

DEPARTAMENTO DE
INGENIERIA COMERCIAL

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Ingeniería Comercial

MBA, Magíster en Gestión Empresarial

PLAN DE NEGOCIO PARA EL ESCALAMIENTO DE UN PROYECTO PILOTO DE INNOVACIÓN ORIENTADO A LA RECUPERACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO FINO DE COBRE EN LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

Tesina de Grado presentada por

LEONARDO FRANCISCO SILVA PIZARRO

Como requisito para optar al grado de

MBA, Magíster en Gestión Empresarial

Guía de Tesina Prof. José Luis Andías

Septiembre de 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; X Tesis de Postgrado

Título del trabajo: PLAN DE NEGOCIO PARA EL ESCALAMIENTO DE UN PROYECTO PILOTO DE INNOVACIÓN ORIENTADO A LA RECUPERACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO FINO DE COBRE EN LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

Nombre del candidato(a): Leonardo Francisco Silva Pizarro

Carrera / Grado: Magíster en Gestión Empresarial

Campus: Vitacura **Departamento:** Ingeniería Comercial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, José Luis Andias Pantoja, 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

[X] 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:

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:
José Luis Andias Pantoja
Fecha: ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a): Leonardo Francisco Silva Pizarro
Fecha: ; **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

TÍTULO DE TESINA: **“PLAN DE NEGOCIO PARA EL ESCALAMIENTO DE UN PROYECTO PILOTO DE INNOVACIÓN ORIENTADO A LA RECUPERACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO FINO DE COBRE EN LA MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA”**

AUTOR: **LEONARDO FRANCISCO SILVA PIZARRO**

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

OBSERVACIONES: *(uso interno)*

COMISIÓN DE TESINA:

- Profesor guía: José Luis Andías
- Correferente externo: Lorena Paredes
- Correferente interno: Juan Tapia

Santiago, 23 de octubre de 2026

Todo el contenido, análisis, conclusiones y opiniones vertidas en este estudio son de mi exclusiva responsabilidad.

Nombre: Leonardo Francisco Silva Pizarro.

Fecha: 23 de octubre de 2026.

1. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Esta tesina desarrolla un modelo de negocio y una metodología de decisión para evaluar el escalamiento condicionado de un proyecto piloto destinado a recuperar, acondicionar, peletizar y reincorporar material particulado fino de cobre en la Mina Chuquicamata Subterránea. Las mediciones mediante bandejas estimaron una generación de 84,29 t/día; el Comité Técnico Asesor de Codelco adoptó 70 t/día como base conservadora para el diseño y la evaluación del piloto.

La solución integra captación, almacenamiento temporal, alimentación dosificada, acondicionamiento con agua, compactación y retorno del material a la correa transportadora. El enfoque metodológico combina diagnóstico operacional, benchmarking tecnológico, propuesta de valor, análisis de riesgos, estructura contractual, evaluación económica y un protocolo de validación con criterios de resistencia, humedad, emisiones, disponibilidad, rendimiento, balance de masa y compatibilidad metalúrgica.

El caso económico de prefactibilidad considera una peletizadora operando 10 h/día, horizonte de cinco años, moneda USD, financiamiento con recursos propios y tasa corporativa de descuento de 8 %. Con ley de cobre de 0,89 %, recuperación metalúrgica de 75 %, humedad de 2 %, precio base de USD 6,00/lb, ahorro contractual de USD 48.000/año, OPEX inicial de USD 293.314 y CAPEX de USD 1.617.967, se obtiene un VAN de USD 6.139.850, una TIR de 118,50 % y un payback simple de 0,82 años. El VAN permanece positivo en las sensibilidades aplicadas al OPEX y al precio del cobre.

Los resultados corresponden a un escenario condicionado, no a beneficios realizados, porque la planta piloto aún no se ha implementado. Se recomienda ejecutar una unidad piloto y avanzar únicamente si la operación continua confirma capacidad, calidad del producto, seguridad, desempeño ambiental, reincorporación metalúrgica y economía actualizada. La replicación en otras ubicaciones deberá evaluarse caso a caso mediante la matriz multicriterio y casos de negocio independientes.

2. ABSTRACT

This thesis develops a business model and a decision methodology to assess the conditional scaling of a pilot project aimed at recovering, conditioning, pelletizing, and reintegrating fine copper-bearing particulate matter at the Chuquicamata Underground Mine. Tray measurements estimated dust generation at 84.29 t/day, while Codelco's Technical Advisory Committee adopted 70 t/day as the conservative basis for pilot design and evaluation.

The proposed solution integrates collection, temporary storage, controlled feeding, water conditioning, compaction, and material return to the conveyor belt. The methodology combines operational diagnosis, technology benchmarking, value proposition, risk analysis, contractual structure, economic evaluation, and a validation protocol addressing mechanical strength, moisture, emissions, availability, throughput, mass balance, and metallurgical compatibility.

The prefeasibility case considers one pelletizer operating 10 hours per day over a five-year horizon, denominated in USD, financed with Codelco's own resources, and discounted at the corporate rate of 8%. Using a copper grade of 0.89%, metallurgical recovery of 75%, moisture of 2%, a base copper price of USD 6.00/lb, annual contractual savings of USD 48,000, initial OPEX of USD 293,314, and CAPEX of USD 1,617,967, the model yields an NPV of USD 6,139,850, an IRR of 118.50%, and a simple payback of 0.82 years. NPV remains positive under the OPEX and copper-price sensitivities evaluated.

These results represent a conditional scenario rather than realized benefits because the pilot plant has not yet been implemented. The recommended decision is to execute one pilot unit and proceed only if continuous operation confirms capacity, product quality, safety, environmental performance, metallurgical reintegration, and updated economics. Replication at other locations should be evaluated individually using the multicriteria matrix and site-specific business cases.

Keywords: pelletization, particulate matter, copper recovery, economic evaluation, mining innovation.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN Y CONCLUSIONES 2

2. ABSTRACT 3

3. CONTEXTO E INTRODUCCIÓN 7

4. RESUMEN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA 8

5. OBJETIVOS 9

5.1. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO 9

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO 9

6. MERCADO OBJETIVO 10

6.1. CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO OBJETIVO 10

6.2. JUSTIFICACIÓN DEL INTERÉS O NECESIDAD DE CONTAR CON LA SOLUCIÓN 10

7. DIAGNÓSTICO 11

7.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA 11

7.2. DIMENSIONAMIENTO DEL PROBLEMA 11

8. ESTADO DEL ARTE: SOLUCIONES EXISTENTES 14

8.1. SISTEMA DE MANEJO DE MINERAL Y GENERACIÓN DE POLVO 14

8.2. COMPORTAMIENTO Y EFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO 14

8.3. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES 15

8.4. AGLOMERACIÓN COMO ALTERNATIVA EMERGENTE 16

8.4.1. BENCHMARKING DE EQUIPOS PARA PELETIZAR O COMPACTAR 16

8.5. SÍNTESIS COMPARATIVA Y CRITERIOS DE SELECCIÓN 20

9. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN 21

9.1. CONFIGURACIÓN Y ALCANCE TECNOLÓGICO 21

9.2. CRITERIOS DE FACTIBILIDAD 22

10. DISEÑO DE PROPUESTA DE VALOR Y GRADO DE INNOVACIÓN 23

10.1. PROPUESTA DE VALOR 23

10.1.1. VALUE PROPOSITION CANVAS 23

10.2. GRADO DE INNOVACIÓN 23

10.3. RESULTADOS O BENEFICIOS ESPERADOS PARA EL MERCADO OBJETIVO 24

10.4. BENEFICIOS SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES 24

11. IDENTIFICACIÓN DE PRINCIPALES DESAFÍOS O BARRERAS 25
12. DISEÑO DE ESTRATEGIA DE NEGOCIO 26
12.1. SITUACIÓN ACTUAL 26
12.2. PROPUESTA ESTRATÉGICA 27
13. ESTIMACIÓN ECONÓMICA 29
13.1. ALCANCE, FUENTES Y CRITERIO DE DECISIÓN 29
13.2. CÁLCULO DEL COBRE RECUPERADO, INGRESOS Y AHORROS 30
13.3. INVERSIÓN, OPEX Y FLUJO DE CAJA DEL PILOTO 30
13.4. TASA CORPORATIVA E INDICADORES DEL PILOTO 31
13.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PILOTO 32
13.5.1. SENSIBILIDAD DEL OPEX 32
13.5.2. SENSIBILIDAD DEL PRECIO DEL COBRE Y DEL INGRESO 33
13.6. PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO DE PROYECTO PILOTO 34
13.6.1. METODOLOGÍA ACADÉMICA DE REPLICABILIDAD 34
13.6.2. MATRIZ DE PRIORIZACIÓN DE UBICACIONES FUTURAS 35
14. DESARROLLO DE ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN 36
14.1. ESTRATEGIA GENERAL DE VALIDACIÓN 36
14.2. INDICADORES Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN 37
14.3. ENSAYOS PRELIMINARES DE LABORATORIO 37
14.4. PRUEBA PILOTO CONTINUA Y DECISIÓN DE ESCALAMIENTO 39
15. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS 41
16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 42
17. ANEXOS 45
17.1. PROCEDENCIA, CONFIDENCIALIDAD Y AUTORIZACIÓN DE LOS ANTECEDENTES INTERNOS 45
17.2. DETALLE DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PILOTO 45
17.3. FUNDAMENTO METODOLÓGICO DE LA BASE DE 70 T/DÍA 47

ÍNDICES DE TABLAS, GRÁFICOS E ILUSTRACIONES

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de generación de polvo por operación minera. 16
Tabla 2. Value Proposition Canvas de la solución propuesta. 23
Tabla 3. Comparación de la propuesta con soluciones alternativas. 23
Tabla 4. Resultados e indicadores asociados a los objetivos específicos. 24
Tabla 5. Matriz de riesgos del piloto y estrategia de tratamiento. 25
Tabla 6. Estructura contractual vigente y adaptaciones requeridas para la peletizadora piloto. 27
Tabla 7. Supuestos, aplicación y trazabilidad del caso piloto de una peletizadora. 29
Tabla 8. Desarrollo del balance físico y del ingreso anual del piloto. 30
Tabla 9. Flujo de caja antes de impuestos del piloto con OPEX creciente. 31
Tabla 10. Indicadores económicos del caso base del piloto. 31
Tabla 11. Sensibilidad del VAN frente al escalador anual del OPEX. 32
Tabla 12. Sensibilidad del ingreso y del VAN al precio del cobre. 33
Tabla 13. Criterios, ponderaciones y reglas de puntuación para evaluar la replicabilidad. 35
Tabla 14. Matriz preliminar de priorización de ubicaciones futuras. 35
Tabla 15. Indicadores, criterios de aceptación y fundamento para la validación del piloto. 37
Tabla 16. Resultados preliminares del primer ensayo de compactación. 38
Tabla 17. Supuestos consolidados del caso piloto. 45
Tabla 18. Resultados económicos del caso piloto. 45
Tabla 19. Flujos antes de impuestos utilizados en la evaluación del piloto. 46
Tabla 20. Composición del presupuesto denominado CAPEX para el plan piloto. 46
Tabla 21. Trazabilidad metodológica y criterio de adopción de la base de 70 t/día. 47

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Base de diseño del piloto y referencia anual de generación de polvo. 12
Gráfico 2. Evolución del OPEX anual durante los cinco años bajo tres tasas de escalamiento. 32
Gráfico 3. Sensibilidad del ingreso anual y del VAN a cinco años frente al precio del cobre. 33
Gráfico 4. Resistencia mecánica medida en los ensayos con formación de briqueta. 38

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Zona de acopio de material particulado fino. 13
Ilustración 2. Sistema de manejo de mineral de la Mina Chuquicamata Subterránea. 14
Ilustración 3. Velocidad de deposición en función del tamaño de las partículas. 15
Ilustración 4. Clasificación del polvo según su penetración en el sistema respiratorio. 15
Ilustración 5. Briquetadora de carbón de la empresa Magri. 17
Ilustración 6. Briquetadora de polvo metálico de la empresa FTM. 17
Ilustración 7. Disco granulador de la empresa Gunt Gerätebau. 18
Ilustración 8. Disco peletizador para mineral de hierro de la empresa Metso. 18
Ilustración 9. Peletizadora estándar de la empresa Hengju. 18
Ilustración 10. Peletizadora de matriz plana de la empresa Kingpro. 18
Ilustración 11. Compactadora de polvo industrial de la empresa Runi. 19
Ilustración 12. Arquitectura conceptual y delimitación de la tecnología de interés. 21
Ilustración 13. Proceso integrado para captar, compactar y reincorporar el material particulado fino. 22
Ilustración 14. Niveles propuestos para validar la solución. 36
Ilustración 15. Briquetas obtenidas en las pruebas preliminares T.04 a T.06. 39

3. CONTEXTO E INTRODUCCIÓN

La acumulación de material particulado fino (PM), también denominado polvo, constituye un problema relevante en las plantas de la gran minería de Chile, especialmente en instalaciones ubicadas en el norte del país. En los procesos de chancado, transferencia y transporte mediante correas, las partículas pueden permanecer en suspensión o depositarse sobre pisos, estructuras, equipos y galerías.

Esta condición afecta la salud y seguridad ocupacional, aumenta las necesidades de aseo industrial y mantenimiento, puede reducir la disponibilidad de los activos y genera pérdidas de valor cuando el mineral fino no retorna al proceso. Las soluciones convencionales se concentran principalmente en controlar emisiones o retirar el material acumulado; sin embargo, existe una oportunidad de complementar esas medidas mediante el acondicionamiento, la aglomeración y la reincorporación controlada del material fino al sistema, pero con una forma física distinta (briquetas), para evitar se vuele con la velocidad de las correas transportadoras.

La tesina aborda esa oportunidad mediante un plan de negocio aplicado al sistema de chancado y transporte de mineral de la Mina Chuquicamata Subterránea. El aporte esperado consiste en integrar criterios técnicos, operacionales, ambientales y económicos para decidir si la solución puede avanzar desde ensayos preliminares hacia un piloto continuo y, posteriormente, a una implementación escalable.

4. RESUMEN DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

El problema que origina el proyecto es la acumulación de material particulado fino generado durante el chancado y transporte de mineral. El polvo depositado requiere limpieza, expone a trabajadores y equipos, puede dispersarse hacia otras áreas y representa mineral que no se reincorpora de manera estable al proceso. La solución propuesta considera como condición de entrada que el material haya sido captado desde puntos de acumulación o sistemas colectores. A partir de ese punto, contempla su almacenamiento temporal en un silo, alimentación dosificada, acondicionamiento con una cantidad técnicamente controlada de agua, compactación mediante una briquetadora, prensa o equipo de peletización y descarga del producto aglomerado sobre la correa transportadora. La propuesta busca transformar un residuo operacional en un flujo recuperable, reduciendo la dispersión secundaria y el manejo abierto del polvo. Su factibilidad deberá comprobarse mediante ensayos de humedad, presión y resistencia, seguidos por una prueba piloto continua que evalúe disponibilidad, capacidad de tratamiento, estabilidad del aglomerado, generación secundaria de polvo y compatibilidad metalúrgica. El modelo de negocio se basa en el valor del cobre fino recuperado y en costos evitados de aseo, manejo y detenciones. La evaluación económica preliminar del piloto utiliza un horizonte de cinco años, una tasa corporativa de descuento de 8 % y presenta VAN, TIR, payback, sensibilidad, índice de rentabilidad y CAPEX máximo justificable, sujetos a la validación interna de los restantes supuestos y del tratamiento tributario.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Desarrollar y evaluar un modelo de negocio y una metodología de decisión para el escalamiento condicionado de un proyecto piloto de recuperación, acondicionamiento, peletización y reincorporación de material particulado fino en la Mina Chuquicamata Subterránea, integrando criterios técnicos, operacionales, ambientales, contractuales y económicos.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO

- Definir la configuración de una solución integrada de acondicionamiento, aglomeración y reincorporación del material particulado fino al proceso.
- Evaluar preliminarmente la factibilidad técnica del acondicionamiento y la aglomeración mediante los antecedentes de compactación disponibles y un plan de ensayos y prueba piloto.
- Estimar los impactos operacionales, de seguridad y ambientales mediante indicadores verificables.
- Evaluar preliminarmente el caso económico del proyecto mediante la tasa corporativa de descuento, VAN, TIR, payback, índice de rentabilidad y CAPEX máximo justificable, identificando las validaciones internas requeridas para consolidar inversión, costos, beneficios y tratamiento tributario.

6. MERCADO OBJETIVO

6.1. CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO OBJETIVO

El mercado objetivo inicial corresponde a la División Chuquicamata de Codelco y, específicamente, a las áreas que intervienen en el sistema de chancado y transporte de mineral de la Mina Chuquicamata Subterránea. Se trata de una aplicación industrial interna, de gran escala y operación continua, en la que la solución deberá integrarse sin comprometer la capacidad de transporte ni la disponibilidad de los activos.

Usuario operacional. La Superintendencia de Chancado y Transporte de Mineral requiere disminuir la acumulación de polvo sin interferir con el flujo de mineral ni generar nuevas detenciones.

Mantenimiento y confiabilidad. Estas áreas requieren una solución mantenible, con acceso seguro, disponibilidad de repuestos y compatibilidad con los servicios y espacios de la mina.

Seguridad, salud ocupacional y medio ambiente. Su interés es reducir la exposición de las personas, controlar la dispersión y mantener trazabilidad sobre el desempeño ambiental.

Procesos metalúrgicos y gestión del negocio. Deben verificar la compatibilidad del material reincorporado y cuantificar los beneficios técnicos y económicos.

Como mercado secundario potencial se consideran otras plantas mineras con problemas comparables de acumulación de finos. Esta posibilidad de escalamiento no se utiliza como base de ingresos en la evaluación actual y deberá validarse mediante evidencia comercial y técnica específica.

Gobernanza de adopción. La decisión distingue cuatro roles: el Comité Técnico Asesor prioriza técnicamente el piloto; Operaciones y Procesos Metalúrgicos validan desempeño y compatibilidad; Proyectos y Finanzas revisan inversión y retorno; y Abastecimiento y Contratos administran el instrumento contractual. La implementación requiere evidencia aceptada, disponibilidad presupuestaria y las aprobaciones internas aplicables.

6.2. JUSTIFICACIÓN DEL INTERÉS O NECESIDAD DE CONTAR CON LA SOLUCIÓN

El interés se fundamenta en cuatro necesidades simultáneas: proteger a los trabajadores; disminuir la acumulación y dispersión secundaria; evitar pérdidas de disponibilidad por limpieza o intervención; y recuperar valor desde un material que actualmente no retorna de forma continua y controlada al proceso. Parte del polvo retirado se reincorpora mediante equipos móviles al sistema Overland, pero el manejo abierto puede volver a dispersar partículas y no asegura una alimentación estable ni medible.

7. DIAGNÓSTICO

7.1. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

El polvo se genera por fragmentación, caída, impacto y turbulencia durante el chancado y las transferencias entre correas. La fracción fina puede ser movilizada por la ventilación y depositarse en superficies alejadas de la fuente. Cuando el material ya está acumulado, su retiro exige tareas de aseo industrial, uso de equipos móviles o soluciones mecanizadas, todas posteriores a la generación del problema (Kissell, 2003; Swinderman et al., 2009).

Las causas principales son la generación continua de finos, la existencia de puntos de transferencia, la movilización por corrientes de aire y la falta de un tratamiento estable para reincorporar el material depositado. Sus efectos comprenden exposición ocupacional, riesgo de dispersión, desgaste y ensuciamiento de equipos, uso de recursos de limpieza, posibles detenciones y pérdida de cobre fino.

7.2. DIMENSIONAMIENTO DEL PROBLEMA

El procedimiento de bandejas estimó indirectamente una generación agregada de 84,29 t/día para el sistema evaluado. La estimación utiliza bandejas de 43 cm por 32 cm, con un área de 0,1376 m², expuestas durante 24 horas; la masa recuperada se normaliza por superficie y se extrapola al área representativa de cada equipo. Por decisión del Comité Técnico Asesor de Codelco, el piloto adopta una base conservadora de 70 t/día, equivalente al 83,05 % de la estimación agregada y 14,29 t/día inferior a ella. Por tanto, 70 t/día es un criterio de diseño derivado de mediciones, no una lectura directa ni una demostración de capacidad continua de la peletizadora. El procedimiento, la conciliación y sus limitaciones se presentan en el Anexo 17.4, sustentado en un antecedente de Codelco proveniente del Comité Técnico Asesor (2024) y en antecedentes operacionales internos de 2026.

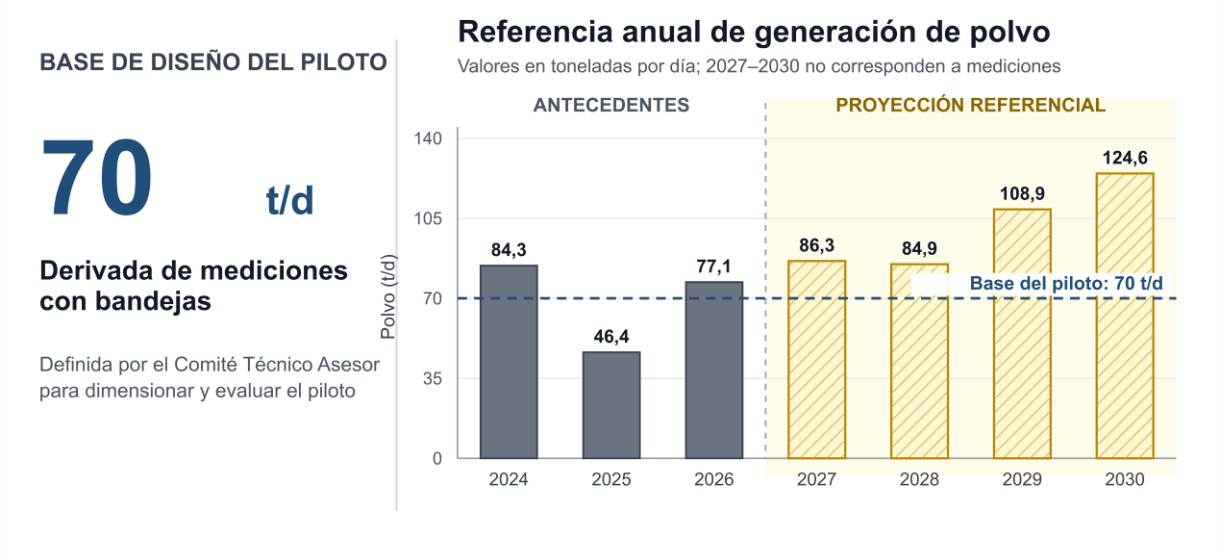


Gráfico 1. Base de diseño del piloto y referencia anual de generación de polvo.

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes de Codelco División Chuquicamata. Las 70 t/d corresponden a la base conservadora de diseño, derivada de mediciones con bandejas y definida por el Comité Técnico Asesor para el piloto. Los valores 2027–2030 corresponden a una proyección referencial y no a mediciones.

Como antecedente complementario, una cubicación interna del acopio superficial reporta 22.884,6 m³. Al aplicar una densidad de 2,68 t/m³, el inventario estimado alcanza aproximadamente 61.331 t. Esta existencia acumulada complementa la medición diaria con bandejas, pero antes de utilizarla como base de valorización deberán confirmarse la fecha, el método de cubicación y la representatividad de la densidad.



Ilustración 1. Zona de acopio de material particulado fino.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedente aportado por el suscrito y utilizado con autorización de la organización.

8. ESTADO DEL ARTE: SOLUCIONES EXISTENTES

8.1. SISTEMA DE MANEJO DE MINERAL Y GENERACIÓN DE POLVO

La Mina Chuquicamata Subterránea opera un sistema continuo que integra chancado primario, transporte intermedio y transporte principal hasta superficie. La sucesión de transferencias, correas y puntos de descarga explica la relevancia de controlar la generación y deposición de material particulado (Codelco División Chuquicamata, 2026b).

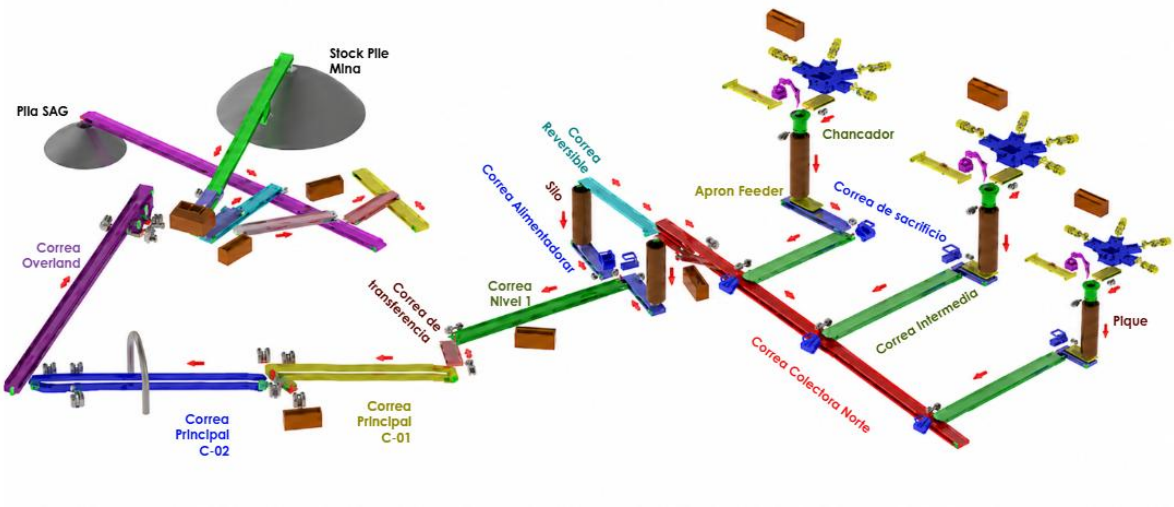


Ilustración 2. Sistema de manejo de mineral de la Mina Chuquicamata Subterránea.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedente aportado por el suscrito y utilizado con autorización de la organización.

8.2. COMPORTAMIENTO Y EFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO

El comportamiento del polvo depende de su granulometría. Las partículas menores pueden permanecer más tiempo en suspensión, mientras que las de mayor tamaño tienden a sedimentarse. La dimensión respiratoria y la masa depositada deben medirse con metodologías distintas y no son magnitudes intercambiables (Bozo Godoy & Bozo Nalli, 2024; Hartman et al., 1982).

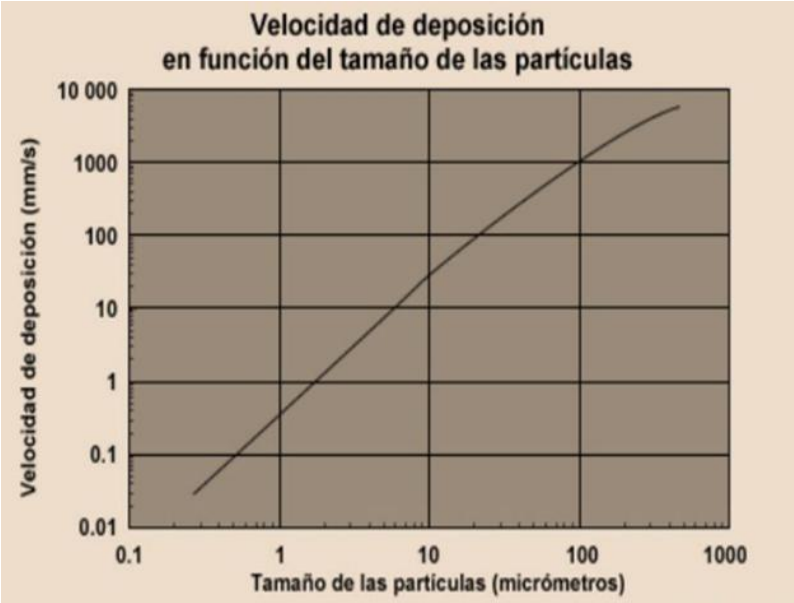


Ilustración 3. Velocidad de deposición en función del tamaño de las partículas.

Fuente: Bozo Godoy y Bozo Nalli (2024).

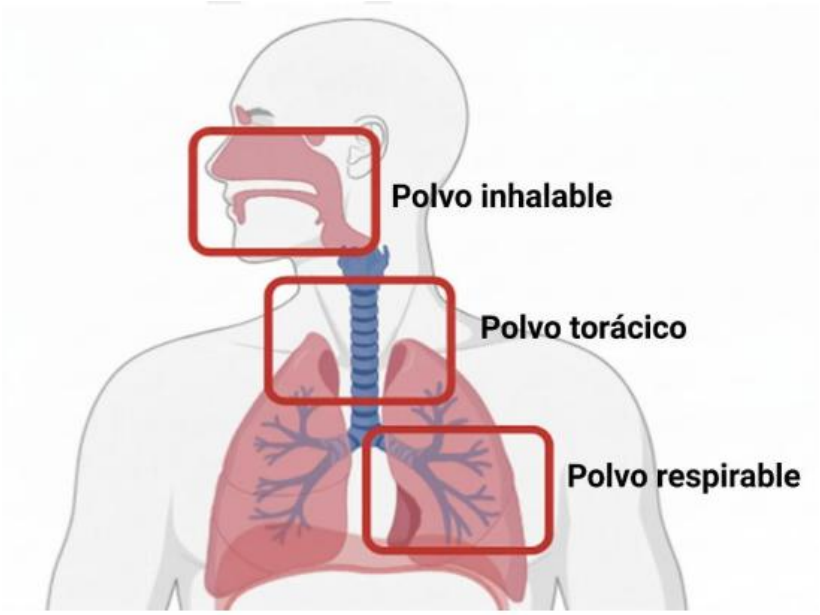


Ilustración 4. Clasificación del polvo según su penetración en el sistema respiratorio.

Fuente: Bozo Godoy y Bozo Nalli (2024).

8.3. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Las soluciones existentes pueden agruparse en sistemas pasivos, activos y mixtos. Los sistemas pasivos utilizan confinamientos y sellos; los activos incorporan supresión mediante agua o agentes químicos, ventilación y captación por filtros; y los mixtos combinan ambas estrategias. Estas tecnologías reducen emisiones, pero no necesariamente resuelven la acumulación progresiva ni la reincorporación estable del material sedimentado (Cavada Vera, 2016; Kissell, 2003; Swinderman et al., 2009).

Cuando el polvo ya se encuentra acumulado, las operaciones recurren a aseo manual, equipos móviles, aspiración industrial o soluciones robotizadas y tele operadas. En una búsqueda tecnológica internacional desarrollada para Codelco se identificaron, además, alternativas de compactación por presión, aglomeración mediante disco o tambor, aplicación de aglomerantes y sistemas de encapsulamiento. La comparación evidenció que cada familia presenta diferencias en madurez, complejidad, necesidad de agua o aditivos, resistencia del producto y facilidad de integración industrial (Ennomotive, 2025).

Tabla 1. Rangos de generación de polvo por operación minera.

Operación	Rango de generación de polvo
Chancado	1-15 %
Harneado	5-10 %
Acopio	10-30 %
Recuperación del mineral desde el acopio	1-10 %
Sistemas de correas transportadoras	30-60 %

Fuente: Swinderman et al. (2009).

8.4. AGLOMERACIÓN COMO ALTERNATIVA EMERGENTE

La aglomeración aumenta el tamaño de las partículas finas mediante procesos físicos o fisicoquímicos, formando pellets o briquetas con propiedades que facilitan su manipulación, transporte y reincorporación. La revisión aplicada muestra que la presión mecánica permite reducir la dependencia de reactivos, pero exige validar la relación entre humedad, presión, resistencia y generación secundaria de polvo con el material específico de Chuquicamata (Szulc et al., 2024; Ennomotive, 2025).

La brecha identificada no corresponde a la ausencia de equipos comerciales, sino a la limitada evidencia de un sistema integrado que transforme el polvo captado en un producto estable, lo transporte sin nueva dispersión, lo reincorpore de forma continua y demuestre compatibilidad metalúrgica y rentabilidad en minería subterránea de gran escala. Esta brecha justifica la solución y su validación industrial.

8.4.1. BENCHMARKING DE EQUIPOS PARA PELETIZAR O COMPACTAR

Para la etapa de compactación de aglomerados se efectuó un benchmarking de equipos potencialmente adaptables a la recuperación del polvo. El principal referente conceptual fue el briquetado empleado en la minería del carbón, donde los finos se transforman en briquetas comercializables. También se revisó la industria agrícola, que utiliza peletizadoras para aserrín y biomasa y obtiene pellets cilíndricos de hasta 8 mm. Para esta aplicación, el producto no debería ser menor a 4 mm, con el fin de limitar la generación secundaria de finos en los procesos posteriores. La humedad deberá controlarse para evitar tanto el atollamiento por exceso de agua como el desprendimiento de material por falta de cohesión (Codelco División Chuquicamata, 2026b).

La primera alternativa corresponde a briquetadoras de carbón o de polvo metálico. La referencia de Magri presenta una capacidad de 1 a 2 t/h, una masa aproximada de 800 kg y briquetas de 20 a 60 mm. Para polvo metálico se revisó un equipo FTM de compactación hidráulica, con capacidades indicativas de 1 a 5 t/h en pequeña escala, 5 a 15 t/h en escala media y 15 a 35 t/h en gran escala. Estas capacidades deberán verificarse para el material de Chuquicamata y para la continuidad requerida por el piloto.



Ilustración 5. Briquetadora de carbón de la empresa Magri.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.



Ilustración 6. Briquetadora de polvo metálico de la empresa FTM.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.

La segunda alternativa es la peletización por disco. Su funcionamiento combina fuerzas giratorias, inclinación controlada y adición de agua o aglomerante para producir aglomerados por rodadura. El equipo de laboratorio de Gunt Gerätebau pesa aproximadamente 205 kg y dispone de un silo de 10 L, por lo que podría apoyar ensayos a escala reducida. Para una aplicación industrial se requeriría un equipo de mayor dimensión, como los discos utilizados por Metso en la industria del hierro.



Ilustración 7. Disco granulador de la empresa Gunt Gerätebau.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.



Ilustración 8. Disco peletizador para mineral de hierro de la empresa Metso.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.

La tercera alternativa reúne peletizadoras de la industria agrícola. La peletizadora estándar revisada presenta capacidades de 0,1 a 3 t/h, pellets de 4 a 12 mm y una masa aproximada de 1.000 kg. La alternativa de matriz plana se ofrece en diferentes configuraciones, con capacidades referenciales de 0,3 a 5 t/h, masas de 1,2 a 9,6 t y pellets de 6 a 12 mm. Su adaptación exigiría evaluar desgaste, alimentación, humedad, estabilidad del producto y compatibilidad con el proceso minero.



Ilustración 9. Peletizadora estándar de la empresa Hengju.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.



Ilustración 10. Peletizadora de matriz plana de la empresa Kingpro.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.

Como cuarta alternativa se revisó una compactadora industrial de polvo Runi. El equipo utiliza un tornillo sinfín, incorpora humectación durante el proceso y descarga el material en forma cilíndrica mediante una boquilla de 37 cm de diámetro. Su capacidad referencial es de 300 kg/h, inferior al

requerimiento medio de 7 t/h asociado a la base de diseño de 70 t/día, por lo que su utilidad se limitaría a ensayos o requeriría una configuración de mayor escala.

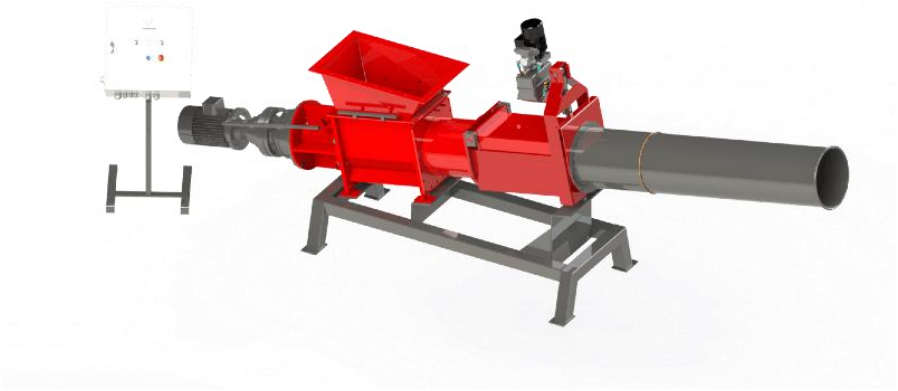


Ilustración 11. Compactadora de polvo industrial de la empresa Runi.

Fuente: Codelco División Chuquicamata (2026b), benchmarking tecnológico interno.

El benchmarking muestra que existen tecnologías maduras para formar briquetas o pellets, pero ninguna puede adoptarse únicamente a partir de su capacidad de catálogo. La selección para Chuquicamata debe comprobar alimentación continua, rango granulométrico, humedad, resistencia mecánica, generación secundaria de polvo, mantenibilidad, disponibilidad de repuestos y compatibilidad metalúrgica. En consecuencia, estas alternativas constituyen referentes para la ingeniería y la prueba piloto, no una selección comercial definitiva.

8.5. SÍNTESIS COMPARATIVA Y CRITERIOS DE SELECCIÓN

La búsqueda aplicada permite comparar las alternativas sin reproducir ofertas, proveedores ni condiciones comerciales de los antecedentes internos. Para la selección se priorizan resistencia, humedad, reducción de dispersión, capacidad continua, integración operacional y soporte técnico.

Compactación por presión. Aumenta el tamaño y la estabilidad del fino mediante esfuerzo mecánico. Puede operar sin aditivos, pero exige validar presión, humedad, desgaste y resistencia después del transporte.

Tambor o disco. Facilita el control del tamaño del aglomerado y puede tratar flujos continuos; normalmente requiere mayor humedad o un aglutinante, por lo que debe comprobarse su compatibilidad con los procesos posteriores.

Aglomerantes o aspersión. Permite reducir emisiones o formar micro aglomerados con equipos relativamente simples. Su evaluación debe considerar consumo de reactivo, estabilidad, trazabilidad y posibles efectos metalúrgicos.

Encapsulamiento y otras alternativas. Pueden disminuir la manipulación abierta del polvo, pero no siempre generan un flujo continuo, dosificado y recuperable para el proceso principal.

Síntesis. La compactación por presión se adopta como referencia para la tesina por su potencial de formar un producto transportable sin aditivos iniciales. La decisión definitiva queda condicionada al piloto y no representa una selección comercial (Ennomotive, 2025; Codelco División Chuquicamata, 2026c).

9. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

9.1. CONFIGURACIÓN Y ALCANCE TECNOLÓGICO

La solución considera cuatro etapas generales: captación del polvo, acondicionamiento, compactación y retorno. La captación se trata como condición de entrada y queda fuera del alcance tecnológico específico de esta tesina. La tecnología de interés comienza en el almacenamiento del material captado y comprende la alimentación controlada, la dosificación de agua, la compactación y la reincorporación del producto aglomerado.

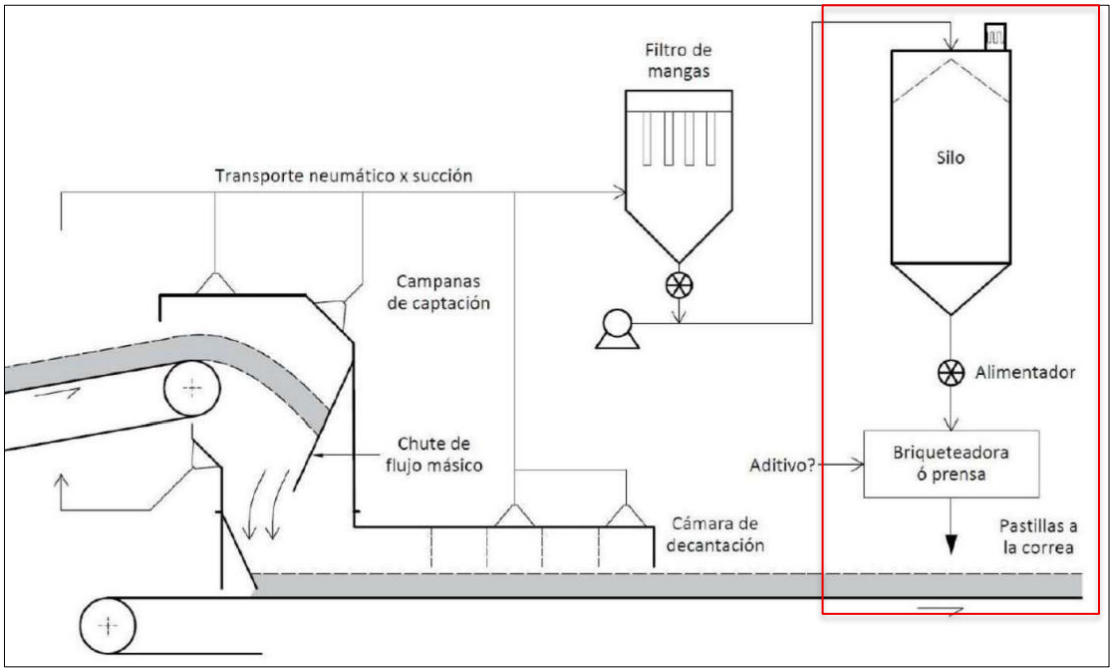


Ilustración 12. Arquitectura conceptual y delimitación de la tecnología de interés.

Nota: El recuadro rojo identifica la tecnología de interés: almacenamiento, alimentación, compactación mediante briquetadora o prensa y retorno del material aglomerado a la correa transportadora.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedente aportado por el suscrito y utilizado con autorización de la organización.

El material se almacena temporalmente en un silo y un alimentador regula su ingreso a una briquetadora, prensa o equipo de peletización. Se incorpora una dosificación técnicamente controlada de agua y se aplica presión mecánica. El material aglomerado se descarga sobre la correa siempre que cumpla criterios de resistencia, humedad, estabilidad y compatibilidad metalúrgica.

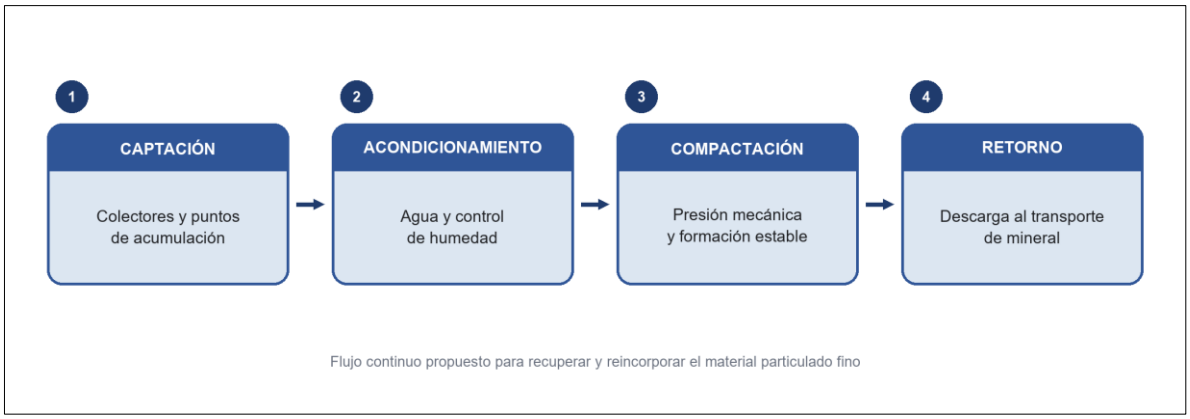


Ilustración 13. Proceso integrado para captar, compactar y reincorporar el material particulado fino.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedentes aportados por el suscrito y utilizados con autorización de la organización.

9.2. CRITERIOS DE FACTIBILIDAD

La factibilidad se evaluará mediante criterios verificables derivados del protocolo de prueba. En el ámbito técnico, el material deberá alcanzar resistencia suficiente, humedad controlada y estabilidad durante el transporte. En el ámbito operacional, el sistema deberá demostrar capacidad continua, disponibilidad, rendimiento y mantenibilidad sin introducir detenciones no controladas. En seguridad y medio ambiente deberá reducir la dispersión secundaria y la exposición de las personas. La compatibilidad metalúrgica y la conveniencia económica serán condiciones de aprobación antes del escalamiento (Codelco División Chuquicamata, 2026c).

10. DISEÑO DE PROPUESTA DE VALOR Y GRADO DE INNOVACIÓN

10.1. PROPUESTA DE VALOR

La propuesta de valor consiste en transformar material particulado fino, actualmente tratado como residuo operacional o pérdida de mineral, en un flujo recuperable y medible. La solución busca disminuir el manejo abierto del polvo, reducir intervenciones de limpieza y reincorporar el material al proceso con criterios técnicos verificables.

El Value Proposition Canvas relaciona las necesidades de las áreas usuarias con los componentes de la solución, de modo que cada atributo responda a un problema operacional o a un beneficio verificable.

10.1.1. VALUE PROPOSITION CANVAS

Tabla 2. Value Proposition Canvas de la solución propuesta.

Perfil del cliente	Mapa de valor
Trabajo del usuario Mantener el flujo de mineral, controlar la acumulación de polvo, proteger a las personas y recuperar material sin generar nuevas detenciones ni riesgos operacionales.	**Productos y servicios** Sistema integrado de almacenamiento, dosificación, acondicionamiento, aglomeración y descarga del material recuperado sobre la correa, acompañado por medición, control y validación piloto.
Dolores Exposición ocupacional, dispersión secundaria, limpieza recurrente, uso de equipos móviles, pérdida de disponibilidad, manipulación abierta y mineral fino que no se valoriza de manera estable.	**Aliviadores de dolores** Confinar el manejo del fino, estabilizarlo mecánicamente, reducir intervenciones de limpieza y verificar mediante ensayos que la reincorporación no afecte la continuidad ni el desempeño metalúrgico.
Beneficios esperados Menor exposición y acumulación, alimentación estable, trazabilidad del material recuperado, reducción de costos evitables y recuperación de cobre fino.	**Creadores de beneficios** Recuperación medible, dosificación controlada, seguimiento de indicadores, evidencia para decidir el escalamiento y una base cuantificable para capturar valor por mineral recuperado y costos evitados.

Fuente: Elaboración propia, basada en Osterwalder et al. (2014).

10.2. GRADO DE INNOVACIÓN

El grado de innovación radica en integrar control ambiental, continuidad operacional, trazabilidad y economía circular. No se atribuye novedad absoluta a los equipos por separado. En el alcance de la búsqueda realizada, la propuesta se presenta como una aplicación integrada no identificada en los referentes revisados: transforma material fino captado en un flujo estable y medible mediante almacenamiento, dosificación, compactación y retorno controlado. Frente al retorno abierto o al aseo correctivo, el sistema busca disminuir la ruptura y la dispersión secundaria durante el transporte, además de recuperar cobre contenido en el material (Ennomotive, 2025; Codelco División Chuquicamata, 2025b).

Tabla 3. Comparación de la propuesta con soluciones alternativas.

Criterio	Propuesta integrada	Control de emisiones	Aseo manual o robotizado
Momento de acción	Después de captar y antes de reincorporar	Durante la emisión	Después de la acumulación
Transformación física	Compacta el fino en un producto estable	No necesariamente modifica el material	Retira y traslada el polvo

Criterio	Propuesta integrada	Control de emisiones	Aseo manual o robotizado
Dispersión secundaria	Busca evitar ruptura y nueva emisión durante el retorno	Depende de la eficiencia del control	Puede reaparecer durante carga y descarga
Recuperación de valor	Integrada y medible	No integrada	Parcial y discontinua
Continuidad operacional	Flujo dosificado sujeto a disponibilidad	Depende del sistema de control	Requiere intervenciones periódicas
Validación requerida	Resistencia, humedad, emisiones, capacidad y metalurgia	Captura o supresión y cumplimiento ambiental	Productividad, exposición y frecuencia de limpieza

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión del estado del arte.

10.3. RESULTADOS O BENEFICIOS ESPERADOS PARA EL MERCADO OBJETIVO

Tabla 4. Resultados e indicadores asociados a los objetivos específicos.

Objetivo específico	Resultado esperado	Indicador preliminar
Definir la configuración	Arquitectura y alcance técnico documentados	Configuración aprobada por las áreas responsables
Validar desempeño técnico	Aglomerados estables y operación continua	Humedad, resistencia, reducción de emisiones, disponibilidad y rendimiento
Cuantificar impactos	Menor exposición, limpieza y dispersión secundaria	t/d recuperadas, HH de exposición, eventos de limpieza y concentración de polvo
Estructurar evaluación económica	Flujo de caja trazable a cinco años	CAPEX, OPEX, ahorros, VAN, TIR y payback

Fuente: Elaboración propia.

10.4. BENEFICIOS SOCIALES Y MEDIOAMBIENTALES

Los beneficios potenciales comprenden reducción de exposición y de intervenciones abiertas de limpieza, menor dispersión hacia áreas aledañas, disminución de material depositado sobre pisos y activos, mayor trazabilidad y valorización del mineral reincorporado. Estos resultados se alinean con los objetivos divisionales de excelencia operacional, recuperación de cobre, control de polvo, productividad, sostenibilidad y economía circular. Su evaluación diferenciará masa depositada, concentración aerotransportada y material efectivamente recuperado, utilizando una línea base y métodos comparables (Codelco División Chuquicamata, 2025a; Torres Muñoz, 2021).

11. IDENTIFICACIÓN DE PRINCIPALES DESAFÍOS O BARRERAS

Tabla 5. Matriz de riesgos del piloto y estrategia de tratamiento.

Categoría	Riesgo y evaluación	Tratamiento y responsable	R
Técnico	P: M | I: A Variabilidad de humedad, granulometría y composición.	Caracterización representativa y ensayos con réplicas. Responsable: Procesos y Proyecto.	M
Operacional	P: M | I: A Interferencia con el flujo, baja disponibilidad o mantenimiento insuficiente.	Piloto continuo, accesibilidad, mantenibilidad y registro de detenciones. Responsable: Operaciones y Mantenimiento.	M
Metalúrgico	P: M | I: A Agua o finos reincorporados afectan procesos posteriores.	Priorizar agua, conciliar el balance y exigir aprobación técnica. Responsable: Procesos Metalúrgicos.	B
Seguridad y ambiente	P: M | I: A Liberación de polvo en alimentación, compactación o descarga.	Confinamiento, ventilación localizada, permisos y monitoreo comparable. Responsable: Seguridad y Medio Ambiente.	M
Económico	P: A | I: A CAPEX, OPEX o beneficios difieren del escenario base.	Validar fuentes, actualizar el flujo y aplicar sensibilidad. Responsable: Finanzas y Proyecto.	M
Contractual	P: M | I: A Hitos, respaldos o aceptación no quedan verificables.	Anexo técnico, evidencias, responsables y aprobación por hitos. Responsable: Administración del acuerdo.	B
Proveedor	P: M | I: A Capacidad, repuestos o respuesta insuficientes durante el piloto.	Evidencia de recursos, stock crítico, soporte y plan de continuidad. Responsable: Abastecimiento y Proyecto.	M
Escalamiento	P: M | I: A Replicar sin caracterizar cada ubicación.	Aplicar la metodología del apartado 13.6 y un caso económico independiente. Responsable: Comité Técnico Asesor.	B

Nota: P/I = probabilidad/impacto; A = alta, M = media y B = baja. R = nivel residual esperado después del tratamiento. Fuente: Elaboración propia.

12. DISEÑO DE ESTRATEGIA DE NEGOCIO

La estrategia inicial corresponde a una aplicación interna en Codelco División Chuquicamata. El proyecto no se sustenta en ventas externas en esta etapa, sino en la combinación de valor recuperado y costos evitados. El ingreso incremental potencial proviene del cobre fino contenido en el material efectivamente reincorporado. Los ahorros potenciales se relacionan con aseo industrial, traslado o disposición de polvo, intervención de equipos móviles y pérdidas de disponibilidad operacional.

Caso económico base. La decisión inmediata corresponde a una planta piloto de una peletizadora, con CAPEX de USD 1.617.967, dimensionada para la base conservadora de 70 t/día aprobado por el Comité Técnico Asesor de Codelco y evaluada a cinco años. El valor anual se calcula a partir del cobre fino recuperado y del ahorro asociado a un camión sucker, descontando un OPEX variable en el tiempo. La existencia de otros sistemas de colección se reconoce únicamente como una oportunidad futura; su evaluación requerirá caracterizar individualmente generación, acceso, condiciones operacionales, capacidad, inversión y beneficios.

Cliente y usuario. División Chuquicamata y las áreas de chancado, transporte, mantenimiento, seguridad, medio ambiente y procesos metalúrgicos.

Mecanismo de valor. Recuperación de cobre fino más ahorros operacionales medidos contra una línea base.

Implementación. Ensayos de laboratorio, piloto continuo, evaluación integral y decisión de escalamiento por etapas.

Apropiabilidad. Documentación de parámetros, ubicación, operación, mantenimiento, KPI y lecciones del piloto, evitando dependencia exclusiva de conocimiento externo.

Escalamiento futuro. Replicación en otras áreas o plantas con problemas equivalentes, condicionada a validación técnica, económica y comercial específica.

12.1. SITUACIÓN ACTUAL

Origen y selección. La iniciativa no se originó en una licitación convencional de mantenimiento u operación de planta. Codelco planteó un reto internacional de innovación abierta orientado a transformar el polvo recuperado mediante aglomeración sin emisiones. El proceso convocó soluciones de distintas procedencias y tecnologías, y utilizó una revisión comparativa antes de seleccionar las alternativas que avanzarían a defensa técnica (Ennomotive[1], 2025).

Evaluación de las alternativas. El informe final registra 57 participantes inscritos y 24 propuestas entregadas. La selección consideró calidad de cohesión y tamaño del producto, evidencia de viabilidad, simplicidad e implementación, costo unitario y capacidad, además del soporte técnico para una

[1] Hub de innovación abierta para empresas, startups y expertos

prueba en instalaciones de Codelco. Los finalistas debían defender técnicamente sus propuestas. Esta etapa actuó como filtro de innovación y no como una orden de compra o un contrato de operación (Ennomotive, 2025).

Instrumento vigente. Una vez seleccionada la alternativa, la relación se formalizó mediante un Acuerdo de Desarrollo Tecnológico Conjunto. El instrumento vigente establece una ejecución temporal, reunión de inicio, administradores del acuerdo, actividades y pagos asociados a hitos verificables, respaldos documentales, garantía de cumplimiento, criterios de éxito para los estados finales, informe técnico de cierre y obligaciones de ética y cumplimiento. La modificación revisada reordenó actividades y amplió la vigencia a doce meses, manteniendo el control del compromiso total; por confidencialidad, esta tesina no reproduce la identidad de la contraparte tecnológica, los montos ni las condiciones comerciales específicas (Codelco División Chuquicamata, 2026i).

Tabla 6. Estructura contractual vigente y adaptaciones requeridas para la peletizadora piloto.

Elemento del esquema vigente	Funcionamiento observado	Adaptación exclusiva para la peletizadora piloto
Ingreso al proceso	Reto de innovación abierta, evaluación comparativa y defensa técnica.	Conservar la trazabilidad de la alternativa ya seleccionada; no repetir una licitación convencional para validar el piloto.
Alcance y vigencia	Acuerdo temporal de desarrollo tecnológico, iniciado mediante reunión formal y acta.	Anexo técnico con base de 70 t/día, operación de 10 h/día, interfaces, límites de humedad y retorno seguro a la correa.
Gobierno	Administradores del acuerdo, coordinación entre las partes y aprobación documentada.	Incorporar responsables de Operaciones, Mantenimiento, Seguridad, Medio Ambiente y Procesos Metalúrgicos en las decisiones técnicas.
Hitos y respaldos	Laboratorio, preparación, integración, instalación, pruebas progresivas, productividad, reincorporación e informe final.	Vincular cada hito con entregables, evidencia y criterios de aceptación del capítulo 14; separar preparación, operación estable y cierre.
Pago y garantía	Estados de pago contra hitos aceptados, documentación de respaldo y garantía de cumplimiento.	Mantener el pago por hitos y condicionar los hitos finales a resultados verificables, con evidencia aprobada por la administración del acuerdo.
Seguridad y cumplimiento	Acreditación, inducción, obligaciones éticas, prevención de delitos y control del personal.	Añadir requisitos de trabajo en mina subterránea, permisos, bloqueo, control de polvo, capacitación y gestión de contratistas.
Cierre y trazabilidad	Informe técnico final, revisión de Codelco, corrección de observaciones y cierre formal.	Entregar base de datos, parámetros, manuales, registros de fallas, consumo, mantenimiento y evidencia de reincorporación, resguardando la confidencialidad.

Fuente: Elaboración propia a partir de Ennomotive (2025) y Codelco División Chuquicamata (2026i).

12.2. PROPUESTA ESTRATÉGICA

La recomendación académica es conservar la estructura del Acuerdo de Desarrollo Tecnológico y adaptar únicamente su anexo técnico, los hitos, los respaldos y los criterios de aceptación a la configuración del piloto. No se propone crear una modalidad contractual paralela ni transformar esta etapa en un servicio permanente.

Pago y control de cumplimiento. El pago debe mantenerse vinculado al cumplimiento verificable de hitos, mediante estados de pago revisados por la administración del acuerdo y respaldados por informes, registros de prueba, actas, resultados de laboratorio y documentación de instalación. Los hitos finales deben quedar condicionados al cumplimiento de los criterios técnicos definidos en el capítulo

14, sin convertir resultados no atribuibles al desarrollador en descuentos automáticos (Codelco División Chuquicamata, 2026i).

Delimitación del modelo futuro. Si después de validar el piloto Codelco decide tercerizar la operación completa, deberá estructurar un proceso separado de abastecimiento, consultar el mercado y definir asignación de riesgos, bases de medición y forma de pago con antecedentes reales. Esa eventual contratación no se modela en esta tesina ni modifica el instrumento utilizado para el desarrollo tecnológico.

Ruta contractual resultante. Reto de innovación abierta; evaluación y defensa técnica; Acuerdo de Desarrollo Tecnológico; adaptación del anexo técnico para la peletizadora; ejecución y aceptación de hitos; prueba continua e informe final; y, solo con resultados validados, decisión sobre escalamiento o una eventual contratación de servicios independiente (Ennomotive, 2025; Codelco División Chuquicamata, 2026i).

13. ESTIMACIÓN ECONÓMICA

La decisión prioritaria evaluada en este capítulo es implementar una planta piloto con una peletizadora, financiada con recursos propios de Codelco, para una base conservadora de 70 toneladas diarias de polvo y una ventana de operación de 10 horas por día. La base fue definida por el Comité Técnico Asesor de Codelco a partir de una estimación agregada de 84,29 t/día obtenida mediante bandejas y extrapolación por superficie. El análisis se presenta en USD, antes de impuestos, para un horizonte de cinco años y con una tasa corporativa de descuento de 8 %. Su propósito es establecer si el piloto tiene mérito económico suficiente para avanzar a validación; no constituye todavía una autorización de inversión ni reemplaza la ingeniería de detalle, la prueba continua o la aprobación corporativa.

13.1. ALCANCE, FUENTES Y CRITERIO DE DECISIÓN

El caso base vincula explícitamente las variables físicas con el resultado financiero. La ley de cobre, la recuperación metalúrgica y el OPEX unitario provienen del Informe de gestión de contratos y proyectos de Codelco División Chuquicamata. El ahorro por eliminar un camión sucker se respalda en el contrato vigente del servicio de aseo industrial. El presupuesto de inversión proviene de la planilla interna CAPEX PELETIZADORA, que consolida el contrato base del plan piloto en CLP y USD. El precio del cobre se evalúa con un caso prudente de USD 6,00/lb y con la referencia de la Bolsa de Metales de Londres. La tasa corporativa de 8 % fue indicada para esta evaluación y deberá quedar formalmente confirmada por el área financiera antes de solicitar la aprobación de inversión. El CAPM de 10,24 % se conserva solo como contraste académico de robustez. Los documentos internos se citan como respaldo, pero no se reproducen en anexos por su confidencialidad parcial (Codelco División Chuquicamata, 2026d, 2026e, 2026g, 2026h; London Metal Exchange, 2026).

Tabla 7. Supuestos, aplicación y trazabilidad del caso piloto de una peletizadora.

Variable	Valor utilizado	Aplicación en el modelo	Fuente o condición
Tratamiento	70 t/día	25.550 t húmedas/año	Base conservadora aprobada por el Comité Técnico Asesor; derivada de una estimación de 84,29 t/día
Régimen diario	10 h/día	7,0 t/h de capacidad media	Condición operativa propuesta
Días de operación	365 días/año	Continuidad calendario	Supuesto de prefactibilidad; sujeto a disponibilidad
Humedad	2,00 %	Se descuenta antes de aplicar la ley	Supuesto de cálculo
Ley de cobre	0,89 % Cu	Cobre contenido en masa seca	Informe interno de gestión, mayo de 2026
Recuperación metalúrgica	75,00 %	Cobre fino económicamente recuperable	Informe interno de gestión, mayo de 2026
Precio base del cobre	USD 6,00/lb	Ingreso del caso base	Supuesto prudente de la evaluación
Precio LME de referencia	USD 14.371 / t; USD 6,52 / lb	Sensibilidad de mercado	Cash settlement del 4 de septiembre de 2026
OPEX unitario	USD 11,48/t húmeda	Costo del año 1	Informe interno de gestión, mayo de 2026
Escalador OPEX	4,00 % anual	Años 2 a 5	Supuesto base; sensibilidad entre 2 % y 6 %

Variable	Valor utilizado	Aplicación en el modelo	Fuente o condición
Ahorro camión sucker	USD 48.000/año	Costo contractual evitado	Contrato vigente de aseo industrial
CAPEX piloto	USD 1.617.967	Desembolso en año 0	Planilla interna CAPEX PELETIZADORA; CLP 926/USD
Tasa de descuento	8,00 %	Descuento de flujos	Tasa corporativa indicada para la evaluación; validar formalmente con Finanzas
Horizonte	5 años	Años 0 a 5	Criterio acordado para evaluar recuperación y creación de valor

Fuente: Elaboración propia a partir de Codelco División Chuquicamata (2026d, 2026e, 2026g, 2026h), London Metal Exchange (2026) y antecedentes financieros indicados para esta evaluación. El CAPM utiliza Board of Governors of the Federal Reserve System (2026) y Damodaran (2026a, 2026b) únicamente como contraste.

13.2. CÁLCULO DEL COBRE RECUPERADO, INGRESOS Y AHORROS

La estimación del ingreso no adopta un monto global sin explicación. Parte de las toneladas húmedas tratadas, descuenta la humedad, aplica la ley de cobre y posteriormente la recuperación metalúrgica. El cobre recuperado se convierte desde toneladas métricas a libras mediante el factor 2.204,6226 lb/t y se valoriza a USD 6,00/lb. El ahorro del camión sucker se presenta por separado para evitar mezclar recuperación metalúrgica con costos contractuales evitados.

Tabla 8. Desarrollo del balance físico y del ingreso anual del piloto.

Paso	Cálculo aplicado	Resultado anual	Lectura del resultado
1. Mineral húmedo tratado	70 t/día × 365 días	25.550 t	Masa que ingresa a la peletizadora
2. Mineral seco	25.550 t × (1 - 2 %)	25.039 t	Base seca utilizada para aplicar la ley
3. Cobre contenido	25.039 t × 0,89 %	222,847 t Cu	Cobre presente antes de recuperación
4. Cobre recuperado	222,847 t × 75 %	167,135 t Cu	Cobre fino recuperable considerado
5. Conversión a libras	167,135 t × 2.204,6226 lb/t	368.470 lb Cu	Cantidad anual comercializable en el modelo
6. Ingreso por cobre	368.470 lb × USD 6,00/lb	USD 2.210.822	Ingreso bruto anual antes de descuentos comerciales
7. Ahorro contractual	1 camión sucker eliminado	USD 48.000	Ahorro anual del contrato de aseo
8. Beneficio bruto	Ingreso por cobre + ahorro	USD 2.258.822	Beneficio anual antes de OPEX

Fuente: Elaboración propia. Ley, recuperación y OPEX: Codelco División Chuquicamata (2026d). Ahorro de camión sucker: Codelco División Chuquicamata (2026g).

El ingreso anual por cobre del caso base es USD 2.210.822 y el ahorro contractual es USD 48.000, por lo que el beneficio bruto asciende a USD 2.258.822. El cálculo no incorpora cargos de tratamiento o refinación, deducciones pagables, primas, impuestos, depreciación, capital de trabajo ni valor residual. Estas partidas deberán incorporarse si Codelco exige una evaluación financiera posterior a la validación del piloto.

13.3. INVERSIÓN, OPEX Y FLUJO DE CAJA DEL PILOTO

La planilla interna CAPEX PELETIZADORA consolida un presupuesto denominado CAPEX para el contrato base del plan piloto de CLP 1.498.237.422. Con el tipo de cambio de CLP 926/USD

incorporado en la planilla, el total equivale a USD 1.617.966,98, redondeado a USD 1.617.967 para el modelo. Las partidas de mayor peso son insumos aportados para el sistema (24,7 %), contingencias (19,4 %), arriendo de herramientas y equipos (16,7 %), gastos generales (15,5 %) y mano de obra (13,8 %). La composición completa se presenta en la Tabla 20 del Anexo 17.2. Para esta evaluación de prefactibilidad se mantiene el total como desembolso inicial en el año 0. Antes de la aprobación, Finanzas deberá confirmar la clasificación contable y el calendario de desembolso de mano de obra, arriendos, gastos generales, utilidades y contingencias, porque algunas partidas podrían tratarse como OPEX o pagos contractuales. El OPEX del año 1 se calcula como 25.550 t × USD 11,48/t = USD 293.314 y aumenta 4 % anual hasta el año 5 para representar la exposición a energía, mantenimiento, repuestos, consumibles y servicios (Codelco División Chuquicamata, 2026h).

Tabla 9. Flujo de caja antes de impuestos del piloto con OPEX creciente.

Concepto	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso por cobre	-	USD 2.210.822	USD 2.210.822	USD 2.210.822	USD 2.210.822	USD 2.210.822
Ahorro camión sucker	-	USD 48.000	USD 48.000	USD 48.000	USD 48.000	USD 48.000
OPEX	-	(USD 293.314)	(USD 305.047)	(USD 317.248)	(USD 329.938)	(USD 343.136)
Inversión inicial	(USD 1.617.967)	-	-	-	-	-
Flujo neto	(USD 1.617.967)	USD 1.965.508	USD 1.953.775	USD 1.941.574	USD 1.928.884	USD 1.915.686

Fuente: Elaboración propia. Montos en USD; los valores entre paréntesis identifican egresos. El OPEX aumenta 4 % anual desde el año 2 y la evaluación se extiende hasta el año 5.

13.4. TASA CORPORATIVA E INDICADORES DEL PILOTO

El caso base utiliza la tasa corporativa de descuento de 8 % indicada para la evaluación del piloto. Esta tasa representa el criterio de decisión solicitado para descontar los flujos y deberá ser confirmada formalmente por Finanzas antes de presentar el caso para aprobación. Como contraste académico, el CAPM previamente calculado alcanza 10,24 % a partir de una tasa libre de riesgo de 4,70 %, beta desapalancada de 1,05, prima de mercado maduro de 4,23 % y prima de riesgo país Chile de 1,10 %. Al aplicar ese CAPM de referencia, el VAN a cinco años permanece positivo en USD 5.704.479, por lo que la conclusión económica no depende exclusivamente de la tasa corporativa (Board of Governors of the Federal Reserve System, 2026; Damodaran, 2026a, 2026b).

Tabla 10. Indicadores económicos del caso base del piloto.

Indicador	Resultado	Definición aplicada	Interpretación
VAN	USD 6.139.850	Valor presente a 8 % menos CAPEX	Crea valor en el escenario base
TIR	118,50 %	Tasa que hace VAN = 0	Supera la tasa corporativa
Payback simple	0,82 años (9,9 meses)	CAPEX / flujo del año 1	Recuperación dentro del primer año
Payback descontado	0,89 años (10,7 meses)	Flujos descontados a 8 %	Recuperación descontada dentro del primer año
Índice de rentabilidad	4,79 veces	Valor presente de entradas / CAPEX	USD 4,79 de valor presente bruto por USD invertido
CAPEX máximo justificable	USD 7.757.817	Valor presente de los flujos operacionales; VAN = 0	Límite económico teórico antes de impuestos

Fuente: Elaboración propia. Evaluación a cinco años con tasa corporativa de 8 %, antes de impuestos, sin valor residual ni capital de trabajo.

El VAN de USD 6.139.850, la TIR de 118,50 % y el payback simple de 0,82 años muestran que el piloto es económicamente atractivo bajo los supuestos definidos. El CAPEX máximo justificable de USD 7.757.817 corresponde al valor presente de los flujos operacionales que hace VAN igual a cero; no constituye un presupuesto disponible ni autoriza aumentar la inversión. El resultado debe interpretarse como señal para avanzar a la prueba continua, no como confirmación de beneficios realizados, porque la instalación todavía no opera y la disponibilidad de 365 días es un supuesto de prefactibilidad.

13.5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PILOTO

La sensibilidad separa dos fuentes de incertidumbre: la evolución del OPEX y el precio del cobre. En todos los escenarios se mantiene la misma producción física, CAPEX, ahorro contractual, horizonte de cinco años y tasa corporativa de 8 %, de modo que la comisión pueda identificar exactamente qué variable cambia y cuál es su efecto.

13.5.1. SENSIBILIDAD DEL OPEX

Tabla 11. Sensibilidad del VAN frente al escalador anual del OPEX.

Escalador anual	OPEX año 1	OPEX año 2	OPEX año 3	OPEX año 4	OPEX año 5	VAN a 8 %
2 %	USD 293.314	USD 299.180	USD 305.164	USD 311.267	USD 317.493	USD 6.185.649
4 %	USD 293.314	USD 305.047	USD 317.248	USD 329.938	USD 343.136	USD 6.139.850
6 %	USD 293.314	USD 310.913	USD 329.568	USD 349.342	USD 370.302	USD 6.092.290

Fuente: Elaboración propia. Evaluación a cinco años, tasa corporativa de 8 %, precio del cobre fijo en USD 6,00/lb y ahorro fijo en USD 48.000/año.

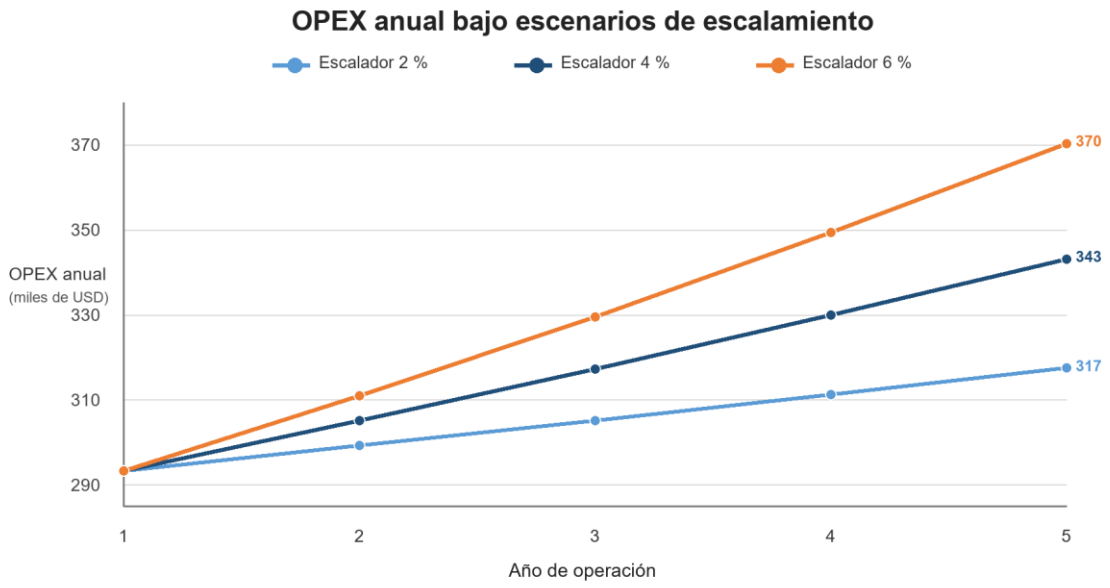


Gráfico 2. Evolución del OPEX anual durante los cinco años bajo tres tasas de escalamiento.

Fuente: Elaboración propia a partir del OPEX unitario informado por Codelco División Chuquicamata (2026d).

El VAN disminuye desde USD 6.185.649 con un escalador de 2 % hasta USD 6.092.290 con 6 %. La variación no elimina la creación de valor, pero confirma que el OPEX debe evolucionar durante todo el horizonte y no mantenerse fijo.

13.5.2. SENSIBILIDAD DEL PRECIO DEL COBRE Y DEL INGRESO

El 4 de septiembre de 2026, el precio cash settlement del cobre grado A fue USD 14.371 por tonelada métrica, equivalente a USD 6,52/lb. Esta referencia es 8,6 % superior al precio base de USD 6,00/lb. Como una cotización puntual no constituye una proyección a cinco años, se mantiene USD 6,00/lb como caso prudente y se evalúan variaciones de ±10 % y ±20 % alrededor del precio LME (London Metal Exchange, 2026; Westmetall, 2026).

Tabla 12. Sensibilidad del ingreso y del VAN al precio del cobre.

Escenario	Precio USD/lb	Equivalente USD/t	Ingreso anual por cobre	VAN a 5 años
LME -20 %	USD 5,21	USD 11.497	USD 1.921.521	USD 4.984.755
LME -10 %	USD 5,87	USD 12.934	USD 2.161.712	USD 5.943.768
Caso base	USD 6,00	USD 13.228	USD 2.210.822	USD 6.139.850
LME 04-09-2026	USD 6,52	USD 14.371	USD 2.401.902	USD 6.902.777
LME +10 %	USD 7,17	USD 15.808	USD 2.642.092	USD 7.861.786
LME +20 %	USD 7,82	USD 17.245	USD 2.882.282	USD 8.820.795

Fuente: Elaboración propia. Referencia LME al 4 de septiembre de 2026; evaluación a cinco años, tasa corporativa de 8 %, OPEX escalado 4 % anual y demás variables del caso base sin cambios.

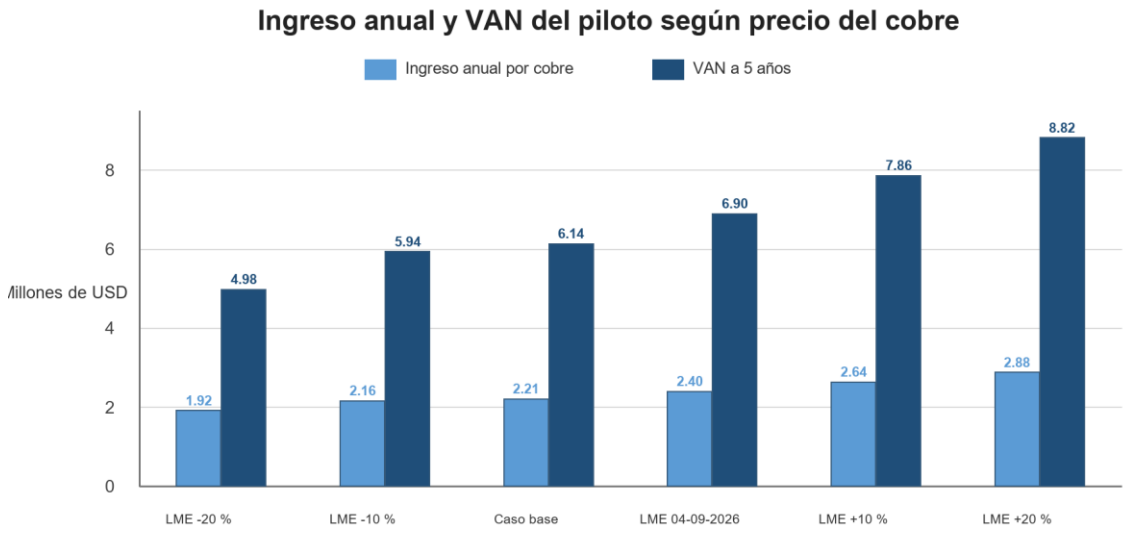


Gráfico 3. Sensibilidad del ingreso anual y del VAN a cinco años frente al precio del cobre.

Fuente: Elaboración propia a partir de London Metal Exchange (2026) y Westmetall (2026).

Con el precio LME de USD 6,52/lb, el ingreso anual por cobre aumenta a USD 2.401.902 y el VAN a cinco años alcanza USD 6.902.777. El precio de equilibrio que hace VAN = 0 es aproximadamente USD 1,83/lb, equivalente a USD 4.027/t. Este umbral corresponde únicamente al modelo simplificado

antes de impuestos; no incorpora descuentos comerciales ni desviaciones de disponibilidad o recuperación.

13.6. PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE ESCALAMIENTO DE PROYECTO PILOTO

La planta dispone de varios sistemas de colección de polvo, por lo que existe una oportunidad futura de replicar la solución si el piloto resulta exitoso. La replicación no forma parte del caso económico base ni puede estimarse mediante una multiplicación lineal de capacidad, inversión, costos o beneficios. Cada ubicación presenta condiciones propias de generación de polvo, ventilación, humedad, granulometría, interfaces, espacio y mantenimiento. Por ello, se propone una metodología trazable que combine requisitos de elegibilidad, evaluación técnico-económica y priorización multicriterio. Las zonas interiores de la mina reciben mayor exigencia relativa por exposición de trabajadores, seguridad operacional y necesidad de controlar la dispersión del polvo; esta prioridad no exime la validación individual de cada caso.

13.6.1. METODOLOGÍA ACADÉMICA DE REPLICABILIDAD

La replicabilidad se entenderá como la capacidad de obtener, en una nueva ubicación y dentro de márgenes previamente definidos, un desempeño técnico, económico, social, de seguridad y ambiental equivalente al observado en el piloto. La decisión se adoptará mediante el siguiente procedimiento secuencial:

1. **Cierre de la evidencia del piloto.** Consolidar la línea base, el balance de masa, la disponibilidad, la calidad del producto, las emisiones y las condiciones de operación estable; distinguir los resultados medidos de las proyecciones.
2. **Caracterización del sitio candidato.** Levantar tonelaje y variabilidad, humedad, granulometría, ley y recuperación, ventilación, exposición de personas, accesos, energía, espacio, interferencias y mantenibilidad.
3. **Configuración específica.** Definir capacidad, equipos auxiliares, puntos de alimentación y descarga, controles, obras de integración y compatibilidad con el proceso metalúrgico del emplazamiento.
4. **Evaluación económica independiente.** Estimar CAPEX, OPEX y beneficios propios del sitio; calcular VAN y payback con la tasa corporativa de 8 % y sensibilizar las variables de mayor incertidumbre.
5. **Verificación de condiciones habilitantes.** Confirmar factibilidad técnica, compatibilidad metalúrgica, aprobación de seguridad, cumplimiento ambiental, mantenibilidad y disponibilidad de datos. El incumplimiento de una condición crítica impide replicar, aunque el resultado económico sea favorable.
6. **Aplicación de la matriz multicriterio.** Asignar puntajes respaldados por evidencia, calcular el índice ponderado y documentar supuestos, responsables y brechas pendientes.
7. **Revisión y decisión.** Presentar el expediente al Comité Técnico Asesor y a las áreas competentes para decidir entre aprobar, ajustar, postergar o descartar la ubicación.
8. **Implementación y aprendizaje secuencial.** Ejecutar una ubicación por vez, verificar el desempeño posterior a la puesta en marcha y actualizar la matriz antes de autorizar el siguiente emplazamiento.

La puntuación final de cada ubicación se calculará como P_i = 0,25 × S_VAN + 0,15 × S_PB + 0,20 × S_FT + 0,10 × S_IS + 0,20 × S_SEG + 0,10 × S_AMB, donde cada subíndice se valora de 1 a 5. El orden resultante solo será válido si se han superado previamente las condiciones habilitantes. En consecuencia, la matriz apoya la decisión y la hace auditable, pero no sustituye la ingeniería ni las aprobaciones corporativas.

Tabla 13. Criterios, ponderaciones y reglas de puntuación para evaluar la replicabilidad.

Criterio	Peso	5 puntos	3 puntos	1 punto
VAN relativo (VAN/CAPEX)	25 %	≥ 50 %	0 % a < 25 %	< −25 %
Payback	15 %	≤ 1 año	> 2 a 3 años	> 5 años o sin recuperación
Factibilidad técnica	20 %	Interfaces, espacio y servicios disponibles; adaptación menor	Ingeniería y adecuaciones moderadas	Interferencia mayor o solución no factible
Impacto social	10 %	Reducción alta de exposición y tareas manuales	Reducción moderada	Efecto marginal
Seguridad	20 %	Reduce materialmente un riesgo o exposición alta	Mejora moderada y controlable	Sin mejora material o introduce riesgo no compensado
Efecto ambiental	10 %	Alta contención y reincorporación; baja dispersión	Mejora moderada	Efecto marginal o adverso

Nota: Los puntajes 2 y 4 representan situaciones intermedias. Para VAN relativo, 4 puntos corresponden a 25 %–<50 % y 2 puntos a −25 %–<0 %. Para payback, 4 puntos corresponden a >1–2 años y 2 puntos a >3–5 años. Fuente: Elaboración propia.

13.6.2. MATRIZ DE PRIORIZACIÓN DE UBICACIONES FUTURAS

Como todavía no existen estimaciones independientes de CAPEX, OPEX, VAN y payback para las ubicaciones futuras, esos campos se mantienen pendientes y no se les asigna un valor ficticio. Para orientar la secuencia inicial se calcula un puntaje provisional P* con los cuatro criterios no económicos, reponderados sobre su 60 % conjunto. Los puntajes expresan una prioridad de estudio coherente con la exposición esperada en interior mina y deberán reemplazarse por evidencia de terreno.

Tabla 14. Matriz preliminar de priorización de ubicaciones futuras.

Ubicación futura	VAN 25 %	PB 15 %	FT 20 %	IS 10 %	SEG 20 %	AMB 10 %	P*	Prioridad
Traspaso Silos Norte y Sur → feeder	Pend.	Pend.	5	5	5	5	5,00	1
Correa Nivel 1	Pend.	Pend.	4	4	5	4	4,33	2
Correa CP01	Pend.	Pend.	4	4	4	4	4,00	3
Correa CP02	Pend.	Pend.	4	4	4	4	4,00	4
Línea 4 (nuevo sistema de transporte)	Pend.	Pend.	3	4	4	4	3,67	5
Correa Pila Mina (exterior)	Pend.	Pend.	4	3	2	3	3,00	6

Nota: PB = payback; FT = factibilidad técnica; IS = impacto social; SEG = seguridad; AMB = efecto ambiental; Pend. = pendiente de evaluación específica. P = (0,20·FT + 0,10·IS + 0,20·SEG + 0,10·AMB)/0,60. El desempate entre CP01 y CP02 responde a la secuencia operacional propuesta, no a una diferencia demostrada de desempeño. Fuente: Elaboración propia.*

Se propone la secuencia: (1) Silos Norte y Sur–feeder; (2) Correa Nivel 1; (3) CP01; (4) CP02; (5) Línea 4; y (6) Correa Pila Mina. Se prioriza el interior por su mayor exigencia de control, exposición y criticidad operacional. La ubicación exterior queda al final, sin negar su impacto ambiental. Antes de decidir, deberán estimarse CAPEX, OPEX, VAN y payback específicos y recalcularse P_i.

14. DESARROLLO DE ESTRATEGIA DE VALIDACIÓN DE LA SOLUCIÓN

14.1. ESTRATEGIA GENERAL DE VALIDACIÓN

La validación se desarrollará en tres niveles. Primero, ensayos de laboratorio para definir combinaciones de humedad y presión capaces de formar briquetas estables. Segundo, una prueba piloto continua para evaluar alimentación, compactación, descarga y retorno. Tercero, una evaluación integral que compare el desempeño técnico, operacional, ambiental y económico con la línea base y determine si corresponde escalar (Codelco División Chuquicamata, 2025b, 2026c).

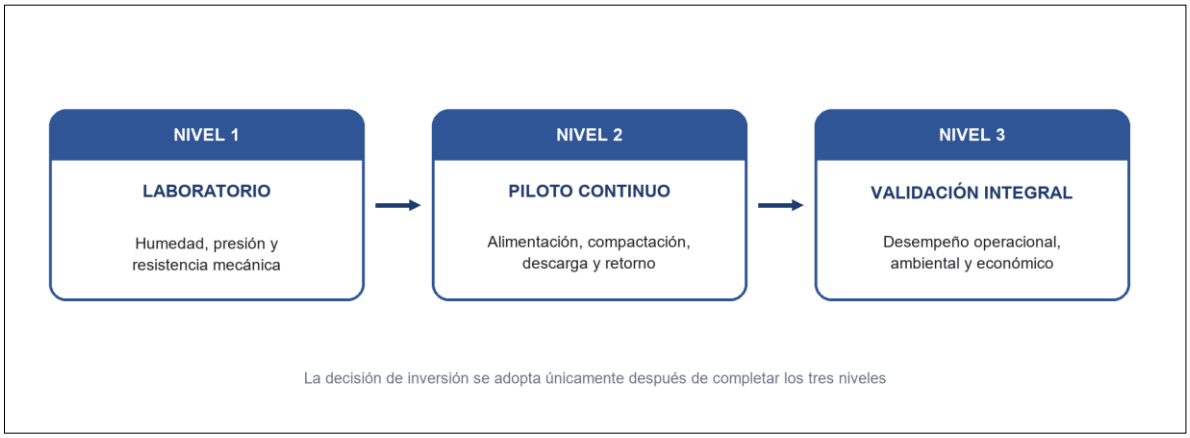


Ilustración 14. Niveles propuestos para validar la solución.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedentes aportados por el suscrito y utilizados con autorización de la organización.

14.2. INDICADORES Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Tabla 15. Indicadores, criterios de aceptación y fundamento para la validación del piloto.

Parámetro	Objetivo	Criterio de aceptación para el piloto	Fundamento y estado
Resistencia mecánica	Resistir transporte y traspasos	Fuerza de rotura ≥ 100 N y verificación posterior al transporte	Umbral preliminar del protocolo interno; confirmar con ensayos de caída y transporte (Codelco División Chuquicamata, 2026c).
Humedad de salida	Mantener estabilidad y compatibilidad operacional	Humedad final ≤ 7 %	Límite preliminar sujeto a validación y aprobación metalúrgica (Codelco División Chuquicamata, 2026c).
Emisión durante transferencias	Disminuir dispersión secundaria	Reducción ≥ 80 % frente a una línea base comparable	Meta propuesta; medir antes y durante el piloto con el mismo método y validar con Seguridad y Medio Ambiente.
Disponibilidad del proceso	Asegurar continuidad operacional	Disponibilidad ≥ 80 % durante el período estable	Meta operacional propuesta; separar detenciones atribuibles y no atribuibles al equipo.
Capacidad de tratamiento	Validar flujo continuo del equipo	Rendimiento real ≥ 70 % del rendimiento teórico	Criterio de prefactibilidad; validar con alimentación continua y balance diario.
Material recuperado	Cuantificar efectividad y trazabilidad	Balance diario conciliado entre alimentación, producto aceptado y pérdidas	Requisito de trazabilidad del protocolo de prueba (Codelco División Chuquicamata, 2026c).
Uso de agua	Controlar acondicionamiento y efectos aguas abajo	Proporción de agua < 15 %, sujeta a compatibilidad metalúrgica	Rango preliminar de ensayo; prevalece la aprobación metalúrgica sobre el límite cuantitativo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Codelco División Chuquicamata (2026c).

14.3. ENSAYOS PRELIMINARES DE LABORATORIO

Los antecedentes técnicos reportan seis pruebas de compactación. Sin aditivos, las presiones de 50, 100 y 150 bar no formaron briquetas estables; a 200 y 250 bar se obtuvieron resistencias de 261 N y 446 N. Una prueba con almidón, agua y secado alcanzó mayor resistencia, pero fue descartada por incompatibilidad con el proceso continuo y por la restricción de incorporar aditivos.

Tabla 16. Resultados preliminares del primer ensayo de compactación.

Prueba	Condición	Presión (bar)	Briqueta	Resistencia
T.01	Polvo sin aditivo	50	No	No medible
T.02	Polvo sin aditivo	100	No	No medible
T.03	Polvo sin aditivo	150	No	No medible
T.04	Polvo sin aditivo	200	Sí	261 N
T.05	Polvo sin aditivo	250	Sí	446 N
T.06	4 % almidón y 10 % agua	50	Sí	122 N 772 N con secado

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedentes aportados por el suscrito y utilizados con autorización de la organización.

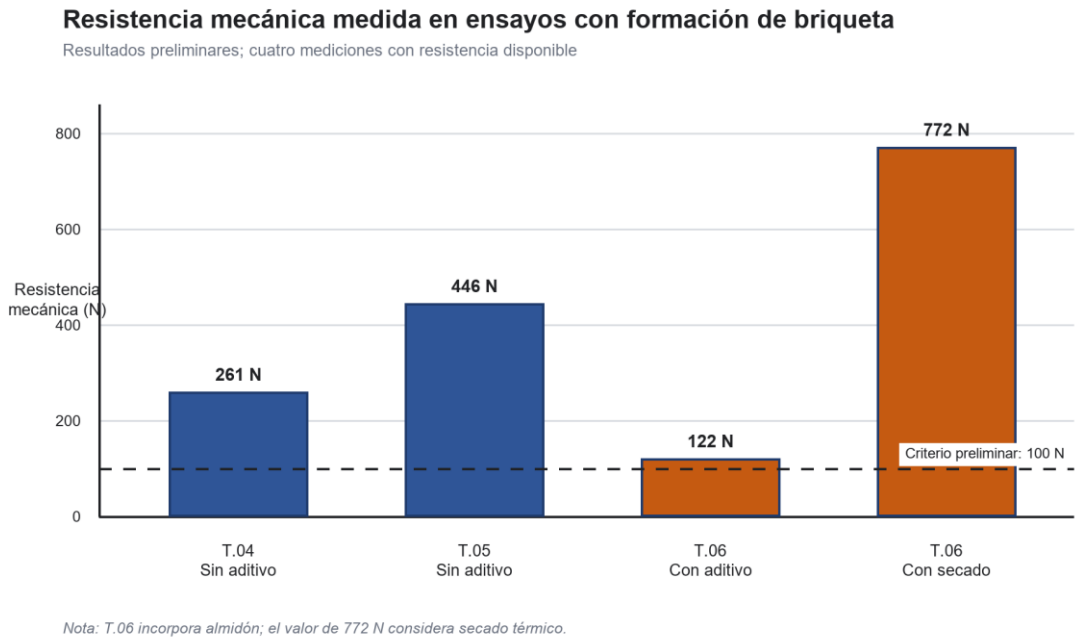


Gráfico 4. Resistencia mecánica medida en los ensayos con formación de briqueta.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedentes aportados por el suscrito y utilizados con autorización de la organización.

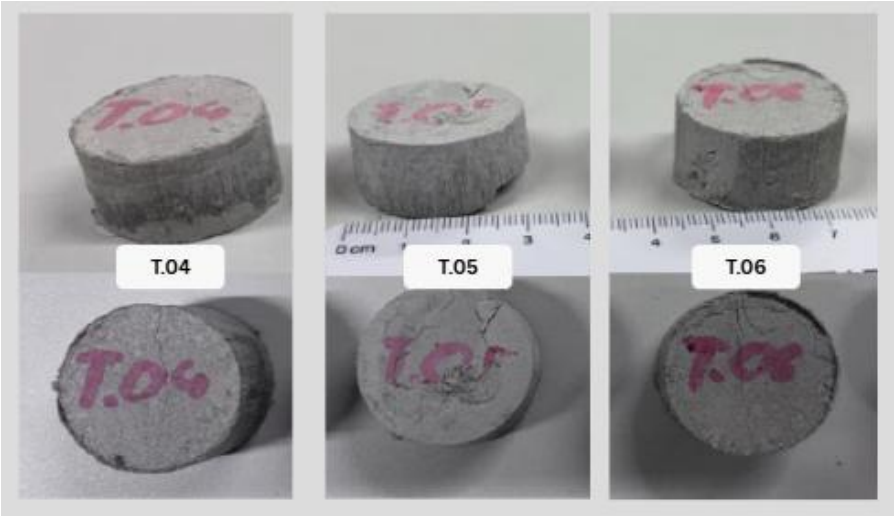


Ilustración 15. Briquetas obtenidas en las pruebas preliminares T.04 a T.06.

Fuente: Codelco División Chuquicamata, antecedentes aportados por el suscrito y utilizados con autorización de la organización.

Los resultados T.04 y T.05 constituyen un punto de partida para una nueva matriz experimental sin aditivos ni secado. No representan validación definitiva porque no informan réplicas, variabilidad, desgaste durante el transporte ni desempeño continuo. La siguiente matriz deberá variar sistemáticamente humedad y presión, medir resistencia inmediata y posterior al transporte y confirmar compatibilidad metalúrgica.

14.4. PRUEBA PILOTO CONTINUA Y DECISIÓN DE ESCALAMIENTO

Diseño mínimo de ejecución. Para la planificación académica se proponen tres campañas consecutivas de diez jornadas operativas, posteriores a la puesta en marcha, con una meta acumulada de 2.100 t tratadas (70 t/día × 30 días). La primera campaña permitirá estabilizar la operación; las dos siguientes constituirán el período de evaluación. Cada campaña deberá registrar el balance diario y, como mínimo, tres réplicas representativas para humedad y resistencia.

Comparabilidad y análisis. La línea base y el piloto se medirán en ventanas equivalentes de producción, horas de operación y ventilación. Se registrarán alimentación, producto aceptado, pérdidas, humedad, resistencia, emisiones, disponibilidad, rendimiento, uso de agua, mantenimiento, fallas y detenciones. Para las réplicas se informarán media, desviación estándar, coeficiente de variación y rango; cualquier valor atípico deberá conservarse y explicarse.

Reglas de decisión. La condición Go exige cumplir simultáneamente los criterios críticos, contar con aprobación de Seguridad y Medio Ambiente, demostrar compatibilidad metalúrgica y mantener VAN positivo con datos observados. La condición Adjust corresponde a desviaciones corregibles con un plan, plazo y nueva medición. La condición No-Go se activa ante incompatibilidad metalúrgica, riesgo de

seguridad no controlado, ausencia de mejora ambiental, capacidad insuficiente después de los ajustes o VAN actualizado igual o menor que cero.

El escalamiento solo procederá cuando los resultados sean repetibles y la evaluación económica se actualice con capacidad real, costos observados y toneladas aceptadas. Mientras no exista un informe de ejecución continua, la tesina presenta el piloto como una recomendación condicionada y no como un resultado concluido (Codelco División Chuquicamata, 2026c).

15. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS

El caso económico de prefactibilidad respalda avanzar a una prueba piloto de una peletizadora. La medición indirecta estimó 84,29 t/día y el Comité Técnico Asesor adoptó 70 t/día como base conservadora. Bajo ese escenario se estiman 167,135 t de cobre recuperado al año, equivalentes a 368.470 lb. Con un precio de USD 6,00/lb, ingreso anual por cobre de USD 2.210.822, ahorro contractual de USD 48.000, OPEX inicial de USD 293.314 creciente 4 % anual y CAPEX de USD 1.617.967, el VAN a cinco años y 8 % alcanza USD 6.139.850, la TIR 118,50 % y el payback simple 0,82 años.

La recomendación no equivale a una autorización de inversión ni a beneficios realizados. El modelo supone 365 días de disponibilidad, producción física constante y una evaluación antes de impuestos, sin depreciación, capital de trabajo ni valor residual. La prueba continua deberá confirmar capacidad, disponibilidad, humedad, resistencia, emisiones, recuperación metalúrgica, costos efectivos y los criterios Go antes de solicitar una decisión posterior.

En consecuencia, se recomienda completar el desarrollo contractual e implementar una unidad piloto. Solo un resultado Go habilitará el estudio de replicación. Las demás ubicaciones constituyen oportunidades futuras y deberán caracterizarse individualmente, sin extrapolar capacidad, inversión, costos ni beneficios. Una eventual contratación de servicios deberá analizarse en un proceso separado, con evidencia de mercado y asignación explícita de riesgos.

Cierre de los objetivos específicos. La revisión de la evidencia permite establecer el siguiente estado:

- Cumplido: se definió la configuración integrada de captación, almacenamiento, acondicionamiento, compactación y retorno.
- Cumplido con condición: la factibilidad técnica cuenta con ensayos preliminares y criterios de aceptación, pero requiere validación continua.
- Cumplido con condición: los impactos operacionales, de seguridad y ambientales disponen de indicadores y métodos, aún sin resultados industriales.
- Cumplido a nivel de prefactibilidad: el caso económico es reproducible y sustenta ejecutar el piloto; la decisión de escalamiento queda condicionada a datos observados.

16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Board of Governors of the Federal Reserve System. (2026, August 25). *H.15 selected interest rates*. https://www.federalreserve.gov/releases/h15/

Bozo Godoy, E., & Bozo Nalli, G. (2024, mayo). *Técnica para el control pasivo del polvo*. Proconm. https://proconm.com/static/pdf/Tecnica%20para%20el%20control%20pasivo.pdf

Cavada Vera, D. I. (2016). *Evaluación económica del control de polución y reconstrucción de carpeta de rodado en camino industrial Los Bronces con supresor de polvo* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140849

Codelco. (2022). Manual de administración de contratos para empresas contratistas. https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20221129/20221129163824/manual_de_administracion_de_contratos_para_empresas_contratistas.pdf

Codelco. (2025). Bases Administrativas Generales para contratos con empresas proveedoras, revisión 6. https://codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20260422/20260422123825/bag_r6.pdf

Codelco. (s.f.-a). El aporte de la innovación. https://www.codelco.com/el-aporte-de-la-innovacion

Codelco. (s.f.-b). Licitaciones públicas de bienes y servicios. https://www.codelco.com/proveedores/licitaciones-publicas-de-bienes-y-servicios

Codelco División Chuquicamata. (2025a). Estrategia 2025-2030 Chuquicamata [Documento interno de circulación restringida].

Codelco División Chuquicamata. (2025b). Prueba industrial: Peletización de polvos GMChS [Presentación interna de circulación restringida].

Codelco División Chuquicamata. (2026a). Informe de gestión del contrato: Servicio de aseo integral de sistemas de chancado y sistema de manejo de minerales [Documento interno confidencial].

Codelco División Chuquicamata. (2026b). Antecedentes técnicos y operacionales internos sobre material particulado y ensayos de compactación [Documento interno no publicado].

Codelco División Chuquicamata. (2026c). Protocolo de prueba: Briquetador de polvo para su reincorporación sin emisiones en Mina Chuquicamata Subterránea (GG-DI-I-01) [Documento interno de circulación restringida].

Codelco División Chuquicamata. (2026d). Informe de gestión de contratos y proyectos, mayo de 2026 [Documento interno confidencial].

Codelco División Chuquicamata. (2026e). Caso de negocio Colector Peletizador y cotización de la tecnología [Modelo económico interno elaborado para fines académicos].

Codelco División Chuquicamata. (2026f). Formulario económico: alternativa Hidrojet Chuquicamata [Antecedente contractual interno confidencial].

Codelco División Chuquicamata. (2026g). Contrato vigente del servicio de aseo industrial [Documento interno confidencial].

Codelco División Chuquicamata. (2026h). CAPEX peletizadora: plan piloto [Planilla interna de estimación de inversión de circulación restringida].

Codelco División Chuquicamata. (2026i). Modificación N.° 1 al Acuerdo de Desarrollo Tecnológico Conjunto para la aglomeración de polvo [Documento interno confidencial].

Damodaran, A. (2026a). *Betas by sector (global)* [Data set]. NYU Stern School of Business. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/BetasGlobal.html

Damodaran, A. (2026b). *Country default spreads and risk premiums* [Data set]. NYU Stern School of Business. https://pages.stern.nyu.edu/adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html

Ennomotive. (2025). Transformación de polvo a través de procesos de aglomeración sin emisiones: Alternativas eficientes para el tratamiento del polvo recuperado y su transporte sin emisiones [Informe confidencial no publicado].

Expande Minería. (2019, diciembre 18). *Aseo industrial mecanizado/robotizado de planta de chancado*. https://expandemineria.cl/desafios/aseo-industrial-mecanizado-robotizado-de-planta-de-chancado/

Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., & Wang, Y. J. (1982). *Mine ventilation and air conditioning* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Kissell, F. N. (2003). *Handbook for dust control in mining* (DHHS [NIOSH] Publication No. 2003-147; Information Circular 9465). National Institute for Occupational Safety and Health. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB2003147

London Metal Exchange. (2026). LME Official Prices. Recuperado el 7 de septiembre de 2026, de https://www.lme.com/market-data/reports-and-data/lme-official-prices

Osterwalder, A., Pigneur, Y., Bernarda, G., & Smith, A. (2014). *Value proposition design: How to create products and services customers want*. Wiley.

Swinderman, R. T., Marti, A. D., Goldbeck, L. J., Marshall, D., & Strebel, M. G. (2009). *Foundations: The practical resource for cleaner, safer, more productive dust and material control* (4th ed.). Martin Engineering Company.

Szulc, A., Skotnicka, E., Gupta, M. K., & Królczyk, J. B. (2024). Powder agglomeration processes of bulk materials: A state-of-the-art review on different granulation methods and applications. *Powder Technology, 431*, 119092. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092

Torres Muñoz, R. R. (2021, octubre 15). *Estándares de calidad del aire: Legislación comparada*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. https://www.bcn.cl/asesoriasparlamentarias/detalle_documento.html?id=79856

Westmetall. (2026). LME copper cash settlement historical data. Recuperado el 7 de septiembre de 2026, de https://www.westmetall.com/en/markdaten.php?action=table&field=LME_Cu_cash

Codelco División Chuquicamata. (2024). Antecedente técnico para la mitigación y recuperación de polvo mediante peletización en el sistema de transporte y acopios de polvo de Mina Chuquicamata Subterránea [Antecedente del Comité Técnico Asesor, documento interno no publicado].

17. ANEXOS

17.1. PROCEDENCIA, CONFIDENCIALIDAD Y AUTORIZACIÓN DE LOS ANTECEDENTES INTERNOS

Los antecedentes técnicos, operacionales, fotografías, resultados de prueba y valores monetarios incorporados provienen de Codelco División Chuquicamata, fueron aportados por el suscrito y cuentan con autorización para su utilización académica en forma parcial.

Los documentos internos y confidenciales consultados se utilizan únicamente como fuentes de apoyo y se identifican mediante autor corporativo, año, título o código en las referencias. No se incorporan como anexos ni se reproducen sus páginas, matrices, ofertas, nombres de proveedores, condiciones comerciales o antecedentes sensibles. Las síntesis y tablas de esta tesina son elaboraciones propias limitadas a la información necesaria para sustentar el análisis.

Este anexo documenta la trazabilidad de la base de 70 t/día y del presupuesto del piloto. La medición indirecta y la extrapolación por superficie estimaron 84,29 t/día, mientras que el Comité Técnico Asesor de Codelco definió 70 t/día como base conservadora. La evaluación económica se concentra en una peletizadora, con horizonte de cinco años, tasa corporativa de descuento de 8 % y un presupuesto base de CLP 1.498.237.422, equivalente a USD 1.617.967 según la planilla interna CAPEX PELETIZADORA.

17.2. DETALLE DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PILOTO

Las tablas siguientes presentan los supuestos, resultados y flujos reproducibles de una peletizadora piloto. Los informes y contratos internos que respaldan los parámetros no se adjuntan por su confidencialidad parcial. No se incluyen cálculos para otras unidades, debido a que cualquier réplica exige caracterización y evaluación económica independientes.

Tabla 17. Supuestos consolidados del caso piloto.

Variable	Piloto: una unidad	Criterio
Tratamiento	70 t/día	Base conservadora aprobada por el Comité Técnico Asesor; estimación agregada de referencia: 84,29 t/día
Régimen	10 h/día; 365 días/año	Disponibilidad anual por validar
Ingreso por cobre	USD 2.210.822/año	Precio base USD 6,00/lb
Ahorro sucker	USD 48.000/año	Un camión; validar ahorro efectivo
OPEX año 1	USD 293.314	USD 11,48/t; escalador base 4 %
CAPEX	USD 1.617.967	Planilla interna CAPEX PELETIZADORA; total contractual por validar
Horizonte y tasa	5 años; 8 %	Evaluación antes de impuestos

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes identificadas en la Tabla 7.

Tabla 18. Resultados económicos del caso piloto.

Indicador	Resultado	Criterio
VAN	USD 6.139.850	Cinco años; tasa corporativa 8 %

Indicador	Resultado	Criterio
TIR	118,50 %	Antes de impuestos
Payback simple	0,82 años	Flujo del año 1
Payback descontado	0,89 años	Descuento a 8 %
Índice de rentabilidad	4,79 veces	VP de flujos / CAPEX
CAPEX máximo justificable	USD 7.757.817	Valor presente de flujos; VAN = 0
VAN con CAPM referencial	USD 5.704.479	Contraste a 10,24 %

Fuente: Elaboración propia. Resultados del caso base antes de impuestos.

Tabla 19. Flujos antes de impuestos utilizados en la evaluación del piloto.

Año	Flujo del piloto	Explicación
0	(USD 1.617.967)	Inversión inicial
1	USD 1.965.508	Ingreso + ahorro – OPEX
2	USD 1.953.775	OPEX aumenta 4 %
3	USD 1.941.574	OPEX aumenta 4 %
4	USD 1.928.884	OPEX aumenta 4 %
5	USD 1.915.686	Último año del horizonte

Fuente: Elaboración propia. Montos en USD; los valores entre paréntesis corresponden a egresos.

La composición del presupuesto se presenta por categorías para permitir su conciliación con el desembolso inicial del modelo. La tabla no reproduce la planilla interna ni sus condiciones comerciales; resume únicamente los totales necesarios para la trazabilidad académica.

Tabla 20. Composición del presupuesto denominado CAPEX para el plan piloto.

Componente	Monto CLP	Monto USD	% del CAPEX	Contenido principal
Mano de obra administrativa y operativa	207.045.631	223.591	13,8	Administración del contrato, prevención, supervisión, ingeniería y operación.
Logística e instalación en punto de trabajo	78.552.981	84.830	5,2	Combustibles, traslados, instalación de faena, acreditaciones y comunicaciones.
Arriendo de herramientas y equipos	249.482.536	269.420	16,7	Equipo Hurricane, vehículos, camión pluma, cama baja y equipo bajo perfil.
Insumos	369.750.000	399.298	24,7	Briquetadora, mangueras, mezclador, transporte, accesorios y humectación.
Gastos generales	232.906.274	251.519	15,5	Instalaciones, envíos, pruebas, prospección, administración y viajes.
Utilidades	70.500.000	76.134	4,7	Margen estimado incorporado en el contrato base.
Contingencias	290.000.000	313.175	19,4	Reserva presupuestaria para incertidumbres del plan piloto.
TOTAL CONTRATO BASE	1.498.237.422	1.617.967	100	Tipo de cambio de la planilla: CLP 926/USD.

Fuente: Elaboración propia a partir de Codelco División Chuquicamata (2026h). Los montos en USD se redondean al dólar; la suma exacta de la planilla es USD 1.617.966,98.

Nota: la denominación CAPEX se conserva conforme a la fuente. La clasificación definitiva entre inversión, OPEX y pagos contractuales deberá ser validada por Finanzas antes de aprobar el caso de negocio.

17.3. FUNDAMENTO METODOLÓGICO DE LA BASE DE 70 T/DÍA

La base de 70 t/día se deriva de un procedimiento de medición indirecta y de una decisión operacional. Las bandejas permiten estimar la deposición diaria y extrapolarla por superficie hasta obtener 84,29 t/día para el sistema evaluado. El Comité Técnico Asesor de Codelco adoptó 70 t/día para el desarrollo del piloto, lo que representa el 83,05 % de esa estimación. La reducción prudencial reconoce la incertidumbre espacial y temporal del método y evita dimensionar el piloto con el extremo superior de una estimación que aún no ha sido validada mediante operación continua.

Tabla 21. Trazabilidad metodológica y criterio de adopción de la base de 70 t/día.

Etapa o variable	Procedimiento o cálculo	Resultado	Interpretación y limitación
Superficie de captura	0,43 m x 0,32 m	0,1376 m²	Área efectiva utilizada para normalizar la masa recolectada.
Tiempo de exposición	Instalación de cada bandeja durante 24 horas	1 día	Entrega una estimación diaria condicionada por la operación, ventilación y limpieza del período observado.
Tasa de deposición por punto	q_i = m_i / (0,1376 m² x 1 día)	kg/m²/día	La masa m_i se obtiene por pesaje. El método supone que el punto representa la superficie evaluada.
Extrapolación al equipo	M_i = q_i x A_i	kg/día por equipo	El área A_i corresponde a la superficie representativa. La deposición puede no ser uniforme.
Conciliación del sistema	0,15 + 0,41 + 72,11 + 9,17 + 2,46 t/día	84,29 t/día	Suma agregada de correas de sacrificio, intermedias, transporte principal y chancadores, evitando duplicar aportes.
Decisión del Comité Técnico Asesor	70 / 84,29 = 83,05 %	70 t/día	Base conservadora aprobada para desarrollar el piloto; no corresponde a una lectura directa de bandeja.
Reducción prudencial	84,29 - 70,00	14,29 t/día; 16,95 %	Margen frente a incertidumbre de representatividad, variación operacional y extrapolación por área.
Capacidad media requerida	70 t/día / 10 h/día	7,0 t/h	Requerimiento medio de diseño. La prueba continua debe validar disponibilidad, puntas y estabilidad del material.
Base económica anual	70 t/día x 365 días/año	25.550 t húmedas/año	Supuesto de prefactibilidad; debe sustituirse por días efectivos de disponibilidad cuando exista operación continua.

Fuente: Elaboración propia a partir de un antecedente de Codelco proveniente del Comité Técnico Asesor (2024) y de Codelco División Chuquicamata (2026b). Los registros brutos por punto, planos y antecedentes operacionales internos no se reproducen por su carácter confidencial; la tabla presenta solo la trazabilidad agregada necesaria para sustentar el criterio académico.

La estimación no equivale a una medición másica continua. Su incertidumbre depende de la ubicación y cantidad de bandejas, la variabilidad operacional y la representatividad de las superficies. El piloto deberá reemplazar esta base de diseño por un balance conciliado de alimentación, producto aceptado, pérdidas, horas efectivas y detenciones.