos estadísticos ni la percepción de actores son suficientes por si solos. En el contexto de minería a la escala que enfoca esta investigación, evidencian que la informalidad en el manejo de insumos como elementos explosivos solo puede explicarse adecuadamente siendo critico en este enfoque mixto.

En consecuencia, el diseño metodológico presentado adopta una estructura secuencial explicativa:

- I. Se obtienen y analizan los datos cuantitativos, para establecer las magnitudes del problema.
- II. Integración de hallazgos cualitativos de la encuesta, para profundizar la explicación de mecanismos causales.

Justificación del uso de múltiples pruebas estadísticas

La totalidad de las fuentes de datos de este estudio comparte una misma limitación estructural, el número de observaciones disponible es reducido. Ante este tamaño muestral la práctica estadística estándar no es aplicar un único test y reportar su resultado de forma aislada, sino recurrir a la triangulación metodológica.

Análisis 1 (Pearson – Bonferroni – Mann Kendall). La correlación de Pearson mide asociación lineal, pero con solo 6 observaciones anuales es sensible tanto a valores atípicos como al riesgo de falsos positivos cuando se prueban múltiples variables simultáneamente. Por ello se incorporan dos controles, la corrección de Bonferroni, que exige un umbral de significancia más estricto proporcional al número de pruebas realizadas y el test de Mann-Kendall, un método no paramétrico que evalúa la existencia de una tendencia temporal sin asumir que esta seguirá una forma lineal y que es menos sensible a observaciones atípicas.

Análisis 2 (Test de dos proporciones). El Análisis 2 se calcula sobre el catastro de faenas de SERNAGEOMIN, que constituye un registro cercano al universo completo de instalaciones de cada comuna y no una muestra reducida. En este escenario sí corresponde aplicar una prueba inferencial formal de comparación de proporciones, ya que el tamaño de los grupos permite una estimación estadísticamente estable de la diferencia observada entre comunas, y así distinguir con confianza si esa diferencia refleja un patrón real o es simplemente ruido de los datos.

Análisis 3 (Cronbach Alpha – regresión logística – Mann Whitney U). Cronbach Alpha se usa como paso previo de validación, para decidir de forma objetiva y no arbitraria qué variables individuales pueden combinarse en un índice compuesto sin perder validez estadística. La regresión logística es el modelo confirmatorio principal, que permite estimar la dirección y magnitud del efecto de cada variable (o

índice) sobre la probabilidad de contar con polvorín propio, controlando por las demás variables del modelo. Tercero, el test de Mann-Whitney U se incorpora como verificación independiente.

Glosario de herramientas e interpretaciones

Está pensado para que el lector pueda comprender los resultados aun sin conocer el test específico que se está utilizando, los términos utilizados suelen repetirse y permiten inmediatamente dar a conocer lo que significan para la investigación.

Valor	¿Qué responde?	Interpretación sobre hipótesis
p-valor	¿Este resultado podría deberse solo al azar?	• $p < 0,05$, poco probable que sea azar. • $0,05 < p < 0,10$, zona marginal, ni fortalece con fuerza ni descarta. • $p > 0,10$, no hay evidencia suficiente.
Dirección del efecto (+ o -)	¿La relación va en el sentido que predice mi hipótesis?	Si la dirección es la esperada, aunque el p-valor sea marginal, es evidencia cualitativa a favor. Si la dirección es contraria, es una señal de alerta aunque el p-valor sea bajo.
Tamaño de la muestra que sostiene el resultado (N)	¿Cuánto peso real tiene sobre un universo identificado?	Un resultado no significativo con N pequeño no es evidencia de que no exista relación, es evidencia de que faltan datos para confirmarlo.
r de Pearson	Que tan fuerte y en que dirección se mueven dos variables juntas, en línea recta. Va de -1 a 1.	r cercano a -1 o 1 evidencia una relación fuerte, cercano a 0 casi no hay relación. Se complementa con p-valor.
Tau de Kendall	Similar a Pearson, pero en tendencias de tiempo, sin asumir que la tendencia es una línea recta perfecta.	Se usa como segunda opinión de Pearson, si ambos apuntan en la misma dirección, la tendencia es más creíble, aunque ninguno es concluyente.
Corrección de Bonferroni	Ajusta que tan exigente debe ser el p-valor cuando se hacen muchas pruebas a la vez, para no encontrar relaciones falsas por casualidad.	Si un resultado se ve optimo después de este ajuste más estricto, es una señal fuerte. Si no sobrevive, se reporta como hallazgo débil.
Estadístico z (test de dos proporciones)	Mide la diferencia entre dos porcentajes, real o azar.	Z grande en conjunto de $p < 0,05$ es una diferencia real.
Odds ratio (OR)	Cuanto se multiplica una causalidad dado el aumento de una variable explicativa.	• $OR < 1$, la variable reduce la causalidad. • $OR = 1$, no demuestra nada. • $OR > 1$, mayor efecto en conjunto con p-valor.

Pseudo R ²	Que tan bien un conjunto de variables explica una variable dependiente.	Sirve para comparar versiones del mismo modelo entre sí.
VIF (factor de inflación de varianza)	Nivel de circularidad entre variables predictoras.	• VIF < 5, confiable. • VIF > 10, no interpreta variables individualmente.
Cronbach Alpha	Identificación de un grupo de preguntas que miden lo mismo.	• Alpha > 0,6, está bien combinarlas. • Alpha < 0,6, no combinarlas.
U de Mann. Whitney	Compara si dos grupos distintos tienen diferencias críticas.	

5.4 Formulación de modelos estadísticos

Hipótesis de investigación

Con base en el problema de investigación definido en el Capítulo I, objetivos planteados en Capítulo II y revisión de literatura del Capítulo IV se formulan las siguientes hipótesis estadísticas.

- *H₀: La infraestructura y el acceso formal a almacenamiento de explosivos disponible en las comunas de Petorca y Cabildo es estructuralmente suficiente para que el pequeño productor minero opere en condición formal, sin evidenciar una brecha sistemática entre la demanda, la capacidad instalada y el acceso individual a dicha infraestructura.*
- *H₁: Existe una brecha estructural entre la demanda, la capacidad formal de almacenamiento y el acceso individual a dicha infraestructura en las comunas de Petorca y Cabildo, asociada a la operación informal o irregular del pequeño productor minero brecha que puede manifestarse como insuficiencia agregada de capacidad, fragmentación del acceso individual a esa capacidad, o como ambas simultáneamente, según la comuna y el nivel de análisis.*

El objetivo del análisis estadístico es aportar evidencia cuantitativa sobre la magnitud y persistencia temporal de la brecha entre demanda estimada y capacidad formal de almacenamiento de explosivos, evaluando si dicha brecha es sistemática o coyuntural en el periodo de estudio. Se enfatiza que el indicador IBCF permite caracterizar una condición estructural de infraestructura, pero no constituye, por sí solo, evidencia directa de comportamiento informal a nivel de productor individual; esta última dimensión se aborda de forma complementaria mediante el análisis de regresión logística sobre la encuesta y el análisis causal cualitativo

Estructura general de modelos

El análisis cuantitativo se estructura en tres modelos complementarios, cada uno diseñado para responder a una dimensión específica del problema.

Tabla 11: Estructura general de los modelos estadísticos

Modelo	Tipo modelo	Enfoque	Nº observaciones	Pregunta que responde
Análisis 1	Correlación de Pearson, IBCF demanda v/s capacidad formal.	Indicador y correlación de Pearson.	72 observaciones mensuales por comuna.	¿Cómo ha evolucionado la brecha entre demanda y capacidad formal en el período 2020–2026?
Análisis 2	Brecha estructural por estado operacional de faenas y test asociados.	Estadística descriptiva e índice de brecha por corte transversal.	3.039 faenas instaladas.	¿Qué proporción de instalaciones opera sin condiciones formales de almacenamiento o irregular operativa?
Análisis 3	Regresión logística sobre encuesta, barreras operacionales y test asociados.	Regresión y agrupación.	N encuestados.	¿Qué variables operacionales explican en mayor medida la barrera para operar formalmente?

Análisis 1: Índice de brecha de cobertura formal (IBCF) – Correlación de Pearson

Construcción IBCF. Se define el IBCF como el cociente entre la demanda mensual estimada de explosivos principales (kg equivalentes) y la capacidad total de almacenamiento formal autorizada en el periodo correspondiente:

$$IBCF(t, c) = \frac{Dem(t, c)}{Cap. tot(t, c)}$$

- Dem (t,c): Kilogramos equivalentes de explosivo principal comprados en el mes t para la comuna c, calculados mediante la estandarización descrita en la *Tabla 8*.
- Cap. Tot (t,c): Capacidad total de almacenamiento formal autorizada en el año t para la comuna c, calculada como:

$$Cap. tot(t, c) = \left(\sum (N_{<70} * 35) + \sum (N_{70-1000} * 535) + \sum (N_{>1000} * 1500) \right) * N_{rot}$$

Siendo N _rango el número de polvorines vigentes en cada rango de capacidad para la comuna c en el periodo t, mientras que los valores (35,535,1500) corresponden al punto medio utilizado como valor representativo de la capacidad del polvorín utilizado.

Representando lo siguiente:

- IBFC > 1: Brecha positiva, la demanda supera la capacidad formal autorizada.
- IBCF = 1: Equilibrio exacto entre demanda y capacidad formal.
- IBCF < 1: Existe capacidad ociosa formal,

La capacidad de almacenamiento autorizada se mantiene constante dentro de cada año. Esta aproximación se considera razonable dado que las autorizaciones de polvorines tienen vigencia anual.

IBCF ajustado a pequeña minería. Los datos de compras de explosivos entregados por DGMN corresponden al total de transacciones registradas en las comunas de Petorca y Cabildo, sin distinción por escala de operación minera (pequeña, mediana o gran minería). Para corregir esta limitación, se construye un factor de representatividad de pequeña minería (FR), que pondera el volumen total de compras por la participación relativa de las faenas de pequeña escala dentro del universo operativo total de cada comuna, utilizando data proporcionada por el catastro de faenas SERNAGEOMIN.

$$FR = \frac{\sum \text{Producción mensual estimada de faenas pequeña minería } (c)}{\sum \text{Producción mensual estimada total de faenas } (c)}$$

Se asume que la producción mensual estimada declarada por cada faena ante SERNAGEOMIN se mantiene constante durante el periodo de estudio, dado que no se dispone de una serie de tiempo real de producción por faena. Esta es una limitación reconocida, coherente con la variabilidad productiva propia de la pequeña minería.

Se asume que el factor de fragmentación (ton_roca/kg_explosivo) es comparable entre pequeña, mediana y gran minería, lo que permite utilizar la participación en producción como proxy de la participación en consumo de explosivos, ante la ausencia de datos de compras segmentados por escala, tal como se menciona en la Sección 4.2 con relación de 5-7 toneladas de roca fragmentada por kg de explosivo.

$$IBCF_ajust(t, c) = \frac{Dem(t, c)}{Cap. tot(t, c)} * FR$$

El FR es una aproximación conservadora obtenida a partir de los datos disponibles en el propio estudio, sin recurrir a fuentes externas no verificables sobre desagregación de compras de explosivos por escala de operación, dado que dicha información no está disponible públicamente a nivel comunal. De esta forma se aísla solo la porción de demanda que corresponde a la pequeña minería, respondiendo a la siguiente interrogante ¿esa demanda por sí sola presiona significativamente la capacidad formal total disponible en la comuna?

Modelo de correlación de Pearson. Dado el carácter exploratorio del Análisis 1 y el tipo de relación que se busca cuantificar, se calcula la matriz de correlaciones de Pearson entre el IBCF mensual y cada una de las variables independientes, para cada comuna por separado:

$$r (IBCF, X_i) = \frac{Cov (IBCF, X_i)}{(\sigma_{IBCF} * \sigma_{X_i})}$$

Se aplica sobre este modelo una corrección de Bonferroni sobre el umbral de significancia, dado que se realizan 5 pruebas de correlación por comuna (10 en total), ajustando el umbral convencional de $\alpha=0,05$ a $\alpha_corregido=0,05/5=0,01$. Además, un test de tendencia de Mann-Kendall, aplicado a la serie temporal del IBCF de cada comuna, como verificación no paramétrica independiente de la tendencia detectada por la correlación de Pearson.

Análisis 2: Brecha estructural por estado operacional de faenas

Este análisis utiliza el corte transversal del catastro de faenas (2026) para calcular un indicador de brecha estructural a nivel comunal:

$$Brecha\ estructural\ (c) = \frac{(N_{activas\ (c)} + N_{irregulares\ (c)})}{N_{Polvorines\ vigentes\ (c)}}$$

Tal indicador cuantifica cuantas faenas en condición de operar (activas + irregulares operativas) existen por cada polvorín autorizado en la zona, evidenciando la insuficiencia de infraestructura formal de almacenamiento disponible. Un valor mayor a 1 indica que existen más faenas operativas que polvorines autorizados, lo que implica que no todas las faenas pueden operar con almacenamiento propio formal, dando cabida a otros factores (externalizar mediante polvorines móviles, utilizar polvorines de otras propiedades mineras, no tener polvorín legal).

Adicionalmente se calcula el porcentaje de instalaciones operativas en condición de irregular respecto al total de instalaciones con actividad declarada:

$$\%Irreg_op = \frac{N_{irregulares\ (c)}}{(N_{activas\ (c)} + N_{irregulares\ (c)})} * 100$$

Se asume que toda faena operativa requiere acceso a almacenamiento formal propio o de terceros autorizado. Dado aquello, se aplica un test de dos proporciones para comparar formalmente el porcentaje de instalaciones en condiciones irregular operativa entre Cabildo y Petorca, lo que permite una estimación estadísticamente estable de la diferencia entre proporciones.

Análisis 3: Regresión exploratoria sobre encuesta

Índice de barrera operacional (IBO). Este índice es un indicador compuesto descriptivo-exploratorio que sintetiza la percepción de barreras en múltiples dimensiones para cada encuestado. Su propósito es construir una variable dependiente única que concentre la información de varias variables ordinales, para luego identificar cuáles de ellas se asocian más intensamente con la barrera total percibida.

$$IBO_i = \frac{(t_{tramite\ i} * Complejidad_i * t_{entrega\ i} * Impacto\ margen_i)}{Proveedores_i}$$

Un mayor valor de IBO indica que el encuestado enfrenta mayores barreras combinadas (alta complejidad, largos plazos, alto impacto en su margen de utilidad y pocos proveedores). La formulación multiplicativa del numerador captura la interacción entre barreras, aunque posee limitantes como:

- I. Multicolinealidad estructural: Al construir el indicador como multiplicación de variables, y luego utilizarlas como independientes para la regresión OLS, se produce multicolinealidad y VIF altos, por aquello se aplica una reducción de dimensionalidad diferenciando un modelo general de uno restringido mediante el test de Mann Whitney U.
- II. IBO como predictor de informalidad: Mide la intensidad percibida de las barreras operacionales en la muestra, no la probabilidad de operar de forma informal.

Variable dependiente (Y). Con el fin de evaluar qué variables operacionales explican la condición de formalización en el almacenamiento de explosivos, se utiliza la data obtenida en la encuesta respectiva a si se cuenta o no actualmente la faena del productor con un polvorín propio autorizado y vigente. Donde $Y_i = 1$ si el encuestado i cuenta con polvorín propio autorizado vigente, y 0 en caso contrario.

$$P(Y_{formal,i} = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k)}}$$

$P(Y_{formal,i} = 1)$, corresponde a la probabilidad de que el encuestado i cuente con un polvorín propio autorizado y vigente, β_0 es el intercepto del modelo, y X_1 a X_7 corresponden a las cinco variables independientes de barrera operacional.

Índice general de barrera operacional (IGBO). Se construye estandarizando cada una de las 7 variables independientes mediante puntaje z , y promediando dichos puntajes en un índice único por encuestado. A diferencia del IBO que es puramente descriptivo y de los coeficientes de la regresión logística que aíslan el efecto individual de cada variable, el IGBO resume la barrera operacional general percibida por cada productor en un solo valor comparable, y se utiliza exclusivamente como variable de entrada del test complementario de Mann-Whitney U, que compara este índice entre el grupo con polvorín propio y el grupo sin polvorín propio.

$$IGBO = \frac{1}{7} \sum Z(x_{k,i}), \quad Z(x_{k,i}) = \frac{x_{k,i} - \bar{x}_k}{s_k}$$

Variable independiente (X).

Tabla 12: Variables independientes del análisis 3

Simbología	Variable	Codificación
X ₁	Tiempo de tramitación de autorización de polvorín.	Ordinal 1-4 (mayor = más tiempo)
X ₂	Complejidad percibida del proceso administrativo.	Likert 1-5 (mayor = más complejo)
X ₃	Número de proveedores accesibles (invertida).	Ordinal 1-3 (mayor código = menos proveedores)
X ₄	Tiempo desde compra hasta disponibilidad en faena.	Ordinal 1-4 (mayor = más tiempo)
X ₅	Impacto del cumplimiento normativo en margen de utilidad.	Ordinal 1-3 (mayor = mayor impacto)
X ₆	Evolución percibida del precio de explosivos.	Ordinal 1-3 (mayor = mayor alza percibida)
X ₇	Quiebres de stock percibidos.	Ordinal 1-3 (mayor = más frecuente)

La diferencia en R^2 entre un modelo restringido con solo las variables de percepción burocrática y el modelo completo con todas las variables, proporciona evidencia sobre la relevancia incremental de las dimensiones de mercado y costo en la explicación de barrera operacional total.

5.5 Análisis causal: Herramientas de excelencia operacional

Una vez obtenidos y cuantificados los hallazgos de los modelos estadísticos y el análisis de mercado, se procede a la interpretación causal del fenómeno mediante herramientas de calidad y excelencia operacional ampliamente validadas en ámbito de ingeniería. El objetivo de esta fase es comprender los mecanismos causales subyacentes a las brechas detectadas, no solo medir su magnitud. La correcta identificación de causas raíz es condición necesaria para el diseño de soluciones afectivas y duraderas.

Diagrama de causa y efecto (Ishikawa)

También conocido como diagrama de Ishikawa o diagrama de espinas de pez, es una herramienta de análisis causal que permite identificar y organizar las posibles causas de un problema o efecto específico en categorías estructuradas.

Su aplicación en la presente investigación tiene por efecto central el fenómeno identificado como: El pequeño productor minero de Petorca-Cabildo opera con explosivos en condición informal. El análisis se estructura en seis categorías causales clásicas:

Normativa y regulación.

- I. Igualdad de exigencias técnicas para la gran y pequeña minería.
- II. Inexistencia de polvorines comunitarios o compartidos.
- III. Vigencia anual de autorizaciones que genera carga burocrática recurrente.
- IV. Falta de ventanilla única.

Mercado y suministro.

- I. Concentración de proveedores.
- II. Tiempos de entrega superiores al umbral operativo crítico.
- III. Quiebres de stock frecuentes.
- IV. Precios en alza sostenida.
- V. Distancia geográfica a puntos de distribución.

Infraestructura y tecnología.

- I. Alto costo de construcción de polvorín propio.
- II. Limitaciones del terreno de la concesión minera.
- III. Ausencia de alternativas de almacenamiento compartido certificado.

Método y gestión.

- I. Desconocimiento del proceso de tramitación.
- II. Falta de asesoría técnica accesible.
- III. Complejidad percibida en los tramites como barrera de entrada.
- IV. Gestión reactiva de insumos.

Entorno institucional.

- I. Fallo de trazabilidad dinámica de la información entre DGMN, SERNAGEOMIN y proveedores.
- II. Capacidad fiscalizadora limitada en zonas remotas.

Factores económicos estructurales.

- I. Márgenes operacionales reducidos en la pequeña minería que dificultan absorber los costos de cumplimiento normativo.
- II. Presión a la informalidad como estrategia de resultados económicos.

Análisis de los 5 por qué?

Esta técnica es un método de análisis causal inductivo que consiste en preguntar iterativamente ¿Por qué? Ante cada respuesta obtenida, hasta alcanzar la causa raíz del problema. Su fortaleza radica en que evita quedarse en síntomas superficiales y fuerza la identificación de causas sistémicas. La técnica se aplica a modo de ejemplo sobre una suposición de informalidad en la gestión de explosivos:

- I. ¿Por qué el pequeño minero opera con explosivos de forma informal?:
Porque no puede cumplir con los requisitos legales para operar formalmente.
- II. ¿Por qué no puede cumplir con los requisitos legales?: Porque el proceso de autorización de polvorines es largo, costoso y complejo, y no está diseñado para la escala de su operación.

- III. ¿Por qué el proceso no está diseñado para su escala?: Porque la normativa chilena de explosivos es uniforme para todas las escalas de operación minera, sin diferenciación que reconozca las capacidad y limitaciones de la pequeña minería.
- IV. ¿Por qué la normativa es uniforme sin diferenciación?: Porque el diseño regulatorio históricamente ha sido conducido por las necesidades de las gran y mediana minería, que son los actores con mayor capacidad de representación ante organismos reguladores.
- V. ¿Por qué los pequeños mineros no han logrado modificar esta regulación?: Porque carecen de organización gremial efectiva, de información técnica sistematizada sobre el impacto de las barreras, con una alta brecha tecnológica de productores y de una propuesta resolutive técnicamente fundamentada que pueda ser representada ante los organismos de decisión.

Para este caso la causa raíz identificada en el quinto nivel seria la ausencia de un marco regulatorio diferenciado y de infraestructura de gestión de explosivos adaptada a la pequeña minería, combinada con la carencia de evidencia cuantitativa que sustente la necesidad de cambio.

Por lo tanto, esta investigación aborda directamente ambas causas raíz, la evidencia cuantitativa mediante modelos estadísticos y la propuesta resolutive mediante el diseño de un modelo de gestión adaptado.

Value stream mapping (VSM) del proceso de gestión de explosivos

Este mapa de flujo de valor es una herramienta de manufactura esbelta (Lean Manufacturing) que permite visualizar y analizar el flujo de materiales e información a lo largo de un proceso, identificando actividades que generan valor y aquella que constituyen desperdicio.

El objetivo es mapear el proceso completo de gestión de explosivos que enfrenta el pequeño minero, desde la decisión de compra hasta la disponibilidad del explosivo en faena, identificando los tiempos muertos, las actividades sin valor agregado y los cuellos de botella regulatorios. El VSM se construye a partir de los datos de la encuesta y del conocimiento normativo de los procesos de DGMN y SERNAGEOMIN, incluyendo las siguientes etapas:

- I. Tramitación de la licencia de consumidor habitual de explosivos ante DGMN.
- II. Tramitación o renovación de la autorización de polvorín (transitorio o permanente) ante DGMN.
- III. Solicitud de cotización y orden de compra al proveedor de explosivos.
- IV. Tramitación de la guía de libre tránsito para el transporte del explosivo.
- V. Transporte desde el proveedor hasta la faena.
- VI. Recepción, verificación y almacenamiento en polvorín.
- VII. Despacho a punto de uso en la tronadura.

Análisis 5S aplicado a la gestión de polvorines

La metodología 5S es un sistema de organización del lugar de trabajo asignado en el Sistema de Producción Toyota, cuyo objetivo es crear y mantener entornos de trabajo ordenados, limpios y seguros, reduciendo desperdicios y aumentando la eficiencia. En el contexto de la pequeña minería, la aplicación de estos principios tiene relevancia directa en la estandarización de los procesos de almacenamiento, control de inventario y mantenimiento de polvorines. Interpretándose de la siguiente forma en este contexto:

Tabla 13: Aplicación de los principios 5S al contexto de gestión de explosivos

Principio	Traducción	Aplicación
Seiri	Clasificar	Identificar y separar los tipos de explosivos según categoría (primario/secundario), fechas de vencimiento, y compatibilidad de almacenamiento conjunto según normativa DGMN.
Seiton	Ordenar	Establecer una ubicación definida y señalizada para cada tipo de explosivo e insumo de tronadura dentro del polvorín, con control de inventario visible.
Seiso	Limpiar	Mantener el polvorín libre de agentes contaminantes y en condiciones ambientales controladas (temperatura, humedad) conforme a las fichas técnicas de los explosivos.
Seiketsu	Estandarizar	Establecer procedimientos escritos y visuales para el ingreso, despacho y control de stock de explosivos, con registros trazables que faciliten las inspecciones de DGMN.
Shitsuke	Disciplina	Implementar auditorías periódicas de cumplimiento de los estándares establecidos, con responsables designados y capacitación continua de los manipuladores habilitados.

La implementación de un estándar 5S en la gestión contribuirá directamente al productor, ya que está basado en exigencias normativas de los entes reguladores, añadiendo seguridad operacional y simplificando la trazabilidad y obtención de la documentación necesaria para la renovación de autorizaciones asociadas.

Diseño de propuesta resolutive: Enfoque Design Thinking

La fase de diseño de la propuesta resolutive adopta este enfoque de pensamiento de diseño, una metodología de innovación centrada en el usuario que propone un proceso iterativo de cinco etapas para el desarrollo de soluciones a problemas complejos: Empatizar, Definir, Idear, Prototipar y Evaluar.

La elección de esta metodología para tal fase responde a la naturaleza del problema, que trata de un desafío sistémico que involucra múltiples actores con intereses y restricciones heterogéneas (pequeños mineros, DGMN, SERNAGEOMIN, proveedores) y cuya solución efectiva requiere incorporar la perspectiva de los usuarios finales desde las etapas más tempranas del diseño.

Empatizar. Esta etapa consiste en comprender profundamente las necesidades, motivaciones, restricciones y frustraciones de los actores involucrados en el problema, Esta etapa se nutre de los datos recolectados en las fases anteriores:

- I. Encuesta de productores mineros proporciona la voz directa del usuario final respecto a las barreras percibidas, los impactos económicos y las soluciones deseadas.
- II. Los datos estadísticos de compras, polvorines y licencias contextualizan cuantitativamente la situación del usuario.
- III. El VSM del proceso actual revela los puntos de fricción específicos desde la perspectiva operacional del productor.

El mapa de actores (stakeholders map) construido en esta etapa identifica los grupos de interés relevantes, sus roles, intereses y niveles de influencia sobre un problema, constituyendo la base para el diseño de una propuesta aceptable.

Definir. Consiste en sintetizar la información recopilada en la etapa de empatizar, para así formular una declaración del problema, clara, específica y centrada en el usuario. Para el estudio se formula de la siguiente manera:

“El pequeño productor minero de Petorca y Cabildo necesita acceder a explosivos de forma legal, oportuna y económicamente viable, pero el sistema actual impone barreras de infraestructura, costo y tiempo que hacen que la operación normal sea estructuralmente inviable para su escala de producción, empujándolo hacia la informalidad como única alternativa operacional en el corto plazo”.

Idear. Consiste en generar un amplio espectro de soluciones potenciales al problema definido, sin restricciones iniciales y luego priorizarlas según criterios de factibilidad, impacto y viabilidad económica. Las líneas de solución exploradas se organizan en tres dimensiones:

- I. Dimensión de infraestructura: Diseño de un modelo de polvorín comunitario mancomunado; Evaluación de polvorines móviles certificados; Análisis de la viabilidad de nodos de almacenamiento distribuido.
- II. Dimensión normativa y procedimental: Propuesta de simplificación de trámites mediante una ventanilla única digital; Análisis de factibilidad de autorizaciones con mayor vigencia o renovación simplificada; Diseño de un modelo de licencia diferenciada para pequeña minería.
- III. Dimensión de mercado y logística: Diseño de un modelo de consignación de explosivos; Evaluación de la factibilidad de un operador logístico especializado para la pequeña minería; Análisis de acuerdos de suministro garantizado con proveedores.

Las ideas generadas se priorizarán mediante una matriz de impacto-esfuerzo, seleccionando de mayor impacto potencial y menor complejidad de implementación para su desarrollo en la propuesta resolutive.

Prototipar. Consiste en desarrollar representaciones concretas pero simplificadas de las soluciones escogidas, suficientes para comunicar y evaluar el concepto sin incurrir en el costo de una implementación completa. El prototipo corresponde al diseño conceptual y la evaluación técnico-económica del modelo de gestión propuesto, el cual incluye:

- I. Diseño modelo operativo: Descripción del flujo de valor del proceso mejorado (VSM futuro), definición de roles y responsabilidades, requerimientos de infraestructura.
- II. Modelo de negocios (Business Model Canvas): Identificación de la propuesta de valor, segmentos de clientes, canales, fuentes de ingreso, estructura de costos, socios clave y actividades clave del modelo propuesto.
- III. Evaluación económica preliminar: Estimación de costos de inversión inicial, costos operacionales y beneficios esperados, con calculo de indicadores de rentabilidad (VAN, TIR, periodo de recuperación) bajo distintos escenarios.

Evaluar. Consiste en contrastar el prototipo de la propuesta con los criterios de factibilidad técnica, normativa y económica, e identificar ajustes necesarios antes de la presentación final.

- I. Análisis de brechas (Gap Analysis) entre el modelo propuesto y el marco normativo vigente, identificando los cambios regulatorios y necesarios para su implementación.
- II. Análisis de sensibilidad del modelo económico ante variaciones en los supuestos de demanda, costo de capital y precio de explosivo.

- III. Validación cualitativa de la propuesta mediante las preferencias declaradas en la encuesta, contrastando si las soluciones priorizadas coinciden con las preferencias de los propios productores.

Herramientas y software utilizados

Tabla 14: Software y herramientas utilizados en la investigación

Herramienta	Uso en la investigación
Python 3.x (Spyder)	Programación de modelos y cálculos computacionales.
Bibliotecas: pandas, numpy, scipy, statsmodels, matplotlib, seaborn	Manipulación de datos, modelamiento estadístico, diagnóstico de supuestos de regresión y visualización.
Microsoft Excel	Estructuración inicial de datasets secundarios, cálculos preliminares de capacidad de polvorines y estadísticas descriptivas básicas.
Google Forms	Diseño, administración y recolección de respuestas del instrumento de encuesta primaria.
Lucidchart / Draw.io	Construcción del Diagrama de Ishikawa, Value Stream Mapping (estado actual y futuro) y Mapa de Actores.
Business Model Canvas	Diseño del modelo de negocios de la propuesta resolutive.

6. Resultados

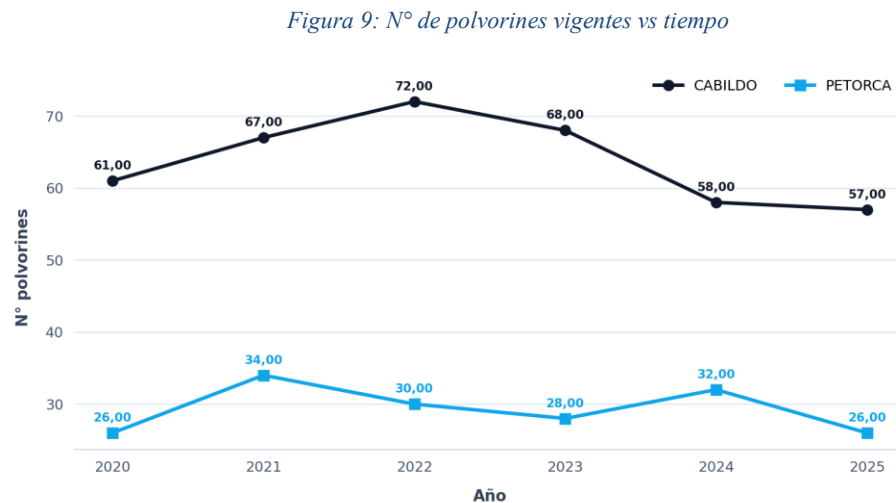
Este capítulo expone los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en la sección anterior, siguiendo la secuencia lógica de cada uno de los ítems presentados junto a su evolución temporal y análisis crítico respectivo.

6.1 Caracterización de datos oficiales depurados

Se procesaron y depuraron cinco bases de datos oficiales: Registro de polvorines vigentes, registro de consumidores habituales de explosivos, registro transaccional de compras de explosivos, catastro de faenas mineras y registro de fiscalización de polvorines. A continuación, se presenta la evolución temporal y características principales considerando desde el año 2020 al 2025, dejando el año 2026 como dato de contexto adicional dado a que corresponde a información parcial.

Polvorines vigentes

La figura 9 presenta la evolución de polvorines vigentes, suma de polvorines permanentes y transitorios, para ambas comunas en el periodo 2020-2025.



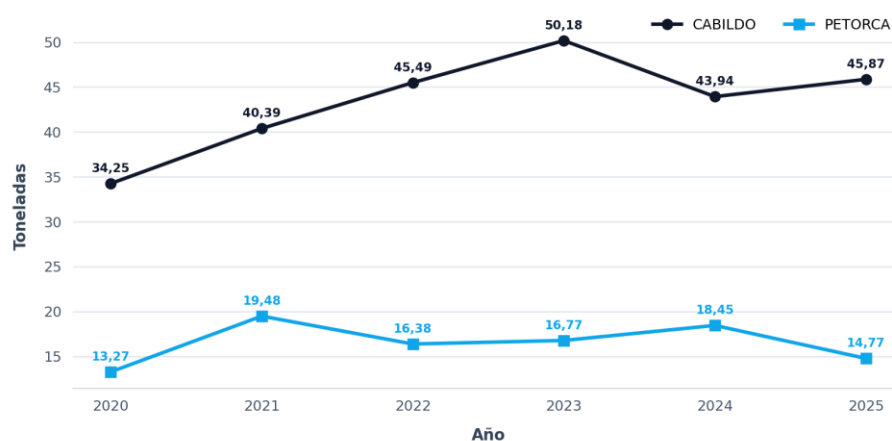
Se evidencia que la comuna de Cabildo posee valores muy superiores fluctuando entre 57 y 72 polvorines, mientras que, Petorca fluctúa entre 26 y 34 polvorines. Ambas zonas muestran preliminarmente una leve tendencia decreciente en los últimos años del periodo observado.

Capacidad total autorizada de almacenamiento anual

La figura 10 muestra la capacidad total autorizada, calculada según el criterio de punto medio de rango descrito en la metodología:

- Punto medio 35 kg : Capacidad polvorín <70 kg
- Punto medio 535 kg: Capacidad polvorín 70 -1.000 kg
- Punto medio 1.500 kg: Capacidad polvorín >1.000 kg

Figura 10: Capacidad de almacenamiento autorizada vs tiempo

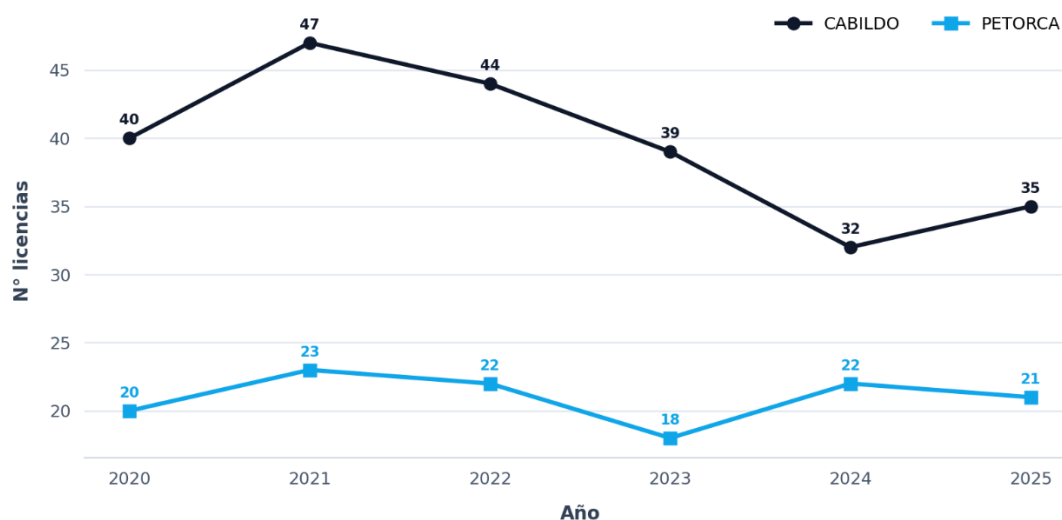


La capacidad autorizada en Cabildo evoluciona desde 34,3 toneladas en 2020 hasta un máximo de 50,2 toneladas en 2023. Mientras tanto, en Petorca se mantuvo un rango más acotado, entre 13,3 y 19,5 toneladas en el mismo periodo. Es relevante notar que el crecimiento en el número de polvorines, no se traduce proporcionalmente en la capacidad total, lo que sugiere que los nuevos polvorines autorizados corresponden mayoritariamente a categorías de menor capacidad.

Licencias de consumidor habitual de explosivos

Se presenta la evolución de las licencias de manipulador/consumidor habitual de explosivos vigentes:

Figura 11: N° de licencias vs tiempo

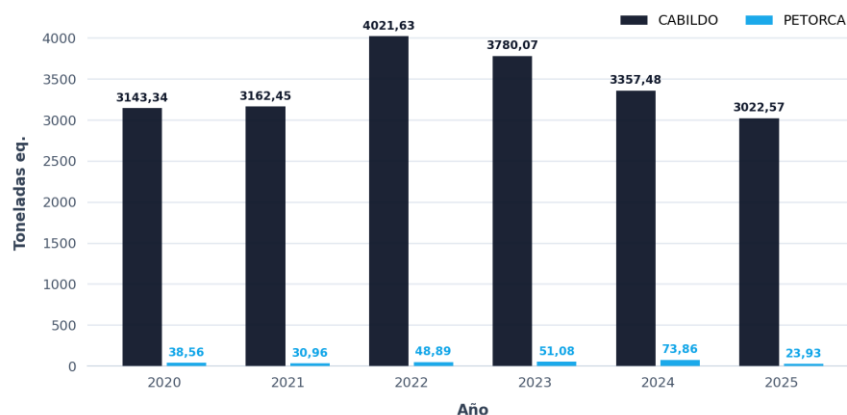


En cuanto a la comuna de Cabildo se evidencia un descenso leve, pero relevante considerando la cantidad de productores mineros en la zona, mientras que, Petorca se mantiene estable. La disminución representada y características se deben a múltiples factores, sin embargo, se puede ver en gran parte contenida en uno de los hallazgos de la encuesta realizada, respecto a la percepción de complejidad en los procesos de habilitación de licencias y tramites.

Compras de explosivo principal

Se presenta el volumen de compras anuales de explosivo principal contenido en polvorines (ANFO, EMULSIONES, AGENTES DE VOLADURA), expresado en toneladas equivalentes, calculadas según el protocolo de estandarización descrito en el marco metodológico.

Figura 12: Compras de explosivo principal vs tiempo

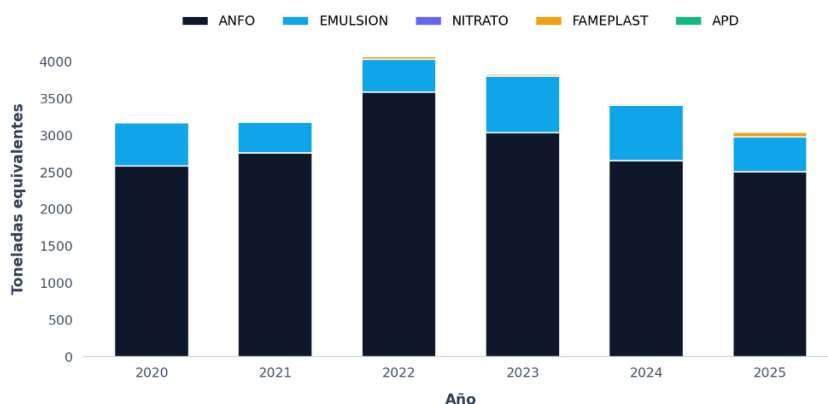


Cabildo concentra el volumen abrumadoramente mayor de compras de explosivo principal, oscilando entre 3.022 y 4.021 toneladas equivalentes anuales. En Petorca estos volúmenes sustancialmente menores, varían entre 39 y 74 toneladas. Esta asimetría se ve producida dado que las compras anuales no corresponden específicamente al nivel del productor (pequeña, mediana, gran minería) sino que son las transacciones generales, y es relevante considerar que en Cabildo existe una cantidad importante de empresas de gran magnitud, mayor cantidad de faenas y de productores, por aquello se aplica un factor de representatividad (FR).

Composición de las compras por tipo de explosivo

Se desagrega el volumen total de compras, por tipo de explosivo principal, permitiendo caracterizar la matriz de consumo del sector.

Figura 13: Composición de compras vs tiempo

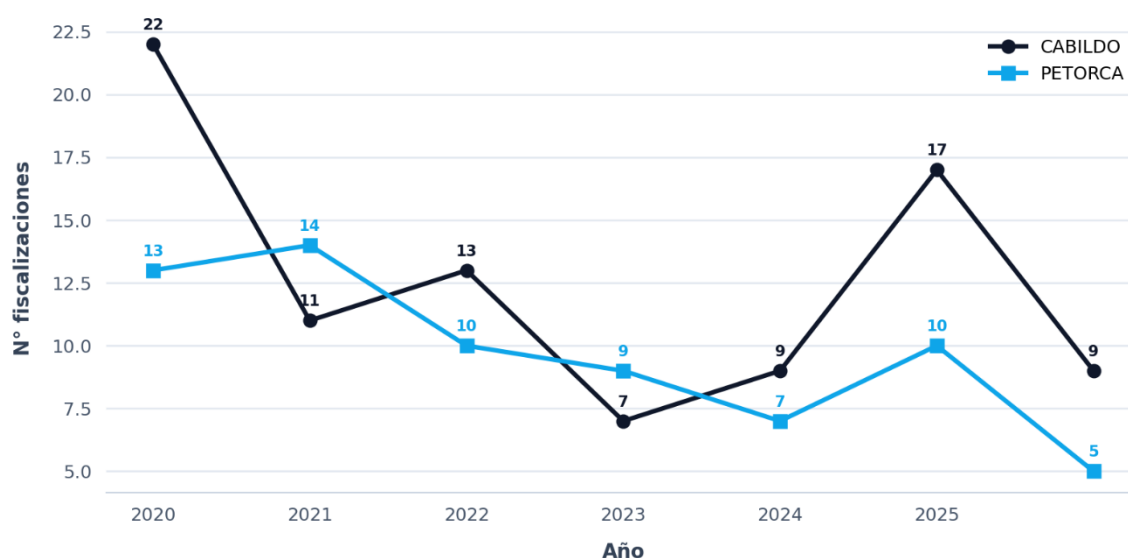


El ANFO constituye el explosivo principal predominante en la matriz de consumo, representando consistentemente entre el 55% y el 75% del volumen total comprado según el año, seguido de las emulsiones que representan entre el 25% y 40%. Los agentes de voladura tipo APD y Fameplast representan una fracción marginal del volumen total, siendo inferiores al 1% en conjunto, aunque cumplen un rol técnico relevante como iniciadores de carga.

Fiscalización de polvorines

Se presenta la evolución del número de fiscalizaciones de polvorines realizadas anualmente por la autoridad competente.

Figura 14: N° fiscalización de polvorines vs tiempo



Se observa una tendencia decreciente en el número de fiscalizaciones realizadas en ambas comunas, con leves alzas en periodos específicos. Esta evolución se retomará en secciones posteriores para el cálculo de ratio de fiscalización de polvorín vigente.

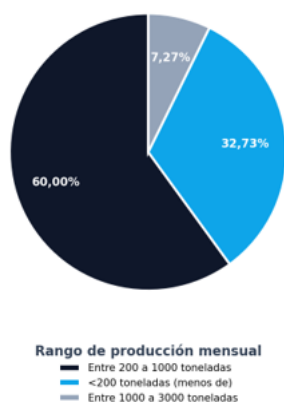
6.2 Resultados de la encuesta a pequeños productores mineros

Se presentan los resultados obtenidos a 55 encuestados válidos los cuales representan el 50% del universo de productores definidos como meta en la construcción de la encuesta, con una tasa de respuesta del 74,32%, correspondientes a pequeños productores mineros de las comunas en estudio. La distribución de la muestra refleja la diferencia en densidad de faenas entre ambas comunas.

Del total, 34 encuestados (61,8%) provienen de Cabildo y 21 (38,2%) de Petorca, proporciones coherentes según la distribución de faenas activas registradas en el catastro Sernageomin.

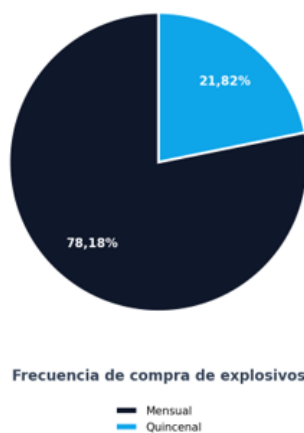
Producción mensual (1). El 60,00% de los encuestados opera en el rango de 200 a 1.000 toneladas mensuales y el 32,73% en el rango inferior a 200 toneladas, confirmando que la totalidad de la muestra corresponde a pequeña minería según los estándares de producción de la zona.

Figura 15: Distribución de encuestados sobre producción mensual



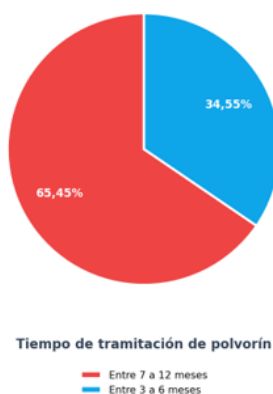
Frecuencia de compra (2). La compra mensual es la práctica predominante con un 78,18%, seguida por la opción quincenal 21,82%. Esta distribución refleja el supuesto base de rotación de inventario ($N_{rot} = 12$) utilizado en el cálculo de Índice de Brecha de Cobertura Formal.

Figura 16: Distribución de encuestados sobre frecuencia de compra



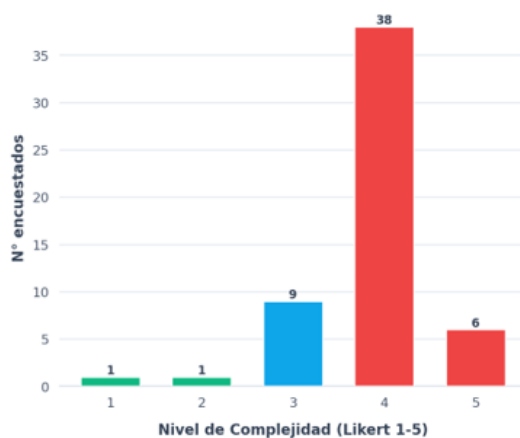
Tiempo de tramitación de polvorín (3). El 65,45% de los encuestados que ha tramitado la autorización de un polvorín reporta tiempos de entre 7 y 12 meses para el proceso completo, mientras que, el 34,55% restante declara entre 3 y 6 meses.

Figura 17: Distribución de encuestados sobre tiempo de tramitación



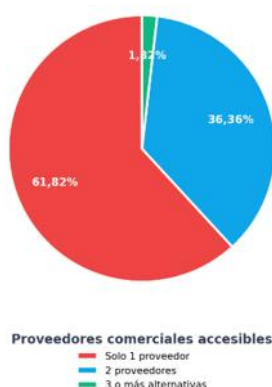
Complejidad administrativa (4 – Likert 1-5). La media obtenida es 3,83 sobre 5, con moda en 4. El 69,09% de los encuestados asigna nivel 4 (excesivamente complejo) el 10,90% nivel 5 (prohibitivo), los dos niveles más altos de la escala. Este resultado constituye evidencia contundente de que la barrera administrativa es percibida como estructuralmente severa por la gran mayoría de productores, lo que también se ve afectado por la naturaleza del trámite.

Figura 18: Distribución de encuestados sobre complejidad administrativa



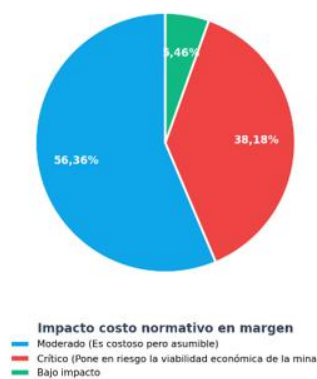
Proveedores accesibles (5). El 61,82% declara contar con solo un proveedor accesible, el 36,36% con dos proveedores y el 1,82% con tres o más. Esta concentración extrema del mercado de abastecimiento limita el poder de negociación del pequeño minero y lo expone a condiciones de precio y disponibilidad determinadas unilateralmente.

Figura 19: Distribución de encuestados sobre proveedores accesibles



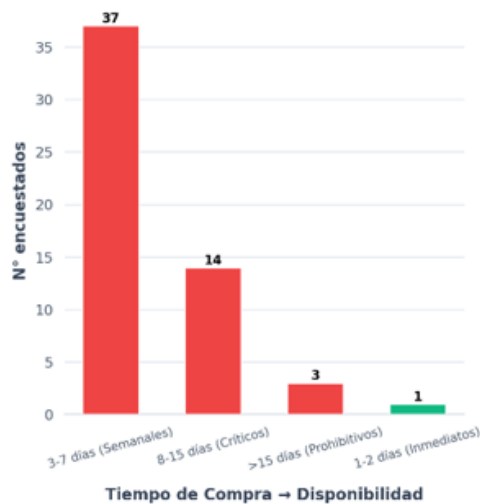
Impacto en margen de utilidad (6). El 56,36% califica el impacto del cumplimiento normativo como moderado y el 38,18% como crítico (que pone en riesgo la viabilidad económica de la faena), solo el 5,46% reporta bajo impacto.

Figura 20: Distribución de encuestados sobre impacto en margen de utilidad



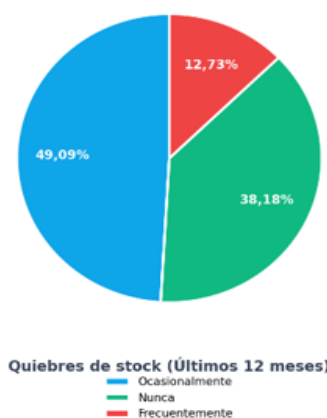
Tiempo desde compra hasta disponibilidad en faena (7): El 67,27% declara un retraso de 3 a 7 días (retraso corto pero que obliga a planificación semanal), el 25,45% entre 8 y 15 días (retraso crítico que afecta el ritmo de avance), el 5,8% más de 15 días (retraso prohibitivo que fuerza detenciones), mientras que, solo el 1,81% reporta disponibilidad inmediata de 1 a 2 días hábiles.

Figura 21: Distribución de encuestados sobre tiempo disponible en faena



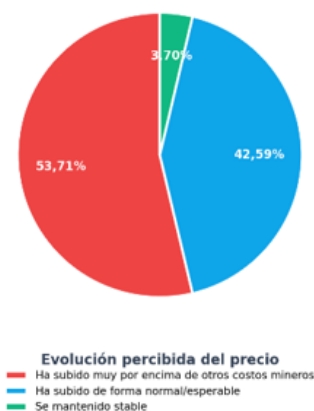
Quiebres de stock (8). El 49,09% reporta quiebres ocasionales y el 12,73% quiebres frecuentes, el 38,18% declara no haber enfrentado quiebres en el último año.

Figura 22: Distribución de encuestados sobre quiebres de stock



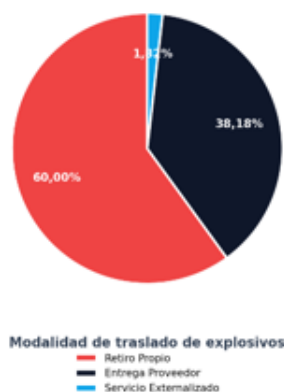
Evolución percibida del precio (9). El 53,71% percibe que el precio de los explosivos ha subido muy por encima de otros costos mineros y el 42,59% que ha subido de forma normal o esperable, solo el 3,70% percibe estabilidad de precios.

Figura 23: Distribución de encuestados sobre percepción de precios



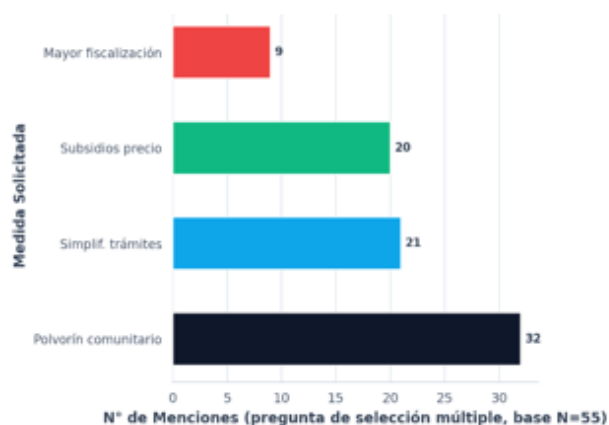
Modalidad de traslado (10 - 11). El 60,00% realiza retiro propio del explosivo desde las instalaciones del proveedor, el 38,18% recibe entrega directa del proveedor en faena y el 1,9% externaliza el servicio completo. De quienes retiran por cuenta propia, el 43,5% utiliza vehículos propios con adaptaciones básicas de seguridad, el 36,9% traslada en vehículos convencionales de trabajo, sin adecuación específica para el transporte de explosivos.

Figura 24: Distribución de encuestados sobre modalidad de traslado



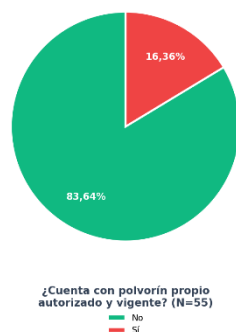
Medida tentativa que reduciría la informalidad (12). La creación de polvorines comunitarios o estatales concentra la mayor proporción de menciones, seguida por la simplificación de trámites de autorización, y los subsidios o regulación de precios de insumos. La opción de mayor fiscalización y sanciones recibe la menos cantidad de elecciones, lo que es relevante para el diseño de propuesta resolutive, ya que no la perciben como una solución principal.

Figura 25: Distribución de encuestados sobre medidas tentativas



Polvorín propio autorizado y vigente (13). Muestra que el 16,36% de los encuestados (9/55) cuenta actualmente con un polvorín propio autorizado y vigente, mientras que el 83,64% (46/55) no cuenta con almacenamiento formal propio.

Ilustración 26: Distribución de polvorín propio



6.3 Resultados de modelos estadísticos

Los tres análisis definidos en la sección de metodología se ejecutaron sobre los datos definitivos, depurados, con equivalencias y supuestos aplicados.

Análisis 1: Índice de Brecha de Cobertura Formal (IBCF)

El IBCF e IBCF_ajust fue calculado para el periodo 2020-2025 asumiendo 12 rotaciones anuales de inventario, valor validado por la moda de frecuencia de compra obtenida en la encuesta.

Tabla 15: Cálculo de FR

Comuna	Faenas <10.000 (ton/mes)	Tot. Faenas con producción	Producción pequeña minería (ton/mes)	Producción tot. (ton/mes)	FR
Cabildo	249	293	197.042,00	625.287,00	0,315
Petorca	176	211	149.269,00	468.249,00	0,318

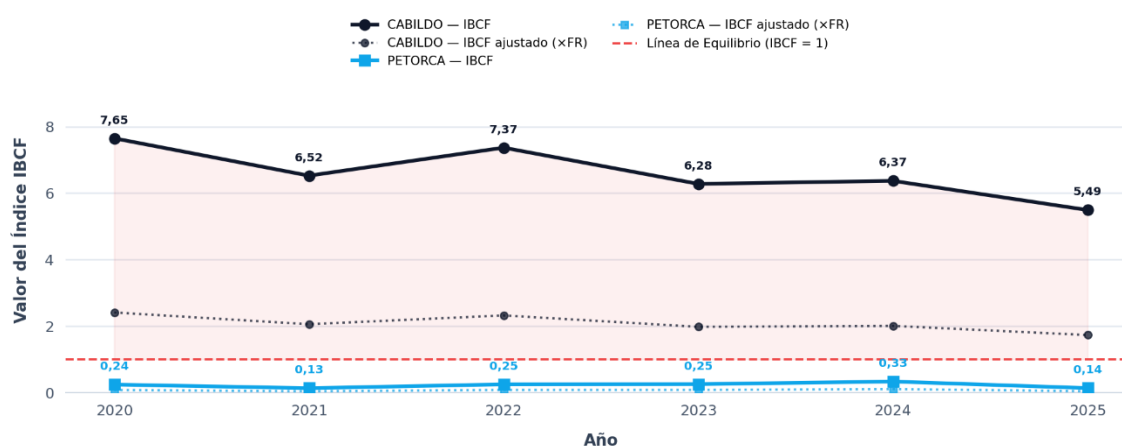
Tabla 16: Índice de Brecha de Cobertura Formal (IBCF) por año y comuna, 2020-2025.

Año	Comuna	Compras (ton)	Cap. Estática (ton)	Cap. Rotación anual (ton)	IBCF	IBCF_ajust
2020	Cabildo	3.143,3	34,3	411,0	7,65	2,41
	Petorca	38,6	13,3	159,2	0,24	0,08
2021	Cabildo	3.162,5	40,4	484,7	6,52	2,06
	Petorca	31,0	19,5	233,8	0,13	0,04
2022	Cabildo	4.021,6	45,5	545,9	7,37	2,32
	Petorca	48,9	16,4	196,5	0,25	0,08
2023	Cabildo	3.780,1	50,2	602,2	6,28	1,98
	Petorca	51,1	16,8	201,2	0,25	0,08
2024	Cabildo	3.357,5	43,9	527,2	6,37	2,01
	Petorca	73,9	18,4	221,3	0,33	0,11
2025	Cabildo	3022,6	45,9	550,4	5,49	1,73
	Petorca	23,9	14,8	177,2	0,14	0,04

Cabildo. Su IBCF ajustado a la caracterización de pequeña minería promedio es 2,08 manteniéndose por sobre el umbral de equilibrio (IBCF =1) durante la totalidad del periodo, lo que constituye un indicio de brecha estructural persistente y no coyuntural.

Petorca. Su IBCF ajustado promedio es 0,07 manteniéndose sistemáticamente bajo el umbral de equilibrio durante todo el periodo. Esto indica que la capacidad formal de almacenamiento en términos de capacidad de rotación anual es suficiente para el volumen total de compras registrado.

Figura 27: IBCF e IBCF_ajust periodo 2020-2025



La persistencia del IBCF de Cabildo demuestra evidencia cuantitativa robusta de brecha estructural entre la demanda operacional y la capacidad formal de almacenamiento. Este factor, calibrado con la frecuencia de compra real de los productores respalda inicialmente el rechazo de H_0 para la comuna.

Correlaciones de Pearson y Test asociados. Se calcularon las correlaciones entre el IBCF y las variables número de polvorines, capacidad total autorizada, licencias vigentes, número de fiscalizaciones y tendencia temporal, para cada comuna por separado ($n = 6$ años), en conjunto de su test de tendencia respectivo.

Tabla 17: Correlaciones de Pearson entre IBCF y variables oficiales, por comuna (n=6)

Comuna	Variable	r (Pearson)	p-valor	¿Sobrevive a Bonferroni ($\alpha=0,01$)?
Cabildo	N° Polvorines	+0,45	0,37	No
	Cap. Total Autorizada	-0,60	0,21	No
	Licencias Vigentes	+0,47	0,34	No
	N° Fiscalizaciones	+0,37	0,47	No
	Tendencia temporal	-0,84	0,04	No (solo nominal a 0,05)
Petorca	N° Polvorines	+0,06	0,91	No
	Cap. Total Autorizada	+0,05	0,93	No
	Licencias Vigentes	-0,22	0,67	No
	N° Fiscalizaciones	-0,67	0,15	No
	Tendencia Temporal	+0,05	0,92	No

Tabla 18: Resultados test de tendencia

Comuna	τ Kendall	p-valor	¿Tendencia confirmada al 0,05?
Cabildo	-0,73	0,06	No (marginal)
Petorca	0,33	0,45	No

Sensibilidad de IBCF a N_rot y a FR. Los tres escenarios oficiales de N_rot confirman robustez del hallazgo de brecha en Cabildo, manteniéndose sobre el umbral de equilibrio.

Tabla 19: Sensibilidad del IBCF a N_rot y FR

Escenario	N_rot	IBCF Cabildo (2025)	IBCF Petorca (2025)
Menor rotación	6	10,98	0,27
Base	12	5,49	0,14
Alta rotación	24	2,75	0,07

Figura 28: Gráfico de sensibilidad IBCF a N_{rot}

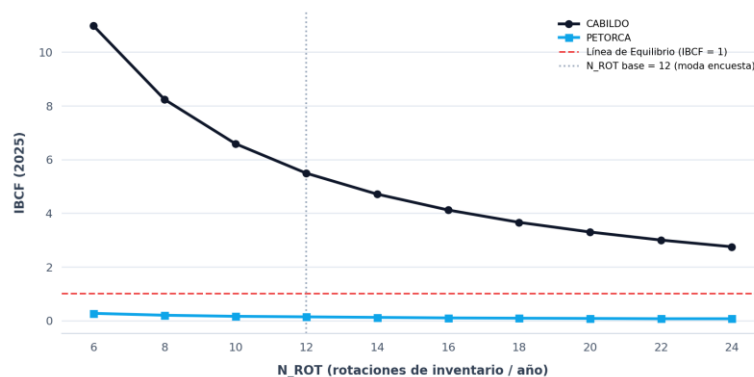
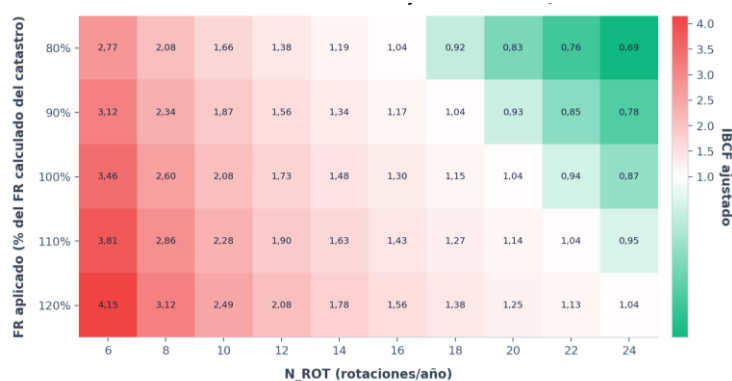


Figura 29: Sensibilidad combinada del IBCF, Cabildo 2025



De forma complementaria, se evaluó la sensibilidad del IBCF ajustado a variaciones simultáneas de N_{rot} y del Factor de Representatividad (FR), mediante una grilla combinada para la comuna de Cabildo. Cada celda de la matriz representa el valor de IBCF_ajust bajo una combinación específica de N_{rot} (eje horizontal, de 6 a 24 rotaciones anuales) y de porcentaje del FR calculado aplicado (eje vertical, de 80% a 120% del valor base), coloreada desde verde (por debajo del umbral de equilibrio) hasta rojo (por sobre el umbral), con blanco en el punto de equilibrio. En la gran mayoría de las combinaciones posibles de ambos parámetros, la celda correspondiente se mantiene en tonos rojos o naranjos, es decir, sobre el umbral de equilibrio, solo bajo una combinación simultánea de alta rotación ($N_{rot} > 20$) y FR reducido en 20% respecto del valor calculado, el IBCF_ajust se aproxima o cruza el umbral de equilibrio.

Hallazgo N°1. Cabildo presenta una brecha estructural agregada persistente entre la demanda de explosivo principal y la capacidad formal de almacenamiento, el IBCF ajustado se mantiene por sobre el umbral de equilibrio durante la totalidad del periodo 2020-2025 (promedio 2,08), y este resultado es robusto ante los tres escenarios oficiales de sensibilidad de N_{rot} evaluados, incluso en el escenario de mayor rotación posible la brecha no se cierra. La correlación entre el IBCF de Cabildo y la tendencia temporal ($r = -0,84$; $p = 0,04$) sugiere además una disminución progresiva de esta brecha en el tiempo, hallazgo respaldado de forma convergente por un segundo método no paramétrico (Mann-Kendall, $\tau = -0,73$; $p = 0,06$), aunque ninguno de los dos alcanza significancia formal tras la corrección por comparaciones múltiples. Petorca, en contraste, no presenta esta brecha a nivel agregado (IBCF ajustado promedio 0,07), lo que constituye el primer indicio.

Análisis 2: Brecha estructural por estado de faenas

El catastro de instalaciones mineras de SERNAGEOMIN contiene 3.039 registros. Tras la clasificación operacional descrita en la metodología, la distribución resultante por comuna es la siguiente:

Tabla 20: Distribución de instalaciones mineras por estado operacional y comuna (catastro 2026)

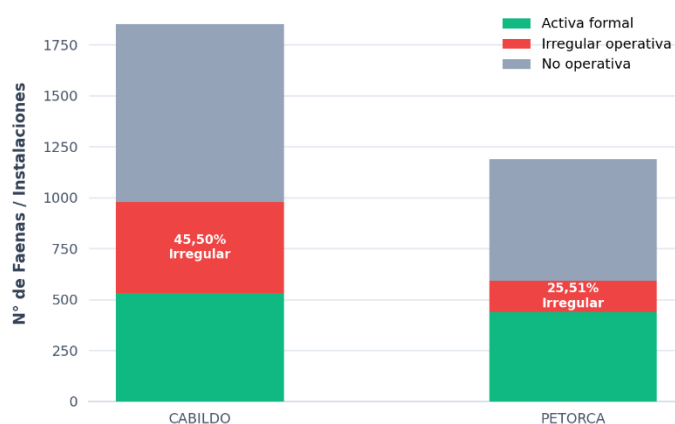
Comuna	Actividad formal	Irregular operativa	No operativa	Total
Cabildo	533	445	874	1.852
Petorca	441	151	595	1.187

A partir de esta distribución y de los polvorines vigentes en 2025, año más reciente con data completa, se calcularon los indicadores de brecha estructural y porcentaje de informalidad operativa definidos anteriormente.

Tabla 21: Indicadores de brecha estructural por comuna

Indicador	Cabildo	Petorca
Faenas operativas (activas + irregulares)	978	592
Polvorines vigentes (2025)	57	26
Ratio de brecha (faenas operativas/polvorin)	17,16	22,77
% de instalaciones en condición irregular operativa	45,50%	25,51%

Figura 30: Distribución de faenas según estado operacional



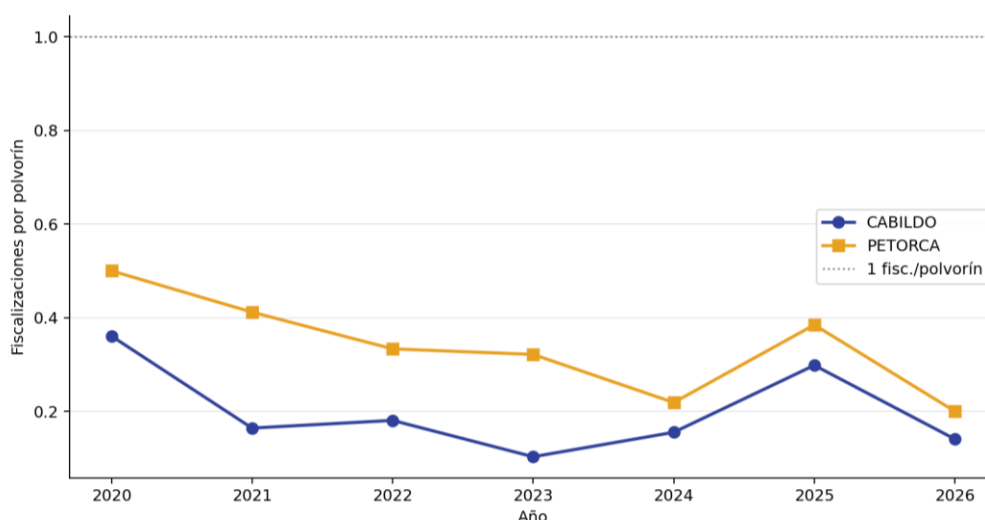
Análisis Complementario: Capacidad de fiscalización del Estado

Se obtuvo el ratio entre el número de fiscalizaciones realizadas y el número de polvorines vigentes para cada año y comuna, como indicador de la capacidad de control efectivo de la autoridad sobre el universo de instalaciones autorizadas.

Tabla 22: Ratio de fiscalización (fiscalizaciones / polvorines vigentes) por año y comuna

Año	Cabildo	Petorca
2020	0,36	0,50
2021	0,16	0,41
2022	0,18	0,33
2023	0,10	0,32
2024	0,16	0,22
2025	0,30	0,38

Figura 31: Ratio de fiscalizaciones vs tiempo



El indicador se mantiene en ambas comunas sustancialmente por debajo de 1 durante todo el periodo, lo que significa que en ningún año la autoridad fiscalizo la totalidad de los polvorines vigentes. El mínimo se observa en Cabildo año 2023, es decir, se fiscalizo aproximadamente 1 de cada 10 polvorines vigentes en dicho año.

Tabla 23: Resultado estadístico de faenas según estado operacional

Comparación	Cabildo	Petorca	z	p-valor	¿Diferencia significativa?
% instalaciones irregular operativa	45,50%	25,51%	7,91	p < 0,001	Si

La diferencia de % en instalaciones en condición irregular operativa entre comunas es estadísticamente significativa ($z = 7,91$; $p < 0,001$), Cabildo presenta una tasa significativamente mayor que Petorca, y esta diferencia no es atribuible al azar. Además, el ratio de brecha estructural evidencia que en ambas comunas resulta estructuralmente insuficiente para el universo completo de faenas operativas, incluyendo Petorca, donde el Hallazgo N°1 mostraba suficiencia agregada de capacidad.

Hallazgo N°2. El análisis de brecha estructural por estado operacional revela una segunda dimensión del problema que el Análisis 1 no captura por sí solo, el 45,50% de las instalaciones operativas de Cabildo y el 25,51% de las de Petorca se encuentran en condición de irregularidad operativa, diferencia que un test de dos proporciones confirma como estadísticamente significativa ($z = 7,91$; $p < 0,001$) y por tanto no atribuible al azar. Más relevante aún, el ratio de brecha estructural 17,16 faenas operativas por cada polvorín vigente en Cabildo, y 22,77 en Petorca demuestra que la infraestructura formal disponible es estructuralmente insuficiente para el universo completo de faenas operativas en ambas comunas, incluyendo Petorca, donde el Hallazgo N°1 mostraba suficiencia agregada de capacidad. Esta aparente contradicción es, en realidad, el hallazgo más importante de ambos análisis combinados, la brecha de Petorca no es de capacidad total, sino de acceso individual a esa capacidad un matiz que solo el corte transversal por faena, y no el índice agregado mensual, permite observar.

Análisis 3: Regresión exploratoria sobre encuesta

El Índice de Barrera Operacional (IBO) fue calculado de forma descriptiva para los 55 encuestados, según todas las variables codificadas.

Tabla 24: Resultados IBO

IBO	Valor
Promedio	47,82
Mín - Máx	2,67 – 135,00
Desv. Estándar	38,4

La alta variabilidad del IBO refleja la heterogeneidad real de las situaciones operacionales de los encuestados, algunos productores enfrentan combinaciones de barreras relativamente manejables (tramitación corta + baja complejidad + varios proveedores), mientras que otros acumulan barreras extremas en todas las dimensiones simultáneamente.

Modelo de regresión logística. Se ajustaron dos modelos uno restringido con solo las variables burocráticas (tiempo y complejidad de trámite), y un modelo completo considerando además un índice de mercado y costo. La comparación entre ambos permite cuantificar el poder explicativo adicional que aportan las variables de mercado y costo por sobre la dimensión puramente administrativa.

Tabla 25: Resultados modelos de regresión

Modelo	Variables incluidas	Pseudo R ² (McFadden)	p-valor
Restringido	t_tramite + Complejidad (dimensión burocrática únicamente sin combinar)	0,05	0,32
Completo	t_tramite + Complejidad + índice mercado/costo	0,11	0,15

Tabla 26: Resultados test estadístico

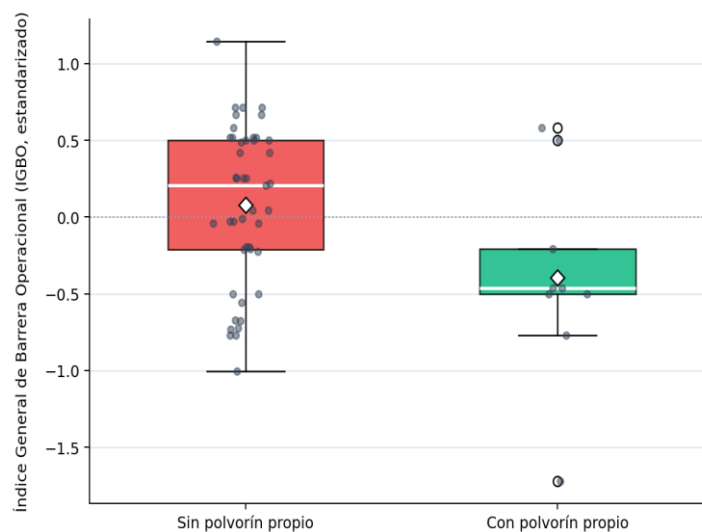
Modelo	Odds Ratio	IC 95%	p-valor	VIF
X1: Tiempo de tramitación	0,68	[0,32 - 1,42]	0,30	1,02
X2: Complejidad administrativa	0,88	[0,40 - 1,91]	0,74	1,06
Índice de barrera de mercado y costo	0,51	[0,23 – 1,17]	0,11	1,06

Test complementario Mann Whitney U sobre Índice general de barrera operacional (IGBO).

Tabla 27: Resultados IGBO

Grupo	Variables incluidas	IGBO promedio
Con polvorín propio	9	-0,39
Sin polvorín propio	46	0,08

Ilustración 32: Distribución del IGBO por grupo.



Con valores de $U = 281,50$ y $p = 0,07$, el grupo que cuenta con polvorín propio presenta, en promedio, un índice de barrera operacional más bajo que el grupo sin polvorín, indicando la dirección esperada por la hipótesis del estudio.

Hallazgo N°3. El análisis de regresión logística confirma, a nivel de productor individual, lo que los Hallazgos N°1 y N°2 muestran a nivel agregado y de infraestructura, solo el 16,36% de los encuestados con datos completos (9 de 55) cuenta actualmente con un polvorín propio autorizado y vigente. El modelo reducido de tres predictores construido resuelve la multicolinealidad severa, mostrando que el Índice de Barrera de Mercado y Costo es la variable con el efecto más cercano a la significancia estadística y en la dirección predicha por la hipótesis del estudio ($OR = 0,51$; $p = 0,11$), por cada desviación estándar de aumento en la percepción de barrera de mercado, la chance de contar con polvorín propio se reduce a aproximadamente la mitad.

Este resultado se ve reforzado por una segunda línea de evidencia independiente el test de Mann Whitney U sobre el Índice General de Barrera Operacional (IGBO), que confirma que el grupo con polvorín propio percibe, en promedio, un nivel de barrera operacional considerablemente más bajo que el grupo sin polvorín propio ($U = 281,50$; $p = 0,07$). Ninguno de estos dos resultados alcanza significancia formal al nivel convencional, una limitación esperable y honesta dado el reducido número de casos positivos disponibles, pero ambos apuntan de forma convergente en la misma dirección, aportando evidencia sugerente, no concluyente por sí sola, pero consistente con los dos análisis anteriores de que son las barreras de mercado y costo, más que las puramente burocráticas, las que mejor explican por qué el pequeño productor no logra formalizar su gestión de explosivos.

6.4 Análisis de mercado y benchmarking normativo

Caracterización de la cadena de suministro

La integración de los datos de compras con los resultados de encuesta permite caracterizar la cadena de suministro en la zona de estudio mediante los siguientes factores identificados:

- I. Concentración de proveedores: El 61,82% de los encuestados tiene solo un proveedor accesible y el 36,36% tiene dos. Esta concentración extrema es coherente con la estructura del mercado nacional de explosivos civiles, donde un número reducido de empresas autorizadas por DGMN concentra la distribución regional.
- II. Asimetría territorial de la demanda: Cabildo concentra entre 40 y 130 veces más volumen de compra anual que Petorca. Esto orienta la logística de los proveedores hacia Cabildo, pudiendo explicar los mayores tiempos de entrega percibidos.

- III. Costo de acceso creciente: El 52,73% de los encuestados percibe que el precio de los explosivos ha subido muy por encima de otros costos mineros, y el 94,54% combina un impacto moderado o crítico del costo normativo en su margen de utilidad.
- IV. Modalidad de traslado con déficit técnico: El 60,00% retira explosivo por cuenta propia, el 80,4% utiliza vehículos convencionales o con adaptaciones básicas, sin certificación DGMN/SERNAGEOMIN, lo que constituye un riesgo de seguridad adicional identificado en el análisis causal.

Benchmarking normativo

Tabla 28: Benchmarking normativo

Dimensión	Chile	Perú	Argentina
Diferenciación por escala	No diferenciada	Parcialmente diferenciada	Diferenciada
Almacenamiento comunitario	No contemplado	Sin evidencia normativa	Sin evidencia normativa
Ventanilla única	No existe	Si	Parcial
Vigencia de autorizaciones	Anual	Variable	Variable

Chile. No presenta diferenciación normativa por escala de operación, según la Guía G3 de SERNAGEOMIN y el Decreto Supremo N°72 (Reglamento de Seguridad Minera) aplican los mismos requisitos de almacenamiento y manipulación de explosivos a la gran, mediana y pequeña minería. No existe la figura de polvorín comunitario ni de ventanilla única entre DGMN, SERNAGEOMIN y Carabineros. La vigencia de autorizaciones (licencia de manipulador, autorización de polvorín) es fija en un año calendario (SERNAGEOMIN,2018).

Perú. La diferenciación por escala en Perú es parcial pero real, existe el Certificado de Operación Minera Excepcional (COME), un régimen especial de acceso a explosivos para mineros inscritos en el Registro Integral de Formalización Minera (REINFO) en proceso de formalización, que flexibiliza los requisitos frente al régimen general de SUCAMEC. Adicionalmente, el reglamento de la Ley N°27651 (D.S. N°013-2002-EM) instruye un tratamiento diferenciado en las tasas administrativas (TUPA) para el Pequeño Productor Minero y el Productor Minero Artesanal (CooperAcción, 2019).

En cuanto a ventanilla única, Perú sí cuenta con una plataforma digital unificada, "Sucamec en Línea" (SEL), que centraliza los tres trámites relevantes (adquisición y uso, manipulación, y almacenamiento de explosivos) bajo un expediente único con notificación electrónica, en operación desde 2020-2021 (SUCAMEC, 2021).

La vigencia de autorizaciones no es un valor único: la autorización de adquisición y uso tiene vigencia máxima de 1 año calendario; la autorización de manipulación, 3 años; y la autorización de almacenamiento, se otorga por un plazo máximo de 1 año, con casos excepcionales de hasta 5 años renovables (CMS, 2021).

Argentina. Presenta la diferenciación por escala más explícita de las tres. La Agencia Nacional de Materiales Controlados (ANMaC) reconoce una categoría normativa específica, el "Polvorín Tipo B (Pequeña Minera)", con un límite de hasta 50 kg de altos explosivos o 5.000 detonadores, además de un rubro separado de "pequeños usuarios de explosivos" (ANMac, 2025).

Respecto a ventanilla única, Argentina dispone de la plataforma nacional Trámites a Distancia (TAD), pero su implementación específica para trámites de explosivos ha sido progresiva (AICACYP, 2018).

La vigencia de autorizaciones no es un valor único, la inscripción anual de usuario de explosivos tiene vigencia de 1 año, mientras que la habilitación de polvorín tiene vigencia de 5 años según el caso (ANMaC, 2025).

6.5 Resultados de análisis causal

Diagrama de Ishikawa

El efecto analizado es: “El pequeño minero de Petorca-Cabildo opera con explosivos en condición irregular o informal”. Cada causa es validada o rechazada con evidencia del análisis estadístico.

Tabla 29: Desarrollo ítems Ishikawa

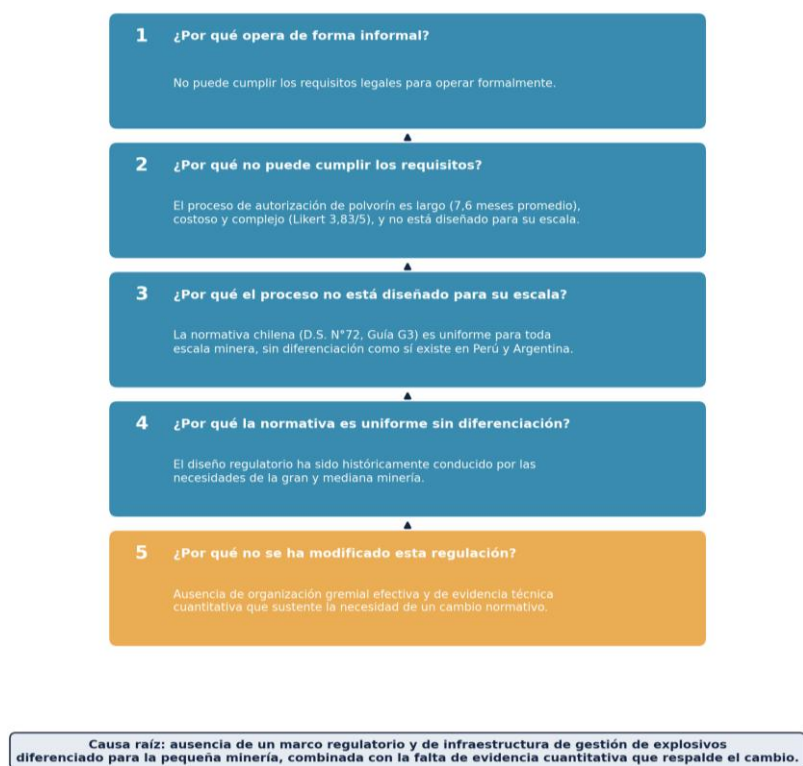
Categoría	Causa	Evidencia cuantitativa
Normativa	Exigencias uniformes para toda escala minera.	Benchmarking Chile sin diferenciación en comparación de Perú y Argentina.
Mercado	Concentración extrema de proveedores.	61,82% con solo 1 proveedor accesible (encuesta).
Infraestructura	Ratio de brecha, más de 17 faenas por polvorín vigente.	Ratio 17,2 en Cabildo y 22,8 en Petorca (Análisis 2)
Método/Gestión	Tramitación de polvorín dura entre 3 y 12 meses.	65,45% declara 7-12 meses y 36,5% declara 3-6 meses (encuesta)
Administrativo	Complejidad burocrática percibida como prohibitiva.	Likert promedio 3,85 de 5, 78.8% en niveles 4-5 (encuesta)
Institucional	Baja capacidad de fiscalización efectiva.	Ratio fiscalización <0,5 en todos los años (análisis complementario)
Económico	Impacto crítico o moderado del costo normativo en el margen.	94,54% califica el impacto como moderado o crítico (encuesta)

6.6 Análisis y aplicación de 5 ¿Por qué?

Se presenta la aplicación formal y sustentada con evidencia y resultados cuantitativos de las secciones anteriores, integrando directamente los hallazgos obtenidos, con el objetivo de robustecer la trazabilidad entre el dato empírico y la causa raíz identificada.

Tal como fue definido, “*El pequeño productor minero de las comunas de Petorca y Cabildo opera con explosivos en faenas de condición informal o irregular operativa*”, Por lo tanto, la figura 34 sintetiza la cadena causal iterativa, indicando en cada nivel la evidencia que la sustenta.

Figura 33: Aplicación de 5 ¿Por qué?



- I. Primer nivel: El 45,5% de las instalaciones operativas de Cabildo y el 25,5% de Petorca se encuentran en condición irregular.
- II. Segundo nivel: El 65,45% de los productores que tramita un polvorín reporta tiempos de 7 a 12 meses, y la complejidad administrativa percibida

alcanza una media de 3,85 sobre 5, con el 78,8% de las respuestas concentradas en la escala alta de 4 y 5.

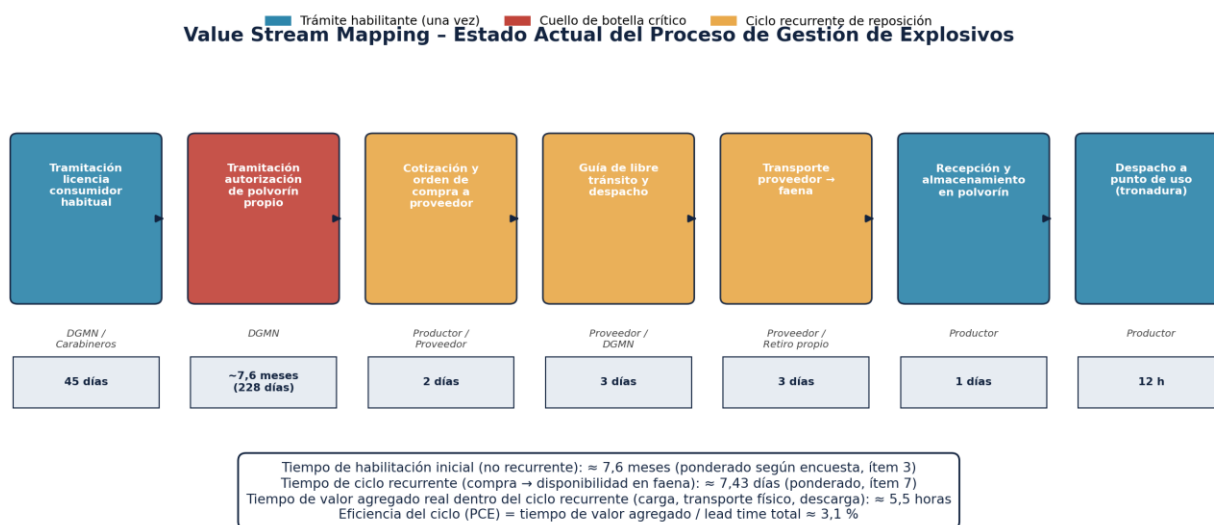
- III. Tercer nivel: Según el benchmarking en Argentina y Perú si existe una diferenciación real en los procedimientos según la escala productiva del minero, en cambio la normativa chilena no contempla efectivamente aquella diferenciación.
- IV. Cuarto nivel: Inferencia razonada a partir de la ausencia de dicha diferenciación, consistente con la lectura institucional descrita en el marco teórico respecto del origen histórico del marco regulatorio de explosivos, orientado preferentemente a las necesidades de la gran minería.
- V. Correspondiente a la causa raíz, se refuerza con un hallazgo adicional de la propia encuesta, al consultar a los productores por la medida que tentativamente reduciría la informalidad, la opción de mayor fiscalización y sanciones concentró la menor cantidad de menciones (9 de 82 menciones totales), mientras que la creación de polvorines comunitarios o estatales concentró la mayor proporción (32 menciones).

Este contraste es consistente con la hipótesis de que el problema no radica en un déficit de control, sino en la ausencia de una alternativa de infraestructura y organización adaptada a la escala del pequeño productor.

6.7 Value stream mapping (VSM) actual en la gestión de explosivos

Se construye este diagrama combinando el conocimiento normativo de los procesos, y los tiempos efectivos reportados por los productores encuestados. La figura 34 representa las siete etapas del flujo, distinguiendo entre el trámite habilitante (único y previo a la operación) y el ciclo recurrente de reposición (que se repite en cada compra de explosivo).

Figura 34: VSM del estado actual.



El tiempo de habilitación inicial se calculó ponderando las dos categorías declaradas en encuesta. Este tiempo es, con la información disponible, no recurrente, una vez habilitado el polvorín el productor no debe repetir este trámite dentro del periodo de vigencia anual, con un resultado de 7,66 meses.

El ciclo recurrente de reposición desde la orden de compra hasta la disponibilidad del explosivo en faena se calculó ponderando la variable del lead time en ciclo de reposición obtenida de la encuesta con un resultado de 7,43 días.

Para efectos de estimar la eficiencia del ciclo (Process Cycle Efficiency PCE), se estimó el tiempo de valor agregado real dentro de dicho ciclo correspondiente estrictamente a las actividades de carga, transporte físico y descarga, en aproximadamente

5,5 hrs, en base a la descripción normativa de estos procesos.

$$PCE = \frac{\text{tiempo valor agregado}}{\text{lead time total}} = \frac{5,5 \text{ hrs}}{7,43 \text{ días} * 24 \text{ hrs}} = 3,08\%$$

Es decir, aproximadamente el 97% del tiempo transcurrido entre la decisión de compra y la disponibilidad del explosivo en faena corresponde a esperas, trámites y coordinación logística sin generación directa de valor para el productor. Este hallazgo es coherente con los resultados del Análisis 3, donde el tiempo de disponibilidad tras la compra forma parte del Índice de Barrera de Mercado y Costo, la variable con el efecto más cercano a la significancia estadística sobre la probabilidad de contar con polvorín propio (OR = 0,51; p = 0,11) confirmando de forma cuantitativa que la duración del ciclo logístico es uno de los factores que mejor explican la barrera operacional percibida por el productor.

6.8 Síntesis integrada del análisis

La triangulación de las tres herramientas de excelencia operacional aplicadas, diagrama de Ishikawa, Análisis de los 5 Porqué (sección 5.6) y Value Stream Mapping, converge en una misma conclusión estructural, “la informalidad del pequeño productor minero de Cabildo y Petorca no es reducible a una única causa administrativa, sino que emerge de la interacción entre tres brechas simultáneas y mutuamente reforzantes”.

Tabla 30: Síntesis integrada

Brecha estructural	Evidencia cuantitativa	Herramienta que la identifico
Infraestructura formal insuficiente para la escala del universo operativo	Ratio de 17,2 (Cabildo) y 22,8 (Petorca) faenas operativas por cada polvorín vigente.	Análisis 2, Ishikawa
Ciclo logístico de reposición con baja eficiencia de valor agregado	PCE = 3,1%, Lead time ponderado 7,43 días.	VSM
Ausencia de diferenciación normativa por escala productiva	Chile sin diferenciación vs figuras de Perú y Argentina.	5 Porqué, Benchmarking

Esta síntesis constituye el puente directo hacia la fase de diseño de la propuesta resolutive, cualquier solución que intervenga una sola de estas tres dimensiones, por ejemplo, únicamente infraestructura, o únicamente digitalización del ciclo logístico dejaría intactas las otras dos brechas y, por tanto, no resolvería de manera integral la presión estructural hacia la informalidad.

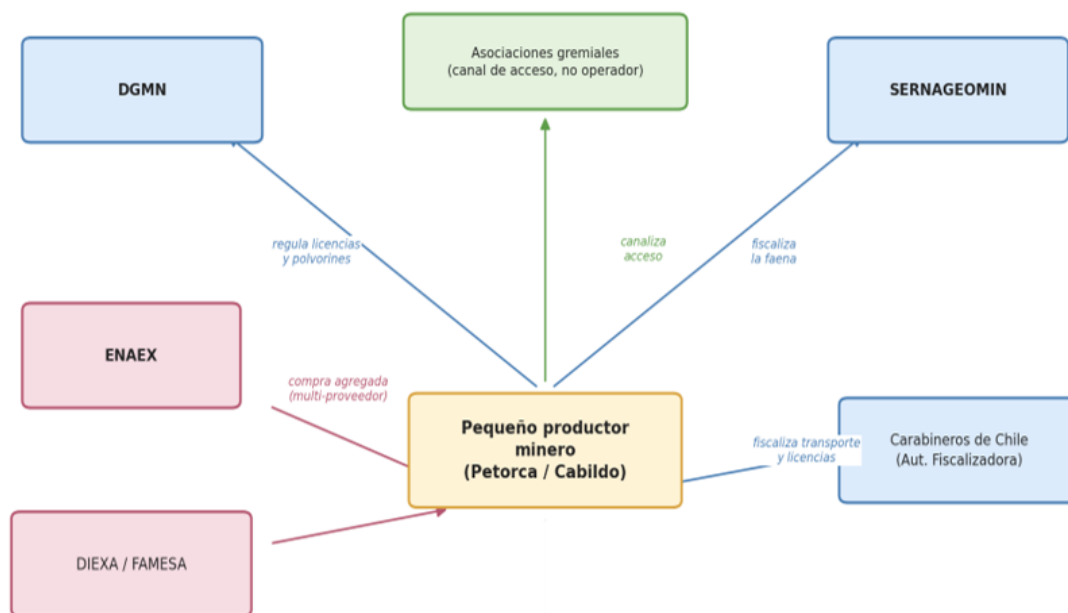
6.9 Aplicación Design Thinking: Empatizar, Definir e Idear

Habiendo obtenido y cuantificado los hallazgos de los modelos estadísticos, caracterización de encuesta y análisis causal, se procede a aplicar las tres primeras etapas del enfoque Design Thinking, con el fin de sintetizar el estudio en una alternativa de solución concreta.

Empatizar

Se integra la información recolectada a lo largo del diagnóstico desde la perspectiva de actores involucrados en la gestión de explosivos de la pequeña minería de Petorca y Cabildo. Identificando un mapa de actores y especificando su tipo de relación, regulatoria, comercial o gremial y de financiamiento que cada uno mantiene con el productor.

Figura 35: Mapa de actores, módulos de almacenamiento de explosivos



Del mapa se desprenden tres observaciones relevantes para el diseño de la propuesta. En primer lugar, el productor minero se relaciona de forma directa con al menos cuatro entidades distintas (DGMN, SERNAGEOMIN, Autoridad Fiscalizadora y proveedores), cada una con sus propios requisitos y tiempos, respaldando la complejidad administrativa percibida por los jefes de faena.

En segundo lugar, el mercado de proveedores no se limita a los dos actores históricamente dominantes en la zona (DIEXA y FAMESA), existen fabricantes como ENAEX siendo el de mayor escala a nivel nacional, pero no atiende directamente al segmento de pequeña minería dado que no resulta rentable la atención de volúmenes individuales pequeños, por lo tanto, aparece una vía de negociación como opción tentativa dado una propuesta de demanda agregada.

En tercer lugar, no existe actualmente ningún actor cuyo rol sea facilitar o intermediar estas relaciones, por lo que cada vinculo debe ser gestionado individualmente por él, lo que constituye un espacio de intervención que se busca ocupar.

Definir

Conociendo la síntesis anterior, se formula la declaración del problema que orienta el diseño resolutivo: *“El pequeño productor minero de Petorca y Cabildo necesita acceder a explosivos de forma legal, oportuna y económicamente viable bajo faenas operativamente regulares, pero el sistema actual impone barreras de infraestructura, costo y tiempo que hacen que la operación normal sea estructuralmente inviable para su escala de producción, empujándolo hacia la informalidad como única alternativa operacional en el corto plazo.”*

Esta declaración concentra los tres hallazgos cuantitativos más robustos: Brecha estructural de capacidad formal evidenciada por IBCF en Cabildo, ratio de faenas operativas por polvorín vigente superior a 17 en ambas comunas, variables de mercado y costo explican una porción sustancialmente mayor de la variabilidad de la barrera operacional percibida que las variables puramente burocráticas.

Idear

En base a la declaración del problema, se generaron nueve ideas de solución agrupadas en tres dimensiones ya declaradas en la sección metodología: Infraestructura, normativa y procedimental, mercado y logística.

Dimensión de infraestructura.

- I. Empresa privada de módulos de almacenamiento móvil: Una empresa externa a los productores adquiere módulos certificados de almacenamiento, bajo la figura normativa de “polvorín móvil” y los arrienda a productores, incluyendo la instalación y transporte de explosivo hasta faena.

- II. Polvorín comunitario mancomunado: Construcción de uno o más polvorines fijos de mayor capacidad, de propiedad y administración compartida entre varios productores agrupados a través de sus asociaciones gremiales quienes serán titulares ante DGMN.
- III. Nodos de almacenamiento: Red de varios puntos de almacenamiento de menor tamaño, ubicados estratégicamente en distintos sectores de la provincia, para acercar la infraestructura formal a los clústeres de faenas.

Dimensión normativa y procedimental.

- I. Ventanilla única digital: Plataforma única de tramitación que integre DGMN, SERNAGEOMIN y Autoridad Fiscalizadora de Carabineros, reduciendo la duplicidad de gestiones que hoy enfrenta el productor.
- II. Autorizaciones de mayor vigencia: Extensión del periodo de vigencia de las autorizaciones de polvorín y licencias, o simplificación de su proceso de renovación anual para la escala del pequeño productor.
- III. Licencia diferenciada para pequeña minería: Creación de una categoría normativa específica con requisitos ajustados a la escala productiva, en línea con el benchmarking normativo de Argentina.

Dimensión de mercado y logística.

- I. Consignación de explosivos con proveedor: Acuerdo comercial en el cual el proveedor mantiene stock consignado cerca de las faenas, reduciendo el capital inmovilizado del productor sin intervención de un tercer operador.
- II. Operador logístico especializado (solo transporte): Empresa que ofrece únicamente el servicio de traslado certificado de explosivo desde el punto de venta hasta la faena, sin intervenir en su almacenamiento.

- III. Acuerdos de suministro garantizado: Convenios marco entre asociaciones de productores y proveedores para asegurar condiciones de entrega y precio estables, sin cambios en la infraestructura de almacenamiento.

Criterios de priorización de ideas. Cada idea se evalúa en dos dimensiones, Impacto y esfuerzo, calculadas como el promedio simple de tres subcriterios por dimensión, en una escala de 1 a 5:

Tabla 31: Criterios y subcriterios de evaluación

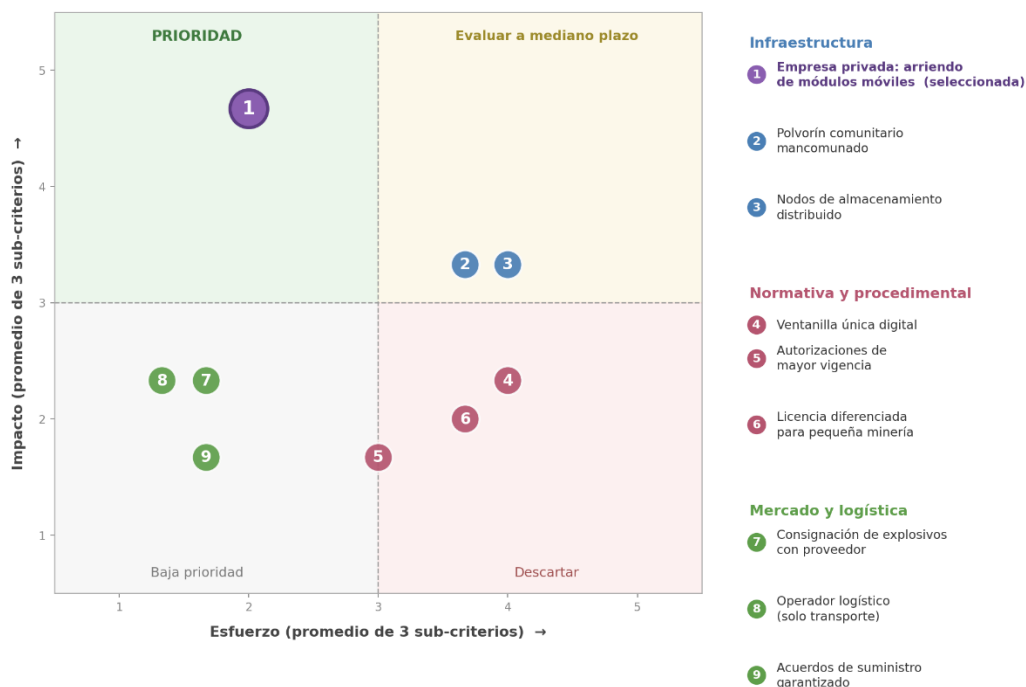
Dimensión	Subcriterio	Descripción
Impacto	Reducción de la barrera costo/inversión	El 94,2% de los encuestados califica el impacto del cumplimiento normativo en su margen de utilidad como moderado o crítico.
	Mejora en trazabilidad y formalización	Corresponde al objetivo general de la investigación.
	Adaptabilidad a la dispersión geográfica	Coherente con el enfoque centrado en el usuario propio de la metodología Design Thinking.
Esfuerzo	Complejidad normativa de implementación	Si requiere o no una nueva categoría regulatoria o cambio legal
	Inversión de capital requerida	Magnitud de la inversión necesaria para poner en marcha la idea
	Tiempo estimado de implementación	Plazo esperado hasta que la idea pueda comenzar a operar.

Tabla 32: Evaluación de ideas de solución

Criterio	Costo/ inversión	Trazabil idad	Dispersió n geográfica	Impacto (prom)	Complej idad normati va	Capital requerido	Tiempo implemen tación	Esfuerzo (prom)
Empresa privada en módulos de arriendo	5	4	5	4,7	2	2	2	2,0
Polvorín comunitario mancomuna do	4	3	3	3,3	3	4	4	3,7
Nodos de almacenami ento	3	3	4	3,3	4	4	4	4,0
Ventanilla única digital	2	4	1	2,3	5	2	5	4,0
Autorizacio nes de mayor vigencia	2	2	1	1,7	4	1	4	3,0
Licencia diferenciada pequeña minería	3	2	1	2,0	5	1	5	3,7
Consignaci ón con proveedor	3	2	2	2,3	2	1	2	1,7
Operador logístico	2	2	3	2,3	1	1	2	1,3
Acuerdos de suministro o garantizado	2	1	2	1,7	2	1	2	1,7

Estas nueve ideas se priorizaron mediante una matriz de Impacto-Esfuerzo, evaluando cada una según su impacto potencial esperado sobre la formalización del sector y su complejidad relativa de implementación.

Figura 36: Matriz de priorización Impacto-Esfuerzo



La idea N°1 se posiciona en el cuadrante de mayor prioridad, principalmente porque puede ampararse en la figura de “polvorín móvil” ya normada por la Guía G3 de SERNAGEOMIN, sin requerir la creación de una nueva categoría regulatoria, lo que se excede de las capacidades reales tanto del estudio como de un agente que intervenga esta área.

Evaluación y selección de alternativas. Las ideas 1, 2 y 7 se comparan formalmente como alternativas de solución completas mediante una matriz de evaluación ponderada (Weighted Sum Model).

Tabla 33: Pesos de criterios de evaluación

Criterio	Peso	Fundamento
Costo de inversión inicial para el productor	25%	El 94,2% de los encuestados califica el impacto del cumplimiento normativo en su margen de utilidad como moderado o crítico.
Impacto en formalización y trazabilidad	20%	Corresponde al objetivo general de la investigación.
Aceptación declarada por los productores	20%	Coherente con el enfoque centrado en el usuario propio de la metodología Design Thinking.
Escalabilidad y adaptabilidad geográfica	15%	El 65% de las faenas se concentra en un radio de dispersión de hasta 35 km.
Complejidad normativa de implementación	10%	Criterio de segundo orden frente al costo y la aceptación.
Riesgo operacional y de seguridad	10%	El 80,4% transporta explosivo sin certificación específica.

Tabla 34: Puntuación de ideas según peso

Criterio	Peso	Idea 1: Empresa privada (módulos)	Idea 2: Polvorín comunitario	Idea 7: Consignación con proveedor
Costo de inversión inicial para el productor	25%	5	3	4
Impacto en formalización y trazabilidad	20%	5	3	3
Aceptación declarada por los productores	20%	3	5	2
Escalabilidad y adaptabilidad geográfica	15%	5	2	3
Complejidad normativa de implementación	10%	4	2	3
Riesgo operacional y de seguridad	10%	4	3	4
Puntaje ponderado total		4,40	3,15	3,15

Se selecciona la idea n°1 “Empresa privada de módulos de almacenamiento de explosivos, con transporte e instalación en faena propio”, por obtener el puntaje ponderado más alto, concentrando su ventaja en costo de inversión, formalización/ trazabilidad y escalabilidad geográfica.

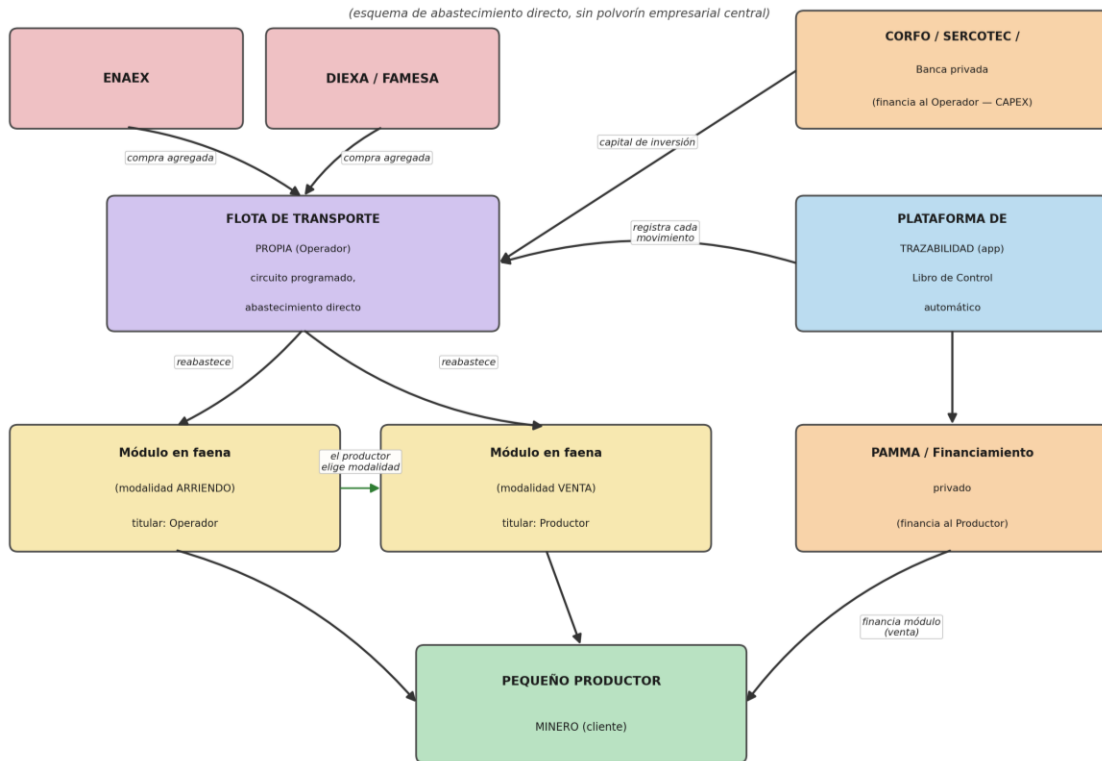
Proceso de refinamiento del diseño. La idea seleccionada fue sometida a un proceso iterativo de revisión crítica antes de fijarse en su forma final, identificando y corrigiendo limitaciones de diseño en cada iteración. La siguiente tabla documenta ese proceso, coherente con la naturaleza iterativa que Design Thinking reconoce explícitamente como parte del método y no como una debilidad final:

Tabla 35: Refinamiento del diseño de propuesta seleccionada

Iteración	Propuesta evaluada	Limitación detectada	Ajuste incorporado
1	Flota de polvorines móviles operada como servicio, con despacho de explosivo según consumo mensual del cliente o proyecto a desarrollar.	No se resolvía dónde queda almacenado el explosivo entre el despacho y su uso en faena, lo que podía derivar en almacenamiento no autorizado en el sitio.	Se distingue el vehículo de transporte de la caja de polvorín móvil una vez instalada (rige como instalación de almacenamiento autorizada bajo la Guía G3).
2	Modelo asociativo: polvorín comunitario operado por la propia asociación gremial, financiado con fondos públicos y privados (PAMMA/FNDR/ETC)	Riesgo de gobernanza, una asociación gremial no está estructurada institucionalmente para asumir titularidad DGMN y responsabilidad normativa asociada a explosivos, con riesgo de captura o uso indebido de fondos por parte de una dirigencia reducida.	Se retorna a una empresa privada especializada como titular única ante DGMN, la asociación gremial solo se mantiene como canal comercial de acceso a clientes, no como operador ni titular de activos.
3	La empresa fabrica sus propios módulos de almacenamiento (metalmecánica propia)	Excede el dominio de la propuesta, y si el módulo pasa a ser propiedad del productor, reintroduce parcialmente la titularidad DGMN individual que el modelo buscaba evitar.	La empresa compra módulos certificados a un proveedor metalmecánico externo especializado, y ofrece dos modalidades comerciales: arriendo (titularidad de resoluciones de la empresa) o venta (titularidad ante DGMN por parte del productor y financiable con PAMMA).
4	Tarifa única no desagregada	No trazable a costos reales de operación, no permite distinguir que componente del gasto del cliente es elegible como “equipamiento” ante un eventual financiamiento público.	Se desagrega la tarifa por ítem, habilitación de sitio, arriendo de módulo, transporte, gestión de trámites y elementos explosivos.
5	Empresa privada, polvorín empresarial propio, módulos en arriendo o venta, transporte propio, financiamiento dual (empresa vía CORFO/Sercotec, cliente vía PAMMA Individual).		Modelo prototipado y evaluado en el capítulo de propuesta resolutive.

La arquitectura operativa resultante de este proceso se presenta a continuación y se desarrolla en profundidad en el capítulo de “Propuesta Resolutiva”.

Figura 37: Arquitectura operativa del modelo de módulos de explosivo



Considerando en conjunto la totalidad de la evidencia desarrollada en este capítulo los tres análisis estadísticos, el diagrama de Ishikawa, el análisis de los 5 Porqué, el Value Stream Mapping y el benchmarking normativo internacional, es posible declarar la problemática validada de esta investigación: “La informalidad del pequeño productor minero de Petorca y Cabildo en el manejo de explosivos no es resultado de un déficit de fiscalización, según lo reportan los propios productores al calificar esa opción como la de menor utilidad percibida entre las medidas de solución, ni tampoco de una única causa administrativa aislada, sino que emerge de la interacción simultánea de tres brechas estructurales mutuamente reforzantes, una brecha de infraestructura formal estructuralmente insuficiente para el

universo de faenas operativas de ambas comunas; una brecha de eficiencia logística, evidenciada en un ciclo de reposición con una eficiencia de valor agregado de apenas 3,08%; y una brecha normativa de origen, consistente en la ausencia de una diferenciación regulatoria por escala productiva que sí existe, en distinta medida, en los marcos normativos de Perú y Argentina. El Hallazgo N°3, a nivel de productor individual, confirma que estas tres brechas se traducen en un resultado concreto y medible, menos de 2 de cada 10 productores encuestados cuenta con almacenamiento propio autorizado y vigente, independientemente de su comuna de origen. Esta problemática, validada por líneas de evidencia cuantitativas y cualitativas independientes entre sí, es la que fundamentará directamente el diseño del modelo de negocio a desarrollar, dando pie a una solución que no depende de mayor fiscalización estatal, sino que reduce el costo, el tiempo y la complejidad de acceso a infraestructura formal para el productor individual, sin requerir ni pretender modificar el marco normativo vigente ni los plazos de tramitación que exceden las atribuciones de un actor privado.

7. Propuesta resolutive

Finalizando el capítulo de Resultados, se desarrollaron las etapas iniciales de Design Thinking, seleccionando mediante una matriz de evaluación ponderada y un proceso de refinamiento iterativo, un modelo de empresa privada de módulos de almacenamiento de explosivos.

Este capítulo, detallara su estructura operativa, factibilidad normativa, mecanismos de financiamiento y evaluación económica, dimensionados para un plan piloto en las comunas de Cabildo -Petorca.

Para efectos de este capítulo, se denomina MODULEX SpA a la empresa que presta el servicio de módulos de almacenamiento de explosivos objeto de esta propuesta. MODULEX actúa como el operador del modelo, es la entidad que, dependiendo de la modalidad comercial elegida por el cliente, asume la titularidad DGMN del módulo de almacenamiento (modalidad de arriendo) o acompaña al productor en la tramitación de su propia titularidad (modalidad de venta). El pequeño minero que contrata el servicio se denomina productor a lo largo de este capítulo.

Misión MODULEX

Facilitar el acceso formal, seguro y trazable a infraestructura de almacenamiento de explosivos para el pequeño productor minero de Petorca y Cabildo, eliminando la barrera de capital y tiempo de tramitación que hoy impide su formalización, mediante un servicio de módulos certificados en arriendo o venta financiada, respaldado por compra agregada y trazabilidad digital.

Visión MODULEX

Ser el operador de referencia en gestión de almacenamiento de explosivos para la pequeña minería de la región de Valparaíso, y extender el modelo hacia otros rubros que comparten el mismo marco regulatorio (obras viales, construcción, canteras), consolidando un estándar de formalización accesible y escalable para consumidores habituales de explosivos de pequeña y mediana escala.

7.1 Descripción del modelo operativo

Declaración normativa MODULEX

La presente sección tiene por objeto respaldar jurídicamente la arquitectura operacional específica del modelo MODULEX propuesto, abarcando titularidad DGMN de los módulos, clasificación normativa, licencias y resoluciones que habilitan su operación, responsabilidades legales asociadas al despacho, inventario, almacenamiento y trazabilidad de los explosivos. Precizando cómo dicho marco habilita, punto por punto, la arquitectura operacional propuesta.

Clasificación normativa del módulo. Los módulos no fabrican, mezclan ni procesan explosivos, una vez instalado en la faena del productor permanece fijo durante todo el período de arriendo o hasta su eventual reasignación, sin operar como unidad móvil en tránsito continuo. En consecuencia, el módulo se clasifica y se inscribe como un almacén de explosivos (polvorín) relocalizable, sujeto a las disposiciones normativas sobre construcción, distancias de seguridad y funcionamiento de almacenes, y no a las disposiciones aplicables a camiones fábrica o plantas móviles.

Cuando el módulo cambia de ubicación ya sea por reasignación a un nuevo productor o por relocalización dentro de la misma faena dicho traslado se distingue en dos actos jurídicamente independientes:

- I. El transporte físico del contenedor vacío, que corresponde a un traslado de carga general sin naturaleza de explosivo.
- II. La habilitación del módulo en su nuevo emplazamiento exige una nueva evaluación de las distancias de seguridad y del plano de ubicación exigidos por reglamento, dado que DGMN autoriza la inscripción original asociada a una ubicación específica. Este acto no es instantáneo y debe incorporarse como plazo operativo dentro del proceso de puesta en marcha de cada nuevo cliente.

Base legal de la titularidad de un almacén de explosivos. Tanto personas naturales como jurídicas pueden solicitar la inscripción de un almacén de explosivos, obteniendo con ello el documento que las autoriza a almacenar productos explosivos en instalaciones diseñadas para dicho fin (ChileAtiende, s.f.-a). Esto sustenta, en primer lugar, que MODULEX, en su calidad de persona jurídica, puede constituirse como titular DGMN de un almacén de explosivos, en los mismos términos en que hoy lo hace cualquier consumidor habitual o empresa proveedora.

Entre los antecedentes requeridos, se encuentra el contrato de comodato o arriendo, u otro, en caso de no ser propietario del lugar de la faena (ChileAtiende, s.f.-a). Esta exigencia es la que permite, de forma directa, que el titular DGMN del almacén no coincida con el propietario del terreno donde este se emplaza. Además, se encuentra el requisito de inscripción como consumidor habitual, indicando mediante resolución de la dirección general la autorización en la construcción del polvorín, sea propio o facilitado por otro consumidor habitual ya inscrito (ChileAtiende, s.f.-b).

Custodia física y titularidad en modalidad de arriendo. Todo almacén de explosivos debe estar a cargo de una persona responsable que cumpla los requisitos de polvorinero, quien debe llevar el libro de existencias, y que la persona titular de la inscripción es la única autorizada para controlar el acceso al polvorín, cerrar dicho libro y responder ante la autoridad fiscalizadora. Dado que el circuito de abastecimiento de MODULEX opera en base a visitas periódicas y que el productor necesita retirar explosivo a diario para su operación minera, surge la problemática de los movimientos de inventario y control de acceso diario. Dejar la responsabilidad al productor para que se autoatienda a diario, sin que exista un acto formal que lo autorice a operar en representación del titular, tiene consecuencias que van desde la incautación del polvorín hasta la responsabilidad penal.

Por aquello se define la figura de encargado de polvorín delegado, en donde, cada faena bajo modalidad arriendo opera bajo la siguiente estructura:

- I. MODULEX emite un contrato de prestación de servicios (o un anexo al contrato de arriendo del módulo) mediante el cual designa al manipulador de explosivos del productor como encargado de polvorín delegado en esa faena, y comunica dicha designación a la autoridad fiscalizadora conforme al mecanismo de actuaciones delegadas (Dirección General de Movilización Nacional, 2007)
- II. El encargado delegado custodia las llaves del módulo actuando en representación de MODULEX (no a título propio) a diario, abre el polvorín, registra en el libro de existencias la salida de explosivo, firma el acta de custodia correspondiente a su propio retiro, realiza la tronadura, y cierra el libro al final de la jornada.

- III. Cada 15 días, cuando MODULEX realiza la visita de reabastecimiento programada, su personal ejecuta una auditoría de inventario, concilia el libro de existencias físico llenado por el encargado delegado contra el stock real dentro del módulo, deja constancia firmada de dicha conciliación, y carga el nuevo stock para el ciclo siguiente.
- IV. Ante una fiscalización de Carabineros, el polvorín se encuentra siendo operado por una persona formalmente autorizada por el titular de la inscripción (MODULEX), y no por un tercero no autorizado.

Resolución de habilitación del módulo. La inscripción de cada módulo como almacén de explosivos se formaliza mediante una resolución, previa presentación de la solicitud correspondiente ante la autoridad fiscalizadora, acompañada del documento que ampara la actividad (contrato de arriendo, comodato u otro), la relación de manipuladores de explosivos vigentes, y los antecedentes técnicos del polvorín, plano de ubicación con coordenadas UTM o geográficas, planos de planta y elevación, especificaciones constructivas (puertas, ventanas, techo, piso, muros, ventilación, instalación eléctrica, pararrayos, conexión a tierra, parapetos, custodia, sistema contra incendios) y el reglamento de seguridad sobre almacenamiento, transporte y manipulación de explosivos.

Aprobada la solicitud se inscribe al solicitante en el registro de consumidores habituales de explosivos, emitiéndose un certificado de inscripción anual. Esta inscripción anual, y no una autorización de vigencia indefinida, es la que MODULEX debe renovar periódicamente respecto de cada módulo bajo su titularidad.

Licencias de manipulador de explosivos. Esta licencia es estrictamente personal e intransferible, su exigencia recae sobre las personas naturales que efectivamente retiran, manipulan o custodian los explosivos, no sobre la persona jurídica titular del almacén.

- I. El productor (y sus trabajadores autorizados) que retiran explosivos desde el módulo para su uso en la faena, quienes deben mantener vigente su propia licencia de manipulador en ambas modalidades de arriendo o venta.
- II. Personal propio de MODULEX que interviene físicamente en la carga, descarga o custodia de explosivos durante el circuito de despacho quien debe mantener su propia licencia vigente de forma independiente.

Vehículos para el transporte de explosivos. El transporte de explosivos dentro de la faena minera requiere una resolución específica que autorice el o los vehículos empleados, completando un formulario de autorización de vehículos ante el reglamento de seguridad minera SERNAGEOMIN, padrón del vehículo, permiso de consumidor habitual de explosivos, revisión técnica al día, declaración jurada del dueño del vehículo y certificado de evaluación del sistema eléctrico.

Esta autorización recae sobre la flota dedicada al transporte de explosivos de MODULEX y debe tramitarse de forma independiente para cada faena en la que dicho vehículo circule, dado que el trámite está asociado a la autorización de ingreso al recinto fiscalizado por Sernageomin correspondiente a cada Productor. De forma complementaria a esta autorización vehicular, el uso y manejo de explosivos dentro de cada faena requiere una resolución de aprobación del reglamento de empleo de explosivos en faenas mineras, describiendo el método de explotación proyectado y que corresponde al productor mantener vigente, no a MODULEX.

Responsabilidades en el despacho. Cada movimiento físico de explosivos entre almacenes incluyendo el traspaso entre el punto de despacho del proveedor (ENAE, DIE, FAMESA) y el módulo del productor debe ampararse en una guía de libre tránsito con una vigencia de veinte días, y siempre que las cantidades solicitadas no sobrepasen la capacidad de almacenaje del polvorín de destino. Esta última condición de capacidad de almacenaje del polvorín de destino es la que ancla, en términos normativos, el límite de 535 kg por módulo, cada despacho debe ajustarse a esa capacidad remanente por cada ciclo de reabastecimiento.

Mientras el explosivo se encuentra en tránsito y a bordo del vehículo autorizado de MODULEX, la responsabilidad por su custodia y manejo recae en MODULEX, a través de su conductor-manipulador. Dicha responsabilidad se traspa al titular del almacén (o encargado de polvorín delegado) de destino en el momento de la recepción y registro del ingreso en el respectivo libro de existencias del módulo, lo que debe quedar reflejado como un procedimiento formal de recepción, y no como una entrega tácita.

Responsabilidades en inventario y almacenamiento. Todo almacén de explosivos esté a cargo de una persona responsable que cumpla los requisitos exigidos para polvorineros, quien debe llevar un "Libro de Existencias", registrado ante la autoridad fiscalizadora correspondiente, en el que se anota la recepción, entrega y devolución de explosivos para las faenas, dando prioridad en la entrega a aquellos explosivos que lleven más tiempo almacenados, es decir, un criterio de rotación FIFO exigido por norma.

En el modelo MODULEX, esta persona responsable corresponde, en la modalidad arriendo, a personal designado por MODULEX y en la modalidad venta, al propio productor u otra persona que este designe y que cumpla los requisitos reglamentarios.

Trazabilidad del sistema digital MODULEX. El sistema de trazabilidad digital del módulo (lectura QR/Rfid, sensores de temperatura, humedad y presión, cámara de seguridad) constituye una herramienta operativa de MODULEX que complementa, pero no reemplaza, el libro de existencias exigido, siendo el instrumento legalmente fiscalizable, por aquello aporta valor adicional en trazabilidad de consumo, alertas de capacidad, evidencia operativa frente al productor y a la propia empresa, pero toda entrada y salida registrada digitalmente debe reflejarse también en el libro de existencias físico y oficial del módulo.

Diferencias entre modalidad arriendo y venta.

Tabla 36: Distinciones entre modalidades comerciales.

Ítem	Arriendo	Venta
Inscripción de módulo	Modulex inscribe el módulo como almacén de explosivos a su propio nombre, acompañando el contrato de arriendo o comodato suscrito con el productor respecto del terreno donde el módulo se instalará.	Productor pasa a ser propietario del activo físico y debe solicitar la inscripción del módulo como almacén de explosivos a su propio nombre, acreditando la propiedad del módulo, documento de compraventa emitido por MODULEX.
Responsabilidad legal de titularidad	Modulex mantiene el Libro de Registro de Movimientos, cumplimiento de las condiciones constructivas y respuesta ante las Autoridades Fiscalizadoras en las fiscalizaciones correspondientes al módulo.	Modulex no conserva titularidad ni responsabilidad legal sobre el almacén.
Término del servicio	El módulo puede ser retirado o reasignado por MODULEX a otro productor terminada o anulada la relación comercial.	

Mecanismo administrativo de traspaso. Cuando un módulo transita desde la modalidad arriendo hacia la modalidad venta para un mismo productor, corresponde tramitar una nueva inscripción a nombre del productor, cancelando o modificando la inscripción previa a nombre de MODULEX y designación del encargado de polvorín delegado.

Se trata de un trámite administrativo adicional, con plazos propios de la autoridad fiscalizadora, que debe ser considerado como parte del proceso comercial de venta y no como una gestión instantánea.

Arquitectura operativa y modificaciones frente al esquema tradicional

El abastecimiento opera bajo un esquema de cross-docking, los proveedores/fabricantes directos de explosivos despachan directamente hacia la flota de transporte propia de MODULEX, la cual los traslada, conforme al circuito programado a los módulos instalados en la faena de cada productor.

Tabla 37: Comparación del nuevo modelo respecto a esquemas tradicionales

Elemento	¿Cambia respecto del esquema tradicional?	Explicación
Plazo legal de tramitación DGMN de una autorización nueva	No cambia	Sigue sujeto a los mismos tiempos oficiales establecidos.
Disponibilidad de infraestructura una vez cumplidos los requisitos del productor	Si cambia	El operador ya cuenta con módulos certificados y resoluciones tipo listas para asignar, evitando que cada productor deba diseñar, cotizar y tramitar su propio polvorín individual desde cero.
Titularidad DGMN del modulo	Depende de la modalidad	En arriendo, la titularidad permanece en el operador, en venta se transfiere al productor.
Exclusividad del uso del modulo	No cambia respecto de un polvorín móvil individual	Un módulo sigue siendo de uso exclusivo, no se introduce un esquema de uso compartido.

Diseño del módulo de almacenamiento

El módulo se construye sobre la base de un contenedor marítimo de 20 pies adaptado a los requisitos técnicos del Decreto Supremo N°72 (ventilación, blindaje interior, puesta a tierra, cerraduras certificadas). Se incorpora un diseño plegable, el módulo se transporta y almacena en configuración plana (una sola pared desplegable), y se despliega a su volumen operativo completo en el momento de la instalación en faena.

Esta característica de diseño aporta dos beneficios operativos directos al modelo. Primero, permite transportar más de un módulo por viaje de la flota, reduciendo el costo logístico de la fase de instalación de nuevos clientes, mientras que, segundo, reduce el espacio de acopio requerido antes de la instalación, lo que es especialmente relevante bajo el esquema de abastecimiento.

Dimensionamiento del piloto

El piloto se dimensiona mediante un modelo de optimización para encontrar los clientes mínimos que generan viabilidad económica, distribuidos posteriormente según la optimización entre modalidades arriendo/venta en cada año del horizonte de evaluación. De esta forma se evita segregar, designar arbitrariamente y concentrar el piloto en una sola modalidad, dando espacio a los clientes en arriendo que permiten validar operativamente esa modalidad, mientras que los en venta validan el mecanismo de financiamiento PAMMA u otro como vía de crecimiento capital-eficiente.

Tabla 38: Dimensionamiento del piloto

Parámetro	Valor	Justificación
Nº de módulos en el piloto año 1	Modelo 1 Modelo 2	Por definir en sección posterior.
Capacidad por módulo	535 kg	Punto medio del rango DGMN 70-1000 kg, mismo valor utilizado en la construcción de IBCF, por coherencia interna.
Cientes objetivo del piloto	55 productores	Relación conservadora para construcción del piloto, utilizando respuestas de encuesta como productores realmente afectados e interesados en la propuesta resolutive. (Clientes potenciales)
Consumo promedio asumido por cliente	200 kg/mes	Punto medio del rango 100-300 kg/mes.
Frecuencia de circuito de reabastecimiento	Quincenal / Mensual	Coherente con el patrón de compra conservador declarado en la encuesta. (Se utilizará quincenal en ev. Económica)
Universo potencial de escalamiento	110 productores	Universo gremial declarado.

Cadena de abastecimiento

La cadena de abastecimiento descrita a continuación es común a ambas modalidades comerciales (arriendo y venta), independientemente de quién sea el titular DGMN del módulo específico una vez instalado en la faena, la gestión de compra, transporte y recepción del explosivo hasta el punto de despacho es siempre responsabilidad exclusiva de MODULEX, lo que constituye precisamente el valor central de la propuesta el productor minero nunca gestiona directamente con el fabricante ni asume la logística de transporte, sin importar si es arrendatario o propietario de su módulo.

Se negocia compra agregada con los fabricantes y distribuidores disponibles en el mercado nacional (ENAEX, DIEXA, FAMESA u otros actores, incluyendo fabricantes en expansión o de reciente entrada al mercado), priorizando en cada período las mejores condiciones comerciales de precio, plazo de entrega y confiabilidad de suministro. La agregación de demanda de múltiples clientes permite alcanzar una escala de volumen que ningún productor individual logra por sí solo, lo que en particular habilita el acceso a fabricantes de mayor escala como ENAEX hoy enfocados en la gran minería y sin atención directa al segmento de pequeña minería, por no resultarles rentable en volúmenes individuales sin que esto implique una dependencia exclusiva ni contractual con dicho fabricante. El explosivo se compra agregada y despacha según listado de reposición mediante la flota propia certificada de la empresa distribuyendo hacia los módulos mediante un circuito programado. MODULEX no mantiene un polvorín empresarial central propio, esquema de abastecimiento directo o Cross Docking.

7.2 Estructura de costos y tarifa desagregada

Financiamiento de flota mediante leasing

La flota de MODULEX representa una de las grandes inversiones en activos prioritarios para la operación de la empresa, para el piloto propuesto se optó por el financiamiento mediante leasing financiero, con un pie de 20% del valor de cada vehículo y el saldo pagadero en 36 cuotas mensuales, mecanismo estándar del mercado financiero chileno para bienes de capital de esta naturaleza, permitiendo reducir la inversión inicial de la empresa.

Tabla 39: Financiamiento de flota vehicular de MODULEX

Vehículo	Valor total	Pie (20%)	Monto financiado	Cuota mensual (36 meses)
Camioneta doble cabina 4x4 diésel certificado	\$20.500.000	\$4.100.000	\$16.400.000	\$544.715
Camión $\frac{3}{4}$ 4x4 certificado para transporte de explosivo	\$24.515.000	\$4.903.000	\$19.612.000	\$651.399
Camión $\frac{3}{4}$ 4x4 con pluma hidráulica	\$33.320.000	\$6.664.000	\$26.656.000	\$885.361
Total flota	\$78.335.000	\$15.667.000	\$62.668.000	\$2.081.474

CAPEX – Inversión inicial al año 0

Tabla 40: Estructura de CAPEX inicial

Ítem	Monto anual	Justificación
Contenedor 20 pies (oficinas)	\$1.500.000	Valores de mercado de container marítimo bruto sin adaptaciones.
Habilitación de oficinas y baño	\$1.000.000	Estimación de costos de aislación, tabiquería, instalación eléctrica y baño.
Computador, impresora e internet	\$600.000	Equipamiento informático mínimo para oficina administrativa de la operación.
Pie de leasing flota	\$15.667.000	Corresponde al 20% del valor total de la flota de vehículos.
Constitución legal, patentes, asesorías y tramites	\$2.000.000	Considera trámites estándar de constitución de SpA, asesoría legal, patente municipal, trámites DGMN.
Módulos en modalidad de arriendo	Variable	Composición de módulo y adaptación técnica de habilitación.

OPEX – Gastos operativos

Tabla 41: Estructura de OPEX en horizonte piloto

Ítem	Monto mensual	Justificación
Jefatura operaciones / administrador	\$1.800.000	Remuneración mensual bruta para un administrador general de MODULEX.
Conductor / manipulador (2)	\$1.300.000	Remuneración mensual bruta del conductor habilitado para transporte y manipulación de explosivos.
Pioneta manipulador	\$900.000	Remuneración mensual bruta del ayudante asistente al conductor/manipulador.
Arriendo terreno de operaciones	\$250.000	Media de arriendos mensuales, terrenos 5000 m ² con factibilidad de agua y luz en las comunas de estudio.
Internet	\$30.000	Plan de conexión a internet de la base de operaciones MODULEX.
Seguros (RC general, RC carga peligrosa, SOAP)	\$1.100.000	Corresponde a la estimación de suma de primas mensuales de pólizas necesarias, sujeto a cotización con corredora de seguros especializada.
EPP	\$100.000	Reposición periódica de equipos de protección personal.
Mantenimiento de flota	\$600.000	Mantenimiento preventivo de la flota, cambios de aceite, filtros, neumáticos, grasa, entre otros.
Gastos administrativos	\$300.000	Corresponde a gastos generales de operación, insumos de oficina, aseo, imprevistos.
Software de gestión interna	\$80.000	Suscripción mensual a una plataforma de gestión empresarial básica que integra contabilidad y gestión de clientes.
Combustible flota	\$500.000	Combustible promedio necesario para la flota de la operación.
Gestión DGMN	\$12.000	Gestión de renovación de polvorines en modalidad de arriendo. (Variable)
Total OPEX fijo	\$8.260.000	

Habilitación de módulo en faena

Tabla 42: Estructura de costos de habilitación de módulo en faena

Ítem	Costo	Fuente
Cierre perimetral (1 rollo malla bizcocho 1,80x25m)	\$68.600	Precio de mercado de un rollo con las características descritas.
Postes de madera para cerco (8)	\$80.000	Costo de 8 postes de madera impregnada, que sostiene el cierre perimetral.
Anclaje antivuelco para módulo	\$80.000	Pernos de anclaje y placas base para la estabilidad estructural del módulo en condiciones extremas.
Antena de descarga eléctrica	\$150.000	Instalación de jabalina de cobre y conexión de puesta a tierra, exigencia estándar para el almacenamiento de explosivo.
Extintores (2)	\$90.000	Extintores de incendio aptos para instalaciones de esta naturaleza. (Polvo químico)
Señalética normativa	\$60.000	Conjunto de letreros normativos exigidos por DGMN y SERNAGEOMIN.
Mano de obra instalación	\$150.000	Pago de cuadrilla 3 instaladores de módulos (no dotación fija), estimado según especialistas de montaje en la zona.
Total habilitación	\$678.600	

Componentes del módulo instalado

Tabla 43: Estructura de costos por módulo instalado

Ítem	Costo	Fuente
Contenedor de 10 pies (obtenido a partir de división de contenedores 20 pies)	\$1.011.500	Media de arriendos, terrenos 500 m ² con factibilidad de agua y luz en las comunas de estudio.
Adaptación técnica normativa (ventilación, blindaje, cerraduras, plegado)	\$1.350.000	Tarifa de taller metalmecánico para adaptaciones.
Kit de trazabilidad digital (IoT)	\$400.000	Dentro de los rangos de transporte en km de las comunas.
Instalación normativa en faena	\$678.600	Valores de mercado de dispositivos digitales IoT.
Total por módulo instalado	\$3.440.100	

Tarifa e ingresos por cliente

Tabla 44: Estructura de ingresos del servicio

Item	Tipo	Monto estimado	Justificación
Habilitación inicial de sitio en faena (cercado perimetral, señalética, registro DGMN y resolución de polvorín móvil, transporte de módulo).	Cargo único fijo, por cliente nuevo.	\$1.050.000	Construcción a partir de costo real de instalación y transporte a faena, más un margen operacional que cubre la gestión administrativa (obligatorio para venta o arriendo de módulos en piloto).
Arriendo de módulo	Fijo mensual.	\$250.000	Tarifa mensual ajustada que MODULEX cobra al productor por el arriendo del módulo.
Valor venta de módulo	Cargo único.	\$6.000.000	Corresponde al precio de venta del módulo el cual se ajusta a métodos de financiamiento como PAMMA.
Servicio de transporte y circuito programado	Por despacho.	\$50.000	Cobro por cada despacho de explosivo realizado por la flota de MODULEX.
Gestión de trámites	Fijo mensual.	\$20.000	Corresponde al tramites asociados a la operación del módulo, como guías de libre tránsito, autorizaciones, etc.
Precio de venta del explosivo al productor	Variable por kg.	\$400	Precio al que MODULEX vende el kg de explosivo, referenciado respecto a precio de mercado y compra agregada alcanzada.
Precio de compra agregada del explosivo MODULEX	Variable por kg.	\$320	Precio al que MODULEX compra el kg de explosivo, referenciado respecto a precio de mercado y compra agregada alcanzada.
Comisión de MODULEX sobre el explosivo	Variable por kg.	\$80	Diferencia entre precio de venta y compra por cada kg intermediado.

En la modalidad de venta, el cliente no paga ítem de arriendo del módulo, pero si adquiere el módulo como activo (financiable vía PAMMA o privado), manteniendo contratados el resto de los ítems como servicios complementarios.

Seguros exigibles para un operador de polvorines móviles y prestación de servicios

Existen dos frentes de exigencia aplicables al modelo propuesto y que deben respetarse a detalle.

- I. Guía de libre tránsito y transporte de carga peligrosa: Este tipo de operación exige contratar un seguro de responsabilidad civil por transporte de carga peligrosa, que cubre daños a terceros derivados de un siniestro durante traslado, aplicable a vehículos y personal autorizado a dicho transporte.
- II. Responsabilidad civil de la instalación de almacenamiento (polvorín): La empresa al ser titular ante DGMN en el caso de arriendo, es una práctica de mercado estándar, por lo tanto, es habitual de las aseguradoras y eventuales socios comerciales o financieros contar con una póliza de responsabilidad civil general que cubra daños a personas y bienes de terceros originados en la actividad de almacenamiento.
- III. Seguros de vehículo y dotación: Seguro obligatorio de accidentes personales (SOAP), seguro de atención médica, entre otros.

7.3 Mecanismo de incentivo a la formalización

El acceso al servicio se condiciona a que el productor mantenga vigente su licencia de manipulador, o esté en proceso activo a tramitarla con acompañamiento del operador (orientación documental, agenda de horas), sin que esto implique que el operador pueda acelerar el tiempo real de tramitación de DGMN/Carabineros, que escapa de su control. Esta condición sigue el principio, documentado en estrategias internacionales de formalización de minería artesanal, de usar el acceso a explosivos como palanca de formalización antes que depender únicamente de la fiscalización (Ministerio de minas y petróleo de Afganistán, 2018)

7.4 Trazabilidad del diseño respecto del diagnóstico

Cada característica de diseño del modelo es trazable a un hallazgo específico del diagnóstico cuantitativo y cualitativo desarrollado anteriormente y no a una inferencia estadística directa, distinción que se mantiene deliberadamente clara:

Tabla 45: Trazabilidad del diseño respecto del diagnóstico

Hallazgo del diagnóstico	Estado de resolución	Característica del diseño que responde
Costo de inversión, es la barrera de mayor peso (94,54% declara un impacto crítico/moderado)	Resuelto	Modalidad arriendo elimina el CAPEX del productor.
61,82% depende de un único proveedor accesible	Resuelto	Compra agregada multi-proveedor.
Ratio de 17-22 faenas operativas por polvorín vigente.	Parcialmente resuelto	El piloto agrega 20 puntos formales de almacenamiento, su efecto sobre el ratio a escala completa depende del existo del escalamiento posterior.
Brecha IBCF persistente en Cabildo	Parcialmente resuelto	El modelo reduce la brecha proporcionalmente al número de módulos desplegados, no se puede afirmar que la cierra por completo sin recalcular el IBCF con datos post-implementación.
80,4% transporta sin certificación específica	Resuelto	Vehículos y conductores certificados desde el diseño
Ausencia de trazabilidad	Resuelto	Plataforma de trazabilidad integrada, Libro de control automatizado y declarado a la autoridad fiscalizadora.
Complejidad administrativa percibida (3,85 / 5)	Parcialmente resuelto	Se reduce la carga percibida por el productor, no se reduce el tiempo real de tramitación DGMN que esta fuera del control del modelo.

Sistema digital de trazabilidad del módulo

Cada módulo de almacenamiento incorpora un sistema digital cuyo propósito es dar cumplimiento automatizado al Libro de Control de Explosivos exigido por SERNAGEOMIN, y mantener las condiciones de almacenamiento dentro de los rangos que la normativa establece para evitar la degradación del explosivo.

- I. Registro de movimientos: Un lector/escáner registra cada entrada y salida de unidades explosivas del módulo, identificando cantidad, fecha, hora y responsable habilitado que realiza el retiro.

- II. Sensores ambientales y de seguridad: Sensores de temperatura, humedad y presión, además de una cámara de seguridad monitorean de forma continua las condiciones internas del módulo, generando alertas automáticas cuando alguno de los parámetros salga de rango.
- III. Llenado automático del Libro de Control: Cada movimiento registrado por el escáner alimenta automáticamente el Libro de Control en formato digital, reduciendo el error de registro manual identificado en el marco teórico como una de las causas de incumplimiento normativo.
- IV. Nivel de acceso diferenciado: El panel de visualización de inventario, cámaras de seguridad y condiciones ambientales es visible para el titular del módulo específico.

El valor agregado de este sistema no es únicamente el cumplimiento normativo, sino que se conecta directamente con el hallazgo del análisis 3 sobre ausencia de trazabilidad como causa raíz y con la brecha de "desaprovechamiento de insumos por falta de control de inventario" citada (Perquilaf, 2017). Al automatizar el registro, el sistema no solo facilita la fiscalización, sino que entrega al propio productor una herramienta de planificación de consumo que hoy no existe en el flujo tradicional.

Estándares de orden y manejo interno del módulo (5S)

Tabla 46: Aplicación de 5S a propuesta piloto

Principio	Aplicación en MODULEX	Responsable
Seiri (Clasificar)	Separación física de explosivo principal y accesorios en compartimientos distintos dentro del módulo de 10 pies, conforme a las categorías de compatibilidad de almacenamiento conjunto.	Conductor / manipulador
Seiton (Ordenar)	Ubicación fija y señalizada para cada categoría de producto dentro del módulo, replicada de forma idéntica por cualquier conductor/manipulador.	Jefe de polvorín/administrador, en el diseño del layout

Seiso (Limpieza y condiciones ambientales)	Inspección visual de ausencia de humedad, corrosión o contaminantes en cada visita del circuito de reabastecimiento, complementada con el análisis de sensores automáticos del módulo.	Conductor / manipulador
Seiketsu (Estandarizar)	Procedimiento escrito único de ingreso, despacho y control de stock, aplicado igual en modalidad de venta o arriendo.	MODULEX (procedimiento corporativo), aplicado por el titular
Shitsuke (Disciplina)	Auditoría de cumplimiento incorporada a la misma visita de circuito que hace el conductor/manipulador.	Conductor / manipulador y administrador

Es fundamental destacar que la metodología 5S no se propone en esta investigación como una auditoría conductual externa para el pequeño productor, sino como el estándar operativo basal que vendrá integrado por diseño en la infraestructura de los polvorines móviles inteligentes. Al garantizar que el módulo móvil obligue a un almacenamiento segregado e incorpore sensores automatizados para el control continuo de las condiciones ambientales, el cumplimiento normativo exigido por la DGMN deja de ser una pesada carga administrativa y se convierte en un atributo integral del servicio.

7.5 Estrategia de entrada al mercado y marketing

En la fase de piloto inicial, no se incurrirá en gastos directos respecto a la entrada al mercado, se utilizarán herramientas que ya se poseen y la presentación de proyecto a organismos como SERNAGEOMIN para incluir la propuesta en bases PAMMA y créditos de reactivación para la pequeña minería.

Canal principal. El canal primario de captación son las asociaciones gremiales de pequeños productores de las comunas Petorca-Cabildo, dando a conocer el modelo en instancias establecidas de reunión con sus asociados, lo que impulsará el conocimiento transversal hacia otros entes.

Tácticas de lanzamiento.

- I. Jornada demostrativa en terreno con modulo piloto visitable y sistema digital en funcionamiento.
- II. Primer cliente ancla: Condiciones preferentes para 1 o 2 productores con alta visibilidad gremial o influencias.
- III. Programa de referidos: Descuento en la tarifa de gestión para quien refiera un cliente que se incorpore efectivamente.
- IV. Presencia informativa en el punto de trámite DGMN/SERNAGEOMIN.

7.6 Mecanismo de financiamiento

Financiamiento del Operador (MODULEX)

La flota de transporte, plataforma tecnológica y la dotación de personal son responsabilidad financiera exclusiva del operador, mediante capital propio y/o los siguientes instrumentos dirigidos a empresas, no a productores mineros.

Tabla 47: Instrumentos de financiamiento para Modulex

Instrumento	Monto máximo	Requisitos clave	Fuente
CORFO Semilla Inicia	\$15.000.000 - \$17.000.000	Persona natural o jurídica constituida en Chile, con menos de 18 de meses de iniciación de actividades y sin ventas previas.	Corporación de Fomento de la Producción [CORFO]. (s.f.). <i>Semilla Inicia</i> . Recuperado el 30 de julio de 2026 de https://www.corfo.cl/sites/cpp/inf/semilla-inicia
CORFO Semilla Expande	\$45.000.000 - \$51.000.000	Persona jurídica con menos de 36 meses de iniciación de actividades y ventas entre \$100.000 y \$60.000.000 en los últimos 12 meses.	Cómo Postular. (2026). <i>Cómo postular a Semilla Expande Corfo 2026</i> . Recuperado el 30 de julio de 2026 de https://comopostular.cl/como-postular-semilla-expande-corfo/
Sercotec (líneas de fomento a empresas)	Variable según convocatoria	Micro y pequeña empresa formalizada.	Servicio de Cooperación Técnica [Sercotec]. (s.f.). Recuperado el 30 de julio de 2026 de https://www.sercotec.cl
Créditos y capital privado	Variable	Persona natural o jurídica que cumpla requisitos de la entidad financiera. O cambio a participación societaria.	Organismos financieros

Financiamiento del cliente (productor)

Cada productor puede optar individualmente a las alternativas de mercado:

Tabla 48: Instrumentos de financiamiento para el productor/cliente

Línea	Monto máximo	Requisitos clave
PAMMA Equipa	\$6.000.000, sin cofinanciamiento	Persona natural o jurídica con permisos de explotación o autorizaciones vigentes, categoría C o D del Atlas minero SERNAGEOMIN.
PAMMA Desarrolla	\$12.000.000, con cofinanciamiento mínimo del 10% del beneficiario.	Persona natural o jurídica con permisos de explotación o autorizaciones vigentes, categoría C o D del Atlas minero SERNAGEOMIN.
Créditos de consumo, privados o recursos propios	Variable	Sujeto a evaluación crediticia o de capital individual.

7.7 Business Model Canvas

Tabla 49: Business Model Canvas

SOCIOS CLAVE • ENAEX, DIEXA, FAMESA u otros fabricantes (según mejores condiciones comerciales) • Proveedor metalmecánico externo (módulos certificados) • DGMN y SERNAGEOMIN • Asociaciones gremiales (canal comercial) • Compañía de seguros (RC y carga peligrosa)	ACTIVIDADES CLAVE • Compra agregada multi-proveedor • Circuito de distribución programado • Gestión normativa y trámites DGMN • Mantención de flota y módulos	PROPUESTA DE VALOR • Acceso a explosivos almacenados y trazados de forma segura y normada • Sin inversión en infraestructura propia (arriendo) o financiable vía PAMMA (venta) • Entrega programada y Libro de Control automatizado • 1 módulo = 1 productor: disponibilidad inmediata sobre resoluciones ya vigentes	RELACIÓN CON CLIENTES • Servicio recurrente por suscripción o compra de activo • Acompañamiento en regularización de licencias	SEGMENTOS DE CLIENTES • Pequeños productores mineros de Cabildo (piloto) • Escalamiento a Petorca • Escalabilidad futura: obras civiles y viales (ver 7.9)
	RECURSOS CLAVE • Contratos de abastecimiento directo con fabricantes • Flota propia certificada • Módulos certificados • Plataforma de trazabilidad (IoT) • Personal habilitado		CANALES • Asociaciones gremiales • Contacto directo en faena • Plataforma digital	
ESTRUCTURA DE COSTOS • Compra mayorista de explosivo, personal, mantención, seguros, cumplimiento normativo, plataforma tecnológica			FUENTES DE INGRESO • Habilitación inicial, arriendo mensual o venta de módulo (financiada PAMMA), cuota de instalación, transporte, gestión de trámites, margen sobre explosivo despachado	

7.8 Evaluación económica

Para realizar una evaluación económica ilustrativa de la realidad operacional y de mercado por parte de MODULEX, se propone un piloto, el cual se construye a partir de modelos de programación y sus respectivos objetivos de optimización, los cuales contienen en su interior el desglose OPEX, CAPEX, tarifas de ingresos, leasing y depreciación de equipos, tratado como un estado de flujos financiero.

Depreciación y desgaste de los equipos

El desgaste de los tres vehículos de la flota queda incorporado en la cuota de leasing, dicha cuota contiene, implícitamente, tanto la recuperación del capital invertido por la entidad financiera como el costo de dicho financiamiento, por lo que no corresponde agregar un cargo adicional de depreciación vehicular mientras dure el contrato de leasing. Para los activos que sí son propiedad directa de MODULEX la base de operaciones y los módulos retenidos en modalidad de arriendo se incorpora una provisión anual de depreciación y reposición equivalente al 10% de su valor de adquisición, calculada bajo el supuesto de una vida útil económica de 10 años, registrada como gasto no operativo independiente del gasto de mantención (que cubre el mantenimiento rutinario, no la reposición del activo).

Justificación tasa de descuento

La tasa de descuento se construye mediante el método de agregación de primas de riesgo, estándar en evaluación de proyectos: se parte de una tasa libre de riesgo de referencia para Chile, aproximadamente 4% a 5%, consistente con las series históricas de bonos reales del Banco Central de Chile a 10 años, a la que se suma una prima de riesgo de mercado accionario local (aproximadamente 6% a 7%, rango habitual utilizado en evaluación de proyectos en Chile) y una prima adicional de 1 o 2 puntos porcentuales por tratarse de una empresa nueva, sin historial crediticio propio, operando en un sector regulado con barreras de entrada normativas (DGMN). La suma de estos componentes converge en un rango de 11% a 14%, del cual se adopta 12% como valor central.

Supuestos de la evaluación

Tabla 50: Consideraciones del piloto

Parámetro	Valor
Tasa de descuento	12% anual.
Tasa de impuesto de Primera Categoría	12,5% la tasa del Impuesto de Primera Categoría (IDPC) se redujo de manera transitoria para los años comerciales 2025, 2026 y 2027. Además de constituir escala de empresa PYME.
Depreciación anual de activos propios	10% del valor de adquisición acumulado.
Servicio de transporte y circuito programado	Circuito quincenal, 24 despachos al año por cliente.
Comisión de MODULEX sobre explosivo	Consumo conservador de explosivo medio de 200 kg/mes.
OPEX mensual	Fijo durante horizonte de 5 años, con capacidad ociosa suficiente de dotación y flota hasta gestión de 60 módulos.
Capital de trabajo inicial	Correspondiente a 3 meses de OPEX, recuperado en el año 5.
S _{máx} (Clientes máximos)	Se utilizará el techo de los productores interesados en la problemática de investigación y propuesta de MODULEX (55).

Modelo de optimización 1: Mínimo de clientes año 1

El modelo 1 determina el tamaño mínimo de la cartera de clientes en el año 1 (C1) que hace al proyecto financieramente viable ($VAN = 0$), asumiendo como punto de partida equitativo una mezcla neutra (50% venta / 50% arriendo) de módulos, distribución que se justificará mediante el modelo 2.

Conjuntos.

- I. $t \in T = \{1,2,3,4,5\}$: Horizonte temporal de evaluación del proyecto piloto en años.
- II. $m \in M = \{Venta, Arriendo\}$: Modalidades de comercialización de los módulos.

Parámetros.

- I. I_0 = Inversión inicial base de capital (CAPEX + capital de trabajo) [\$].
- II. PV = Precio de venta unitario de un módulo $\left[\frac{\$}{unidad} \right]$.
- III. TA = Tarifa anual de arriendo de un módulo [\$/unidad].
- IV. CV_m = Costo variable unitario de fabricación, traslado e instalación según modalidad m. [\$/unidad].
- V. CF_t = Costo fijo operacional y de administración proyectados para el periodo t [\$/año].
- VI. r = Tasa de descuento del proyecto [%].
- VII. T_{impt} = Tasa de impuesto a la renta [%].
- VIII. D_t = Depreciación de activos operacionales en el periodo t [\$/año].
- IX. $S_{máx}$ = Capacidad máxima de absorción del mercado de pequeñas faenas del piloto [55 clientes].

Variables.

- I. C_1 = Número mínimo de clientes iniciales requeridos en el año 1 [clientes].
- II. g = Tasa de crecimiento anual compuesta requerida para alcanzar $S_{máx}$ clientes al año 5 [%].

Función objetivo.

- I. Mín. C_1

Restricciones.

- I. Equilibrio financiero objetivo: $VAN(C_1) = 0$
- II. Dominio y acotamiento: $1 < C_1 < S_{máx}$
- III. Naturaleza de las variables: $C_1 \in \mathbb{Z}^+$; $g \in \mathbb{R}$, $0 < g < 1$

Resultados modelo 1

La cartera de clientes activos en cada periodo se modela con crecimiento geométrico compuesto, $C_t = C_1 * (1 + g)^{t-1}$ de modo que fijar C_1 y exigir que $C_5 = S_{máx}$ determina la tasa de crecimiento requerida $g = (\frac{55}{C_1})^{\frac{1}{4}} - 1$. Los clientes nuevos incorporados cada periodo son $N_t = C_t - C_{t-1}$. El flujo de caja de cada periodo se construye con la estructura de ingresos y costos que se desglosará posteriormente, sobre esa base se evalúa el VAN(C_1) para valores crecientes de C_1 y se toma el primer entero para el cual el VAN es igual o mayor a cero.

Tabla 51: Resultados modelo 1.

Año	0	1	2	3	4	5
Cartera de clientes (valor entero)	-	29	34	40	47	55

Este escenario arroja VAN = \$3.586.449 (equilibrio, ligeramente positivo por la naturaleza entera de C_1) a una tasa de descuento del 12% y $g = 17,35\%$ anual.

Modelo de optimización 2: Punto de equilibrio modalidad arriendo vs venta

El modelo 2 determina la distribución optima de clientes anuales en modalidad de venta o arriendo, que hace al proyecto financieramente atractivo (Máx VAN).

Conjuntos.

- I. $t \in T = \{1,2,3,4,5\}$: Horizonte temporal de evaluación del proyecto piloto en años.
- II. $m \in M = \{Venta, Arriendo\}$: Modalidades de comercialización de los módulos.

Parámetros.

- I. I_0 = Inversión inicial base de capital / CAPEX [\$].
- II. PV = Precio de venta unitario de un módulo $\left[\frac{\$}{unidad}\right]$.
- III. TA = Tarifa anual de arriendo de un módulo $[\$/unidad]$.
- IV. CV_m = Costo variable unitario de fabricación, traslado e instalación según modalidad m. $[\$/unidad]$.
- V. CF_t = Costo fijo operacionales y de administración proyectados para el periodo t $[\$/año]$.
- VI. r = Tasa de descuento del proyecto [%].
- VII. T_{impt} = Tasa de impuesto a la renta [%].
- VIII. D_t = Depreciación de activos operacionales en el periodo t $[\$/año]$.
- IX. C_1 = Clientes mínimos del año 1 para que el piloto sea viable (20).
- X. g = Tasa de crecimiento anual de clientes (28,78%)
- XI. C_t = Cartera acumulada de clientes activos en el periodo t [clientes].
- XII. N_t = Número de clientes nuevos incorporados en el periodo t [clientes].

Variables.

- I. $X \in [0,1]$ = Proporción de la cartera de clientes que opera bajo la modalidad de Venta.
- II. $Y \in [0,1]$ = Proporción de la cartera de clientes que opera bajo la modalidad de Arriendo.

Función objetivo.

$$I. \quad \text{Máx } VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^5 \frac{FCL_t(X,Y)}{(1+r)^t}$$

Restricciones.

- I. Proporción de demanda captada: $X + Y = 1$.
- II. Autofinanciamiento en la fabricación de módulos en arriendo:

$$\sum_{t=1}^5 (N_t * Y * CV_{arriendo}) < \sum_{t=1}^5 (N_t * X * PV)$$

Resultados modelo 2

Su solución se elabora a partir del despeje de la restricción 2 en su punto de igualdad (el máximo Y financiable con el ingreso de venta disponible), $Y * CV_{arriendo} = X * PV$, y usando $X = 1 - Y$, se obtiene $Y_{\text{máx}} = PV / (PV + CV_{arriendo})$.

Con $PV = \$6.000.000$ y $CV_{arriendo} = \$3.440.100$ se obtiene $Y_{\text{máx}} = 61,82\%$ (arriendo), $X = 38,18\%$ (venta). Aplicando esta proporción a la trayectoria de clientes N_t del modelo 1, y redondeando a números enteros de clientes por año, la distribución óptima resulta:

Tabla 52: Resultados modelo 2.

Año	Nuevos clientes totales	Venta	Arriendo	Cartera acumulada
1	29	11	18	29
2	5	2	3	34
3	6	2	4	40
4	7	3	4	47
5	8	3	5	55
Total	55	21	34	-

Composición de la evaluación económica

La evaluación económica de este capítulo corresponde a un flujo de caja del proyecto con financiamiento, y no a un flujo de caja puro del proyecto sin deuda. Esta elección metodológica se justifica porque el leasing de la flota no es una alternativa de financiamiento genérica entre otras posibles, sino una decisión de diseño específica y central del modelo de negocio evaluado: la estructura de costos, el CAPEX inicial y, por consiguiente, la viabilidad económica del piloto depende directamente de que la flota se financie mediante leasing y no mediante compra al contado.

Excluir el servicio de esa deuda del flujo evaluado habría subestimado la exigencia real de caja del modelo y sobreestimado su viabilidad, motivo por el cual tanto el interés (gasto financiero deducible de impuesto, incorporado en el cálculo de la utilidad antes de impuesto) como el principal (amortización de capital, descontado directamente del flujo de caja) se incorporan explícitamente en ambos escenarios. Sin embargo, se excluyen algunos ítems:

- I. Fuentes de financiamiento de MODULEX a diferencia del leasing de la flota, estas fuentes no son un elemento de diseño fijo del modelo evaluado, sino alternativas de financiamiento cuya estructura definitiva (monto, plazo, tasa) depende de decisiones posteriores a esta etapa de la memoria, por lo que incorporarlas exigiría supuestos adicionales no sustentados en una cotización o condición de mercado específica, a diferencia del leasing de la flota, que sí cuenta con una estructura definida y justificada.
- II. Reparto de utilidades a los socios de MODULEX (dividendos), la evaluación económica de este capítulo tiene como objetivo determinar si el proyecto, por sí mismo, genera caja suficiente para ser viable esa es la pregunta que responden el VAN y la TIR, y no cómo los propietarios de la empresa deciden distribuir posteriormente esa caja generada. La política de dividendos es una decisión de estructura de capital y de gobierno corporativo posterior a la viabilidad del proyecto

Flujo de caja y evaluación de escenario óptimo

Año	0	1	2	3	4	5
Ingreso por habilitación		\$30.450.000	\$5.250.000	\$6.300.000	\$7.350.000	\$8.400.000
Ingreso por arriendo		\$54.000.000	\$63.000.000	\$75.000.000	\$87.000.000	\$102.000.000
Ingreso por venta		\$66.000.000	\$12.000.000	\$12.000.000	\$18.000.000	\$18.000.000
Ingreso por servicio (transporte, trámites, comisión)		\$47.328.000	\$55.488.000	\$65.280.000	\$76.704.000	\$89.760.000
Costo de módulos vendidos (-)		\$-37.841.100	\$-6.880.200	\$-6.880.200	\$-10.320.300	\$-10.320.300
OPEX (-)		\$-99.336.000	\$-99.372.000	\$-99.420.000	\$-99.468.000	\$-99.528.000
Depreciación (-)		\$-6.192.180	\$-7.224.210	\$-8.600.250	\$-9.976.290	\$-11.696.340
Interés leasing (-)		\$-6.527.259	\$-4.187.282	\$-1.550.539		
UAI		\$47.881.461	\$18.074.308	\$42.129.011	\$69.289.410	\$96.615.360
Impuesto (-)		\$-5.985.183	\$-2.259.288	\$-5.266.126	\$-8.661.176	\$-12.076.920
Utilidad neta		\$41.896.278	\$15.815.020	\$36.862.885	\$60.628.234	\$84.538.440
Depreciación		\$6.192.180	\$7.224.210	\$8.600.250	\$9.976.290	\$11.696.340
FC operativo		\$48.088.458	\$23.039.230	\$45.463.135	\$70.604.524	\$96.234.780
Principal leasing (-)		\$-18.450.429	\$-20.790.406	\$-23.427.149		
CAPEX módulos arriendo (-)		\$-61.921.800	\$-10.320.300	\$-13.760.400	\$-13.760.400	\$-17.200.500
Recup. Cap. trabajo						\$24.780.000
Inversión	\$-45.547.000					
Flujo neto	\$-45.547.000	\$-32.283.771	\$-8.071.476	\$8.275.586	\$56.844.124	\$103.814.280

Indicador	Resultado
VAN (12%; n=5)	\$ 20.116.550
TIR	18,38%
Payback simple	4,20 años

Síntesis de resultados de evaluación económica

El proyecto recupera la inversión dentro del horizonte de evaluación, con los años 1 y 2 en flujo negativo (etapa de mayor inversión en fabricación de módulos y servicio de la deuda de leasing) y un punto de inflexión hacia flujo positivo sostenido desde el año 3, acelerando en los años 4 y 5 a medida que la cartera de arriendo activo alcanza su madurez.

Análisis de sensibilidad

Sensibilidad en tarifa de arriendo mensual.

Tabla 53: Sensibilidad variable tarifa arriendo.

Variación	Tarifa (\$/mes)	VAN	TIR
-20%	\$200.000	\$-26.256.460	3,64%
-10%	\$225.000	\$-3.069.955	11,03%
Base	\$250.000	\$20.116.550	18,38%
+10%	\$275.000	\$43.303.055	25,76%
+20%	\$300.000	\$66.489.561	33,17%

Sensibilidad al consumo de explosivo (kg/mes).

Tabla 54: Sensibilidad variable consumo de explosivo.

Consumo (kg/mes)	VAN	TIR
150	\$14.129.598	16,48%
175	\$17.123.074	17,43%
200 (base)	\$20.116.550	18,38%
225	\$23.110.027	19,33%
250	\$26.103.503	20,28%

Sensibilidad a la tasa de descuento.

Tabla 55: Sensibilidad variable tasa de descuento.

Tasa de dscto.	VAN
10%	\$27.936.847
11%	\$23.922.275
12% (base)	\$20.116.550
13%	\$16.507.335
14%	\$13.083.117

Sensibilidad al precio de venta del módulo.

Tabla 56: Sensibilidad variable precio de venta.

Variación	Precio venta	VAN	TIR
-20%	\$4.800.000	\$2.845.928	12,86%
-10%	\$5.400.000	\$11.481.239	15,55%
Base	\$6.000.000	\$20.116.550	18,38%
+10%	\$6.600.000	\$28.751.861	21,37%
+20%	\$7.200.000	\$37.387.173	24,52%

El escenario óptimo se mantiene con VAN positivo en todo el rango evaluado de consumo de explosivo, precio de venta y tasa de descuento (hasta 14%), y solo se vuelve inviable ante una caída de tarifa de arriendo de aproximadamente 10% o más.

Esto lo hace razonablemente robusto entre las cuatro variables analizadas, la tarifa de arriendo es la que más influye en él, seguida por la tasa de descuento y el precio de venta, mientras el consumo de explosivo tiene el menor impacto relativo.

7.9 Escalabilidad comercial

Como se muestra en la evaluación económica el ritmo de crecimiento proyectado alcanza el 54,5% del universo potencial de productores clientes, dejando un margen amplio de crecimiento adicional dentro de la pequeña minería de esa comuna. La escalabilidad hacia otros rubros que comparten el mismo marco regulatorio (Ley N°17.798, DS N°72) constituye, por tanto, una condición de sostenibilidad de mediano plazo, no solo una oportunidad comercial futura.

Tabla 57: Escalabilidad comercial de la propuesta

Rubro	Uso de explosivos	Ajuste requerido al modelo
Obras viales (construcciones y mejoramiento de caminos)	Tronadura para movimientos de tierra y roca en cortes de camino.	Sin modificación estructural, mismo marco DS N°72.
Obras civiles menores	Tronadura controlada, generalmente esporádica.	Favorece la modalidad de arriendo por proyecto de corto plazo (se ajustan tarifas y protocolos).
Canteras y áridos	Consumo recurrente, escala similar a la pequeña minería.	Sin modificación estructural, mismo marco DS N°72.

8. Conclusiones

A continuación se presenta la síntesis de los principales hallazgos de la investigación, la evaluación del grado de cumplimiento del objetivo general y específicos formulados en el Capítulo 2, discusión del impacto esperado de la propuesta resolutive sobre la industria y escala abordada en las comunas de Petorca y Cabildo, además de exponer las limitaciones metodológicas del estudio junto con líneas de trabajo futuro que permitirían profundizar, expandir y robustecer resultados aquí obtenidos.

8.1 Cumplimiento del objetivo general

Tal como se definió, el objetivo general de la investigación consiste en formular y evaluar la viabilidad técnica y económica de un modelo de gestión, suministro y almacenamiento de explosivos, que por consecuencia provocara reducción de costos, mitigación de riesgos y fomento a la formalización de la pequeña minería en aspectos de gestión de elementos explosivos. Por lo tanto, el desarrollo de este enfoque mixto no solo se limitó a un problema cualitativo, sino que se respaldó y potenció con la cuantificación de indicadores contruidos específicamente para este ambiente, que se verificaron estadísticamente mediante pruebas de hipótesis formales.

Sobre esta base empírica, el estudio culminó en la formulación de un modelo de negocio concreto y operacionalmente viable, cuya factibilidad técnica se sustenta en una arquitectura normativa real expuesta por Dirección General de Movilización Nacional, ChileAtiende, SERNAGEOMIN y Autoridad Fiscalizadora.

Mientras que, su viabilidad económica se estima favorable bajo el modelo de evaluación desarrollado, el cual, bajo condiciones reconocidas y realistas de mercado, proyecta un Valor actual neto de \$20.116.550 y una Tasa interna de retorno de 18,38%, con un periodo de recuperación de inversión de 4,20 años, calculados a partir de una tasa de descuento de 12% anual, posicionando al modelo como una alternativa financieramente atractiva para su implementación.

La coherencia entre estos tres planos, normativo, operacional y financiero, es lo que permite afirmar que el modelo propuesto no constituye únicamente una alternativa conceptual, sino una solución evaluada integralmente. En consecuencia, la variable independiente identificada en el Capítulo 1, sobre las condiciones de acceso y almacenamiento de explosivos, deja de representar únicamente una condición estructuralmente negativa para el pequeño productor y pasa a contar con una vía de transformación concreta, medible en sus efectos esperados y sostenible en el tiempo bajo los supuestos evaluados.

8.2 Cumplimiento de objetivos específicos

Objetivo específico 1

El diagnóstico de la situación actual técnica, normativa y económica del uso de explosivos en la zona de estudio, mediante uso de datos y fuentes oficiales, fue cumplido mediante la construcción y aplicación del Índice de brecha de cobertura formal (IBCF), indicador propuesto que permitió cuantificar, año a año durante el periodo 2020-2025, la relación entre la demanda efectiva de explosivos, expresada en toneladas de compras registradas, y la capacidad formal de almacenamiento autorizada y disponible en cada comuna, expresada en capacidad de rotación anual.

Se evidenció brecha estructural persistente en la comuna de Cabildo, cuyo IBCF ajustado promedio es de 2,08 manteniéndose por sobre el umbral de equilibrio durante la totalidad de años analizados, en contraste con Petorca, cuyo IBCF es 0,07 siendo suficiente su capacidad formal en nivel agregado.

Sin embargo, la investigación no se conforma solo con este resultado agregado, el análisis complementario de faenas en condición de irregularidad operativa reveló que un test de dos proporciones confirma una diferencia estadísticamente significativa entre comunas, 45,50% de instalaciones irregulares en Cabildo versus 25,51% en Petorca, y que el ratio de faenas operativas por polvorín vigente de 17,16 en Cabildo y 22,77 en Petorca, es estructuralmente insuficiente para el universo completo de faenas operativas.

Este último hallazgo es relevante porque reconcilia una aparente contradicción con el resultado del IBCF, demostrando que la suficiencia agregada de capacidad formal convive con una elevada irregularidad operativa a nivel de faena individual, por lo tanto, un único indicador agregado, por robusto que sea, resulta insuficiente para diagnosticar el problema en toda su magnitud, y valida la decisión metodológica de emplear múltiples análisis complementarios.

Objetivo específico 2

La identificación de causas raíz del sobre costo operacional e informalidad logística en la cadena de suministros de explosivos, desarrollada con herramientas de excelencia operacional y análisis estadístico se llevó a cabo mediante la aplicación triangulada del diagrama de Ishikawa, análisis de 5 porqué, Value Stream Mapping y un modelo de regresión logística, constituyendo una fortaleza metodológica, dado que ningún hallazgo individual descansa sobre una única fuente de evidencia.

La convergencia de estas herramientas permitió identificar tres brechas estructurales simultáneas que explican la informalidad del pequeño productor minero, con una infraestructura formal insuficiente para la escala del universo operativo, evidenciada por el ratio de faenas por polvorín antes descrito, un ciclo logístico de reposición con una eficiencia de valor agregado (Process Cycle Efficiency) de apenas 3,08%, resultado de un tiempo de habilitación inicial de 7,66 meses y un lead time de reposición ponderado de 7,43 días, de los cuales solo 5,5 horas corresponden a actividades que efectivamente agregan valor al productor, y una ausencia de diferenciación normativa por escala productiva respecto de figuras regulatorias existentes en países con industrias similares.

A nivel de productor individual, el modelo de regresión logística de tres predictores mostró que el Índice de Barrera de Mercado y Costo es la variable con el efecto más próximo a la significancia estadística y en la dirección predicha por la hipótesis del estudio, es decir que, por cada desviación estándar de aumento en la percepción de esta barrera, la probabilidad de contar con polvorín propio se reduce a aproximadamente la mitad. Este hallazgo fue reforzado por una segunda línea de evidencia estadísticamente independiente, el test de Mann-Whitney U aplicado sobre el Índice General de Barrera Operacional, que mostró que el grupo con polvorín propio percibe, en promedio, un nivel de barrera operacional menor que el grupo sin polvorín. Es necesario precisar, con la misma rigurosidad estadística exigida al resto del estudio, que ninguno de estos dos resultados a nivel individual alcanzó significancia estadística convencional al umbral de 5%, por lo que corresponde interpretarlos como evidencia consistente y convergente con la hipótesis del estudio, y no como confirmación estadística definitiva.

El hallazgo más contundente de este objetivo no requiere prueba de hipótesis alguna, solo el 16,36% de los productores encuestados con datos completos, 9 de 55, declaró contar actualmente con un polvorín propio autorizado y vigente, cifra que por sí

sola dimensiona la magnitud del problema de informalidad diagnosticado.

Objetivo específico 3

El diseño de una propuesta de valor y modelo operativo logístico-tecnológico adaptado a la geografía y normativa nacional, mediante metodología de design thinking e integración de un modelo de negocios CANVAS, fue cumplido mediante la aplicación secuencial de las etapas de empatizar, definir e idear sobre los hallazgos cuantitativos de los objetivos anteriores, proceso que culminó en el diseño de MODULEX, un modelo de arriendo y venta de módulos de almacenamiento de explosivos relocizables. El diseño resultante no es una propuesta genérica trasladada a un contexto minero, sino una solución construida a la medida de las tres brechas diagnosticadas en el objetivo anterior, la brecha de infraestructura se aborda mediante módulos certificados y relocizables que reducen la barrera de inversión individual del productor, la brecha de eficiencia logística se aborda mediante un esquema de abastecimiento directo y cross-docking, sin polvorín central propio que evita duplicar tiempos de tránsito y la brecha de diferenciación normativa se aborda mediante una arquitectura de titularidad jurídicamente diferenciada entre las modalidades de arriendo y venta, sustentada en decretos, normas y procedimientos oficiales de inscripción de la DGMN, ChileAtiende, Autoridad Fiscalizadora y SERNAGEOMIN. A ello se añade un sistema de trazabilidad digital que refuerza, sin reemplazar, el libro de existencias exigido por la normativa vigente.

Adicionalmente el diseño resuelve una brecha de intermediación identificada en el mapa de actores del estudio, donde se constató que ningún actor cumple actualmente el rol de facilitar la relación entre el pequeño productor y el conjunto de entidades regulatorias, comerciales y gremiales con las que debe vincularse individualmente.

Objetivo específico 4

Evaluar la factibilidad técnica y económica del modelo propuesto, mediante indicadores financieros y análisis de sensibilidad. Este se logró mediante la construcción de dos modelos de optimización complementarios, formulados y resueltos con conjuntos, parámetros, variables de decisión y restricciones explícitas.

El modelo 1 determinó el tamaño mínimo de cartera de clientes en el año 1 que hace al proyecto financieramente viable bajo la condición de equilibrio $VAN = 0$, estableciendo un umbral de 29 clientes, con una trayectoria de crecimiento geométrico hasta alcanzar el techo de 55 productores definido como universo de interesados en la propuesta. El modelo 2 determinó la mezcla óptima entre las modalidades de venta y arriendo mediante una restricción de autofinanciamiento explícita, que exige que el costo acumulado de fabricar los módulos en modalidad de arriendo no exceda el ingreso acumulado por concepto de venta, resolviendo analíticamente una proporción óptima que, aplicada a la trayectoria entera de clientes, resultó en una distribución de 21 clientes en modalidad de venta y 34 en modalidad de arriendo a lo largo del horizonte de cinco años.

Sobre esta base, la evaluación económica final arrojó un VAN de \$20.116.550 y una TIR de 18,38%. El análisis de sensibilidad, aplicado a las cuatro variables de mayor incidencia, tarifa de arriendo mensual, consumo de explosivo, tasa de descuento y precio de venta del módulo, mostró que el proyecto mantiene VAN positivo en la totalidad del rango evaluado para tres de las cuatro variables, y que solo se torna inviable ante una caída de la tarifa de arriendo mensual igual o superior a 10%, lo que identifica con precisión cuál es la variable crítica que debe monitorearse con mayor rigurosidad en una eventual etapa de implementación.

8.3 Impacto esperado en la industria y población evaluada

La implementación del modelo propuesto tendría un impacto multidimensional sobre la pequeña minería de las comunas de Petorca - Cabildo y potencialmente sobre el sector a una escala mayor. Este impacto se fundamenta a continuación dimensión por dimensión, vinculando cada uno con la evidencia específica que lo sustenta:

- I. Impacto en la formalización productiva: Al reducir las barreras de infraestructura, costo y tiempo que hoy empujan al pequeño productor hacia la informalidad, el modelo aporta una vía concreta de formalización que no exige al productor individual asumir la totalidad de la inversión ni la carga administrativa que hoy demanda un polvorín fijo propio.
- II. Impacto en la seguridad operacional: Al centralizar la responsabilidad de custodia diaria en un operador especializado, con manipuladores licenciados y un mecanismo de actuaciones delegadas jurídicamente respaldado en el artículo 54 del Decreto N° 83 de 2007, el modelo contribuye directamente a mitigar el riesgo de accidentabilidad asociado al manejo inadecuado de explosivos. La estandarización del proceso de despacho y almacenamiento bajo un único operador, en lugar de bajo prácticas heterogéneas de 55 productores individuales, reduce además la variabilidad operacional que constituye, en sí misma, un factor de riesgo.
- III. Impacto en la estructura de costos y competitividad del pequeño productor: Dado que la adquisición y almacenamiento de explosivos puede representar entre el 25% y el 30% del costo total por tonelada producida, la agregación de demanda que habilita el modelo MODULEX introduce un poder de negociación hoy inexistente para el productor individual.

Bajo el supuesto de consumo conservador de 200 kg/mes por cliente empleado en la propia evaluación económica del estudio, la cartera proyectada de 55 clientes activos al quinto año representaría un volumen agregado de demanda del orden de 11.000 kg mensuales gestionados por un solo operador ante proveedores de elementos explosivos, escala de negociación que ningún productor individual de la zona alcanza en la actualidad.

- IV. Impacto en la estructura de mercado: El modelo introduce un actor intermediario que hoy no existe en la cadena de suministro de explosivos de la zona de estudio, donde se constató que el productor debe vincularse individualmente con al menos cuatro entidades distintas. Con ello, el modelo reconfigura parcialmente una estructura de mercado hoy concentrada en dos proveedores dominantes, introduciendo un actor cuya función específica es reducir la fricción de esa relación, sin alterar el rol regulatorio de DGMN ni SERNAGEOMIN.
- V. Impacto sectorial de mediano plazo: La escalabilidad comercial del modelo hacia rubros que operan bajo el mismo marco regulatorio de la Ley N° 17.798 y su reglamento complementario, tales como obras viales, obras civiles menores, canteras y áridos, sugiere que el aporte de esta investigación trasciende el piloto evaluado. En la medida en que dicha escalabilidad no requiere modificación estructural del modelo, MODULEX podría constituirse en una plataforma de gestión de explosivos relocalizable aplicable de forma más amplia dentro de las actividades productivas que requieren tronadura controlada en Chile, aunque, dicha extensión no fue modelada cuantitativamente en este estudio y queda planteada como proyección conceptual.

8.4 Limitaciones del estudio

Con la misma rigurosidad exigida al resto de la investigación, las limitaciones metodológicas que acotan el alcance de las conclusiones anteriores son:

- I. El estudio se circunscribe exclusivamente a las comunas de Petorca y Cabildo, por lo que sus resultados no son directamente extrapolables a otras regiones mineras del país sin la incorporación de datos adicionales específicos a cada territorio, tal como se estableció explícitamente en el alcance de la investigación.
- II. La investigación llega hasta la evaluación de viabilidad técnica y económica del modelo propuesto, su implementación efectiva excede el alcance de una memoria de título y requeriría decisiones adicionales de inversión y, eventualmente, de política pública.
- III. Si bien la arquitectura de MODULEX quedó respaldada en fuentes normativas oficiales, dicho mecanismo, debe ser validado ante organizaciones respectivas.
- IV. Algunos resultados estadísticos del análisis causal, en particular los del modelo de regresión logística y test asociados, no alcanzaron significancia estadística convencional al 5%, condición atribuible en parte al tamaño muestral disponible ($n = 55$ encuestados; $n = 6$ años de datos oficiales), por lo que dichos resultados deben interpretarse como evidencia direccional consistente con la hipótesis del estudio, y no como prueba estadística concluyente.
- V. La evaluación económica se construyó sobre una estructura tarifaria y de costos determinística, sin incorporar simulación estocástica de la incertidumbre asociada a la velocidad real de adopción de clientes ni a variaciones en costo de explosivos.

- VI. El estudio excluye explícitamente la ingeniería de voladura, la evaluación de impacto ambiental y el análisis de la gran minería, dimensiones que de incorporarse podrían complementar, sustancialmente las conclusiones aquí presentadas.

8.5 Líneas futuras de trabajo

A partir de las limitaciones anteriores y de los hallazgos de la investigación, se recomienda considerar las siguientes líneas de trabajo futuro:

- I. Presentar ante DGMN y SERNAGEOMIN el modelo de negocios completo propuesto, para obtener la validación formal del mecanismo junto a las figuras que lo componen, de manera previa a cualquier etapa de implementación piloto del modelo.
- II. Modelar cuantitativamente la escalabilidad comercial hacia obras viales, obras civiles menores, canteras y áridos, hoy descrita a nivel conceptual, incorporando estimaciones de demanda propias de cada rubro.
- III. Evaluar estructuras de financiamiento alternativas para el CAPEX de fabricación de módulos en modalidad de arriendo, tales como su incorporación a un esquema de leasing análogo al ya contemplado para la flota de transporte, de manera de reducir el capital propio requerido para el lanzamiento del piloto.
- IV. Ampliar el tamaño muestral y la ventana temporal del análisis estadístico en investigaciones futuras, con el objetivo de robustecer la significancia estadística de las relaciones identificadas entre barreras de mercado, costo y formalización.

- V. Desarrollar, en una etapa posterior a la implementación piloto, un proceso de validación ex-post de los supuestos tarifarios y de costos empleados en la evaluación económica, contrastándolos con datos operacionales reales. Además, de un sistema post-servicio, con la finalidad de reconocer nuevos desafíos y el nivel de satisfacción alcanzado.

8.6 Síntesis final

Al dar término a la presente memoria de título, corresponde recordar la constatación simple y a la vez urgente con la que parte esta temática en las comunas de Petorca y Cabildo, el acceso formal a un insumo tan crítico como riesgoso para la actividad minera se encuentra fuera del alcance real de la mayoría de sus pequeños productores, brecha observada en terreno y potenciada por años de experiencia real del memorista. Esa brecha acaba transformándose, a lo largo de este trabajo, en un problema caracterizado con rigor estadístico mediante datos oficiales, explicado en sus causas raíz mediante herramientas de excelencia operacional y análisis causal, finalmente resuelto mediante una propuesta técnica, normativa y financieramente evaluada.

Cada etapa de este recorrido fue, a su vez, condición necesaria de la siguiente, sin la cuantificación de indicadores contruidos específicamente para el estudio no habría sido posible identificar con solidez sus causas estructurales, sin la comprensión de esas causas no habría sido posible diseñar una propuesta de valor que las abordara de manera pertinente y no genérica, y sin un diseño operativo concreto no habría sido posible someterlo a la prueba exigente de una evaluación económica formal.

En este recorrido reside, más allá de cualquier cifra individual, el principal aporte de esta investigación, demostrar que un problema de informalidad estructural puede ser abordado con el mismo rigor metodológico que cualquier proyecto de ingeniería

industrial, integrando en un mismo modelo el análisis cuantitativo de datos oficiales, el diagnóstico de causas raíz, el diseño centrado en el usuario y la evaluación económica de proyectos, sin renunciar en ningún momento al respaldo normativo que la actividad exige. El resultado no es una propuesta especulativa, sino un modelo, cuya viabilidad fue puesta a prueba desde múltiples ángulos, técnico, jurídico, operativo y financiero, que resistió esa evaluación con resultados consistentes y defendibles.

Queda sentada una base concreta, evaluada y defendible, sobre la cual la pequeña minería de la zona de estudio, y eventualmente de otras regiones del país que comparten esta misma problemática, podría avanzar hacia una operación más formal, más segura y competitiva. En un país cuya identidad productiva está indiscutiblemente ligada a la actividad minera, la gestión eficiente de insumos críticos como los explosivos no constituye un asunto menor ni circunscrito a la gran minería, es precisamente, en los eslabones más pequeños de la cadena donde suelen concentrarse las mayores brechas de formalización, seguridad y eficiencia, donde intervenir de manera rigurosa genera el mayor retorno posible en términos de estándar país.

Elevar las condiciones operacionales desde la pequeña minería no es una tarea secundaria frente a los grandes proyectos que concentran la atención de la industria, sino una condición necesaria para que Chile consolide, de manera integral y no solo en sus operaciones de mayor escala, su posición como referente minero a nivel mundial. En esa línea, esta investigación no solo resuelve una problemática local, sino que propone una forma de abordar la optimización de insumos críticos que es, en esencia, replicable a otras escalas, otros territorios y otros recursos de igual sensibilidad operacional, dejando así planteado un camino posible hacia una minería nacional aún más formal, segura y eficiente en todos sus niveles, cerrando con ello el ciclo que esta investigación se propuso recorrer desde su planteamiento inicial.

9. Referencias

- [1] Afganistán, M. d. (2018). *Artisanal and small-scale mining (ASM) formalization strategy*. Obtenido de https://momp.gov.af/sites/default/files/2019-04/ASM%20SS%20Formalisation%20Strategy%202018_V4_reduce_0.pdf
- [2] AICACYP. (2018). *Procedimiento para la inscripción de sectores de almacenamiento (SDA)*. Obtenido de AICACYP: <https://www.aicacyp.ar/blog/procedimiento-para-la-inscripcion-de-sectores-de-almacenamiento-sda/>
- [3] ANMec. (2025). *Trámites de Usuarios de Explosivos*. Obtenido de argentina.gob: <https://www.argentina.gob.ar/seguridad/anmac/tramites/usuarios-explosivos>
- [4] Asiva. (2021). *Agencia de Sustentabilidad e Innovación Valparaíso*. Obtenido de Caracterización económica de la provincia de Petorca 2021: <https://www.asiva.cl/wp-content/uploads/2021/01/Caracterizacio%CC%81n-Econo%CC%81mica-de-la-Provincia-de-Petorca-2021.pdf>
- [5] Bahamóndez, M. (2017). *Implementación Sistema de Gestión para Reducción de Costos Optimizando el Desempeño por Componentes en Equipos Mineros*. Santiago de Chile: Repositorio U. de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/146289/Implementaci%c3%b3n-Sistema-de-Gesti%c3%b3n-para-Reducci%c3%b3n-de-Costos-Optimizando-el-Desempe%c3%b1o-por-Componentes-en-Equipos-Mineros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] BCN. (s.f.). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de Legislación sobre armas y explosivos: https://www.bcn.cl/portal/resultado-busqueda?texto=explosivos%20y%20armas&dc_source=&npagina=1&tipo_recurso=
- [7] BID. (2020). *Banco Interamericano de Desarrollo*. Obtenido de Cadenas de suministro 4.0: Mejores prácticas internacionales y hoja de ruta para América Latina: https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Cadena_de_suministro_4.0_Mejores_pr%C3%A1cticas_internacionales_y_hoja_de_ruta_para_Am%C3%A9rica_Latina_es.pdf
- [8] Cáceres, T. &. (2016). *Catastro de prácticas operacionales y de diseño para la mediana minería subterránea en Chile [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas]*. Repositorio Institucional Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/115142/Catastro-de-pra%cc%81cticas-operacionales-y-de-disen%cc%83o-para-la-mediana-mineri%cc%81a-subterra%cc%81nea-en-Chile.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [9] Centre., O. &. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. OECD Publishing. Obtenido de https://www.oecd.org/content/dam/oecd/es/publications/reports/2008/03/oecd-factbook-2008_g1gha96f/9789264079809-es.pdf
- [10] Chile, B. d. (1983). *Código de Minería*. Obtenido de REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8704>
- [11] Chile, D. M. (2025). *Climatología*. Obtenido de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>
- [12] ChileAtiende. (s.f.-a). *ChileAtiende*. Obtenido de Inscripción de almacenes de explosivos, canchas de nitrato de amonio y camiones fábrica. Gobierno de Chile.: <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/1006-inscripcion-de-almacenes-de-explosivos-canchas-de-nitrato-de-amonio-y-camiones-fabrica>
- [13] ChileAtiende. ((s.f.-b)). *ChileAtiende*. Obtenido de Inscripción en el registro nacional de consumidores habituales de explosivos. Gobierno de Chile.: <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/4504-inscripcion-en-el-registro-nacional-de-consumidores-habituales-de-explosivos>
- [14] CMS. (2021). *Resolución de Superintendencia N°453-2021-SUCAMEC*. Obtenido de SUCAMEC: <https://cms.law/es/per/publication/aprueban-norma-que-regula-las-condiciones-caracteristicas-y-medida-de-seguridad-de-las-instalaciones-de-almacenamiento-de-explosivos-y-materiales>

- [15] Contreras, J. (s.f.). *Territorio Minero*. Obtenido de <https://territoriominero.cl/cluster-minero-en-valparaiso-impacto-en-el-futuro-regional-a-traves-del-desarrollo-de-proveedores/>
- [16] CooperAcción / Wiener Ramos, L. (2019). *Manual sobre la formalización de la minería en pequeña escala y artesanal*. Obtenido de CooperAccion: <https://cooperaccion.org.pe/wp-content/uploads/2019/06/Formalizaci%C3%B3n-Minera.pdf>
- [17] Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.)*. Obtenido de SAGE Publications: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/72214301/Ishtiaq_2019-libre.pdf
- [18] Domeyko, A. (19 de Abril de 2022). La pequeña minería. (SERNAGEOMIN, Entrevistador) Obtenido de <https://www.sernageomin.cl/la-pequena-mineria/>
- [19] ENAMI. (2023). *Empresa Nacional de Minería*. Obtenido de Asistencia técnica y atención de operación Fomento Directo [Informe de cumplimiento de ley de presupuesto]: https://www.enami.cl/Fomento/B_CumplimientoLeyPresupuesto/Asistencia%20te%CC%81cnica%20y%20atencio%CC%81n%20de%20operacio%CC%81n%20Fomento%20Directo.pdf?utm_source=
- [20] Festival., R. (Mayo de 2025). *Pequeños mineros de Cabildo y Petorca conocen detalles del programa Pamma*. Obtenido de <https://www.radiofestival.cl/pequenos-mineros-de-cabildo-y-petorca-conocen-detalles-del-programa-pamma/>
- [21] Global, H. (2021). *RFID and IoT for harsh and hazardous environments*. *RFID Journal / HID Global*. Obtenido de https://www.rfidjournal.com/wp-content/uploads/2021/11/HID_RFID_and_IoT_for_Harsh_Environments.pdf?utm_source
- [22] Hair, J. F. (2019). *Multivariate data analysis (8th ed.)*. *Cengage Learning*. Obtenido de ekoizpen: <https://ekoizpen-zientifikoa.ehu.eus/documentos/642c49d1124b445f6ae6772a>
- [23] Hernández Sampieri, R. F. (2014). *Metodología de la investigación (6.ª ed.)*. *McGraw-Hill*. Obtenido de scalahed: <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25566w/Planteamiento%20cuantitativo.pdf>
- [24] IIMCh. (2023). *Instituto de Ingenieros de Minas de Chile*. Obtenido de Informe de innovación tecnológica en la pequeña minería 2023: https://www.iimch.cl/?utm_source
- [25] INDAP. (2023). *Estrategia de Desarrollo 2023-2030*. Obtenido de Una Agricultura Familiar Campesina Sustentable y con Oportunidades: <https://www.indap.gob.cl/sites/default/files/2023-08/libro-estrategia-2023-2030vff.pdf>
- [26] INE. (2021). *Instituto Nacional de Estadísticas*. Obtenido de Estimaciones y proyecciones de población 2002-2035, comuna y área urbana y rural: https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/proyecciones-de-poblacion/metodologia/proyecci%C3%B3n-base-2017/estimaciones-y-proyecciones-2002-2035-comunas-y-%C3%A1rea-metodolog%C3%ADa.pdf?sfvrsn=71c4ebf1_4
- [27] INE. (2025). *Instituto Nacional de Estadísticas*. Obtenido de Presentación regional de Valparaíso: Resultados Censo 2024: https://censo2024.ine.gob.cl/wp-content/uploads/2025/03/05_PRESENTACION_REGIONAL-VALPARAISO.pdf
- [28] James, G. W. (2021). *An introduction to statistical learning with applications in R (2nd ed.)*. Obtenido de Casact: <https://www.casact.org/sites/default/files/2022-12/James-G.-et-al.-2nd-edition-Springer-2021.pdf>
- [29] Leiva, M. (2023). *Flexibilidad operacional en la demanda energética de la industria minera de cobre bajo distintos escenarios tecnológicos para el suministro*. Santiago de Chile: Repositorio U. Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/198731/Flexibilidad-operacional-en-la-demanda-energetica-de-la-industria-minera-de-cobre-bajo-distintos-escenarios-tecnologicos-para-el-suministro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [30] Maptek. (2020). *Digital explosives inventory management*. *Maptek Forge Magazine, September 2020*. Obtenido de https://www.maptek.com/forge/september_2020/digital-explosives-inventory-management/?utm_source
- [31] Militar, I. G. (2025). *Resultados de la búsqueda: Petorca*. Obtenido de <https://www.igm.cl/tiendaonline/busqueda?controller=search&s=petorca>

- [32] Minería, M. d. (2025). *MinMinería*. Obtenido de Política de fomento a la pequeña minería. Gobierno de Chile: https://minmineria.cl/politica/fomento/doctos_descarga/Politica-Fomento-Pequeña-Mineria-web.pdf
- [33] Minero., R. (Octubre de 2025). *SONAMI y Asociación Minera de Petorca abordan el impacto de la Ley N°21.600 en faenas mineras*. Obtenido de ReporteMinero: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2025/10/sonami-y-asociacion-minera-de-petorca-abordan-el-impacto-de-la-ley-n21600-en-faenas-mineras>
- [34] Montgomery, D. C. (2014). *Applied statistics and probability for engineers (6th ed.)*. John Wiley & Sons. Obtenido de books.google: <https://books.google.cl/books?id=NuO9EAAAQBAJ>
- [35] Nacional, D. G. (2007). *Dirección General de Movilización Nacional*. Obtenido de Reglamento complementario de la Ley N.º 17.798, sobre control de armas y elementos similares (Decreto N.º 83, de 2007, del Ministerio de Defensa Nacional): https://www.dgmn.cl/leydearmas/wp-content/uploads/2021/06/reglamento_complementario_2007.pdf
- [36] Perquilaf Reyes, I. (2017). *Análisis a la manipulación y almacenamiento de explosivos industriales en faenas mineras de la zona central de Chile [Tesis de pregrado, Universidad de Las Américas]*. Concepción: Repositorio UDLA. Obtenido de <https://repositorio.udla.cl/xmlui/bitstream/handle/udla/226/a41571.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [37] Públicas, M. d. (2024). *Dirección de vialidad*. Obtenido de Red Vial Nacional: Dimensionamiento y características año 2024: <https://vialidad.mop.gob.cl/uploads/sites/9/2024/11/Red-Vial-Nacional-Dimensionamiento-y-Caracteristicas-Ano-2024.pdf>
- [38] Schipper, I. d. (2021). *Analysis of the formalization process of artisanal and small-scale mining (ASM): Case region Puno-Peru*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101991>
- [39] SERNAGEOMIN. (2006). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de El potencial minero de los Distritos Pedernal, Cantarito y El Bolsón, Provincia de Petorca, V Región: <https://repositorio.sernageomin.cl/items/11da2273-2a0d-42e2-8266-e0ee8a5d17ed>
- [40] SERNAGEOMIN. (2012). *Atlas de faenas mineras*. Obtenido de <https://repositorio.sernageomin.cl/items/750fcc75-b496-4259-a7a7-63eaa15d7ecf>
- [41] SERNAGEOMIN. (2018). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de Guía de orientación para el cumplimiento de la normativa de manejo de explosivos (Guía G3): https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/10/G3_ManejoExplosivos.pdf
- [42] SERNAGEOMIN. (2023). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de Anuario de la minería de Chile: https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario/Anuario_de_la_mineria_de_chile_2023_web.pdf
- [43] SERNAGEOMIN. (2024). *Servicio Nacional de Geología y Minería*. Obtenido de Guía para proyectos mineros de hasta 5.000 ton/mes (Guía No. 1): <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2024/12/1.-Guia-proyectos-menores-que-5000-18122024.pdf>
- [44] SERNAGEOMIN. (Julio de 2025). *Servicio Nacional de Geología y Minería s.f.* Obtenido de Accidentabilidad minera.: <https://www.sernageomin.cl/accidentabilidad-minera/>
- [45] SONAMI. (2021). *Sociedad Nacional de Minería*. Obtenido de Fundamentos de la política de fomento a la pequeña minería: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2021/11/fundamentos-2021-final.pdf>
- [46] SONAMI. (2023). *Sociedad Nacional de Minería*. Obtenido de Caracterización de la mediana minería [Informe]: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2023/06/caracterizacion-mm.pdf>
- [47] SUCAMEC. (s.f.). *Solicitar autorización para la adquisición y uso de explosivos y materiales relacionados*. Obtenido de SUCAMEC: <https://www.gob.pe/12845-solicitar-autorizacion-para-la-adquisicion-y-uso-de-explosivos-y-materiales-relacionados>

- [48] Vega, F. (2015). *Diseño de tronaduras y su impacto en el costo mina de Compañía Minera Cerro Negro [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]*. Santiago de Chile: Repositorio Institucional Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137507/Diseno-de-tronaduras-y-su-impacto-en-el-costo-mina-de-Compania-Minera-Cerro-Negro.pdf?>