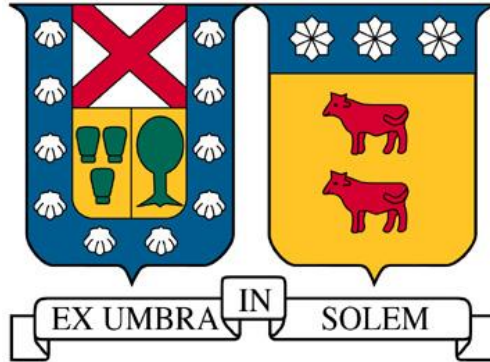


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO – CHILE



MODELO PILOTO DE GESTION INTERINSTITUCIONAL PARA LA
VALORIZACIÓN DE NEUMATICOS FUERA DE USO (NFU) DE LA GRAN
MINERÍA EN INFRAESTRUCTURA URBANA SOSTENIBLE

Paula García M.

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA:

SRA.PILAR GARATE
AGOSTO 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Modelo piloto de gestión interinstitucional para la valorización de neumáticos fuera de uso (NFU) de la gran minería en infraestructura urbana sostenible

Nombre del candidato(a): Paula García Muñoz

Carrera / Grado: Magíster en Ingeniería Industrial

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, María Pilar Gárate, 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

☒ 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:

Fecha: 28/09/2026; **Firma:**

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-09-2026

; 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.

CONTENIDO

1	RESUMEN EJECUTIVO	7
2	PROBLEMA DE ESTUDIO	10
2.1	CONTEXTO GENERAL DEL PROBLEMA	10
2.1.1	Ineficiencia del sistema actual: brecha entre generación y valorización local	11
2.1.2	Contribución de la investigación	11
2.2	Objetivos	11
2.2.1	Objetivo General	11
2.2.2	Objetivos específicos	12
2.3	Alcance	13
2.3.1	Límites de la investigación	13
3	MARCO TEORICO	14
3.1	Economía circular en la gestión de residuos industriales	14
3.2	Logística inversa y cadenas de suministro de ciclo cerrado	15
3.3	Modelos de gobernanza colaborativa y valor compartido	16
3.3.1	Gobernanza colaborativa en proyectos de infraestructura sostenible	16
3.3.2	Valor compartido y criterios ESG en la minería	16
3.4	Tecnologías de valorización de NFU y selección para el caso de estudio	17
3.4.1	Justificación de la selección tecnológica.	18
3.5	Evaluación económica integral de proyectos de infraestructura	19
3.5.1	Análisis Costo-Beneficio Social (CBS)	19
3.5.2	Análisis multicriterio con factores ESG (AMC- ESG)	19
3.5.3	Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC)	20
3.5.4	Sistema de Responsabilidad Extendida del Productor en Chile	20
3.5.5	Marco normativo técnico aplicable	21
4	METODOLOGÍA	22
4.1	Fase 1 Diagnóstico y levantamiento de la Línea Base	24
4.1.1	Análisis de Inventario y Oferta de Residuos	24
4.1.2	Capacidad Instalada y Logística de Reversa	24
4.1.3	Caracterización del Emplazamiento	24
4.2	Fase 2 Benchmarking y Marco Normativo Comparado	24
4.2.1	Vigilancia Tecnológica Internacional	25
4.2.2	Matriz de Homologación Normativa	25
4.3	Fase 3 Diseño del prototipo	25
4.3.1	Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica con GCR	25
4.3.2	Especificaciones de la demarcación fotoluminiscente	26
4.3.3	Protocolo de implementación del tramo piloto	26
4.4	Fase 4 Evaluación integral de viabilidad	26

4.4.1	Evaluación de externalidades: análisis costo-beneficio social (CBS)	26
4.4.2	Evaluación estratégica: análisis multicriterio con factores ESG (AMC-ESG)	27
4.4.3	Evaluación técnico-económica: análisis de costo de ciclo de vida (LCC)	27
4.4.4	Enfoque Técnico: Desempeño Material y Seguridad Vial	27
4.4.5	Enfoque Ambiental: Sostenibilidad y Circularidad	28
4.4.6	Enfoque Social: Confort y Seguridad del Usuario y Territorio	28
4.5	Fase 5 Diseño del Modelo de Gestión Interinstitucional y escalamiento	28
4.5.1	Mapeo y Definición de Roles de Stakeholders	28
4.5.2	Diseño de la Arquitectura de Gobernanza y mecanismo de coordinación	30
4.5.3	Flujo Logístico y Operacional cerrado	30
4.5.4	Modelo de Sostenibilidad Financiera	31
4.5.5	Criterios de validación y escalamiento del Modelo de Gestión	31
4.5.6	Juicio de Expertos	32
4.6	Fase 6 Validación, monitoreo y mejora continua	33
4.6.1	Validación formal del modelo piloto	33
4.6.2	Sistema de monitoreo continuo	33
4.6.3	Ciclo PDCA de mejora continua	34
5	DESARROLLO	34
5.1	Fase 1: Diagnóstico y levantamiento de la Línea Base	34
5.1.1	Estimación de generación anual de NFU - Nodo Copiapó - Tierra Amarilla	34
5.1.2	Análisis de sensibilidad de la disponibilidad de NFU	36
5.1.3	Capacidad instalada y logística de reversa	38
5.1.4	Caracterización del emplazamiento	45
5.2	Fase 2: Brechmarking y Marco Normativo Comparado	48
5.2.1	Vigilancia tecnológica internacional	48
5.2.1.1	Casos internacionales de referencia	49
5.2.1.2	Estado del arte en Chile	51
5.2.2	Matriz de homologación normativa	51
5.3	Fase 3 Diseño del prototipo	54
5.3.1	Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica modificada con GCR	54
5.3.2	Especificaciones de la demarcación fotoluminiscente	58
5.3.3	Protocolo de implementación del tramo piloto	60
5.4	Fase 4: Evaluación integral de vialidad	65
5.4.1	Evaluación técnica del material	65
5.4.2	Evaluación técnico-económica: análisis de costo de ciclo de vida (LCC)	67
5.4.3	Evaluación de externalidades: análisis costo-beneficio social (CBS)	70
5.4.4	Evaluación estratégica: análisis multicriterio con factores ESG (AMC-ESG)	72
5.4.5	Evaluación ambiental: análisis de ciclo de vida simplificado (LCA)	74
5.4.6	Síntesis de la evaluación integral y verificación de criterios de validación	76
5.5	Fase 5 Diseño del Modelo de Gestión interinstitucional y escalamiento	77
5.5.1	Matriz de actores aplicada al nodo Copiapó–Tierra Amarilla	78
5.5.2	Flujo logístico y operacional del ciclo cerrado - Nodo Copiapó - Tierra Amarilla	81

5.5.3	Canvas de Economía Circular aplicado al modelo	82
5.5.4	Modelo de sostenibilidad financiera aplicado	84
5.5.5	Análisis de transferibilidad y corredores candidatos	87
5.5.6	Juicio de expertos: protocolo y panel propuesto	89
5.6	Fase 6: Validación, Monitoreo y Mejora Continua	90
5.6.1	Protocolo de verificación de criterios	90
5.6.2	Sistema de monitoreo continuo del nodo Copiapó–Tierra Amarilla	91
5.6.3	Ciclo PDCA de mejora continua aplicado al nodo	93
6	PLANES DE ACCIÓN Y MEJORA	96
6.1	Del modelo piloto hacia la transformación sistémica del territorio minero	96
6.1.1	Plan de Acción Nivel 1: Marco Normativo Habilitante	96
6.1.2	Plan de Acción Nivel 2: Arquitectura Institucional para la Replicación	98
6.2	Hoja de Ruta Integrada de los Cuatro Niveles	99
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
7.1	Principales hallazgos de la investigación	101
7.2	Limitaciones de la investigación	102
7.3	Aporte de la investigación	102
7.4	Recomendaciones	103
7.4.1	Recomendaciones para las empresas mineras	103
7.4.2	Recomendaciones para los municipios	103
7.4.3	Recomendaciones para el Ministerio de Obras Públicas y el Ministerio del Medio Ambiente	104
7.4.4	Recomendaciones para la academia	104
8	BIBLIOGRAFIA	105
9	SIGLAS	111
10	ANEXOS	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Ciclo de valor para la transformación de NFU mineros en infraestructura urbana sostenible	9
Figura 2 : Representación esquemática del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, Ruta C-3	48
Figura 3: Levantamiento geoespacial para la selección del tramo piloto en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla	64
Figura 4: Flujos del análisis de Costo del ciclo de vida (LCC)	69
Figura 5: Arquitectura conceptual del modelo gestión propuesto como un ciclo secuencial interrelacionadas que transforman NFU mineros en infraestructura urbana de valor territorial.	77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ineficiencias sistemáticas del modelo actual de gestión de NFU en Copiapó-Tierra Amarilla	10
Tabla 2: Objetivos Específicos	12
Tabla 3: Comparación de tecnologías de valorización de NFU OTR	18
Tabla 4: Figuras del Sistema REP y su rol en la gestión de NFU mineros	21
Tabla 5: Metas de valorización de NFU mineros según DS N°8/2019	21
Tabla 6: Marco regulatorio técnico aplicable al caso de estudio	22
Tabla 7: Síntesis de las seis fases metodológicas	23
Tabla 8 Matriz de actores del modelo de gestión interinstitucional (Poder-Interés)	29
Tabla 9: Criterios de validación del modelo piloto con umbrales de aprobación definidos a priori	32
Tabla 10: Estimación de generación anual de neumáticos fuera de uso (NFU) del nodo Copiapó-Tierra Amarilla	36
Tabla 11: Análisis de los 3 escenarios evaluados	37
Tabla 12: Proyección de generación anual y acumulada de NFU	38
Tabla 13: Cuadro comparativo logístico de rutas de transporte de NFU mineros.	40
Tabla 14: Matriz de análisis logísticos estimado, nodo Copiapó	41
Tabla 15: Síntesis de barreras y condiciones de viabilidad	43
Tabla 16: Ensayos de control de calidad para el GCR y la mezcla asfáltica modificada	45
Tabla 17 Benchmarking internacional del uso de NFU en pavimentos e infraestructura ciclovial	51
Tabla 18: Matriz de homologación normativa EEUU, Europa y Chile	53
Tabla 19: Parámetros de diseño de la mezcla asfáltica modificada con GCR- Tramo piloto 100m	55
Tabla 20: Plan de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) para el GCR y la mezcla asfáltica modificada	57
Tabla 21: Especificación técnicas de la demarcación fotoluminiscente - Tramo piloto 100m	59
Tabla 22: Protocolo de implementación tramo piloto- Secuencia de etapas y criterios de avance	61
Tabla 23: Cadena de custodia del GCR - Sistema de trazabilidad RETC desde faena hasta la obra	62
Tabla 24: Desempeño comparativo asfalto convencional vs asfalto modificado GCR(20%)- contexto Atacama	65
Tabla 25: Estructura de costos del LCC a 15 años- Tramo piloto 100m (Valores estimados de referencia)	68
Tabla 26: Cuantificación de externalidades positivas mediante CBS-SNI- Tramo piloto 100m	70
Tabla 27: Resultados de la evaluación social mediante la razón beneficio-costos (B/C)	71
Tabla 28: Matriz AMC-ESG con ponderaciones AHP aplicadas al modelo piloto	72
Tabla 29 : LCA simplificado: comparación de escenarios por etapa- tramo piloto 100m	74

Tabla 30: Resumen de indicadores ambientales del LCA simplificado y criterios de validación	75
Tabla 31: Verificación de criterios de validación del Modelo - Resultados de la fase 4	76
Tabla 32: Matriz de actores aplicada al nodo Copiapó- Tierra Amarilla	78
Tabla 33: Matriz RACI aplicada - Actores reales del nodo Copiapó - Tierra Amarilla	79
Tabla 34: Flujo Operacional del Modelo	81
Tabla 35: Canvas de Economía Circular aplicado al modelo NFU- Ciclovía fotoluminiscente	82
Tabla 36: Matriz de creación y captura de valor del modelo de gestión interinstitucional	83
Tabla 37: Estructura de costos compartidos y sostenibilidad financiera del modelo	84
Tabla 38: Sistema de indicadores de desempeño con líneas base y metas- Nodo Copiapó – Tierra Amarilla	85
Tabla 39: Análisis de riesgo específico del nodo Copiapó- Tierra Amarilla	86
Tabla 40: Análisis de transferibilidad del modelo- Corredor piloto vs corredores candidatos	88
Tabla 41: Protocolo de validación formal- Criterios, instrumentos reales y acciones correctivas	90
Tabla 42 : Sistema de monitoreo continuo — Indicadores, instrumentos y responsables	91
Tabla 43: Ciclo PDCA aplicado al modelo de gestión	93
Tabla 44: Catálogo de desvíos esperados en el primer ciclo PDCA y acciones correctivas anticipadas	94
Tabla 45: Plan de Acción Normativo - Cinco acciones con horizontes y condiciones de activación	97
Tabla 46: Plan de Acción Institucional - Cinco acciones para la arquitectura de replicación	98
Tabla 47 Hoja de ruta integrada — Cuatro niveles de acción en el horizonte 2025–2030	100
Tabla 48: Comparación de costos de las alternativas evaluadas	113
Tabla 49: Supuestos generales de cálculo para la evaluación económica	114
Tabla 50: Valores de Evaluación técnica	115
Tabla 51: Evaluación del costo del ciclo de vida (LCC) de las alternativas	117
Tabla 52: Beneficio social total anual estimado	119
Tabla 53: Análisis de sensibilidad de la razón beneficio-costos (B/C)	120
Tabla 54: Evaluación consolidada de la matriz AMC-ESG	120
Tabla 55: Síntesis consolidada de los resultados de evaluación del modelo propuesto	122

1 RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación aborda la gestión y valorización de neumáticos fuera de uso (NFU) provenientes de la gran minería, con foco en la Región de Atacama y particularmente en el corredor Copiapó- Tierra Amarilla. Los neumáticos mineros OTR (*Off The Road*), utilizados principalmente en camiones CAEX, constituyen un desafío debido a sus dimensiones, peso y complejidad logística, condiciones que incrementan los costos asociados a su transporte, almacenamiento y valorización. En Atacama, la concentración de operaciones mineras y la limitada capacidad territorial para transformar estos residuos evidencian una brecha entre su generación y aprovechamiento local (González Cortés, 2022).

Este escenario adquiere especial relevancia frente a las exigencias de la Ley N°20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y del D.S.N.°8/2019 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece metas progresivas de recolección y valorización de neumáticos. En este contexto, desarrollar alternativas territoriales representa una oportunidad para reducir cargas logísticas, fortalecer el cumplimiento regulatorio y generar nuevos encadenamientos productivos bajo principios de economía circular.

La investigación responde a la pregunta: ¿Cómo puede estructurarse un modelo de gestión interinstitucional que permite valorizar el caucho reciclado proveniente de NFU mineros en infraestructura urbana sostenible, bajo un enfoque de economía circular? Para esto, se utiliza como caso de aplicación un tramo piloto de ciclovía fotoluminiscente de 100 m en el corredor Copiapó-Tierra Amarilla.

El objetivo general consiste en diseñar y evaluar la viabilidad técnica, social, ambiental y económica de un modelo piloto de gestión interinstitucional para valorizar caucho reciclado proveniente de NFU de la gran minería en infraestructura urbana sostenible. Se plantea que la articulación entre compañías mineras, gestores, empresas transformadoras y organismos públicos pueden generar beneficios conjuntos mediante la reducción de distancias y costos logísticos, la incorporación de granulado de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas y la generación de externalidades ambientales y sociales. Su desempeño deberá validarse mediante ensayos, implementación del piloto y monitoreo de indicadores.

Metodológicamente, el estudio adopta un enfoque de economía circular aplicado a la ingeniería de procesos y gestión de operaciones (Ellen MacArthur Foundation, 2013). La evaluación integra tres instrumentos complementarios: Análisis de costo del ciclo de vida (LCC), comparando la solución convencional con la alternativa con GCR; Análisis Costo-Beneficio Social (CBS), para monetizar externalidades respaldadas por antecedentes y precios sociales verificables; y una evaluación multicriterio con factores ESG, propuesta para analizar beneficios estratégicos no monetizables, como cumplimiento regulatorio, circularidad y vinculación territorial.

Como resultado, se propone una arquitectura de gestión replicable y escalable que articula generadores, gestores, transformadores y organismos públicos, orientada a transformar un pasivo ambiental minero en un insumo para infraestructura urbana sostenible, contribuyendo al cumplimiento de la Ley REP, la economía circular y al desarrollo territorial de la Región de Atacama.

Abstract

This research addresses the management and valorization of end-of-life tires (ELTs) generated by the large-scale mining industry, with a particular focus on the Atacama Region and the Copiapó–Tierra Amarilla corridor. Mining OTR (*Off-The-Road*) tires, primarily used on large mining haul trucks (CAEX), pose significant challenges due to their size, weight, and logistical complexity, which increase the costs associated with their transportation, storage, and valorization. In Atacama, the concentration of mining operations and the limited local capacity to process these materials reveal a gap between ELT generation and their local recovery and productive use (González Cortés, 2022).

This issue has become increasingly relevant in light of the requirements established under Law No. 20,920 on Extended Producer Responsibility (EPR) and Supreme Decree No. 8/2019 issued by the Chilean Ministry of the Environment, which establishes progressive targets for tire collection and valorization. Within this regulatory framework, developing regional valorization alternatives represents an opportunity to reduce logistical burdens, strengthen regulatory compliance, and foster new value chains based on circular economy principles.

The research addresses the following question: How can an interinstitutional management model be structured to enable the valorization of recycled rubber derived from mining ELTs in sustainable urban infrastructure under a circular economy approach? To address this question, a 100 m pilot section of a photoluminescent cycle path along the Copiapó–Tierra Amarilla corridor is used as the application case.

The general objective is to design and assess the technical, social, environmental, and economic feasibility of a pilot interinstitutional management model for the valorization of recycled rubber derived from large-scale mining ELTs in sustainable urban infrastructure. The research proposes that coordination among mining companies, ELT management operators, processing companies, and public-sector institutions can generate shared benefits by reducing transportation distances and logistics costs, incorporating ground tire rubber (GTR) into asphalt mixtures, and generating positive environmental and social externalities. Its performance must subsequently be validated through testing, pilot implementation, and performance indicator monitoring.

Methodologically, the study adopts a circular economy approach applied to process engineering and operations management (Ellen MacArthur Foundation, 2013). The assessment integrates three complementary instruments: Life-Cycle Cost Analysis (LCCA), comparing the conventional solution with the GTR-based alternative; Social Cost-Benefit Analysis (SCBA), aimed at monetizing externalities supported by verifiable evidence and social pricing parameters; and a proposed ESG-based Multi-Criteria Analysis (MCA) to assess non-monetizable strategic benefits, including regulatory compliance, circularity, and territorial stakeholder engagement.

As a result, the research proposes a replicable and scalable management architecture that integrates waste generators, ELT management operators, processing companies, and public-sector institutions. The model is designed to transform a mining-related environmental liability into an input for sustainable urban infrastructure, thereby contributing to EPR compliance, advancing circular economy practices, and supporting the territorial development of the Atacama Region.

La Figura 1 presenta el ciclo de valor del modelo propuesto, integrando el flujo de transformación y valorización de los NFU mineros con las etapas de implementación, monitoreo y escalamiento, desde la generación del residuo hasta su aplicación en infraestructura urbana sostenible. Los flujos verdes representan el circuito físico del NFU minero desde la faena hasta el tramo piloto; los flujos azules representan los mecanismos de gobernanza, permisos y monitoreo que articulan institucionalmente el modelo.

Figura 1 : Ciclo de valor para la transformación de NFU mineros en infraestructura urbana sostenible



Nota. La Elaboración propia. La figura sintetiza el ciclo de valor propuesto para la valorización de NFU mineros, desde su transformación en granulado de caucho reciclado (GCR) y su incorporación en mezclas asfálticas, hasta la construcción, monitoreo y escalamiento del modelo. Los flujos representan la secuencia de transformación del material, validación técnica e implementación del piloto.

2 PROBLEMA DE ESTUDIO

2.1 CONTEXTO GENERAL DEL PROBLEMA

La industria minera constituye el sector productivo de mayor escala en Chile, representando aproximadamente el 55% de las exportaciones nacionales (COCHILCO, 2022). Su operación implica el uso intensivo de equipos de alto tonelaje (camiones CAEX, cargadores frontales y motoniveladoras), cuya dotación de neumáticos Off The Road (OTR) genera un flujo continuo y predecible de residuos industriales de gran volumen y masa unitaria. A diferencia de los neumáticos de uso general, los NFU OTR de gran minería (Categoría B, Decreto Supremo N.º 8) presentan pesos unitarios superiores a las 3 toneladas, diámetros de hasta 4 metros y una composición de hasta un 74% de caucho polimérico recuperable, lo que los convierte en un recurso de alto potencial de valorización y, simultáneamente, en un desafío logístico de primera magnitud cuando no existe infraestructura de procesamiento local.

En la Región de Atacama, las tres faenas principales: Candelaria (Lundin Mining), Caserones (JX Nippon) y Mantoverde (Capstone Copper), generan entre 15.000 y 20.000 toneladas anuales de NFU OTR (estimación propia a partir de COCHILCO, 2022; Caterpillar Performance Handbook, 2020). El modelo de gestión actual consiste en el traslado de estos residuos hacia plantas de valorización ubicadas en el nodo Antofagasta, a una distancia de entre 550 y 600 km, con costos de transporte y procesamiento de entre 180 y 400 USD por tonelada (Ministerio de Energía, 2022). Este modelo genera cuatro ineficiencias sistémicas identificables y cuantificables que justifican el rediseño del sistema desde una perspectiva de ingeniería de procesos y economía circular, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Ineficiencias sistémicas del modelo actual de gestión de NFU en Copiapó- Tierra Amarilla

Ineficiencia identificada	Descripción del estado actual	Impacto cuantificable
Ineficiencia logística	Traslado de NFU a plantas externas a 550–600 km (nodo Antofagasta)	Costo logístico de 180–400 USD/ton; huella de carbono crítica por carga sobredimensionada
Pérdida de valor territorial	El material reciclado no retorna al territorio generador	El nodo Atacama entrega materia prima y debe importar soluciones de infraestructura
Brecha de capacidad local	Ausencia de molienda de precisión para GCR < 0,8 mm en Copiapó	Dependencia tecnológica y logística del nodo Antofagasta

Nota. Elaboración propia a partir de COCHILCO (2022), Ministerio de Energía (2022) y MMA (2021).

2.1.1 Ineficiencia del sistema actual: brecha entre generación y valorización local

El análisis de flujos del sistema actual revela que Copiapó–Tierra Amarilla opera como exportador neto de materia prima reciclable sin capturar el valor agregado de su transformación. Las faenas generadoras cumplen con la normativa REP externalizando el costo de gestión hacia plantas lejanas, los gestores maximizan márgenes evitando el procesamiento local, y el sector público carece de mecanismos vinculantes para retener el recurso en el territorio. El resultado es una triple pérdida: logística (costo de flete), ambiental (huella de carbono) y territorial (valor del material reciclado que no retorna).

Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, esta configuración equivale a un sistema productivo sin cierre de ciclo: la cadena de valor del residuo se interrumpe en la frontera del territorio generador y se completa fuera de la región, impidiendo la captura local de valor y la optimización del sistema en su conjunto. La solución propuesta en esta investigación aborda precisamente ese punto de quiebre: el diseño de un modelo de gestión que cierre el ciclo dentro del territorio, transformando el NFU en insumo para infraestructura vial local mediante una cadena de valor más cercana y trazable.

2.1.2 Contribución de la investigación

La contribución original de esta investigación se sitúa en la intersección entre la ingeniería de procesos aplicada a la gestión de residuos industriales, la economía circular territorial y el diseño de modelos de gobernanza colaborativa para infraestructura pública sostenible, proponiendo un modelo de gestión interinstitucional que integra operativamente tres dimensiones: la cuantificación del flujo de residuos y la capacidad instalada de valorización local, las especificaciones técnicas del caucho reciclado aplicado a infraestructura vial en contextos climáticos extremos, y los mecanismos de gobernanza y financiamiento necesarios para asegurar el funcionamiento de la cadena de valor, sin depender exclusivamente de subsidios o decisiones de los actores involucrados. Bajo este escenario, el caso de aplicación corresponde a un tramo piloto de 100 metros de ciclovía fotoluminiscente en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla, constituyendo no sólo un ejemplo ilustrativo, sino un instrumento metodológico para generar evidencia cuantitativa sobre costos, desempeño y externalidades en condiciones territoriales reales, permitiendo validar un modelo mediante datos específicos, medibles y potencialmente transferibles a otros territorios y proyectos de infraestructura urbana sostenible.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

Diseñar y evaluar la viabilidad técnica, social, ambiental y económica de un modelo piloto de gestión interinstitucional que permita valorizar el caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso de la gran minería en infraestructura urbana sostenible, utilizando como caso de aplicación un tramo piloto de ciclovía fotoluminiscente en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla.

2.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos se estructuran en correspondencia con las principales etapas metodológicas de la investigación, asociándose cada uno a resultados verificables, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2: *Objetivos Específicos*

N°	Objetivo específico	Resultado verificable	Fase
OE1	Diagnosticar el sistema actual de generación, gestión y valorización de NFU OTR en el polo de valorización Copiapó–Tierra Amarilla, identificando brechas logísticas, regulatorias y de capacidad instalada para su valorización territorial.	Línea base cuantificada del flujo NFU, actores, costos y capacidad instalada regional.	Fase 1
OE2	Identificar y analizar referentes internacionales, tecnologías y marcos normativos aplicables al uso de caucho reciclado en infraestructura vial sostenible.	Matriz de benchmarking tecnológico y matriz de homologación normativa ASTM/AASHTO–MOP.	Fase 2
OE3	Diseñar un modelo piloto de gestión interinstitucional para la valorización territorial de NFU mineros, incorporando mecanismos de gobernanza, trazabilidad, financiamiento y articulación público-privada.	Modelo de gobernanza, esquema de financiamiento y protocolo de trazabilidad.	Fase 3
OE4	Diseñar y evaluar técnicamente un tramo piloto de ciclovía fotoluminiscente utilizando mezcla asfáltica modificada con GCR, considerando criterios de desempeño técnico, seguridad vial y comportamiento en condiciones climáticas extremas.	Especificaciones técnicas, dosificación, protocolo constructivo y criterios de validación técnica del piloto de 100 m.	Fase 4
OE5	Evaluar la viabilidad integral y escalabilidad del modelo mediante análisis técnico-económico, ambiental, social y multicriterio ESG aplicado al tramo piloto.	Indicadores LCC, VAN, TIR, análisis costo-beneficio social, matriz ESG y hoja de ruta de replicabilidad regional.	Fase 5

Nota. *Elaboración propia.*

La estructura propuesta permite una trazabilidad metodológica entre el diagnóstico territorial del flujo de NFU, la identificación de referentes tecnológicos y regulatorios, el diseño del modelo de gobernanza interinstitucional, la validación técnica mediante un tramo piloto y la evaluación integral de viabilidad y escalabilidad, configurando una secuencia investigativa coherente, incremental y transferible a otros territorios mineros del país.

2.3 Alcance

El presente estudio posee un alcance conceptual–estratégico con validación cuantitativa parcial y se centra en el corredor territorial Copiapó–Tierra Amarilla, entendido como el sistema integrado por actores generadores de NFU OTR provenientes de faenas mineras, gestores autorizados, empresas transformadoras y organismos públicos vinculados al flujo de valorización de neumáticos fuera de uso en la Región de Atacama. Como el caso de aplicación considera un tramo piloto de 100 metros de ciclovía fotoluminiscente en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla, definido como unidad mínima de análisis para estimar costos reales, validar especificaciones técnicas y generar evidencia para un eventual escalamiento regional; el análisis económico se desarrolla sobre un horizonte de 15 años, coherente con la vida útil estándar de pavimentos flexibles en Chile según el Manual de Carreteras MOP (2022), mientras que la proyección de generación de NFU se extiende al horizonte de cumplimiento REP 2030; asimismo, el modelo de gestión se formula a nivel de factibilidad, incorporando especificaciones técnicas suficientes para sustentar decisiones de inversión, sin contemplar ingeniería de detalle ni construcción física del prototipo, y el análisis normativo se limita al marco regulatorio chileno vigente —incluyendo la Ley REP y el Manual de Carreteras del MOP— junto con estándares internacionales de referencia, tales como ASTM, AASHTO y normas EN, relevantes para la eventual homologación del GCR (*Granulado de Caucho Reciclado*) en infraestructura vial pública.

2.3.1 Límites de la investigación

El estudio presenta las siguientes limitaciones que deben considerarse en la interpretación de sus resultados:

1. La estimación de generación de NFU (15.000–20.000 ton/año) tiene carácter de orden de magnitud y se basa en ratios de productividad estándar de la industria. Los valores exactos por faena están sujetos a los planes de minado vigentes y no son de acceso público en todos los casos.
2. El análisis de viabilidad económica utiliza precios de referencia de mercado para el GCR y el asfalto convencional, los cuales pueden variar en función de las condiciones de negociación entre actores y de la escala de producción alcanzada.
3. La validación de las propiedades técnicas de la mezcla asfáltica con GCR se realiza a nivel de diseño teórico con referencia a ensayos documentados en la literatura internacional. La validación experimental en laboratorio y en terreno queda fuera del alcance de este estudio y constituye una línea de trabajo futura.
4. El modelo de gobernanza propuesto asume la disposición de los actores a colaborar bajo los incentivos identificados. La validación empírica de esa disposición mediante entrevistas o encuestas estructuradas se aborda de manera parcial y constituye una limitación del diseño metodológico. Esta limitación se mitiga de tres formas: (a) el análisis de incentivos económicos demuestra que la participación es racionalmente conveniente para cada actor sin necesidad de altruismo; (b) la existencia de Distrito Candelaria como caso documentado de valorización de NFU bajo Ley REP en Chile (América Minera, 2025) provee evidencia de disposición real de actores análogos en contextos similares; y (c) el protocolo de la Fase 1 es el espacio para verificar empíricamente esa disposición antes de comprometer recursos, constituyendo el mecanismo de resolución de esta limitación dentro del propio diseño metodológico.

3 MARCO TEORICO

Este marco teórico se estructura en torno a cinco pilares conceptuales que fundamentan el diseño metodológico y los instrumentos de evaluación utilizados: (1) la economía circular aplicada a la gestión de residuos industriales, (2) logística inversa como modelo de recuperación de valor, (3) los modelos de gobernanza colaborativa y valor compartido, (4) la evaluación económica integral de proyectos de infraestructura, y (5) el marco regulatorio nacional e internacional aplicable. Cada pilar se operacionaliza en variables e indicadores que alimentan directamente los objetivos específicos de la investigación.

3.1 Economía circular en la gestión de residuos industriales

La economía circular constituye un modelo sistémico orientado a mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible, reduciendo la generación de residuos y la extracción de recursos vírgenes (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kirchherr et al., 2017). A diferencia del modelo lineal de extracción–producción–disposición, la economía circular propone cerrar los ciclos de materiales mediante estrategias de reutilización, reciclaje, remanufactura y valorización, reduciendo simultáneamente los costos operacionales asociados a la gestión de residuos y las externalidades ambientales negativas.

En Chile, este enfoque ha sido incorporado progresivamente en las políticas públicas ambientales mediante instrumentos regulatorios que promueven la valorización de residuos. Uno de los más relevantes es la Ley N° 20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que introduce un nuevo modelo de gestión para productos prioritarios, incluyendo los neumáticos (Ministerio del Medio Ambiente, 2021).

Aplicada a la industria minera, la economía circular implica transitar desde un modelo donde los insumos de producción —incluyendo los neumáticos OTR— se gestionan como desechos al término de su vida útil, hacia un sistema donde esos mismos insumos se recuperan, transforman y reincorporan en nuevos ciclos productivos dentro del territorio. Este tránsito no es solo una decisión ambiental: es una decisión de optimización de la cadena de valor, dado que el caucho polimérico recuperable de un neumático OTR representa entre el 72% y el 74% de su masa total y posee propiedades técnicas de alto valor para la modificación de mezclas asfálticas (FHWA, 2018).

Para efectos de esta investigación, la economía circular se operacionaliza mediante tres indicadores principales: (1) la tasa de cierre de ciclo del residuo, definida como el porcentaje de NFU generados en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla que son valorizados localmente respecto del total generado; (2) la reducción de la huella de carbono logística, medida en kg CO₂ equivalente por tonelada de NFU gestionada respecto del escenario base de transporte a Antofagasta; y (3) el diferencial de costo de ciclo de vida de la infraestructura vial con GCR respecto de la solución convencional de referencia, expresado en pesos por metro lineal a 15 años.

3.2 Logística inversa y cadenas de suministro de ciclo cerrado

La logística inversa (reverse logistics) comprende el conjunto de actividades relacionadas con la recuperación de productos al término de su vida útil, su transporte desde los puntos de generación hacia los centros de procesamiento y su reincorporación en la cadena de valor mediante reciclaje, reparación o valorización (Rogers & Tibben-Lembke, 1999; Fleischmann et al., 2000). En el contexto de la gestión de residuos industriales de gran tonelaje —como los NFU OTR mineros— la logística inversa adquiere una complejidad adicional derivada del tamaño, peso y dispersión territorial de los puntos de generación, así como de la escasez crítica de infraestructura de procesamiento en proximidad a las faenas generadoras.

El modelo de cadenas de suministro de ciclo cerrado (closed-loop supply chains, Guide & Van Wassenhove, 2009) extiende el concepto de logística inversa integrando los flujos directos e inversos del material en un sistema único de optimización. En este modelo, las decisiones de diseño del sistema logístico —localización de centros de procesamiento, capacidad instalada, frecuencia de recolección y selección de rutas— se toman de manera conjunta con las decisiones de producción y distribución del material recuperado. La selección del polo de valorización de procesamiento es, desde esta perspectiva, una decisión de diseño de cadena de suministro que determina directamente el costo total del sistema, la huella de carbono logística y la viabilidad económica del modelo.

En el caso del polo de valorización Copiapó–Tierra Amarilla, el diagnóstico de la red logística disponible revela una brecha estructural: no existe actualmente ningún centro de valorización con capacidad de producir GCR de granulometría apta para uso vial en la Región de Atacama. Los centros presentes en la región, San Basilio y Resur, realizan exclusivamente acopio y corte primario del neumático, sin etapa de molienda ni producción de material certificado. El centro de valorización más próximo con capacidad de pirólisis es la planta de El Peñón en la Región de Coquimbo, a 320–350 km de las faenas de Atacama, que procesa el residuo mediante descomposición térmica produciendo aceite pirolítico y negro de carbono —no GCR— por lo que tampoco satisface el requerimiento técnico del modelo propuesto. El corredor de referencia para la valorización actual del NFU minero de Atacama es Antofagasta (La Negra), a 550–600 km, donde operan Otre recycling, Kal Tire y Michelin con las tecnologías pertinentes.

Desde el marco teórico de las cadenas de suministro de ciclo cerrado, esta configuración representa el escenario de mayor ineficiencia posible: el territorio que genera el residuo no solo carece de capacidad para valorizarlo, sino que no cuenta siquiera con una etapa intermedia de procesamiento que reduzca la distancia efectiva de transporte. La propuesta de esta investigación aborda precisamente ese vacío: instalar en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla la capacidad de molienda de precisión que permita transformar los centros de acopio existentes —San Basilio y Resur— en nodos completos de valorización, reduciendo la distancia de transporte del residuo de 550–600 km a 15–60 km y cerrando el ciclo del material dentro del territorio que lo genera.

Esta decisión de localización es la que minimiza el costo total del sistema —incluyendo costos logísticos, de procesamiento y de externalidades— y maximiza la captura de valor territorial del residuo. La diferencia respecto de la solución de Coquimbo no es solo de distancia —aunque la reducción adicional de 320 km a 15–60 km es significativa— sino de producto: mientras el pirólisis de El Peñón destruye el polímero de caucho produciendo subproductos de uso industrial genérico, la molienda mecánica local produciría el GCR directamente aplicable como insumo para la mezcla asfáltica de la ciclovía piloto, cerrando el ciclo dentro del mismo corredor territorial donde se generó el residuo.

Los indicadores de desempeño de la logística inversa aplicables a este caso incluyen el costo por tonelada recuperada, la distancia media de transporte del residuo, el tiempo de ciclo desde la generación hasta la valorización y la tasa de recuperación efectiva del material utilizable (GCR de granulometría apta para uso vial). Estos indicadores se cuantifican comparativamente para los tres escenarios logísticos identificados: Antofagasta (550–600 km), Coquimbo (320–350 km) y polo de valorización local propuesto (15–60 km), en la Fase 1 del estudio, y se utilizan como línea base para evaluar la mejora del modelo propuesto en la Fase 5.

3.3 Modelos de gobernanza colaborativa y valor compartido

3.3.1 Gobernanza colaborativa en proyectos de infraestructura sostenible

La gobernanza colaborativa (collaborative governance) es un modelo de gestión en el que actores públicos, privados y de la sociedad civil participan conjuntamente en el diseño, implementación y evaluación de decisiones que afectan recursos o servicios de interés colectivo (Ansell & Gash, 2008). A diferencia de los modelos jerárquicos de gestión pública tradicional, la gobernanza colaborativa opera sobre la base de acuerdos voluntarios entre partes con distintos roles, recursos e incentivos, coordinados en torno a un objetivo común.

En el contexto de proyectos de valorización de residuos industriales en infraestructura pública, la gobernanza colaborativa es especialmente relevante porque ningún actor individual posee todos los recursos necesarios para implementar el modelo completo: las empresas mineras tienen el residuo, pero no la infraestructura de procesamiento, ni la demanda pública; los gestores autorizados tienen la capacidad técnica, pero no la escala de operación, ni los contratos garantizados; y el sector público tiene la demanda, pero no los recursos para financiar el procesamiento del residuo. El modelo de gestión interinstitucional propuesto en esta investigación, opera precisamente sobre esa complementariedad, diseñando los mecanismos de articulación que permiten que cada actor aporte lo que tiene y reciba lo que necesita.

3.3.2 Valor compartido y criterios ESG en la minería

El concepto de valor compartido (Porter & Kramer, 2011) plantea que las empresas pueden generar ventaja competitiva identificando y resolviendo problemas sociales y ambientales del entorno donde operan, transformando externalidades negativas en oportunidades de negocio. Aplicado a la gran minería chilena, el valor compartido se expresa en la posibilidad de que las empresas mineras transformen la gestión de sus residuos (actualmente un costo de cumplimiento normativo) en una fuente de valor territorial cuantificable: infraestructura pública que mejora la calidad de vida de las comunidades adyacentes, reduce la huella ambiental de la operación y fortalece los indicadores ESG (Environmental, Social and Governance) reportados a inversionistas y reguladores.

Los criterios ESG constituyen hoy un marco de evaluación del desempeño corporativo ampliamente adoptado en la industria minera global (World Economic Forum, 2020; ICMM, 2022). En el componente ambiental, la valorización local de NFU contribuye a reducir la huella de carbono operacional y a demostrar trazabilidad en la gestión de residuos. En el componente social, la inversión en infraestructura comunitaria mejora la licencia social para operar, que es reconocida como uno de los principales activos intangibles de las empresas mineras en contextos de alta conflictividad territorial (Gunningham et al., 2004). En el componente de gobernanza, la participación en modelos interinstitucionales transparentes y verificables fortalece la reputación corporativa ante reguladores, inversionistas y comunidades.

Para efectos de esta investigación, el valor compartido generado por el modelo se cuantifica mediante el indicador de Retorno Social de la Inversión (SROI, Social Return on Investment), que expresa en términos monetarios el valor de las externalidades positivas generadas por el proyecto, mejora de seguridad vial nocturna, reducción de ruido, ahorro en mantenimiento vial público, por cada peso invertido en la implementación del modelo (Nicholls et al., 2012). En esta evaluación, el SROI se estima de manera preliminar considerando exclusivamente aquellas externalidades sociales para las cuales se dispone de una monetización explícita, evitando incorporar beneficios estratégicos sin proxies financieros validados.

El valor compartido generado por el modelo no se circunscribe a la ciclovía piloto. La diversificación de usos del GCR —rutas mineras, multicanchas, plazas, zonas de juego infantil, pavimentos de entrenamiento físico— permite activar la misma cadena de valor con distintos organismos demandantes: municipios, empresas mineras para sus propios caminos internos, servicios de salud con infraestructura deportiva y juntas de vecinos con proyectos de mejoramiento de espacios públicos. Esta ampliación del mercado local fortalece simultáneamente la viabilidad financiera del gestor, la licencia social de la minera y la percepción comunitaria de valor compartido, distribuyendo los beneficios de la economía circular entre distintos tipos de usuarios y espacios del eje Copiapó–Tierra Amarilla. El resultado es un modelo cuyo impacto territorial supera con amplitud el tramo piloto de 100 metros, posicionando el nodo Copiapó–Tierra Amarilla como referente de economía circular aplicada en territorio minero.

3.4 Tecnologías de valorización de NFU y selección para el caso de estudio

Los neumáticos OTR fuera de uso pueden valorizarse mediante tres tecnologías principales, cada una con distintos subproductos, aplicaciones y niveles de complejidad operativa. La Tabla 3 presenta una comparación de las tres tecnologías en los atributos relevantes para el caso de estudio:

Tabla 3: Comparación de tecnologías de valorización de NFU OTR

Tecnología	Subproductos	Aplicaciones	Complejidad operativa	Pertinencia para el caso
Trituración mecánica (GCR)	Granulado de caucho (GCR), acero reciclado	Mezclas asfálticas, pavimentos, superficies deportivas	Media	Alta — Preserva el polímero para uso vial
Pirólisis	Aceite pirolítico, negro de carbono, acero, gas	Combustibles, negro de carbono industrial	Alta	Baja — Destruye el polímero; no produce GCR para pavimentos
Recauchaje	Neumático extendido en vida útil	Extensión de uso antes de disposición final	Baja	Alta — Reduce generación de NFU en origen

Nota. Elaboración propia a partir de FHWA (2018), Williams (2013), WBCSD (2018) y Edeskär & Grahn (2019).

3.4.1 Justificación de la selección tecnológica.

Para el caso de estudio en el nodo Copiapó-Tierra Amarilla, la trituración mecánica con producción de GCR es la tecnología seleccionada por tres razones técnicas y operativas convergentes:

Primero, es la única tecnología que produce el insumo directamente requerido para la modificación de mezclas asfálticas: el granulado de caucho (GCR) con granulometría controlada. La pirólisis destruye el polímero de caucho en el proceso de descomposición térmica, produciendo subproductos de uso industrial distinto al vial.

Segundo, existe capacidad local de acopio y pretratamiento mediante gestores como Resur y San Basilio; sin embargo, el nodo no dispone actualmente de capacidad de molienda de precisión para producir GCR con granulometría apta para uso vial. Por ello, la implementación del modelo requiere incorporar esta capacidad tecnológica como parte del desarrollo del nodo de valorización local.

Tercero, es compatible con los métodos de incorporación del caucho en mezclas asfálticas reconocidos por el Manual de Carreteras MOP (2026): tanto la vía húmeda como la vía seca y semi húmeda requieren GCR como insumo, no subproductos de pirólisis.

La granulometría requerida para uso vial es inferior a 0,8 mm (ASTM D5644). Esta especificación se aborda en la Fase 3 de la metodología, mediante el diseño del protocolo de control de calidad del GCR, y en la Fase 4, mediante la evaluación económica de la inversión en equipos de molienda de precisión necesarios para alcanzarla.

El GCR producido mediante trituración mecánica no se limita a la aplicación en mezclas asfálticas para ciclovías. El mismo insumo es técnicamente apto para superficies de uso público y minero de distinta naturaleza: rutas de acceso a faenas y caminos de servicio interior de mina, pavimentos para plazas de entrenamiento físico y zonas de ejercicio al aire libre, canchas de pádel y multicanchas comunitarias, áreas de juego infantil con superficies amortiguadoras, plazas y paseos peatonales, y bermas de estacionamiento. Esta diversificación de aplicaciones amplía el mercado local del GCR más allá del prototipo piloto, mejorando la ecuación de amortización de la inversión en molienda de precisión al aumentar el volumen demandado por distintos tipos de obras públicas en el territorio.

3.5 Evaluación económica integral de proyectos de infraestructura

3.5.1 Análisis Costo-Beneficio Social (CBS)

El Análisis Costo-Beneficio Social (CBS) es el instrumento estándar del Sistema Nacional de Inversiones (SNI) de Chile para la evaluación de proyectos de inversión pública (MIDEPLAN, 2013; Ministerio de Desarrollo Social, 2021). A diferencia de la evaluación privada, el CBS incorpora los costos y beneficios sociales que no se reflejan en los precios de mercado (las externalidades), mediante precios sombra que expresan el valor social de los recursos utilizados o generados por el proyecto.

Para el caso de estudio, los principales beneficios sociales cuantificables mediante CBS son la reducción de accidentes viales nocturnos asociada a la mejora de la visibilidad en el corredor (valorizada mediante el costo social del accidente de tránsito del MINECON/MDS), la reducción del ruido de rodadura del tráfico pesado (valorizada mediante funciones de dosis-respuesta de molestia acústica), y la reducción de la huella de carbono logística (valorizada mediante el precio sombra del CO₂ del MDS (USD 35/ton CO₂, actualización 2023)). La razón beneficio-costos social ($B/C > 1$) es el criterio de viabilidad social del proyecto para efectos de postulación a financiamiento público.

La diversificación de usos del GCR amplía adicionalmente el beneficio social cuantificable del modelo. Al extender las aplicaciones hacia rutas mineras, multicanchas, plazas y zonas de juego infantil, el número de usuarios beneficiados aumenta significativamente respecto del corredor de ciclovía considerado en el prototipo. Esto implica que los beneficios sociales estimados en el CBS —reducción de accidentes, mejora de movilidad activa, reducción de ruido— son conservadores respecto del potencial real del modelo a escala territorial, lo que refuerza la robustez del indicador B/C social ante escenarios de menor uso del corredor piloto.

3.5.2 Análisis multicriterio con factores ESG (AMC- ESG)

El análisis multicriterio (AMC) es un método que permite evaluar una alternativa usando varios criterios al mismo tiempo, incluso cuando esos criterios no se pueden medir en la misma unidad. En esta investigación se usa para responder una pregunta que el LCC y el CBS no pueden responder solos: ¿qué valor estratégico obtiene una empresa minera al participar en el modelo, más allá del ahorro en costos?

Los cinco criterios evaluados y su peso relativo son: cumplimiento normativo REP (30%), fortalecimiento de la licencia social para operar (25%), reducción de huella de carbono (20%), contribución a reportes GRI/SASB (15%) y reputación ante inversionistas (10%). Los pesos se asignan mediante el método AHP (Saaty, 1980), que estructura las preferencias de los expertos de forma matemáticamente consistente.

El criterio GRI/SASB merece una aclaración. El GRI (Global Reporting Initiative) es el estándar de reporte de sostenibilidad hacia la comunidad y los reguladores; el SASB (Sustainability Accounting Standards Board), específicamente su estándar EM-MM-150a para minería de metales, es el estándar de reporte hacia inversionistas financieros internacionales. Una empresa con capital extranjero como Lundin Mining debe satisfacer ambas audiencias simultáneamente.

El valor concreto del modelo en esta dimensión es que el sistema de trazabilidad RETC genera automáticamente los datos que ambos marcos requieren (toneladas valorizadas, origen, destino, kilómetros de infraestructura) sin trabajo adicional de cuantificación. Participar en el modelo no es solo cumplir una obligación ambiental: es obtener evidencia verificable para los reportes ESG que los inversionistas exigen.

3.5.3 Análisis de Costo de Ciclo de Vida (LCC)

El Análisis de Costo de Ciclo de Vida (Life Cycle Costing, LCC) es un método de evaluación económica que considera todos los costos asociados a un activo o sistema durante su vida útil completa, incluyendo costos de inversión inicial, operación, mantenimiento, rehabilitación y disposición final (ISO 15686-5, 2017; Whole Life Costing, BSI, 2008). A diferencia de la evaluación de inversión tradicional centrada en el costo de construcción, el LCC permite comparar alternativas con perfiles de costo temporal distintos, lo que es especialmente relevante para pavimentos: una mezcla con GCR puede tener un costo inicial mayor que el asfalto convencional, pero un costo total de ciclo de vida menor si su mayor durabilidad reduce la frecuencia de mantenimiento y rehabilitación.

La literatura documenta reducciones del 15% al 35% en el costo de ciclo de vida de pavimentos con GCR respecto de pavimentos convencionales (FHWA, 2018). En esta investigación, el LCC se aplica sobre un horizonte de 15 años comparando ambas alternativas para el tramo piloto, utilizando una Tasa Social de Descuento (TSD) de 5,5% anual establecida por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile, que refleja el costo de oportunidad del dinero público desde la perspectiva de la sociedad en su conjunto y no la rentabilidad de un inversionista privado. Marco regulatorio nacional e internacional.

3.5.4 Sistema de Responsabilidad Extendida del Productor en Chile

La Ley N°20.920, promulgada en 2016, establece el marco legal para la gestión de residuos en Chile bajo el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), que traslada la responsabilidad de la gestión post-consumo desde los municipios hacia los productores que ponen los productos en el mercado (MMA, 2016). Este principio, conocido internacionalmente como el que contamina paga (OECD, 2016), implica que los generadores de NFU mineros, las empresas mineras, son responsables de financiar y organizar la recolección y valorización de sus residuos, ya sea directamente o a través de sistemas de gestión colectivos.

El sistema REP opera mediante cuatro figuras interrelacionadas, cuyas funciones en el contexto de la gestión de NFU mineros se describen en la Tabla 4.

Tabla 4: Figuras del Sistema REP y su rol en la gestión de NFU mineros

Figura REP	Función en el sistema de gestión de NFU
Productores	Responsables de organizar y financiar la recolección y valorización de los residuos de los productos que ponen en el mercado. En el caso de NFU mineros, son las empresas mineras generadoras.
Sistemas de Gestión	Organizaciones creadas por los productores para cumplir colectivamente las metas de recolección y valorización. Actúan como articuladores del sistema entre generadores y gestores.
Gestores de residuos	Empresas autorizadas que realizan recolección, transporte, tratamiento, reciclaje y valorización de residuos. Requieren resolución sanitaria y registro en el RETC (Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes) y SINADER (Sistema Nacional de Declaración de Residuos) .
Comercializadores	Puntos de venta o distribución que deben informar a los consumidores y facilitar la devolución de residuos al sistema de gestión.

Nota. Elaboración propia a partir de Ley N°20.920 (MMA, 2016) y DS N°8/2019.

Un elemento central del sistema es la definición de metas progresivas de valorización establecidas en el Decreto Supremo N°8 de 2019, que obligan a los productores a aumentar gradualmente el porcentaje de NFU recuperados hasta alcanzar el 100% de valorización para neumáticos mineros al año 2030. La Tabla 5 presenta las metas vigentes con su implicancia operativa para el nodo Copiapó–Tierra Amarilla:

Tabla 5: Metas de valorización de NFU mineros según DS N°8/2019

Año	Meta de valorización	Implicancia operativa
2023	25%	Establecimiento del sistema de recolección y registro de gestores autorizados
2026	60%	Consolidación de la infraestructura de valorización; operación plena de plantas regionales
2030	100%	Valorización total de NFU mineros generados; cierre completo del ciclo bajo Ley REP

Nota. Elaboración propia a partir de DS N°8/2019, Ministerio del Medio Ambiente.

3.5.5 Marco normativo técnico aplicable

La aplicación del GCR en infraestructura vial pública está regulada por un conjunto de normas técnicas nacionales e internacionales que condicionan el diseño del prototipo y el protocolo de control de calidad de la investigación. La Tabla 6 presenta los instrumentos normativos relevantes con su aplicación específica en el caso de estudio:

Tabla 6: Marco regulatorio técnico aplicable al caso de estudio

Instrumento	Organismo	Aplicación en la investigación
Ley N°20.920	MMA_Ministerio de Medio Ambiente	Marco legal general. Define figuras REP, principios de economía circular y obligaciones de productores y gestores.
DS N°8/2019 (actualizado)	MMA_Ministerio de Medio Ambiente	Establece las metas de valorización para neumáticos: 25% (2023), 60% (2026) y 100% (2030) para NFU mineros.
Manual RETC	MMA_Ministerio de Medio Ambiente	Regula la declaración y trazabilidad del caucho desde la faena generadora hasta el proyecto de valorización.
Manual de Carreteras Vol. 5 (ed. ene. 2026)	MOP Ministerio de Obras Públicas	Especificaciones técnicas para pavimentos flexibles. Incorpora desde enero 2026 la especificación de mezclas con polvo de caucho por vía semi húmeda y clasificación Superpave.
ASTM D5644 / AASHTO M320	ASTM / AASHTO	Normas internacionales de referencia para granulometría del GCR y especificaciones del ligante asfáltico modificado con caucho.

Nota. Elaboración propia a partir de MMA (2021), MOP (2026), ASTM (2023) y AASHTO (2020).

La incorporación en la edición de enero 2026 del Manual de Carreteras MOP de una especificación explícita para mezclas asfálticas con polvo de caucho por vía semi húmeda, así como la clasificación de asfaltos por zonas climáticas mediante el sistema Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements), representa un avance normativo significativo que elimina una de las principales barreras regulatorias identificadas para la implementación del modelo propuesto.

4 METODOLOGÍA

La investigación adopta un diseño mixto (cuantitativo-cualitativo) de carácter aplicado y alcance descriptivo-propositivo. Este diseño se justifica por la naturaleza del problema: el objeto de estudio no es un fenómeno observable en condiciones controladas de laboratorio, sino un sistema sociotécnico complejo que involucra flujos físicos de materiales, estructuras normativas, decisiones económicas y relaciones interinstitucionales. Ningún diseño puramente cuantitativo ni puramente cualitativo sería suficiente para abordarlo en su totalidad.

El componente cuantitativo sustenta, análisis costo-beneficio social (CBS) con metodología SNI-MIDEPLAN, la evaluación de viabilidad técnico-económica mediante modelación de costos de ciclo de vida (LCC), cuantificación de inventarios de NFU a través del sistema RETC y medición de desempeño técnico del material (reología del ligante modificado y autonomía lumínica de la demarcación fotoluminiscente). El componente cualitativo sustenta el diseño del modelo de gestión interinstitucional mediante análisis de brechas normativas, mapeo de stakeholders con matriz Poder-Interés (Mendelow, 1991) y diseño de arquitectura de gobernanza colaborativa (Ansell & Gash, 2008).

La validez buscada es de dos tipos: validez interna, entendida como la coherencia entre el diseño del modelo, sus supuestos y los instrumentos de evaluación utilizados; y validez externa o transferibilidad, entendida como la capacidad del modelo de ser replicado en otros corredores viales de regiones mineras con condiciones análogas. Esta segunda dimensión de validez se aborda explícitamente en la Fase 5.

La unidad de análisis es el corredor territorial Copiapó - Tierra Amarilla, que concentra los actores generadores, procesadores y consumidores del flujo de NFU OTR en la Región de Atacama. El caso de aplicación es un tramo piloto de 100 metros de ciclovía fotoluminiscente en el corredor que conecta ambas comunas, seleccionado como la unidad mínima que permite estimar costos reales, validar especificaciones técnicas y generar evidencia cuantitativa para el escalamiento del modelo. En la tabla 7 podemos apreciar las seis fases metodológicas que aplicadas a esta investigación.

Tabla 7: *Síntesis de las seis fases metodológicas*

Fase	Nombre	Entregable principal	Enfoque
F1	Diagnóstico y línea base	Inventario NFU, capacidad instalada, logística de reversa, caracterización GIS del corredor	Cuantitativo / Documental
F2	Benchmarking y marco normativo	Vigilancia tecnológica internacional, matriz de homologación normativa ASTM/AASHTO-MOP	Cualitativo / Comparativo
F3	Diseño del prototipo	Especificaciones técnicas de mezcla, dosificación GCR, protocolo de implementación del tramo piloto de 100 m	Cuantitativo / Normativo
F4	Evaluación integral de viabilidad	LCC (15 años), CBS-SNI, análisis multicriterio ESG con AHP; indicadores VAN, TIR, B/C y SROI	Cuantitativo / Mixto
F5	Modelo de gobernanza y escalamiento	Modelo interinstitucional con roles, mecanismos de financiamiento, protocolo de trazabilidad RETC y hoja de ruta regional	Cualitativo / Propositivo
F6	Validación, monitoreo y mejora continua	Sistema de monitoreo semestral, ciclo PDCA anual, informe de validación formal y ajustes al modelo con base en evidencia empírica	Cuantitativo / Iterativo

Nota. *Elaboración propia.*

4.1 Fase 1 Diagnóstico y levantamiento de la Línea Base

El objetivo de esta fase es establecer el escenario actual en la Región de Atacama, cuantificando las brechas entre la generación de residuos NFU y la capacidad de valorización in situ. Los productos de esta fase constituyen la línea base sobre la cual se evalúa la mejora del modelo propuesto en la Fase 4.

4.1.1 Análisis de Inventario y Oferta de Residuos

Se realiza la cuantificación volumétrica de NFU Categoría B mediante dos fuentes primarias complementarias: el sistema RETC del Ministerio del Medio Ambiente, que registra las declaraciones de residuos industriales de las faenas autorizadas, y los reportes de sustentabilidad 2022–2023 de Candelaria, Caserones y Mantoverde. La estimación de la flota activa de camiones CAEX se construye a partir de ratios de productividad estándar de la industria (Caterpillar Performance Handbook, 2020; COCHILCO, 2022), con una nota metodológica explícita que reconoce el carácter de estimación de orden de magnitud del resultado. El análisis incluye una proyección de generación a 5 años bajo dos escenarios: base (flota constante) y crecimiento moderado al 3% anual (COCHILCO, 2023).

4.1.2 Capacidad Instalada y Logística de Reversa

Se realiza el mapeo de gestores autorizados y plantas de trituración en los puntos de Antofagasta, Coquimbo y Copiapó–Tierra Amarilla, con caracterización de su capacidad instalada, tecnología disponible y granulometría de GCR producido. El indicador central de esta subsección es la brecha de cercanía, definida como la diferencia entre el costo logístico del flujo actual (traslado a Antofagasta, 550–600 km) y el costo logístico del modelo propuesto (procesamiento local, 15–60 km), expresada en USD por tonelada y en kg CO₂ equivalente por tonelada. Este indicador opera como el argumento económico primario y ambiental (huella de carbono) para justificar la instalación de capacidad local.

4.1.3 Caracterización del Emplazamiento

Se realiza el levantamiento geoespacial del tramo Copiapó–Tierra Amarilla mediante análisis de imágenes satelitales (Google Earth Pro, 2024) y datos vectoriales del IDE Chile (Ministerio de Bienes Nacionales, 2023), identificando los tramos de oscuridad absoluta durante el turno nocturno, el estado actual de la carpeta de rodado y la localización de los actores logísticos clave del corredor. Los resultados del levantamiento GIS se presentan en el Anexo A y alimentan directamente la selección del tramo piloto de 100 metros en la Fase 3.

4.2 Fase 2 Benchmarking y Marco Normativo Comparado

Esta fase identifica las mejores prácticas globales en la valorización de neumáticos fuera de uso (NFU) globales en infraestructura urbana con especial énfasis en pavimentos fotoluminiscentes y mezclas asfálticas modificadas con caucho, las homologa con el marco normativo chileno, generando el respaldo técnico y regulatorio necesario para las decisiones de diseño de la Fase 3.

4.2.1 Vigilancia Tecnológica Internacional

Se realiza un análisis sistemático de casos de uso de asfalto caucho en climas áridos similares al corredor de estudio, con énfasis en los casos de Arizona (ADOT, más de 20 años de uso documentado) y Australia (SSROC, 11 municipios con evaluación de ciclo de vida). El análisis compara el desempeño mecánico (resistencia al ahuellamiento, durabilidad, propiedades fonoabsorbentes) y el costo por metro lineal de ciclovía en cada caso, construyendo una matriz de benchmarking que orienta la selección de la tecnología y el método de incorporación del GCR para el prototipo. La incorporación de demarcación fotoluminiscente se analiza a partir de los casos Van Gogh Path (Países Bajos) y Starpath (Escocia), identificando las condiciones técnicas de viabilidad y los riesgos de adopción tecnológica.

4.2.2 Matriz de Homologación Normativa

Se construye una matriz de contraste entre los estándares internacionales (ASTM D5644, AASHTO M320, AASHTO MP19, normas EN 13108 y EN 14023) y las especificaciones del Manual de Carreteras del MOP (edición enero 2026), identificando las brechas de homologación que condicionan la certificación del GCR producido localmente para su uso en pavimentos públicos. La actualización del Manual de Carreteras MOP de enero 2026, que incorpora una especificación explícita para mezclas con polvo de caucho por vía semi húmeda y la clasificación Superpave, se analiza como un avance normativo que elimina la principal barrera regulatoria previamente identificada.

4.3 Fase 3 Diseño del prototipo

El objetivo de esta fase es traducir los insumos del diagnóstico (Fase 1) y del benchmarking (Fase 2) en especificaciones técnicas concretas para el tramo piloto de 100 metros, generando el objeto de evaluación sobre el cual opera la Fase 4. Esta fase precede a la evaluación porque no es posible evaluar la viabilidad de algo que no ha sido diseñado.

4.3.1 Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica con GCR

Se definen las especificaciones de diseño de la mezcla asfáltica modificada con GCR para el tramo piloto, incluyendo el método de incorporación seleccionado (vía seca o semi húmeda según disponibilidad de GCR local), la dosificación de caucho (rango 1%–3% del peso del agregado en vía seca, según FHWA, 2018), la granulometría requerida del GCR (inferior a 0,8 mm, conforme ASTM D5644) y los parámetros de control de calidad del ligante modificado (viscosidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica, conforme AASHTO T316 y T301). El diseño de mezcla se realiza a nivel teórico con referencia a la literatura internacional, dado que la validación experimental en laboratorio queda fuera del alcance de este estudio y constituye una línea de trabajo futura.

4.3.2 Especificaciones de la demarcación fotoluminiscente

Se definen las especificaciones de la capa de demarcación fotoluminiscente basada en aluminato de estroncio, incluyendo el espesor de aplicación, la luminancia mínima requerida para garantizar visibilidad durante los cambios de turno mineros nocturnos (mínimo 7 mcd/m² a las 10 horas de oscuridad, según referencias internacionales) y la autonomía lumínica esperada bajo los niveles de radiación solar del corredor Copiapó–Tierra Amarilla (2.500 kWh/m²-año, Atlas Solar de Chile, Ministerio de Energía, 2020). La tecnología fotoluminiscente se incorpora como capa funcional de señalética especializada, no como argumento único de viabilidad del pavimento.

4.3.3 Protocolo de implementación del tramo piloto

Se diseña el protocolo de implementación del tramo piloto de 100 metros, definiendo la secuencia de actividades, los requerimientos de equipamiento, los puntos de control de calidad en planta y en obra, y los criterios de aceptación y rechazo de la mezcla conforme a las normas aplicables. El protocolo incluye la cadena de custodia del GCR desde la faena generadora hasta la aplicación en obra, garantizando la trazabilidad exigida por el sistema RETC para el cumplimiento de las metas REP. El tramo piloto de 100 metros opera como la unidad de análisis sobre la cual se calculan los costos reales de implementación en la Fase 4.

4.4 Fase 4 Evaluación integral de viabilidad

El objetivo de esta fase es evaluar la viabilidad del modelo propuesto mediante tres instrumentos complementarios y jerarquizados: el análisis de costo de ciclo de vida (LCC) como núcleo de la evaluación técnico-económica, el análisis costo-beneficio social (CBS) para la cuantificación de externalidades, y el análisis multicriterio con factores ESG (AMC-ESG) para la dimensión estratégica. Los tres instrumentos operan sobre el diseño generado en la Fase 3 y producen los indicadores que alimentan los criterios de validación de la Fase 5.

4.4.1 Evaluación de externalidades: análisis costo-beneficio social (CBS)

Se aplica la metodología CBS del Sistema Nacional de Inversiones (SNI-MIDEPLAN, 2021) para cuantificar las externalidades positivas del modelo que no se reflejan en los precios de mercado. Los beneficios sociales cuantificables son tres. Primero, la reducción de accidentes viales nocturnos en el corredor, valorizada mediante el costo social del accidente de tránsito establecido por el Ministerio de Desarrollo Social (MDS, 2023), aplicado a la reducción esperada en la tasa de accidentabilidad nocturna derivada de la mejora de visibilidad con demarcación fotoluminiscente. Segundo, la reducción del ruido de rodadura del tráfico pesado, valorizada mediante funciones de dosis-respuesta de molestia acústica (WHO, 2018) y el número de residentes expuestos en el corredor. Tercero, la reducción de la huella de carbono logística al procesar el NFU localmente, valorizada mediante el precio sombra del CO₂ del MDS (USD 35/ton CO₂ equivalente, actualización 2023). El criterio de viabilidad social es una razón beneficio-costos B/C igual o superior a 1,3, umbral mínimo del SNI para proyectos de infraestructura vial urbana.

4.4.2 Evaluación estratégica: análisis multicriterio con factores ESG (AMC-ESG)

Se aplica un análisis multicriterio con enfoque ESG para evaluar la viabilidad del modelo desde la perspectiva de las empresas mineras participantes, incorporando criterios no capturables en una evaluación puramente monetaria. La selección del método sigue el marco taxonómico de Guitouni & Martel (1998), aplicándose una suma ponderada como procedimiento de agregación. Las ponderaciones de los criterios se determinan mediante el método AHP (Saaty, 1980) a partir de una consulta estructurada con expertos del sector minero, y corresponden a valores de referencia sujetos a validación en el trabajo de campo. Los criterios y sus ponderaciones de referencia son: cumplimiento normativo REP (30%), reducción de huella de carbono operacional (20%), fortalecimiento de la licencia social para operar (25%), contribución a indicadores de reporte GRI/SASB (15%) y reputación corporativa ante inversionistas (10%). De forma complementaria y paralela al AMC, se calcula el indicador SROI (Social Return on Investment, Nicholls et al., 2012), que expresa en términos monetarios el valor de las externalidades positivas generadas por el proyecto por cada peso invertido.

4.4.3 Evaluación técnico-económica: análisis de costo de ciclo de vida (LCC)

Se realiza el análisis LCC del tramo piloto sobre un horizonte de 15 años, consistente con la vida útil estándar de pavimentos flexibles en Chile según el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas. El análisis compara dos alternativas: la solución con mezcla asfáltica modificada con GCR y demarcación fotoluminiscente (alternativa propuesta) frente al pavimento asfáltico convencional sin modificar (alternativa de referencia). Los costos incluidos en el LCC son: inversión inicial (CAPEX), incluyendo materiales, producción de la mezcla y aplicación en obra; costos de operación y mantenimiento rutinario (OPEX anual); costos de mantenimiento mayor y rehabilitación en el año 10 del horizonte; y valor residual estimado al año 15. La tasa de descuento aplicada es del 5,5% anual, según la Tasa Social de Descuento vigente establecida por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile. Los indicadores de resultado son el VAN del diferencial de costos entre ambas alternativas y la TIR del proyecto incremental.

4.4.4 Enfoque Técnico: Desempeño Material y Seguridad Vial

Se analiza la capacidad del caucho reciclado (NFU) y la tecnología fotoluminiscente para responder a las exigencias climáticas y operativas de la zona.

- Comportamiento y Modelación de Mezcla Asfáltica: Evaluación teórica del comportamiento del ligante modificado con caucho, enfocándose en la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) y la elasticidad ante las amplitudes térmicas del desierto de Atacama.
- Autonomía y Rendimiento Lumínica: Evaluación de la tecnología fotoluminiscente mediante la medición de la luminancia proyectada y su autonomía bajo los niveles de radiación del corredor de la Región de Atacama.
- Copiapó - Tierra Amarilla para garantizar visibilidad durante los cambios de turno mineros.

4.4.5 Enfoque Ambiental: Sostenibilidad y Circularidad

Se cuantifica el impacto positivo de evitar que el residuo minero termine en vertederos o acopios abandonados.

- Análisis de Ciclo de Vida (LCA) Simplificado: Cálculo de las emisiones de CO₂ evitadas al valorizar el residuo *in situ*, comparándolo con el impacto ambiental del transporte de NFU a plantas fuera de la región (logística actual).
- Índice de Circularidad Material (MCI): Medición del porcentaje de recursos recuperados e integración de externalidades positivas (reducción de pasivos ambientales mineros).

4.4.6 Enfoque Social: Confort y Seguridad del Usuario y Territorio

Evaluación del valor agregado para los trabajadores y residentes que interactúan con la vía.

- Seguridad Vial Percibida y Segregación: Análisis de la reducción de riesgos de accidentes mediante la segregación vial y la demarcación activa fotoluminiscente como herramienta visual en sectores de oscuridad absoluta.
- Confort Acústico y Reducción del ruido: Evaluación de las propiedades fonoabsorbentes y la resiliencia mecánica mezcla del asfalto modificado (Asfalto.caucho). El análisis se centra en su capacidad para disipar la energía acústica y disminuir los decibeles generados por el rodado del tráfico pesado colindante.
- Licencia Social para operar y Valor territorial: Análisis del impacto sociopolítico y comunitario que genera la valorización de un pasivo ambiental crítico (NFU mineros). Se examina cómo la transformación de este residuo en infraestructura pública sustentable promueve la percepción de valor compartido y genera beneficios directos para las comunidades del eje Copiapó–Tierra Amarilla.

4.5 Fase 5 Diseño del Modelo de Gestión Interinstitucional y escalamiento

La fase final sintetiza los hallazgos de las cuatro fases anteriores en un modelo de gestión interinstitucional replicable, que articule la relación entre la minera (generador), el gestor (transformador) y el municipio (usuario final del material valorizado). Y evalúa las condiciones para su escalamiento a otros corredores viales de regiones mineras de Chile.

4.5.1 Mapeo y Definición de Roles de Stakeholders

Se aplica la Matriz de Interesados Poder-Interés (Mendelow, 1991) para clasificar a los actores del sistema según su nivel de influencia sobre el proyecto y su grado de interés en su implementación. Esta clasificación determina la estrategia de involucramiento de cada actor y el tipo de mecanismo de coordinación requerido. La Tabla 8 presenta la matriz de actores con sus roles y estrategias de involucramiento en el modelo:

Tabla 8 Matriz de actores del modelo de gestión interinstitucional (Poder-Interés)

Actor	Poder	Interés	Rol en el modelo	Estrategia de involucramiento
Empresas mineras (Candelaria, Caserones, Mantoverde)	Alto	Alto	Generador del residuo; financia valorización bajo Ley REP; aporta trazabilidad RETC	Socio estratégico - gestión activa
Gestores autorizados (Resur, San Basilio)	Medio	Alto	Operador logístico y de procesamiento; produce GCR certificado	Socio operativo - coordinación directa
Municipios Copiapó y Tierra Amarilla	Alto	Alto	Receptor del beneficio urbano; facilita faja vial; asume mantenimiento preventivo	Socio institucional -gestión activa
Gobierno Regional de Atacama	Alto	Medio	Fuente de financiamiento (FNDR, FIC-R); habilitador normativo regional	Informar y comprometer
MOP – Dirección de Vialidad	Alto	Medio	Autoridad técnica vial; valida especificaciones y homologación del GCR	Consultar y alinear
MMA – Fiscalización REP	Alto	Bajo	Organismo regulador; verifica cumplimiento de metas DS N°8	Informar y reportar
Planta asfáltica Bitumix	Medio	Alto	Fabricante de la mezcla modificada; socio técnico de producción	Socio operativo - coordinación directa
Comunidad Tierra Amarilla	Bajo	Alto	Beneficiaria directa de la infraestructura; generadora de licencia social	Informar y participar

Nota. Elaboración propia a partir de Mendelow (1991) y análisis del ecosistema de actores del nodo Copiapó–Tierra Amarilla.

Se aplicará una Matriz de Interesados (Poder vs. Interés) para definir el nivel de involucramiento de cada actor:

- **Sector Privado (Minería)**
Como generador responsable bajo la Ley REP, aporta el residuo y el financiamiento inicial del tratamiento, asumiendo costo evitado de disposición.
- **Sector Público (Municipios de Copiapó y Tierra Amarilla)**
Como receptores del beneficio urbano, facilitan la faja vial y asumen el mantenimiento preventivo.
- **Gestores Autorizados**
Empresas encargadas de la logística de reversa (corte, transporte y molienda) que transforman el NFU en granulado certificado.

4.5.2 Diseño de la Arquitectura de Gobernanza y mecanismo de coordinación

Se diseña la arquitectura de gobernanza del modelo, definiendo los acuerdos legales y administrativos necesarios para su operación. Los mecanismos de coordinación considerados son cuatro, que operan de manera complementaria y secuencial.

El primero son los convenios de colaboración público-privada entre las empresas mineras y los municipios, estructurados bajo la Ley N°19.862 de organizaciones receptoras de fondos públicos y la normativa de donaciones con fines públicos de la Ley N°19.885. Estos instrumentos permiten formalizar la transferencia del caucho reciclado como aporte con fines públicos o bajo modelos de compensación de emisiones y residuos, sujeto a validación jurídica específica por la Contraloría Regional antes de su implementación.

El segundo son los protocolos de compra verde y cláusulas de compra circular en las bases de licitación del municipio, que exigen el uso de insumos reciclados de origen regional en la contratación de infraestructura vial, siguiendo el modelo de experiencias comparadas en España y Colombia (European Commission, 2017). Este mecanismo es el que genera la demanda pública vinculante, sin la cual el mercado no tiene incentivo para invertir en capacidad local de valorización.

El tercero son los contratos de suministro de largo plazo entre las faenas mineras y los gestores locales, que garantizan la masa crítica de NFU necesaria para rentabilizar la operación de molienda local. Sin un volumen comprometido contractualmente, la inversión en equipos de molienda de precisión no tiene justificación económica para el gestor.

El cuarto es el protocolo de trazabilidad RETC, diseñado sobre la base del Manual del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes del Ministerio del Medio Ambiente. Este protocolo asegura que el 100% del residuo entregado por la minera sea efectivamente registrado, procesado e incorporado en la infraestructura vial local, generando el respaldo documental necesario para el cumplimiento de las metas REP del DS N°8 y para la certificación de origen ante organismos fiscalizadores e inversionistas.

4.5.3 Flujo Logístico y Operacional cerrado

Se diseña el flujo operacional completo del sistema bajo el modelo de cadena de suministro de ciclo cerrado (Guide & Van Wassenhove, 2009; Frosch & Gallopoulos, 1989), estructurado en tres etapas secuenciales que constituyen la cadena de valor del residuo: extracción y pretratamiento en faena minera (corte y preparación para transporte); valorización intermedia en planta de procesamiento local (trituration mecánica y producción de GCR certificado); e integración productiva en la cadena asfáltica (fabricación de mezcla modificada en Bitumix y aplicación en obra). El protocolo de trazabilidad RETC opera transversalmente en las tres etapas, asegurando que el 100% del residuo entregado por la minera sea efectivamente incorporado en la infraestructura vial local y reportado para el cumplimiento de las metas REP.

Diseño del proceso de transformación material bajo principios de economía circular regional, estructurado en tres etapas secuenciales:

- Extracción y Pre-tratamiento Gestión en faena minera.
- Valorización Intermedia Trituración mecánica en planta procesadora.
- Integración Productiva: Fabricación de la mezcla asfáltica modificada y aplicación en un tramo vial piloto.

4.5.4 Modelo de Sostenibilidad Financiera

Se define la estructura de costos compartidos del modelo, donde la empresa minera cubre el costo de valorización del NFU como costo de cumplimiento REP (costo evitado de disposición en planta externa), el sector público cubre la instalación de la infraestructura vial (mediante FNDR o FIC-R), y la planta asfáltica recibe el GCR como insumo a precio inferior al asfalto convencional, generando un incentivo económico para su adopción. La viabilidad financiera del modelo se evalúa mediante el Business Model Canvas para Economía Circular (Lewandowski, 2016), que adapta el modelo Canvas de Osterwalder & Pigneur (2010) para capturar los flujos de valor en sistemas de recuperación de materiales, identificando las condiciones mínimas necesarias para la replicabilidad del modelo sin dependencia de subsidios permanentes.

Definición de los mecanismos de financiamiento para asegurar la replicabilidad del modelo a largo plazo:

- Estructura de Costos Compartidos: La minera cubre el costo de valorización (cumplimiento REP), mientras el sector público cubre la instalación, beneficiándose del menor costo del insumo recuperado respecto al asfalto convencional.
- Identificación de Fuentes de Financiamiento Externo: Levantamiento de instrumentos disponibles, incluyendo el Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) y fondos regionales de innovación y sustentabilidad.

4.5.5 Criterios de validación y escalamiento del Modelo de Gestión

La validación del modelo se realiza mediante la verificación de cinco criterios explícitos cuyos umbrales de aprobación se definen a priori, garantizando que la validación sea objetiva y no dependiente de la interpretación del investigador. La Tabla 9 presenta los criterios, sus umbrales y los instrumentos de medición correspondientes:

Tabla 9: *Criterios de validación del modelo piloto con umbrales de aprobación definidos a priori*

Criterio de validación	Umbral de aprobación	Instrumento de medición	Dimensión evaluada
VAN del LCC (15 años)	$VAN > 0$ respecto del pavimento convencional de referencia	Análisis LCC con tasa de descuento 5,5% anual (TSD, Ministerio de Desarrollo Social y Familia)	Viabilidad técnico-económica privada
Razón B/C social (CBS)	$B/C \geq 1,3$ (umbral mínimo SNI para proyectos de infraestructura vial)	CBS con precios sombra MDS 2023	Viabilidad social del proyecto
Reducción huella de carbono logística	Reducción $\geq 70\%$ respecto del escenario base (transporte a Antofagasta)	LCA simplificado; precio sombra CO_2 USD 35/ton	Viabilidad ambiental
Puntaje AMC-ESG	Puntaje $\geq 70/100$ en la matriz multicriterio con factores ESG ponderados por AHP	AMC con consulta estructurada a expertos del sector minero	Viabilidad estratégica para actores privados
Replicabilidad del modelo	Al menos 2 corredores viales adicionales identificados con condiciones equivalentes al caso piloto	Análisis de transferibilidad con criterios de masa crítica y actores disponibles	Escalamiento regional

Nota. *Elaboración propia a partir de SNI-MIDEPLAN (2021), Nicholls et al. (2012) y Saaty (1980).*

El escalamiento regional se evalúa mediante un análisis de transferibilidad que identifica corredores viales en regiones mineras del norte de Chile con condiciones análogas al caso piloto: masa crítica de NFU superior a 8.000 ton/año, presencia de gestores autorizados locales, corredor con tráfico pesado minero y municipio con demanda de infraestructura vial. La identificación de al menos dos corredores adicionales que cumplan estos criterios constituye el indicador de replicabilidad del modelo.

Verificación de la aplicabilidad y coherencia de los acuerdos interinstitucionales suscritos entre los actores clave (Mineras-Municipio-Gobierno Regional) y evaluación de la sostenibilidad financiera del modelo mediante la herramienta Canvas de Economía Circular, identificando las condiciones mínimas necesarias para su replicabilidad.

4.5.6 Juicio de Expertos

Como mecanismo de validación externa del modelo, se presenta el diseño completo, incluyendo las especificaciones técnicas, los resultados de la evaluación integral y la arquitectura de gobernanza, ante un panel de expertos del ecosistema público, privado y académico. El panel incluye representantes de la Dirección de Vialidad del MOP, profesionales del área de sustentabilidad de al menos una de las faenas mineras consideradas, un representante del Gobierno Regional de Atacama y académicos con especialización en ingeniería vial y economía circular. Las observaciones del panel se incorporan al modelo mediante un proceso estructurado de revisión, y las condiciones técnicas, normativas y financieras identificadas para el escalamiento se documentan como líneas de trabajo futuro.

Presentación de los resultados del tramo piloto ante actores clave del ecosistema público, privado y académico, con el fin de someter el modelo a validación experta, incorporar observaciones críticas y establecer las condiciones técnicas, normativas y financieras requeridas para escalar el proyecto a nivel regional.

4.6 Fase 6 Validación, monitoreo y mejora continua

La Fase 6 cierra el ciclo metodológico de la investigación incorporando el mecanismo de aprendizaje y corrección que distingue un modelo de gestión de un proyecto de construcción. Su fundamento conceptual es el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act, Deming, 1986; ISO 9001:2015), que establece que ningún modelo de gestión puede considerarse validado sin un proceso iterativo de verificación empírica, identificación de desvíos y ajuste sistemático. Esta fase opera sobre los resultados reales generados por la implementación del prototipo y la aplicación de los instrumentos de evaluación de la Fase 4, convirtiendo los datos observados en insumos para la mejora del modelo.

4.6.1 Validación formal del modelo piloto

La validación formal consiste en la verificación de los cinco criterios definidos a priori en la Tabla 9 de la metodología, aplicados ahora sobre datos reales de implementación en lugar de proyecciones. Para cada criterio se compara el valor observado con el umbral de aprobación, se determina si el criterio fue satisfecho, y se identifica la causa raíz de cualquier desvío significativo respecto de las proyecciones de la Fase 4.

El informe de validación formal se presenta ante el panel de expertos convocado en la Fase 5, siguiendo el protocolo Delphi de dos rondas. Los expertos evalúan no solo si los criterios fueron satisfechos, sino si los umbrales definidos a priori eran adecuados para el contexto específico del corredor Copiapó - Tierra Amarilla, generando recomendaciones para su ajuste en futuras aplicaciones del modelo.

4.6.2 Sistema de monitoreo continuo

El sistema de monitoreo opera en ciclos semestrales durante los primeros tres años post-implementación del prototipo, y en ciclos anuales a partir del cuarto año. En cada ciclo se miden once indicadores de la tabla N°42, se comparan con los umbrales de validación y con los valores del ciclo anterior, y se identifican tendencias de mejora o deterioro en cada dimensión del modelo.

Los datos de monitoreo se reportan de manera estructurada a los actores del modelo —empresas mineras, municipios, gestores autorizados— en el marco de la Mesa Técnica Permanente definida en la Fase 5, y al Ministerio del Medio Ambiente para el cumplimiento de las metas REP del DS N°8. Este doble flujo de reporte garantiza tanto la rendición de cuentas interna del modelo como el cumplimiento normativo externo, y genera el registro histórico necesario para demostrar la consistencia del sistema ante organismos fiscalizadores y potenciales replicadores.

4.6.3 Ciclo PDCA de mejora continua

El ciclo PDCA se aplica anualmente sobre los resultados del monitoreo, estructurado en cuatro etapas:

1. **Planificar (Plan):** con base en los desvíos detectados en el ciclo de monitoreo, se identifican las variables que no alcanzaron sus umbrales de validación y se diseñan las acciones correctivas o preventivas correspondientes. Las acciones pueden referirse al diseño técnico de la mezcla, a la arquitectura de gobernanza, a la estructura de financiamiento o a los mecanismos de coordinación, según la naturaleza del desvío.
2. **Ejecutar (Do):** las acciones correctivas se implementan en el siguiente ciclo operativo del modelo, con responsables y plazos definidos conforme a la Matriz RACI de la Fase 5. Las modificaciones al diseño técnico requieren validación normativa del MOP antes de su implementación; las modificaciones a la gobernanza requieren acuerdo formal de la Mesa Técnica Permanente.
3. **Verificar (Check):** al término del ciclo de implementación de las acciones correctivas se mide nuevamente el indicador que motivó la corrección, comparando el nuevo valor con el umbral de validación y con el valor previo a la corrección. Si el indicador supera el umbral, la acción correctiva se considera exitosa y se documenta como práctica a replicar. Si el indicador sigue sin alcanzar el umbral, se activa un análisis de causa raíz de segundo nivel.
4. **Actuar (Act):** los aprendizajes del ciclo se incorporan al modelo mediante actualización de la documentación técnica, las especificaciones de gobernanza o los criterios de transferibilidad para el escalamiento regional. Esta etapa cierra el ciclo y alimenta la planificación del siguiente período, garantizando que el modelo mejora de manera acumulativa en cada iteración.

5 DESARROLLO

5.1 Fase 1: Diagnóstico y levantamiento de la Línea Base

La cuantificación de la generación de NFU en el nodo Copiapó–Tierra Amarilla constituye el punto de partida del diagnóstico. La fuente primaria para este levantamiento es el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) del Ministerio del Medio Ambiente, complementado con los reportes de sustentabilidad de las principales faenas generadoras de la región: Minera Candelaria y Minera Caserones (Lundin Mining) y Mantoverde (Capstone Copper).

5.1.1 Estimación de generación anual de NFU - Nodo Copiapó - Tierra Amarilla

La estimación de 15.000 a 20.000 toneladas anuales de NFU generadas en el nodo se construye a partir de tres variables interrelacionadas: la producción de cobre de las principales faenas de la región, la flota de equipos de extracción asociada a esa producción y el ciclo de vida promedio de los neumáticos OTR en operación minera continua.

Parámetro 1: Capacidad operacional, producción regional de cobre y flota activa

Las faenas mineras de Minera Candelaria, Caserones y Mantoverde registran una producción conjunta cercana a 300.000 toneladas de cobre fino por año, de acuerdo con sus Reportes de Sustentabilidad correspondientes al período 2022–2023.

Este nivel de producción requiere una operación continua de equipos de extracción de gran tonelaje, principalmente camiones CAEX Caterpillar 793 y Komatsu 830E, además de cargadores frontales, motoniveladoras y otros equipos auxiliares que utilizan neumáticos OTR de gran dimensión.

Como mecanismo de validación del orden de magnitud operacional, se estimó una dotación superior a 150 camiones CAEX en operación, considerando los índices de productividad reportados para minería a cielo abierto y las relaciones promedio de movimiento de mineral y estéril utilizadas por la industria minera chilena (Caterpillar Performance Handbook, 2020; Komatsu Mining, 2021; COCHILCO, 2022). Esta estimación no constituye la base directa del cálculo de NFU, sino un indicador que confirma la elevada capacidad generadora de neumáticos fuera de uso del nodo minero analizado.

Parámetro 2: Generación anual de neumáticos fuera de uso

La estimación de la generación anual de NFU se fundamenta en la magnitud operacional de las faenas, los antecedentes reportados por las empresas mineras y los requerimientos establecidos por la Ley N.º 20.920 sobre Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP), que obliga a la valorización progresiva de neumáticos fuera de uso.

Los neumáticos OTR utilizados por camiones CAEX y equipos auxiliares presentan una vida útil promedio de 4.000 a 6.000 horas de operación, equivalente aproximadamente a 7–10 meses de servicio continuo, dependiendo de las condiciones geotécnicas, operacionales y de mantenimiento (FHWA, 2018).

A partir de estos antecedentes y considerando la magnitud del parque de equipos presente en el nodo, se estima que las operaciones mineras de Candelaria, Caserones y Mantoverde generan un flujo anual del orden de 15.000 a 20.000 toneladas de neumáticos fuera de uso, constituyendo uno de los principales flujos regionales de residuos valorizables asociados a la gran minería del cobre.

Parámetro 3: Conversión de toneladas a unidades equivalentes

Con el fin de facilitar la comprensión de la magnitud del recurso disponible, la generación anual expresada en toneladas fue convertida a un número equivalente de neumáticos OTR.

De acuerdo con información técnica de Michelin (2021) y la Ellen MacArthur Foundation (2013), un neumático OTR correspondiente a camiones CAEX de gran tonelaje posee un peso promedio cercano a 4,5 toneladas por unidad.

Aplicando este valor de referencia, la generación estimada de 15.000 a 20.000 toneladas anuales equivale aproximadamente a un rango de 3.300 a 4.400 neumáticos OTR por año.

Esta equivalencia tiene un carácter referencial y permite dimensionar el potencial de valorización del material disponible para aplicaciones en infraestructura urbana sostenible, sin representar un inventario exacto por operación minera.

La Tabla 10, sintetiza los parámetros de estimación de generación anual de NFU para el nodo Copiapó–Tierra Amarilla, construida a partir de tres variables interrelacionadas: la producción de cobre de las faenas consideradas, la flota de equipos de extracción asociada y el ciclo de vida promedio de los neumáticos OTR en operación minera continua. Los valores resultantes —entre 15.000 y 20.000 toneladas anuales, equivalentes a 3.300–4.400 unidades— tienen carácter de estimación de orden de magnitud y deben entenderse como el piso conservador del potencial de valorización local, dado que no incorporan la totalidad de equipos auxiliares ni las faenas menores de la región.

Tabla 10: *Estimación de generación anual de neumáticos fuera de uso (NFU) del nodo Copiapó–Tierra Amarilla*

Parámetro	Valor estimado	Unidad	Fuente
Faenas mineras consideradas	Candelaria, Caserones y Mantoverde	—	Reportes de Sustentabilidad 2022–2023
Producción conjunta de cobre fino	≈300.000	ton Cu/año	Reportes corporativos
Flota CAEX estimada (validación)	>150	camiones	Caterpillar (2020); Komatsu (2021); COCHILCO (2022)
Equipos auxiliares OTR	Cargadores, motoniveladoras y equipos de apoyo	—	Elaboración propia
Vida útil promedio neumático OTR	4.000–6.000	horas	FHWA (2018)
Ciclo promedio de reemplazo	7–10	meses	FHWA (2018)
Peso promedio neumático OTR	4,5	ton/unidad	Michelin (2021); Ellen MacArthur Foundation (2013)
Generación estimada de NFU	15.000–20.000	ton/año	Elaboración propia
Equivalencia aproximada	3.300–4.400	NFU/año	Elaboración propia
Potencial de valorización	Aplicación en mezclas asfálticas modificadas y otros productos de infraestructura urbana	—	Modelo propuesto

Nota. *Elaboración propia a partir de Reportes de Sustentabilidad de Minera Candelaria, Caserones y Mantoverde (2022–2023); COCHILCO (2022); Caterpillar Performance Handbook (2020); Komatsu Mining (2021); FHWA (2018); Michelin Technical Data (2021); Ellen MacArthur Foundation (2013).*

5.1.2 Análisis de sensibilidad de la disponibilidad de NFU

Con el fin de evaluar la robustez del modelo de gestión propuesto, se desarrolló un análisis de sensibilidad considerando distintos niveles de disponibilidad anual de neumáticos fuera de uso (NFU) en el nodo Copiapó–Tierra Amarilla. Se definieron tres escenarios (pesimista, base y optimista) contruidos a partir de la variabilidad operacional de las principales faenas mineras y de las proyecciones de crecimiento del sector.

Es importante señalar que la viabilidad del tramo piloto de 100 metros no depende del volumen total de NFU generado, ya que el consumo de aproximadamente 3,5 toneladas de caucho granulado reciclado (GCR) representa una fracción mínima del recurso disponible. En consecuencia, el análisis se centra en evaluar el efecto de la disponibilidad de NFU sobre la rentabilidad de una eventual planta regional de molienda.

Escenario pesimista (8.000 ton/año). Corresponde a una disponibilidad reducida de NFU asociada a una menor actividad minera. Aunque el período de recuperación de la inversión en molienda se extiende a aproximadamente 10–15 años, el procesamiento regional continúa siendo más económico que el transporte del material hacia La Negra, por lo que el apoyo de instrumentos públicos, como el FIC-R, favorecería la implementación de la infraestructura.

Escenario base (15.000–20.000 ton/año). Representa la condición de diseño del modelo y la disponibilidad estimada para las faenas de Candelaria, Caserones y Mantoverde. En este escenario, la planta regional de molienda alcanza períodos de recuperación estimados entre 5 y 8 años, permitiendo una operación económicamente autosostenible mediante contratos de suministro con la industria minera.

Escenario optimista (23.000 ton/año). Considera un incremento de la producción minera hacia 2030. La mayor disponibilidad de NFU genera economías de escala, favorece el ingreso de nuevos operadores y contribuye a disminuir el costo del GCR destinado a mezclas asfálticas modificadas.

En los tres escenarios evaluados, se puede apreciar en la Tabla 11 que el modelo mantiene su viabilidad técnica y económica para el desarrollo del piloto. La principal variable sensible corresponde al período de amortización de la planta de molienda regional, mientras que el beneficio económico asociado al procesamiento local de NFU respecto de su transporte a otras regiones permanece favorable en todos los casos analizados.

Tabla 11: Análisis de los 3 escenarios evaluados

	NFU disponibles (ton/año)	Viabilidad del piloto	Recuperación inversión molienda	Necesidad de financiamiento	Competitividad regional
Pesimista	8.000	Muy Alta	10–15 años	Alta (FIC-R/FNDR)	Baja
Base	15.000–20.000	Muy Alta	5–8 años	Moderada	Alta
Optimista	23.000	Muy Alta	<5 años	Baja	Muy Alta

Nota. Elaboración Propia

Proyección de generación de NFU a 5 años (2025–2030)

Con el propósito de evaluar la disponibilidad futura de materia prima para el modelo de valorización, se proyectó la generación de neumáticos fuera de uso (NFU) en un horizonte de cinco años mediante dos escenarios: escenario base y escenario de crecimiento moderado.

El escenario base asume una producción minera y una flota de equipos relativamente estables, manteniendo una generación anual estimada entre 15.000 y 20.000 toneladas de NFU, lo que representa un volumen acumulado de 75.000 a 100.000 toneladas durante el período analizado.

Esta disponibilidad resulta suficiente para sustentar la implementación de una planta regional de valorización de escala intermedia desde los primeros años de operación.

El escenario de crecimiento moderado incorpora una tasa de crecimiento de la producción minera del 3 % anual, en concordancia con las proyecciones de COCHILCO (2023) y los planes de expansión de las principales faenas de la Región de Atacama. Bajo este supuesto, la generación anual de NFU alcanzaría aproximadamente 17.400 a 23.200 toneladas hacia el final del período, acumulando entre 82.000 y 109.000 toneladas.

En ambos escenarios se observa una disponibilidad suficiente de materia prima para abastecer una infraestructura regional de valorización. Asimismo, los resultados respaldan la conveniencia de implementar capacidad local de molienda y procesamiento antes del cumplimiento de las metas establecidas por la Ley N.º 20.920 (Ley REP), particularmente considerando el objetivo de valorización del 100 % de los neumáticos OTR al año 2030. La instalación anticipada de esta infraestructura permitiría reducir costos logísticos, fortalecer la economía circular regional y asegurar la capacidad de respuesta frente al incremento proyectado en la generación de NFU.

A partir de los escenarios definidos, la Tabla 12 sintetiza la proyección de generación anual y acumulada de neumáticos fuera de uso (NFU) en el nodo Copiapó–Tierra Amarilla para un horizonte de cinco años. Los resultados permiten evaluar la disponibilidad futura de materia prima y respaldan técnicamente la implementación anticipada de infraestructura regional de valorización, en concordancia con las metas establecidas por la Ley N.º 20.920 (Ley REP)

Tabla 12: *Proyección de generación anual y acumulada de NFU*

Escenario	Generación anual (ton/año)	Generación acumulada (5 años)	Implicancia para el modelo
Base	15.000–20.000	75.000–100.000	Justifica una planta regional de valorización
Crecimiento moderado	17.400–23.200	82.000–109.000	Refuerza la necesidad de ampliar la capacidad instalada antes de 2030

Nota. *Elaboración propia a partir de los resultados de la estimación de generación de NFU desarrollada en esta investigación, utilizando información de los Reportes de Sustentabilidad de Minera Candelaria, Caserones y Mantoverde (2022–2023), proyecciones de COCHILCO (2023) y criterios de análisis establecidos en la Ley N.º 20.920 (Ley REP).*

5.1.3 Capacidad instalada y logística de reversa

El propósito de esta sección es diagnosticar la asimetría regional en la valorización de NFU. Esta brecha estructural, acentuada por la concentración de plantas de tratamiento en regiones vecinas, evidencia la necesidad imperativa de implementar un modelo de gestión circular autónomo en el nodo Copiapó -Tierra Amarilla.

Mapeo de infraestructura: análisis comparativo

El ecosistema actual de valorización de neumáticos OTR (Categoría B) presenta un marcado sesgo de centralización hacia el norte del país, imponiendo una dependencia logística crítica para las faenas mineras de la Región de Atacama. Para comprender la magnitud de esta asimetría, es necesario analizar los tres nodos que estructuran el sistema actual:

1. Nodo Antofagasta - Centro de gravedad tecnológico

El nodo Antofagasta constituye hoy el referente técnico del sistema nacional de valorización. Concentra infraestructura de gran envergadura orientada a la pirólisis avanzada, y la trituración mecánica, destacando las siguientes instalaciones:

- Kal Tire (La Negra): planta de conversión térmica (pirólisis) con capacidad para procesar neumáticos de hasta 63 pulgadas, transformándolos en r-Oil, negro de humo y acero.
- Michelin (Bahía de Mejillones): planta de pirólisis de alta tecnología enfocada en el reciclaje integral de neumáticos mineros gigantes.
- Otreycling (Barrio Industrial La Negra): planta especializada en neumáticos OTR que recientemente amplió su capacidad de 20 a 120 toneladas diarias, consolidándose como el principal punto de referencia para calcular la brecha de cercanía que afecta a Atacama.
- Rembre / Arrigoni Ambiental: plantas de trituración mecánica que generan granulado de caucho (GCR) para diversos usos industriales.

2. Nodo Coquimbo — Descentralización incipiente y precedente replicable

El nodo Coquimbo representa un caso de descentralización incipiente pero significativo para el análisis. La puesta en marcha de una planta de pirólisis en el sector El Peñón, con una capacidad de procesamiento de 3.600 toneladas anuales, constituye el primer antecedente concreto de valorización de NFU mineros fuera del eje Antofagasta–Región Metropolitana.

Su relevancia para este estudio es doble. Por una parte, demuestra que es técnica y económicamente viable instalar infraestructura especializada en regiones intermedias, alejadas de los grandes polos industriales, siempre que exista masa crítica de residuos y voluntad de articulación entre los actores del territorio. Por otra parte, su existencia pone en evidencia una paradoja estructural: mientras Coquimbo —región con una actividad minera considerablemente menor que Atacama— ya cuenta con capacidad de valorización local, la región que concentra algunas de las mayores faenas cupríferas del país sigue exportando su residuo hacia el norte. La planta de El Peñón opera, en este sentido, como espejo y como precedente replicable para el nodo Copiapó–Tierra Amarilla.

3. Nodo Copiapó–Tierra Amarilla — Brecha de infraestructura y potencial local

En el nodo Copiapó–Tierra Amarilla, la gestión ha estado históricamente limitada al acopio y corte primario. Sin embargo, emergen capacidades locales que constituyen una base sólida para escalar hacia un modelo más completo:

- San Basilio (Copiapó): gestor con presencia histórica en el manejo de residuos industriales, con autorizaciones vigentes para NFU y capacidades de transporte operativas.
- Resur (Atacama/Nacional): empresa con resolución sanitaria y registro en el RETC/SINADER. Cuenta con capacidad de recolección, transporte y molienda mecánica para diferentes granulometrías de NFU Categoría B.

Desde el punto de vista técnico, la trituración mecánica que realizan estos gestores presenta una ventaja diferencial respecto del pirólisis: en lugar de descomponer el material en aceite y acero, genera polvo de caucho granulado (GCR), insumo esencial para la modificación de mezclas asfálticas de alto desempeño. Esta característica convierte al nodo local, no sólo en un gestor de residuos, sino en un potencial proveedor de materia prima para infraestructura vial. A continuación, podemos ver en la Tabla 13, el análisis logístico comparativo de rutas de transporte de NFU mineros.

Tabla 13: Cuadro comparativo logístico de rutas de transporte de NFU mineros.

Ruta Logística	Distancia	Impacto Principal
Faena Atacama – Antofagasta (La Negra)	550–600 km	Alto costo de flete por carga sobredimensionada; huella de CO ₂ crítica por volumen y distancia
Faena Atacama – Coquimbo (El Peñón)	320–350 km	Costo de flete elevado; el residuo abandona el territorio que lo genera sin retorno de valor
Propuesta: Nodo Copiapó–T. Amarilla	15–60 km	Reducción del 90% en distancias; cierre del ciclo en el territorio de origen; impulso a la economía circular regional

Nota. Elaboración propia a partir de datos de ruteo vial (Rutas Chile / Google Maps, 2024) y análisis logístico de rutas mineras en la macrozona norte. Las referencias FHWA (2018) y European Commission (2017) sustentan los criterios de evaluación de impacto logístico, no las distancias geográficas.

Impacto en la hoja de ruta de la Ley REP

La Ley N.º 20.920 (Ley REP) establece metas progresivas que culminan con la valorización del 100 % de los neumáticos OTR al año 2030, lo que incrementará la demanda por infraestructura especializada para su tratamiento. En este contexto, la Región de Atacama, con una generación estimada entre 15.000 y 20.000 toneladas anuales de NFU, dispone de una masa crítica suficiente para sustentar una capacidad regional de valorización, reduciendo la dependencia de plantas ubicadas en otras regiones y fortaleciendo la gestión local del recurso.

Asimismo, la experiencia de la planta de El Peñón, en la Región de Coquimbo, constituye un antecedente que demuestra la factibilidad de implementar infraestructura de valorización en regiones intermedias cuando existe disponibilidad de residuos y una adecuada articulación entre los actores del territorio. En este sentido, el desarrollo de una capacidad regional de procesamiento en Atacama se presenta como una alternativa estratégica para avanzar en el cumplimiento de la Ley REP, disminuir costos logísticos y consolidar un modelo de economía circular aplicado a la minería.

Integración en la cadena de valor asfáltica

Para la ejecución del prototipo de ciclovía de 100 metros, el nodo Copiapó–Tierra Amarilla cuenta con actores instalados que permiten estructurar una cadena de valor local completa. Bitumix, ubicada en Cuesta Cardones (km 799, Ruta 5 Norte), es el actor principal: posee experiencia acreditada en mezclas de alta resistencia y constituye el socio técnico idóneo para la incorporación de GCR bajo especificación técnica controlada.

Ecmovial aporta flexibilidad operativa en pavimentación urbana, haciéndola ideal para la escala del piloto. La Constructora Regional Atacama (CRA) se proyecta como la alternativa de escalabilidad mediante plantas móviles. La Tabla 14 sintetiza las tres rutas logísticas del nodo, evidenciando la ventaja estructural del modelo propuesto respecto del flujo actual:

Tabla 14: Matriz de análisis logísticos estimado, nodo Copiapó

Tramo Logístico	Destino	Distancia	Tiempo Estimado	Huella CO ₂
Flujo actual	Planta La Negra	565 km	7,5 hrs	Crítica: alto consumo de combustible por carga pesada
Propuesta local	Gestor / Resur	15–25 km	30 min	Mínima: optimización de activos regionales
Suministro mezcla	Planta Bitumix	12 km	20 min	Insignificante: suministro directo para mezcla asfáltica

Nota. *Elaboración propia.*

Ventaja competitiva y certificación

El modelo propuesto no resuelve únicamente una ineficiencia técnica: genera valor agregado en múltiples dimensiones. Al procesar localmente, se elimina el denominado flete muerto, evitando el transporte de volúmenes compuestos en un porcentaje significativo por aire. Este efecto se deriva de la morfología del neumático OTR: un neumático 59/80R63 tiene un volumen geométrico exterior de aproximadamente 8,5 m³ y una masa de 5,0 ton, lo que equivale a una densidad aparente de solo 588 kg/m³, frente a los 1.100–1.200 kg/m³ del GCR densificado. La relación entre volumen transportado y masa útil mejora en aproximadamente un 47% al transportar GCR en lugar de neumático entero (estimación propia a partir de especificaciones Michelin OTR, 2021 y Rubber Pavements Association, 2020), lo que se traduce directamente en reducción de viajes y costos de flete. La proximidad a Bitumix garantiza además las condiciones de temperatura necesarias para trabajar el asfalto modificado con la calidad requerida por el prototipo.

Desde la perspectiva de las empresas mineras, el modelo ofrece un beneficio adicional de alto valor estratégico: la certificación de origen. La minera puede acreditar la trazabilidad completa de sus residuos, transformados en infraestructura pública para su propia comunidad, fortaleciendo tanto sus indicadores de RSE como el cumplimiento de la Ley REP ante los organismos fiscalizadores.

Barreras de entrada y condiciones de viabilidad

Todo modelo de innovación territorial enfrenta resistencias estructurales que, si no se reconocen explícitamente, pueden comprometer su implementación independientemente de sus méritos técnicos. El modelo propuesto para el nodo Copiapó–Tierra Amarilla identifica cuatro barreras de entrada cuya resolución es condición necesaria para la implementación. La Tabla 13 presenta su nivel de criticidad y la condición de viabilidad asociada a cada una, antes de desarrollar el análisis de cada barrera en detalle.

Barrera 1: Inversión inicial en equipos de molienda de precisión.

Los gestores locales actuales realizan trituración primaria, pero carecen de la etapa de molienda fina necesaria para producir GCR con granulometría inferior a 0,8 mm, requerida para mezclas asfálticas de desempeño. La inversión estimada para una unidad de molienda mecánica de escala intermedia oscila entre USD 800.000 y USD 1.500.000 (FHWA, 2018). Esta barrera es real pero no insalvable: el prototipo puede ejecutarse con GCR proveniente de Antofagasta en una primera fase, mientras se gestiona financiamiento a través del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC-R), fondos CORFO de economía circular o compromisos de RSE de las mineras locales.

Barrera 2: Masa crítica mínima para rentabilizar la operación.

La experiencia internacional sitúa ese umbral en torno a las 8.000–10.000 toneladas anuales (European Commission, 2017). Con una generación estimada de 15.000 a 20.000 toneladas en el nodo, el volumen regional supera con holgura ese mínimo. La condición de viabilidad no es volumétrica sino contractual: requiere que las mineras generadoras comprometan el suministro de sus NFU a la planta local en lugar de renovar contratos con gestores externos.

Barrera 3: Resistencia de gestores externos con contratos vigentes.

Las plantas de Antofagasta tienen acuerdos de largo plazo con las mineras de Atacama y pueden ejercer presión comercial frente a la instalación de capacidad local competidora. La condición de viabilidad es la certificación técnica del GCR producido localmente y la demostración práctica de su desempeño mediante el prototipo piloto.

Barrera 4: Ausencia de demanda pública vinculante.

Sin un mecanismo de compra pública que exija el uso de insumos reciclados de origen regional en licitaciones de infraestructura vial, el mercado no tiene incentivo para invertir en capacidad local. La condición de viabilidad requiere que el municipio de Copiapó, el Gobierno Regional de Atacama o el Ministerio de Obras Públicas incorporen cláusulas de compra circular en sus bases de licitación, tal como ya ocurre en experiencias comparadas en España, Francia y Colombia (European Commission, 2017).

La Tabla 15 sintetiza las principales barreras identificadas para la implementación del modelo de gestión propuesto, evaluando su nivel de criticidad y las condiciones necesarias para su mitigación. Esta evaluación permite priorizar las acciones requeridas para asegurar la factibilidad técnica, económica e institucional del proyecto.

Tabla 15: *Síntesis de barreras y condiciones de viabilidad*

Barrera	Nivel de Criticida	Condición de Viabilidad
Inversión en infraestructura de molienda de precisión	Alta	Acceso a financiamiento mediante FIC-R, CORFO o programas de inversión social (RSE/ESG) de la industria minera.
Masa crítica de NFU	Baja	La generación regional estimada (15.000–20.000 ton/año) supera el volumen mínimo requerido para sustentar una planta de valorización.
Resistencia de gestores externos	Media	Validación técnica del caucho granulado reciclado (GCR) y ejecución de un proyecto piloto que demuestre su desempeño.
Demanda pública de materiales reciclados	Baja	Incorporación de criterios de compra pública circular y especificaciones técnicas en licitaciones de infraestructura regional.

Nota. *Nota metodológica: el nivel de criticidad se determina combinando dos dimensiones:*

(1) probabilidad de que la barrera se materialice como obstáculo efectivo, y (2) impacto sobre la viabilidad del proyecto.

Alta: barrera probable y de alto impacto si no se resuelve; Media: moderada en probabilidad o impacto; Baja: superable con los recursos actuales del nodo. Elaboración propia.

Normativa técnica aplicable al GCR y al asfalto modificado con caucho

La incorporación del granulado de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas está regulada por un conjunto de normas técnicas internacionales y nacionales que establecen los requisitos de granulometría, pureza, comportamiento reológico y desempeño estructural que el material debe cumplir. El cumplimiento de estas normas no es sólo una exigencia técnica; es la condición que otorga validez institucional al modelo propuesto y lo hace replicable a escala regional y nacional.

Normas internacionales de referencia

La principal referencia es el documento *Rubberized Asphalt: State of the Practice* (FHWA, 2018), que define dos métodos de incorporación: la vía húmeda (*wet process*), donde el GCR se mezcla con el ligante asfáltico antes de incorporar los áridos, y la vía seca (*dry process*), donde reemplaza parcialmente los áridos. Para el prototipo propuesto, la vía húmeda es la más adecuada dado que maximiza las propiedades fonoabsorbentes y elásticas de la mezcla final, verificables mediante el ensayo de nivel de ruido por rodadura conforme a ISO 11819-1.

En materia de granulometría, la norma ASTM D5644 establece el método de ensayo para determinar la distribución de tamaño de partícula del caucho molido proveniente de neumáticos, verificando que el GCR destinado a uso asfáltico cumpla con la granulometría requerida: malla predominante de 0,6 a 0,8 mm (malla N°30 a N°20) para capas de rodadura, conforme a los lineamientos de la FHWA (2018) y la Rubber Pavements Association (2020). La pureza del GCR, ausencia de contaminantes de acero y fibra textil, se controla mediante ASTM D297, condición indispensable para garantizar la homogeneidad de la mezcla y la trabajabilidad en planta.

El comportamiento del ligante asfáltico modificado con caucho se verifica mediante tres ensayos complementarios: la viscosidad rotacional (AASHTO T316 / ASTM D4402), que controla la trabajabilidad y bombeabilidad de la mezcla en planta; el punto de ablandamiento (ASTM D36), que certifica la resistencia térmica y consistencia del ligante bajo las temperaturas superficiales extremas del corredor Copiapó -Tierra Amarilla; y la recuperación elástica (AASHTO T301 / ASTM D6074), que cuantifica el comportamiento elastomérico aportado por el caucho y es el parámetro que distingue funcionalmente al ligante modificado del convencional. Estas propiedades se enmarcan en las especificaciones AASHTO M320 y AASHTO MP19 para ligantes PG-plus en climas de alta amplitud térmica.

El desempeño estructural de la mezcla terminada se evalúa mediante dos ensayos: la resistencia al ahuellamiento mediante la Pista de Hamburgo (AASHTO T324 o EN 12697-22), que simula el paso repetido de carga sobre la superficie bajo condiciones de temperatura y humedad controladas; y el módulo resiliente (ASTM T307 o ASTM D7369), que determina la capacidad estructural de la mezcla y es el parámetro de entrada para el diseño de espesores de pavimento conforme al método AASHTO.

Marco normativo nacional

En Chile, el Manual de Carreteras Volumen 5 del MOP establece los requisitos para pavimentos flexibles. Si bien no contempla explícitamente las mezclas con GCR como estándar obligatorio, su incorporación es viable mediante la figura de especificación técnica especial, que permite al proyectista definir requisitos particulares para materiales no contemplados en las especificaciones generales. Esta figura es la que habilita la ejecución del prototipo piloto bajo el marco regulatorio vigente, sin necesidad de modificaciones legislativas previas.

En materia ambiental, la producción local de GCR está regulada por la Ley N°20.920 y el Decreto Supremo N°8, que exigen resolución sanitaria vigente, registro en el RETC/SINADER y autorización expresa para el manejo y valorización de NFU Categoría B. Resur cumple con estos requisitos, validando su rol como proveedor de GCR para el prototipo dentro del marco legal vigente.

La Tabla 16 sistematiza los ocho ensayos de control de calidad requeridos para verificar el cumplimiento de estas normas en cada etapa del proceso, desde la producción del GCR hasta la mezcla asfáltica terminada.

Tabla 16: *Ensayos de control de calidad para el GCR y la mezcla asfáltica modificada*

Ensayo	Norma Aplicable	Parámetro Controlado
Granulometría del GCR	ASTM D5644	Distribución de tamaño de partícula del caucho molido
Contenido de acero y fibra textil	ASTM D297	Pureza del GCR (ausencia de contaminantes)
Viscosidad del ligante modificado	AASHTO T316/ D4402 ASTM	Trabajabilidad y bombeabilidad de la mezcla en planta
Punto de ablandamiento	ASTM D36	Resistencia térmica y consistencia del ligante
Recuperación elástica	AASHTO T301/ASTM 6074	Comportamiento elastomérico aportado por el caucho
Resistencia a la deformación (Rueda de Carga)	AASHTO T324 o EN 12697-22	Resistencia al ahuellamiento (Pista de Hamburgo)
Módulo resiliente	ASTM t307 o ASTM D7369	Capacidad estructural de la mezcla
Nivel de ruido por rodadura	ISO 11819-1	Reducción de ruido superficial por el paso de neumáticos

Nota. *Elaboración propia a partir de FHWA (2018), AASHTO (2020) y MOP Chile (2022).*

La inclusión de estos ensayos en el protocolo del prototipo garantiza la calidad técnica de la obra piloto y genera la evidencia documentada necesaria para sustentar una futura especificación técnica estándar para mezclas asfálticas con GCR en la Región de Atacama.

5.1.4 Caracterización del emplazamiento

El área de estudio se sitúa en la precordillera de la Región de Atacama, sobre el corredor vial estratégico que conecta las comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. Esta localización no es circunstancial: es el epicentro de la actividad minera regional y el escenario donde convergen las tensiones entre desarrollo productivo, infraestructura pública y calidad de vida comunitaria. Sus características físicas, operativas y sociales condicionan de manera directa el diseño, los materiales y los estándares de desempeño requeridos para la infraestructura vial propuesta.

Condiciones climáticas y ambientales

El corredor se emplaza en una zona de clima desértico de altura (clasificación BWk según Köppen-Geiger), con temperaturas que oscilan entre -5°C en invierno y 35°C en verano (Dirección Meteorológica de Chile, Estación Copiapó, datos 2010–2022), generando ciclos térmicos de alta amplitud diaria de hasta 20°C que someten permanentemente a los pavimentos convencionales a procesos acelerados de fatiga y fisuración.

La irradiación solar intensa, con valores de radiación global horizontal superiores a $2.400 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$ (Atlas Solar de Chile, Ministerio de Energía, 2020), potencia la degradación de los ligantes asfálticos tradicionales, justificando el uso de mezclas modificadas con mayor resiliencia térmica. La aridez extrema, con precipitaciones inferiores a 25 mm anuales (DMC, 2022), incrementa la presencia de material particulado fino que afecta la visibilidad y la seguridad vial, especialmente en los tramos de oscuridad absoluta durante el turno nocturno.

Tipo de suelo y condiciones geotécnicas

Según la carta geológica de la Región de Atacama (SERNAGEOMIN, 2019), el suelo predominante en el corredor es de tipo granular con presencia de arcillas expansivas en sectores puntuales, sobre una base de roca volcánica fracturada característica de la precordillera atacameña. Esta composición ofrece capacidad portante moderada a alta en condiciones secas (CBR estimado de 20- 40%), pero presenta riesgo de asentamiento diferencial en zonas de relleno asociadas a antiguas labores mineras superficiales. Estas condiciones refuerzan la pertinencia de una capa asfáltica con mayor flexibilidad estructural, característica inherente al asfalto modificado con caucho (GCR).

Flujo vehicular y composición del tránsito

Según datos del Censo Vehicular del MOP (2022) para la Ruta C-35 y tramos adyacentes del corredor, el tránsito medio diario anual (TMDA) supera los 3.500 vehículos equivalentes, con una composición dominada por vehículos de carga pesada asociados a las operaciones de Candelaria, Caserones y Mantoverde. Este flujo intenso de tráfico pesado genera dos condiciones que justifican la intervención propuesta: primero, un entorno de alta peligrosidad para ciclistas y peatones que comparten el corredor sin infraestructura segregada, lo que hace de la ciclo vía una solución de seguridad vial de primera necesidad y no solo un equipamiento de confort; segundo, niveles de ruido ambiental elevados en los sectores habitados adyacentes, cuya mitigación mediante las propiedades fonoabsorbentes del asfalto caucho representa un beneficio directo y tangible para los residentes de Tierra Amarilla, cuantificable como externalidad positiva en el análisis CBS del modelo.

Sectores de oscuridad absoluta y seguridad vial

Un rasgo distintivo del corredor es la presencia de tramos de oscuridad absoluta durante el turno nocturno, condicionados por la ausencia de iluminación pública en sectores intermedios entre ambas comunas. Esta condición eleva significativamente el riesgo de accidentes para ciclistas y peatones que utilizan el corredor como vía de desplazamiento cotidiano.

La incorporación de demarcación fotoluminiscente activa en el diseño de la ciclovia piloto responde directamente a esta característica, transformando una vulnerabilidad del entorno en un criterio de diseño específico y replicable.

Levantamiento GIS del corredor

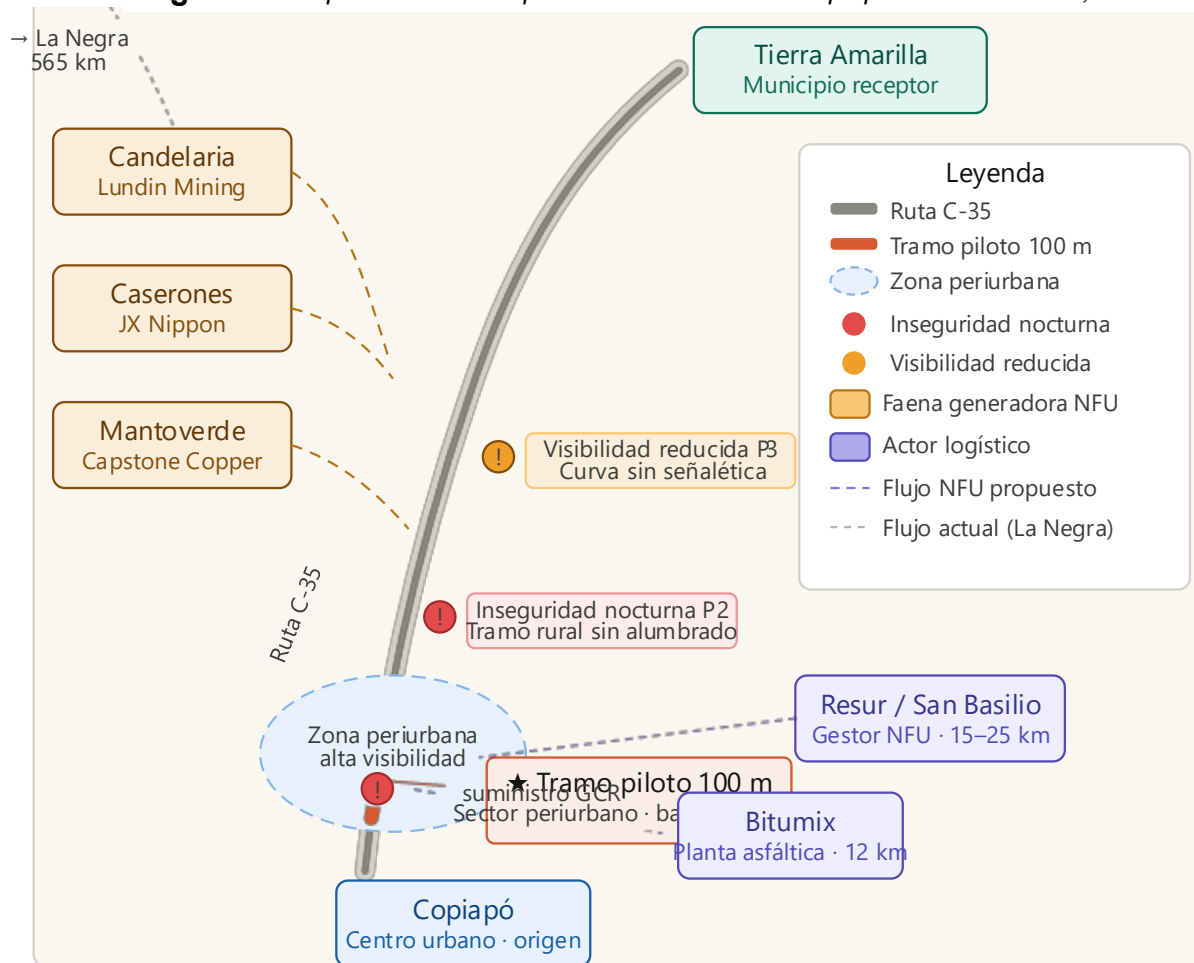
El levantamiento geoespacial del tramo Copiapó - Tierra Amarilla se presenta en el Anexo A del presente documento, donde se incluye la cartografía del corredor con identificación de los puntos críticos de inseguridad vial nocturna, el estado actual de la carpeta de rodado por tramos y la localización de los actores logísticos clave del nodo (gestores de NFU, plantas asfálticas y faenas generadoras). El análisis espacial se realizó con base en imágenes satelitales de alta resolución (Google Earth Pro, 2024) y datos vectoriales del IDE Chile (Infraestructura de Datos Espaciales, Ministerio de Bienes Nacionales, 2023). Los resultados del levantamiento GIS alimentan directamente el diseño del prototipo de ciclovia en la Fase 3, particularmente en la selección del tramo piloto de 100 metros con mayor impacto en seguridad vial nocturna.

Dimensión social y territorial

El corredor Copiapó -Tierra Amarilla no es solo una vía de tránsito: es el eje de cohesión territorial entre una ciudad capital regional y una comuna cuya identidad histórica está profundamente ligada a la actividad minera. Tierra Amarilla ha soportado históricamente las externalidades ambientales de esa actividad sin recibir una proporción equivalente de sus beneficios en forma de infraestructura pública de calidad. En este contexto, la ciclovia piloto adquiere una dimensión que trasciende lo técnico: es una intervención de valor simbólico y comunitario que transforma el residuo de la industria que define al territorio en infraestructura para quienes lo habitan.

La Figura 2, presenta el levantamiento geoespacial esquemático del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, donde se identifican los puntos críticos de inseguridad vial nocturna, la localización de las faenas generadoras de NFU y los actores logísticos del nodo. El tramo piloto de 100 metros se ubica en el sector periurbano de Copiapó, adyacente a la zona de mayor visibilidad comunitaria y a 12 kilómetros de la planta Bitumix, condición que optimiza la logística de suministro de la mezcla asfáltica modificada y maximiza el impacto social del prototipo al situarlo en un entorno de uso cotidiano para los residentes del corredor.

Figura 2 : Representación esquemática del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, Ruta C-3



Nota. Elaboración propia a partir de Google Earth Pro (2024) e IDE Chile (2023). La figura representa esquemáticamente el corredor Copiapó–Tierra Amarilla y la localización referencial del tramo piloto de 100 m, identificando las principales faenas generadoras de NFU, los actores asociados a su gestión y transformación, y los flujos logísticos propuestos. Asimismo, se señalan condiciones territoriales relevantes para la intervención, como sectores de inseguridad nocturna, visibilidad reducida y zonas periurbanas de alta visibilidad.

5.2 Fase 2: Brechmarking y Marco Normativo Comparado

5.2.1 Vigilancia tecnológica internacional

La revisión internacional demuestra que el campo del asfalto caucho, ya se encuentra tecnológicamente maduro, con una producción científica sostenida y casos de aplicación en múltiples contextos climáticos y urbanos. Para efectos de este estudio, el benchmarking se organiza en torno a tres tecnologías de incorporación del caucho en pavimentos y dos líneas de innovación complementarias: los pavimentos de seguridad y la infraestructura fotoluminiscente.

Tecnologías de incorporación del caucho en pavimentos

La ruta técnica documentada por la FHWA, Caltrans y la revisión estadística internacional de Bressi et al. organiza el uso del caucho reciclado en pavimentos en tres clasificaciones principales:

Vía húmeda

Corresponde a la mezcla del caucho con el ligante asfáltico antes de fabricar la mezcla asfáltica. La FHWA la define como el método donde el caucho molido se incorpora al ligante antes de su contacto con el árido; en la variante asphalt rubber el caucho representa al menos un 15% del peso total del ligante. Caltrans indica que este proceso requiere temperaturas de al menos 177°C, normalmente con agitación para mantener la homogeneidad de la dispersión. Es el método que maximiza las propiedades reológicas del ligante y el desempeño fonoabsorbente de la mezcla final.

Vía seca

Incorpora el caucho directamente en el árido antes del ligante. La FHWA define este proceso para mezclas asfálticas en caliente, indicando que el caucho puede tener granulometría inferior a 0,6 mm y que la sustitución típica se sitúa entre el 1% y el 3% del peso del agregado. Es el método de menor complejidad operativa y más compatible con las capacidades instaladas de los gestores locales de Copiapó.

Terminal blend

Corresponde a mezclas preparadas industrialmente en terminales, con menor complejidad operativa en obra. Permite mayor consistencia en la dosificación, pero requiere infraestructura de mezclado especializada.

5.2.1.1 Casos internacionales de referencia

Estados Unidos — Arizona y California

Estados Unidos cuenta con la experiencia más amplia y documentada en el uso de asfalto con caucho, registrando en 2018 el consumo de 20.117 toneladas de caucho molido en pavimentos, de las cuales California concentró 13.412 toneladas y Arizona 4.303 toneladas. El caso de Arizona es especialmente relevante para este estudio debido a su similitud climática con el norte de Chile; con más de 20 años de aplicación en calles y autopistas, el Departamento de Transportes de Arizona (ADOT) ha reportado que este material no solo ofrece una superficie de rodado más suave y una mayor durabilidad estructural, sino también una reducción promedio de 4 dB en el ruido de rodadura.

Australia — New South Wales

Tyre Stewardship Australia identifica aplicaciones de caucho en asfalto y tratamientos superficiales tanto por vía húmeda como por vía seca, incluyendo ciclovías y soluciones urbanas. El proyecto SSROC en New South Wales incluyó pavimentos con y sin caucho en 11 municipios. Su evaluación de ciclo de vida es particularmente significativa: el pavimento con caucho mejora el desempeño entre un 10% y un 40%, y la reducción de huella de carbono en un horizonte de 40 años puede ir del 5,6% al 18,9% en Burwood, del 11% al 27,3% en North Beaches y del 9,9% al 23,6% en Sydney. Estos rangos constituyen un argumento cuantificado de sostenibilidad directamente transferible al caso de Atacama.

Europa — Pavimentos de seguridad para ciclistas y peatones

En Europa, la línea de innovación en pavimentos amortiguantes con caucho reciclado ha mostrado resultados relevantes para justificar aplicaciones en ciclovías urbanas orientadas a la seguridad. Estudios realizados en Suecia e Italia con casos simulados de accidentes demostraron que, al aumentar el contenido de caucho en el pavimento, se reducen significativamente los indicadores de lesión craneal: el riesgo de fractura de cráneo en el caso peatonal bajó de 1,00 a 0,63, y el riesgo de conmoción de 0,64 a 0,07. Si bien no se trata de un pavimento estructural convencional, estos resultados son altamente relevantes para justificar aplicaciones en ciclovías urbanas donde la seguridad del usuario es el criterio dominante.

Paralelamente, Europa ha desarrollado una segunda línea de innovación orientada a la seguridad urbana: los impact-absorbing pavements para ciclistas y peatones, y los pavimentos fotoluminiscentes para demarcación y señalética especializada.

Países Bajos — Van Gogh Path

El proyecto Van Gogh Path, desarrollado por Studio Roosegaarde junto a Heijmans y gobiernos locales, no utiliza NFU como componente principal del pavimento, pero constituye el benchmark más emblemático de infraestructura fotoluminiscente aplicada a ciclovías. Su concepto —piedras que se cargan de energía solar durante el día y emiten luz durante la noche— establece un precedente de diseño que combina identidad territorial, funcionalidad nocturna y sostenibilidad energética, referentes directamente aplicables al corredor Copiapó–Tierra Amarilla.

Escocia — Starpath

El ensayo escocés de Starpath, desarrollado por Pro-Teq Surfacing, evaluó un tratamiento superficial fotoluminiscente que afirmaba una autonomía lumínica de 13 a 15 horas y una vida de diseño de 15 años. Sin embargo, el material fue finalmente descartado por sus costos elevados, problemas de provisión y falta de evidencia técnica suficiente del proveedor. Esta experiencia demuestra que la tecnología fotoluminiscente tiene potencial real, pero conlleva riesgos asociados a la adopción tecnológica que deben gestionarse mediante pilotos controlados y monitoreo sistemático, en lugar de su implementación directa a gran escala.

Con el propósito de identificar experiencias internacionales aplicables al contexto del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, se realizó un benchmarking de casos representativos relacionados con la incorporación de neumáticos fuera de uso (NFU) en pavimentos asfálticos e infraestructura ciclovial. El análisis considera soluciones implementadas en distintos países, evaluando las tecnologías utilizadas, sus principales aplicaciones y los resultados obtenidos en términos de desempeño técnico, seguridad y sostenibilidad. La Tabla 17 resume los casos de referencia que sustentan la selección de la alternativa propuesta en esta investigación.

Tabla 17 Benchmarking internacional del uso de NFU en pavimentos e infraestructura ciclovial

País / Región	Tecnología	Caso destacado	Resultado principal
EE.UU. (California / Arizona)	Vía húmeda (asphalt rubber)	ADOT – autopistas y calles urbanas (>20 años)	Reducción promedio de 4 dB en ruido de rodadura; superficie más suave y mayor durabilidad
Australia	Vía húmeda y vía seca	SSROC – 11 municipios de New South Wales	Reducción huella de carbono a 40 años: 5,6%–18,9% (Burwood); mejora ciclo de vida 10%–40%
Europa (Suecia / Italia)	Pavimentos amortiguantes con caucho	Estudio de impacto en seguridad peatonal y ciclista	Riesgo fractura craneal peatonal: de 1,00 a 0,63; riesgo conmoción: de 0,64 a 0,07
Países Bajos	Infraestructura fotoluminiscente	Van Gogh Path – Studio Roosegaarde	Benchmark emblemático de ciclovía fotoluminiscente; piedras cargadas de día que brillan de noche
Escocia	Tratamiento superficial fotoluminiscente	Starpath – Pro-Teq Surfacing	Autonomía lumínica 13–15 hrs; vida diseño 15 años; descartado por costos y falta de evidencia del

Nota. Elaboración propia a partir de FHWA (2018), Rubber Pavements Association (2020), Tyre Stewardship Australia (2021), European Commission (2019), Studio Roosegaarde (2014) y Pro-Teq Surfacing (2014).

Los antecedentes revisados evidencian que existen soluciones tecnológicas y modelos de valorización de NFU con distintos niveles de desarrollo y aplicación. En este contexto, las características operacionales del corredor Copiapó–Tierra Amarilla y las condiciones ambientales de la Región de Atacama constituyen un entorno favorable para analizar la factibilidad de implementar un piloto adaptado a la realidad territorial y a los requerimientos del modelo de gestión propuesto.

5.2.1.2 Estado del arte en Chile

Los antecedentes revisados muestran que Chile ha avanzado significativamente en la valorización de neumáticos fuera de uso y en el desarrollo de tecnologías asociadas al reciclaje de caucho. Sin embargo, aún persiste una brecha en la aplicación de estos materiales en infraestructura urbana con enfoque territorial y economía circular. En este contexto, la presente investigación desarrolla un modelo de gestión orientado a evaluar la factibilidad técnica de incorporar caucho reciclado en un tramo piloto de ciclovía para el corredor Copiapó–Tierra Amarilla.

5.2.2 Matriz de homologación normativa

El uso de granulado de caucho proveniente de NFU en pavimentos asfálticos presenta un desarrollo normativo desigual entre Estados Unidos, Europa y Chile. En términos comparativos, los marcos más avanzados no regulan el caucho como material autónomo, sino que lo incorporan mediante especificaciones de desempeño del ligante y de la mezcla, complementadas con exigencias de control de calidad, trazabilidad del material reciclado y verificación reológica.

Referentes normativos en Estados Unidos: ASTM, AASHTO y FHWA

En el contexto estadounidense, el marco normativo es el más consolidado a nivel global. ASTM International lidera con la norma ASTM D6114/D6114M-19(2023), que constituye la referencia directa para ligantes asfalto-caucho. A esta se suman métodos de ensayo críticos: la ASTM D7741/D7741M-23 para medir la viscosidad aparente y la ASTM D6373 para la clasificación por desempeño del ligante. AASHTO emplea un sistema de especificación por desempeño que integra modificadores como el caucho siempre que el ligante resultante cumpla los requisitos exigidos, destacando las referencias M320 y M332 para clasificación PG mediante MSCR, R29 para verificación del grado PG, y T315/T316 para caracterización reológica.

La FHWA reconoce el uso del crumb rubber modifier (CRM) como aplicación técnica válida. Sus lineamientos específicos para el proceso húmedo indican proporciones de caucho de entre 18% y 25% en el ligante previo al mezclado con el árido. Esto confirma que en EE.UU. la validación técnica del material reciclado se fundamenta en una tríada: especificación del ligante, control del proceso y verificación del desempeño del pavimento.

Referentes normativos europeos: normas EN y enfoque de conformidad

En Europa, el enfoque regulatorio presenta matices distintos al estadounidense. No existe una norma armonizada dedicada exclusivamente al asfalto con caucho; sin embargo, se dispone de un entramado normativo robusto para mezclas bituminosas, ligantes modificados y materiales recuperados. La familia EN 13108 regula las especificaciones de mezclas asfálticas, y dentro de esta la EN 13108-8 define los requisitos para el asfalto recuperado como material constituyente. Para ligantes modificados, la referencia central es la EN 14023, que establece el marco de especificación para betunes modificados con polímeros (BMP) evaluando consistencia, cohesión, durabilidad y recuperación elástica. La caracterización de mezclas se apoya en la serie EN 12697, con métodos críticos como la EN 12697-24 (resistencia a la fatiga) y la EN 12697-18 (drenaje del ligante).

La experiencia europea reciente demuestra que el caucho reciclado suele integrarse mediante guías técnicas nacionales o sectoriales. Un ejemplo destacado es la guía de SIGNUS, que vincula las mezclas con caucho a los ensayos de la familia EN 12697 añadiendo requisitos de producción y puesta en obra. Este modelo sugiere una hoja de ruta regulatoria gradual: iniciar con guías técnicas y especificaciones complementarias para avanzar posteriormente hacia una incorporación formal en el cuerpo normativo general.

Situación normativa en Chile y brechas de homologación

En Chile, el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (MOP) constituye la principal referencia técnica para el diseño y construcción de pavimentos. La actualización vigente desde enero de 2026 incorpora especificaciones para mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho mediante tecnología semi húmeda, además de nuevos criterios de clasificación de ligantes basados en la metodología Superpave. Estos avances reflejan una evolución del marco normativo nacional hacia la incorporación de tecnologías de valorización de neumáticos fuera de uso (NFU), alineándose progresivamente con las tendencias internacionales.

Con el propósito de identificar el grado de desarrollo alcanzado por la normativa nacional, se realizó una comparación entre los principales estándares aplicados en Estados Unidos, Europa y Chile. El análisis considera la especificación del ligante, los métodos de incorporación del caucho, los ensayos de caracterización reológica y los mecanismos de trazabilidad del material reciclado. La Tabla 18 resume los principales elementos comparativos y permite identificar las brechas que aún limitan la incorporación sistemática del caucho granulado reciclado (GCR) en infraestructura vial nacional.

Tabla 18: Matriz de homologación normativa EEUU, Europa y Chile

Aspecto	EE.UU. (ASTM/AASHTO/FHWA)	Europa (EN)	Chile (MOP)
Especificación del ligante con caucho	ASTM D6114 (asphalt-rubber); AASHTO M320/M332 (PG)	EN 14023 (BMP por desempeño)	Manual de Carreteras Vol. 5 – nueva especificación semi húmeda (desde enero 2026)
Método de incorporación del caucho	Vía húmeda: 18%–25% CRM en ligante (FHWA)	Guías nacionales / sectoriales (ej. SIGNUS)	Vía semi húmeda reconocida; vía seca no estandarizada aún
Ensayos de caracterización reológica	ASTM D7741 (viscosidad); AASHTO T315/T316 (DSR)	EN 12697-24 (fatiga); EN 12697-18 (drenaje ligante)	Referencia Superpave incorporada; ensayos de fatiga en desarrollo
Trazabilidad del material reciclado	CRM certificado; control de proceso documentado	EN 13108-8 (asfalto recuperado como constituyente)	Sin flujo certificado de trazabilidad del caucho minero
Brecha crítica para Chile	—	—	Falta: estándar de aceptación de ligante asfalto-caucho; ensayos de fatiga; trazabilidad del GCR

Nota. Elaboración propia a partir de ASTM (2023), AASHTO (2020), European Commission (2019) y MOP Chile (2026).

La comparación evidencia que Estados Unidos y Europa disponen de marcos normativos consolidados para regular las propiedades del ligante modificado, los procedimientos de control de calidad y la evaluación del desempeño de mezclas con caucho reciclado. En contraste, aunque Chile ha incorporado recientemente especificaciones para mezclas asfálticas modificadas mediante tecnología semi húmeda, persisten brechas relacionadas con la estandarización de la vía seca, la validación de ensayos de fatiga y deformación bajo condiciones climáticas nacionales y la implementación de sistemas de trazabilidad para el caucho reciclado proveniente de neumáticos de la gran minería. La superación de estas brechas permitirá fortalecer el marco técnico nacional y facilitar la incorporación del GCR como un material confiable y verificable para aplicaciones de infraestructura pública.

Propuesta de arquitectura normativa para Chile

La revisión normativa internacional identifica dos enfoques complementarios que pueden orientar el desarrollo de futuras especificaciones nacionales. Por una parte, los estándares estadounidenses destacan por el rigor en la caracterización y control de ligantes modificados; por otra, la normativa europea privilegia la evaluación del desempeño y la conformidad funcional de los materiales. En este contexto, más que replicar normas extranjeras, el desafío para Chile consiste en desarrollar un marco técnico propio que integre las mejores prácticas internacionales y responda a las condiciones operacionales, climáticas y regulatorias del país.

En este escenario, el prototipo piloto propuesto para el corredor Copiapó–Tierra Amarilla constituye una oportunidad para generar evidencia técnica que contribuya a la futura actualización de las especificaciones nacionales para mezclas asfálticas con caucho reciclado. Asimismo, los antecedentes obtenidos del benchmarking internacional, el estado del arte nacional y la matriz de homologación normativa conforman el marco técnico sobre el cual se desarrollan los criterios de dosificación, implementación y control definidos en la Fase 3 de la investigación, articulando la cadena de valor regional identificada en la Fase 1 con las mejores prácticas internacionales analizadas.

5.3 Fase 3 Diseño del prototipo

5.3.1 Especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica modificada con GCR

Con base en los resultados obtenidos durante la Fase 2, benchmarking tecnológico, revisión normativa y análisis de factibilidad regional, se definieron las especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica modificada con caucho granulado reciclado (GCR) para el tramo piloto del corredor Copiapó - Tierra Amarilla. Esta etapa establece el método de incorporación del caucho, los criterios de diseño de la mezcla y los parámetros técnicos de referencia que sustentan el desarrollo conceptual del prototipo.

Selección del método de incorporación

Conforme al análisis tecnológico de la Fase 2 y los lineamientos de la Federal Highway Administration (FHWA, 2018), se selecciona la vía húmeda en planta como método de incorporación del GCR en la mezcla asfáltica para el tramo piloto. Esta decisión se sustenta en tres criterios convergentes: desempeño técnico, factibilidad operacional y coherencia normativa.

En primer lugar, la vía húmeda permite incorporar el GCR directamente al ligante asfáltico antes del contacto con los agregados, lo que posibilita el control de las propiedades reológicas del material resultante —viscosidad, punto de ablandamiento y recuperación elástica— mediante ensayos de laboratorio previos a la producción. Este procedimiento reduce la variabilidad del ligante modificado y mejora la confiabilidad del desempeño estructural del pavimento, aspecto especialmente relevante bajo las condiciones de alta amplitud térmica del corredor Copiapó–Tierra Amarilla.

En segundo lugar, la planta asfáltica Bitumix, ubicada en Cuesta Cardones (Ruta 5 Norte, km 799), dispone de equipamiento compatible con el proceso de vía húmeda, lo que permite ejecutar el prototipo sin inversión adicional en infraestructura. Su proximidad al tramo piloto ,12 km, garantiza además que la mezcla llegue a obra dentro del rango de temperatura requerido para una compactación adecuada.

En tercer lugar, la actualización del Manual de Carreteras MOP (enero 2026) incorpora especificaciones para mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho por vía semi húmeda, abriendo un espacio normativo concreto para tecnologías con caucho reciclado. Si bien la vía húmeda y la vía semi húmeda presentan diferencias operacionales, ambas comparten el mismo principio de control del ligante modificado, lo que facilita la habilitación del prototipo mediante la figura de especificación técnica especial sin necesidad de modificaciones al marco regulatorio vigente.

Parámetros de diseño de la mezcla

El diseño de la mezcla asfáltica modificada con GCR se desarrolló utilizando como referencia la metodología Superpave, adoptada por el Manual de Carreteras del MOP (2026) para la clasificación de ligantes por desempeño. Los parámetros definidos corresponden a un diseño conceptual, sustentado en antecedentes técnicos, normas internacionales y experiencias previamente documentadas, constituyendo la base para el desarrollo del prototipo.

Es importante señalar que esta investigación no tiene por objetivo desarrollar un nuevo diseño de mezcla a nivel de laboratorio, sino proponer un modelo de gestión para la valorización de NFU aplicado a infraestructura urbana. En consecuencia, los valores presentados corresponden a parámetros de referencia técnicamente fundamentados, mientras que su validación experimental mediante ensayos de laboratorio y pruebas de desempeño forma parte de una etapa posterior del proceso de implementación, destinada a verificar el comportamiento de la mezcla antes de una eventual aplicación a escala real.

La Tabla 19 presenta los principales parámetros de diseño considerados, junto con sus valores de referencia, las normas técnicas aplicables y los criterios de control propuestos para la mezcla asfáltica modificada con GCR.

Tabla 19: *Parámetros de diseño de la mezcla asfáltica modificada con GCR- Tramo piloto 100m*

Parámetro de diseño	Valor o rango de referencia	Norma aplicable	Observación de control
Contenido de GCR sobre ligante (%)	18%–22% (vía húmeda) 5%–10% (terminal blend)	FHWA (2018); Rubber Pavements Association (2020)	Verificar trabajabilidad a cada nivel
Granulometría del GCR (mm)	< 0,8 mm (malla N°30–N°20)	ASTM D5644	Control en planta antes de mezcla
Temperatura de mezcla (°C)	170–190°C	FHWA (2018); MOP (2026)	Ajustar según equipo de planta local
Temperatura de compactación (°C)	155–175°C	FHWA (2018)	Verificar antes de aplicación en obra
Tiempo de digestión caucho–ligante (min)	45–60 min a 190°C	FHWA (2018)	Control en planta con cronómetro calibrado
Contenido óptimo de ligante modificado (%)	6,5%–8,0% del peso total	Diseño Marshall / Superpave	Determinado por diseño de mezcla específico

Parámetro de diseño	Valor o rango de referencia	Norma aplicable	Observación de control
Vacíos de aire en mezcla compactada (%)	3%–5%	ASTM D3203 / MOP (2026)	Control en probetas de laboratorio
Estabilidad Marshall (kN)	≥ 8,0 kN	ASTM D6927	Ensayo en laboratorio previo a producción

Nota. Elaboración propia a partir de FHWA (2018), Rubber Pavements Association (2020), MOP (2026) y normas ASTM/AASHTO referenciadas.

Dosificación de GCR por escenario

La dosificación de GCR en vía húmeda se expresa como porcentaje del peso del ligante asfáltico. Para el tramo piloto se definen tres escenarios dentro del rango documentado por la FHWA (2018), que permiten ajustar la formulación según los resultados de los ensayos de producción en planta.

El escenario conservador, con un 18% de GCR sobre el ligante, corresponde al límite inferior del rango para asphalt rubber en vía húmeda. Minimiza el incremento de viscosidad y facilita la trabajabilidad en planta, con mejoras moderadas en recuperación elástica y resistencia al ahuellamiento. Es la dosificación de respaldo si los ensayos de viscosidad rotacional indican que una mayor concentración supera el rango de trabajabilidad del equipo disponible en Bitumix.

El escenario base, con un 20% de GCR sobre el ligante, corresponde al valor central del rango FHWA y al referente más documentado en la literatura internacional para aplicaciones en climas áridos cálidos comparables al corredor de Atacama, particularmente en las experiencias del Arizona Department of Transportation (ADOT). Ofrece el mejor balance entre mejora reológica del ligante y trabajabilidad en planta, y es el punto de partida recomendado para la producción del prototipo.

El escenario alto, con un 22% de GCR sobre el ligante, corresponde al límite superior del rango FHWA para vía húmeda. Maximiza la recuperación elástica y la resistencia al ahuellamiento, pero incrementa la temperatura de mezcla entre 5 y 10°C adicionales y puede comprometer la compactación si el equipo de planta no dispone de capacidad de calentamiento suficiente. Su adopción requiere verificación previa de constructibilidad mediante ensayos en Bitumix antes de la producción definitiva.

La selección del escenario de dosificación se confirma durante la producción de la mezcla piloto, sobre la base de los resultados de viscosidad rotacional (AASHTO T316) y de las probetas Marshall. El escenario base del 20% es el punto de partida, con la posibilidad de ajustar hacia el escenario conservador o el alto según el comportamiento real del ligante modificado en planta.

Protocolo de ensayos de control de calidad del GCR y la mezcla

Con el propósito de garantizar la calidad del material reciclado y el desempeño esperado de la mezcla asfáltica modificada, se propone un plan de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) estructurado en dos niveles complementarios.

El primero corresponde al control del caucho granulado reciclado (GCR) producido por el gestor autorizado, verificando el cumplimiento de los requisitos de granulometría, pureza y propiedades físicas antes de su incorporación al ligante asfáltico. El segundo nivel considera el control de la mezcla asfáltica producida en planta, mediante ensayos destinados a verificar las propiedades del ligante modificado y el comportamiento mecánico de la mezcla terminada. La selección de los ensayos se fundamenta en los estándares ASTM, AASHTO, ISO y en los lineamientos del Manual de Carreteras del MOP, permitiendo evaluar tanto la calidad del insumo como el desempeño esperado del pavimento. La Tabla 20 resume el plan de aseguramiento y control de calidad propuesto para el prototipo.

Tabla 20: Plan de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) para el GCR y la mezcla asfáltica modificada

Ensayo	Norma aplicable	Parámetro controlado y umbral	Momento de ejecución
Granulometría del GCR	ASTM D5644	Distribución de tamaño de partícula; malla N°30–N°20 predominante	Cada lote producido por el gestor
Contenido de acero y fibra textil	ASTM D297	Pureza del GCR; acero < 0,1%; textil < 0,5%	Cada lote; certificado del gestor
Densidad aparente del GCR	ASTM D1895	Densidad para cálculo de dosificación en mezcla	Primer lote y cambios de fuente
Viscosidad rotacional del ligante modificado	AASHTO T316	Trabajabilidad; verificación de temperatura de mezclado	Cada producción en planta
Punto de ablandamiento del ligante	ASTM D36 / AASHTO T53	Resistencia térmica del ligante; mínimo 55°C	Cada producción en planta
Recuperación elástica del ligante	AASHTO T301 (MSCR)	Comportamiento elastomérico; recuperación ≥ 40%	Primer ensayo y control periódico
Resistencia a la deformación permanente	ASTM E2373 (Wheel Tracking)	Ahuellamiento; deformación ≤ 6 mm a 60°C	Probetas de laboratorio previas a obra
Resistencia a la fatiga	AASHTO T321	Ciclos hasta falla; ≥ 10 ⁵ ciclos	Probetas de laboratorio previas a obra
Resistencia al deslizamiento (BPN)	ASTM E303	Adherencia superficial; BPN ≥ 60 en rectas	Medición en obra post-aplicación
Nivel de ruido por rodadura	ISO 11819-1	Reducción acústica respecto de convencional	Medición en obra a 30 días de apertura

Nota. Elaboración propia a partir de ASTM (2023), AASHTO (2020), ISO 11819-1 y MOP (2026).

Como parte de la etapa de implementación del prototipo, se propone que los ensayos de laboratorio previos a la construcción, incluyendo estabilidad Marshall, resistencia al ahuellamiento (*Wheel Tracking*) y resistencia a la fatiga, sean ejecutados por un laboratorio acreditado bajo la norma NCh-ISO/IEC 17025, garantizando la competencia técnica e independencia del proceso de evaluación. Los resultados obtenidos constituirán la base técnica para verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño y respaldar la eventual autorización del proyecto piloto por parte de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

5.3.2 Especificaciones de la demarcación fotoluminiscente

Sistema de dos capas y justificación de la arquitectura

El prototipo considera una arquitectura de dos capas funcionalmente diferenciadas, compuesta por una base estructural de mezcla asfáltica modificada con caucho granulado reciclado (GCR) y una capa superficial fotoluminiscente aplicada una vez que el pavimento alcanza temperatura ambiente (inferior a 30 °C). Esta configuración se selecciona como la alternativa técnicamente más adecuada, ya que permite optimizar el desempeño de cada material de acuerdo con su función específica.

La base asfáltica modificada con GCR aporta capacidad estructural, recuperación elástica y mayor resistencia al ahuellamiento, mientras que la capa superficial fotoluminiscente está orientada a mejorar la visibilidad nocturna mediante la emisión gradual de luz. La separación de ambas funciones evita compromisos de diseño que podrían afectar simultáneamente el comportamiento mecánico del pavimento y el desempeño lumínico del sistema.

Desde el punto de vista de la gestión del ciclo de vida, esta arquitectura también favorece la mantenibilidad del prototipo. Dado que la vida útil esperada de la capa fotoluminiscente (5–10 años) es inferior a la de la estructura asfáltica (12–20 años), su eventual reposición puede realizarse sin intervenir la base del pavimento, reduciendo costos de mantenimiento y tiempos de intervención.

Asimismo, la evidencia internacional indica que los recubrimientos fotoluminiscentes superficiales alcanzan niveles de luminancia superiores a los obtenidos mediante la incorporación directa de pigmentos en mezclas bituminosas (Van Tiggelen et al., 2019). En consecuencia, esta configuración reduce el riesgo tecnológico asociado al prototipo y concentra los desafíos técnicos en la durabilidad del recubrimiento y su compatibilidad con la base asfáltica.

Material activo y fundamento técnico

El material seleccionado para la capa fotoluminiscente es el aluminato de estroncio activado con europio y disprosio ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Dy}$), reconocido como el compuesto de mayor eficiencia fotoluminiscente para aplicaciones en pavimentos (Van Tiggelen et al., 2019; Pro-Teq Surfacing, 2014). Su funcionamiento se basa en la absorción de energía solar durante el día y su posterior emisión gradual en forma de luz visible durante la noche.

Las condiciones climáticas de la Región de Atacama favorecen especialmente esta tecnología. Con niveles de radiación global horizontal superiores a 2.500 kWh/m²·año y más de 4.000 horas de sol anuales, el material dispone de condiciones suficientes para alcanzar diariamente su nivel óptimo de carga sin requerir iluminación artificial complementaria. En este contexto, el principal desafío técnico del sistema no radica en la activación del pigmento, sino en asegurar la durabilidad del recubrimiento frente al desgaste mecánico y su adecuada adherencia a la superficie asfáltica.

Especificaciones técnicas de la capa fotoluminiscente

Las especificaciones consideradas para la capa fotoluminiscente corresponden a valores de referencia obtenidos de la literatura especializada y de experiencias internacionales previamente documentadas. Estos parámetros constituyen la base conceptual para el diseño del prototipo y deberán ser verificados durante la etapa de implementación mediante los ensayos de laboratorio y controles de calidad correspondientes. La Tabla 21 presenta los principales parámetros de diseño, los valores de referencia, las normas aplicables y los criterios de control considerados para la capa fotoluminiscente propuesta.

Tabla 21: Especificación técnicas de la demarcación fotoluminiscente - Tramo piloto 100m

Parámetro	Valor de referencia	Fuente / norma	Control de calidad
Material activo	Aluminato de estroncio (SrAl ₂ O ₄ :Eu,Dy)	Compuesto fotoluminiscente de referencia para pavimentos (Van Tiggelen et al., 2019)	Verificar certificado de composición del proveedor
Luminancia inicial L ₀ (tras carga solar)	≥ 100 mcd/m ²	UNE-23035-1; literatura de referencia (rango reportado: 63–9.600 mcd/m ²)	Medición en laboratorio con luxómetro calibrado
Luminancia a t = 10 min	≥ 60 mcd/m ²	UNE-23035-1 (umbral de norma de seguridad)	Medición en secuencia de atenuación
Luminancia a t = 60 min	≥ 7,8 mcd/m ²	UNE-23035-1	Medición en secuencia de atenuación
Tiempo hasta umbral mínimo operativo (0,3 mcd/m ²)	≥ 900 min (15 hrs)	UNE-23035-1; compatibilidad con turno nocturno minero	Curva de decaimiento L(t) = L ₀ ·e ^{Λ(-kt)}
Espesor de aplicación (pintura/recubrimiento)	1,5–3,0 mm	Referencia de aplicaciones comparadas en Europa	Control con galga de espesores post-aplicación
Contenido de aluminato en formulación (%)	15%–30% en masa	Rango reportado en literatura para formulaciones óptimas	Certificado del proveedor de pintura
Resistencia a la abrasión	Pérdida ≤ 5% en 1.000 ciclos	ASTM D4060 (Taber Abraser)	Ensayo en probetas antes de aplicación en obra
Compatibilidad con base asfáltica	Sin segregación ni ampollamiento a 7 días	Protocolo de compatibilidad in situ	Prueba de adherencia en tramo de prueba de 5 m

Nota. Elaboración propia a partir de UNE-23035-1, Van Tiggelen et al. (2019), ASTM D4060 y Pro-Teq Surfacing (2014).

Modelo de decaimiento lumínico y criterio de desempeño nocturno

El comportamiento de la capa fotoluminiscente se representa mediante un modelo de decaimiento exponencial de la luminancia, expresado por la ecuación: $L(t) = L_0 \cdot e^{(-kt)}$

donde L_0 corresponde a la luminancia inicial después de la carga solar completa, k representa la constante de decaimiento característica del material y t el tiempo transcurrido desde el término de la excitación solar. Este modelo constituye la base teórica para evaluar el desempeño lumínico del prototipo y permitirá, durante la etapa de implementación, estimar la evolución de la luminancia a partir de mediciones experimentales y del ajuste de la curva mediante regresión no lineal por mínimos cuadrados.

Para el diseño conceptual del prototipo se establece como criterio de desempeño que la demarcación fotoluminiscente mantenga una luminancia igual o superior a 7,8 mcd/m² durante las primeras 4 a 6 horas de oscuridad, período que coincide con la mayor intensidad de uso nocturno del corredor asociada a los cambios de turno de las operaciones mineras. Este criterio de diseño busca asegurar condiciones adecuadas de visibilidad durante la ventana de mayor riesgo vial y constituye el parámetro de referencia para la evaluación del sistema durante la etapa de validación.

Asimismo, se propone verificar la compatibilidad entre la capa fotoluminiscente y la base asfáltica modificada con GCR mediante un tramo de prueba previo a la aplicación del prototipo. Esta validación considera la evaluación de la adherencia superficial y la inspección de posibles defectos, como ampollamiento, segregación o pérdida de adherencia, en diferentes intervalos de tiempo posteriores a la aplicación. En caso de detectarse incompatibilidades, la formulación del recubrimiento o el sistema de imprimación deberán ajustarse antes de su aplicación a escala piloto, con el fin de asegurar la durabilidad y el correcto desempeño del sistema.

5.3.3 Protocolo de implementación del tramo piloto

La implementación del tramo piloto de 100 metros se estructura mediante un protocolo secuencial que organiza las actividades críticas del proyecto, desde la recepción y verificación del caucho granulado reciclado (GCR) hasta el cierre de la trazabilidad del material y el reporte de cumplimiento de la Ley REP. Este protocolo tiene como finalidad asegurar la coordinación entre los distintos actores involucrados, establecer puntos de control durante la ejecución y minimizar los riesgos técnicos, operacionales y administrativos asociados al desarrollo del prototipo.

La secuencia de implementación se basa en un enfoque Stage-Gate, ampliamente utilizado en la gestión de proyectos, en el que cada etapa incorpora un responsable claramente definido, las actividades principales y un criterio de aceptación que debe cumplirse antes de autorizar el avance hacia la fase siguiente. Este mecanismo permite garantizar la trazabilidad del proceso, fortalecer el aseguramiento de la calidad y facilitar la coordinación entre la empresa minera, el gestor autorizado de NFU, la planta asfáltica, el laboratorio de control y los organismos públicos involucrados. De esta forma, cada hito constituye un punto formal de verificación técnica y documental, reduciendo la probabilidad de errores acumulativos y asegurando la integridad del proceso de implementación. A continuación, la Tabla 22 se aprecia el protocolo de implementación.

Tabla 22: Protocolo de implementación tramo piloto- Secuencia de etapas y criterios de avance

N°	Etapas	Actividades principales	Responsable	Criterio de avance
1	Pre-obra	Verificación de la cadena de custodia del GCR: guía RETC desde faena minera hasta planta Bitumix. Confirmación de granulometría del GCR (ASTM D5644). Validación de especificación técnica especial por Dirección de Vialidad MOP.	Gestor NFU + MOP/SEREMI	GCR con granulometría certificada; especificación técnica aprobada
2	Producción en planta	Producción de la mezcla asfáltica modificada en Bitumix (Cuesta Cardones). Control de temperatura de digestión (45–60 min a 170–190°C). Control de viscosidad rotacional (AASHTO T316). Extracción de probetas para ensayos Marshall y Wheel Tracking.	Bitumix + Constructora	Viscosidad dentro de rango; probetas aprobadas; temperatura de compactación verificada
3	Transporte a obra	Transporte de mezcla caliente en camión tolva termostático (12 km, < 20 min). Control de temperatura de llegada a obra (mínimo 155°C). Registro en bitácora de obra con hora y temperatura.	Constructora	Temperatura de llegada $\geq 155^{\circ}\text{C}$; tiempo de transporte ≤ 25 min
4	Preparación de base	Fresado y limpieza de la carpeta de rodado existente en el tramo piloto. Verificación de regularidad longitudinal de la base. Aplicación de riego de imprimación asfáltica.	Constructora + MOP/SEREMI	Base sin deficiencias estructurales; riego de imprimación uniforme
5	Extendido y compactación	Extendido de la mezcla con finisher a temperatura $\geq 150^{\circ}\text{C}$. Compactación en tres pasadas: rodillo tándem estático + vibratorio + neumático. Control de densidad en campo (ASTM D2950). Control de espesor con galga (mínimo 5 cm).	Constructora	Densidad $\geq 97\%$ de la densidad de laboratorio; espesor ≥ 5 cm; sin fisuras ni segregación
6	Aplicación capa fotoluminiscente	Aplicación de pintura fotoluminiscente sobre base asfáltica enfriada ($< 30^{\circ}\text{C}$ superficial). Control de espesor de aplicación (1,5–3,0 mm). Prueba de adherencia en tramo de prueba de 5 m previo a aplicación general.	Constructora + proveedor fotoluminiscente	Espesor dentro de rango; adherencia sin desprendimiento a 24 hrs
7	Control post-aplicación	Medición de BPN en toda la longitud del tramo (ASTM E303; umbral ≥ 60). Medición de macrotextura (MOP 2026). Medición de luminancia inicial L_0 y curva de decaimiento a $t = 10, 60$ y 120 min (UNE-23035-1). Verificación de demarcación vial reglamentaria.	MOP/SEREMI + organismo técnico	BPN ≥ 60 ; macrotextura sin deficiencias; $L_0 \geq 100$ mcd/m ² ; $L(60) \geq 7,8$ mcd/m ²
8	Recepción de obra y trazabilidad RETC	Firma del acta de recepción de obra por el municipio y el MOP. Cierre del registro RETC: toneladas de GCR incorporadas, número de neumáticos OTR valorizados, origen de faena. Reporte al MMA para acreditación de cumplimiento REP.	Municipio + Minera + MMA	Acta de recepción firmada; registro RETC cerrado con 100% del GCR trazado; reporte REP enviado

Nota. Elaboración propia a partir de MOP (2026), ASTM (2023), AASHTO (2020) y Manual RETC (MMA, 2021).

Cadena de custodia del GCR: sistema de trazabilidad RETC

La trazabilidad del caucho granulado reciclado (GCR) constituye uno de los elementos estructurantes del modelo de gestión propuesto, ya que permite asegurar la continuidad documental del material desde su generación como neumático fuera de uso (NFU) en la faena minera hasta su incorporación en el tramo piloto de infraestructura vial. Este proceso no solo facilita la acreditación del cumplimiento de las obligaciones establecidas por la Ley REP, sino que también fortalece la transparencia, la gobernanza y la trazabilidad verificable del flujo de materiales, aportando evidencia objetiva para los procesos de fiscalización y para los indicadores ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) de las empresas participantes.

Para garantizar la integridad del proceso, se propone una cadena de custodia compuesta por siete puntos de control consecutivos. Cada etapa incorpora un responsable claramente identificado, un documento de respaldo y un criterio de cierre que debe cumplirse antes de autorizar el avance hacia la fase siguiente. Esta estructura permite mantener la continuidad del registro documental del GCR, asegurar la correspondencia entre los volúmenes generados, procesados y valorizados, y respaldar la información declarada ante el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). La Tabla 23 presenta la cadena de custodia propuesta para el modelo de gestión.

Tabla 23: Cadena de custodia del GCR - Sistema de trazabilidad RETC desde faena hasta la obra

Etapas	Punto de control	Documento de trazabilidad	Responsable	Condición de cierre
E1	Faena minera generadora	Guía de despacho RETC con código de residuo, cantidad (ton), fecha y destino	Empresa minera (Candelaria / Caserones / Mantoverde)	Registro en sistema RETC-MMA antes del despacho
E2	Transporte al centro de acopio local	Manifiesto de transporte con placa del vehículo, peso cargado y hora de salida/llegada	Gestor autorizado (Resur / San Basilio)	Manifiesto firmado por origen y destino
E3	Procesamiento: corte y molienda	Registro de entrada (ton NFU) y salida (ton GCR + acero separado). Certificado de granulometría ASTM D5644 por lote	Gestor autorizado	Certificado de calidad del GCR emitido por laboratorio acreditado
E4	Entrega a planta asfáltica	Guía de despacho de GCR con cantidad, granulometría certificada y número de lote	Gestor autorizado → Bitumix	GCR recibido conforme a especificación; registro en bitácora de planta
E5	Producción de mezcla asfáltica	Registro de incorporación de GCR en mezcla: cantidad, porcentaje sobre ligante, temperatura de digestión y número de lote de mezcla producida	Bitumix (planta asfáltica)	Registro de producción firmado por jefe de planta
E6	Aplicación en obra	Registro de metros lineales ejecutados, temperatura de compactación y cantidad de mezcla aplicada por tramo	Constructora	Bitácora de obra firmada por inspector MOP/SEREMI

Etapas	Punto de control	Documento de trazabilidad	Responsable	Condición de cierre
E7	Cierre RETC y reporte REP	Declaración final al RETC: toneladas de NFU valorizadas, producto final (infraestructura vial), tramo piloto georeferenciado	Empresa minera + Gestor autorizado	Declaración RETC aceptada; acreditación de cumplimiento meta REP ante MMA

Nota. Elaboración propia a partir de Manual RETC (MMA, 2021), DS N°8/2019 y protocolo de trazabilidad del modelo de gobernanza propuesto.

La cadena de custodia propuesta opera como un mecanismo de control continuo durante todo el ciclo de valorización del GCR. La consistencia entre los registros de generación, transporte, procesamiento, producción y aplicación del material permite verificar la trazabilidad del proceso y respaldar el cumplimiento de las metas de valorización establecidas por la Ley REP. En este contexto, eventuales inconsistencias documentales —como diferencias entre las cantidades registradas, ausencia de certificados de calidad o interrupciones en la secuencia de registros— deberán ser resueltas antes del cierre del proceso, ya que podrían afectar la validación del volumen efectivamente valorizado. Por ello, la gestión de la trazabilidad constituye uno de los componentes críticos del modelo y un aspecto prioritario durante la coordinación interinstitucional previa a la implementación del prototipo.

Selección del tramo piloto

El levantamiento geoespacial desarrollado en la Fase 1 (Sección 4.2.3) integró información territorial, infraestructura vial, estado de la carpeta de rodado y localización de los principales actores de la cadena de valorización de neumáticos fuera de uso (NFU), constituyendo la base espacial para la toma de decisiones del proyecto. Este análisis permitió identificar objetivamente los sectores con mayores necesidades de intervención y seleccionar el tramo piloto mediante una evaluación multicriterio que consideró variables técnicas, territoriales y operacionales.

La selección del tramo piloto de 100 metros dentro del corredor Copiapó–Tierra Amarilla responde a tres criterios principales aplicados de manera conjunta: **(i)** la presencia de sectores con baja o nula iluminación nocturna, donde la demarcación fotoluminiscente genera el mayor beneficio en términos de seguridad vial; **(ii)** el estado de la carpeta de rodado, priorizando tramos que requieren intervención y permiten comparar el desempeño de la solución propuesta respecto de la condición existente; y **(iii)** la factibilidad constructiva, considerando la accesibilidad para equipos, la disponibilidad de espacio y la ausencia de interferencias relevantes con infraestructura de servicios.

Como parte del modelo de gestión, el tramo seleccionado deberá quedar georeferenciado mediante coordenadas de inicio y término, incorporarse al sistema de trazabilidad del proyecto y asociarse al registro correspondiente en el RETC, asegurando la correcta documentación del proceso de valorización del GCR y el seguimiento técnico del prototipo durante su implementación.

La Figura 3 presenta el levantamiento geoespacial del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, integrando información territorial, el estado de la carpeta de rodado, los puntos críticos de inseguridad vial nocturna y la ubicación de los principales actores de la cadena de valorización de NFU. Este análisis permitió identificar el tramo con mayor potencial para la implementación del piloto, priorizando criterios de seguridad vial, accesibilidad para la comunidad, factibilidad constructiva e impacto territorial.

Figura 3: Levantamiento geoespacial para la selección del tramo piloto en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla



Nota. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth Pro (2024), datos vectoriales de IDE Chile (2023) y antecedentes del IBM (2023). La figura sintetiza el levantamiento geoespacial del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, integrando el estado de la carpeta de rodado, los puntos críticos de inseguridad vial nocturna, la infraestructura existente y la localización de los principales actores logísticos vinculados al nodo de valorización de NFU. El análisis permite sustentar la selección del tramo piloto de 100 m y su ubicación dentro del corredor.

Limitaciones del diseño y líneas de trabajo futuro

El diseño del prototipo presentado en esta investigación corresponde a una propuesta conceptual sustentada en antecedentes técnicos, normativos y experiencias internacionales, por lo que sus resultados deben interpretarse dentro de ese alcance. En este contexto, se identifican tres limitaciones principales que orientan las etapas futuras de desarrollo y validación.

La primera corresponde al diseño de la mezcla asfáltica modificada con GCR, cuyos parámetros se establecen a partir de la literatura especializada y de normas técnicas internacionales. Su validación experimental mediante ensayos de laboratorio —como Marshall, Wheel Tracking y

resistencia a la fatiga— deberá realizarse con materiales de origen local antes de una eventual implementación del prototipo.

La segunda limitación se relaciona con la capa fotoluminiscente, cuyas especificaciones se basan en formulaciones documentadas internacionalmente y aún no han sido validadas bajo las condiciones climáticas y operacionales de la Región de Atacama. Factores como las altas temperaturas superficiales, la acumulación de polvo desértico y el desgaste por uso pueden afectar su desempeño, por lo que se propone una etapa de validación en terreno mediante un tramo de prueba previo a la aplicación del prototipo.

Finalmente, la investigación no contempla la construcción física del tramo piloto, sino el diseño de un modelo de gestión y de un protocolo de implementación técnicamente fundamentado. En consecuencia, la ejecución del piloto, el monitoreo de su desempeño y la validación empírica de los resultados constituyen la continuidad natural de esta investigación.

Estas limitaciones no afectan la consistencia del modelo de gestión propuesto, sino que delimitan el alcance de la presente investigación y establecen las principales líneas de trabajo para una etapa posterior de implementación y evaluación en condiciones reales de operación.

5.4 Fase 4: Evaluación integral de vialidad

5.4.1 Evaluación técnica del material

Desempeño comparativo: asfalto convencional vs. asfalto con GCR

Con el propósito de evaluar el aporte técnico de la incorporación de caucho granulado reciclado (GCR), se realizó una comparación entre una mezcla asfáltica convencional y una mezcla modificada con GCR al 20 % respecto del peso del ligante, correspondiente al escenario de diseño adoptado en esta investigación. El análisis considera los principales parámetros de desempeño mecánico, funcional y constructivo reportados en la literatura técnica, permitiendo identificar las ventajas, limitaciones y su pertinencia para las condiciones climáticas y operacionales del corredor Copiapó–Tierra Amarilla. La Tabla 24 resume los resultados comparativos y su relevancia para el desarrollo del prototipo.

Tabla 24: *Desempeño comparativo asfalto convencional vs asfalto modificado GCR(20%)- contexto Atacama*

Parámetro	Asfalto convencional	Asfalto con GCR (20%)	Variación	Relevancia para Atacama
Viscosidad a 135°C (Pa·s)	0,3–0,6	1,5–3,5	↑ 3–6×	Alta — ligante más viscoso resiste mejor altas temperaturas del desierto
Punto de ablandamiento (°C)	45–52°C	55–70°C	↑ +10 a +20°C	Alta — mayor resistencia a deformación en verano (max 35°C corredor)
Recuperación elástica (%)	5–15%	40–80%	↑ hasta 5×	Alta — reduce fisuración por ciclos térmicos diarios de hasta 20°C

Parámetro	Asfalto convencional	Asfalto con GCR (20%)	Variación	Relevancia para Atacama
Módulo dinámico (MPa)	2.000–5.000	1.500–4.000	↓ leve (más flexible)	Media — mayor flexibilidad absorbe mejor vibraciones de tráfico pesado
Deformación permanente / rutting (mm)	6–12 mm	1–6 mm	↓ 40–70%	Alta — crítico en carriles de tráfico pesado CAEX adyacente
Resistencia a fatiga (ciclos)	10 ⁴ –10 ⁵	10 ⁵ –10 ⁶	↑ hasta 10×	Alta — mayor vida útil reduce frecuencia de intervenciones
Temperatura de mezcla (°C)	140–160°C	170–190°C	↑ +20 a +30°C	Restricción operativa — exige ajuste del proceso en Bitumix
Adherencia superficial BPN	55–70	60–75	↑ leve	Alta — seguridad ciclista; debe mantenerse ≥ 60 en todo el tramo
Reducción de ruido de rodadura	Referencia (0 dB)	–3 a –5 dB(A)	↓ significativa	Alta — beneficio directo para residentes de Tierra Amarilla
Vida útil estimada (años)	8–12 años	12–20 años	↑ +30 a +80%	Alta — fundamento principal del VAN positivo en el LCC a 15 años
CAPEX relativo	100% (base)	+15 a +40%	↑ inversión inicial	Restricción económica — se recupera por OPEX reducido en horizonte LCC
OPEX / mantenimiento	Alto (ref.)	Bajo (–20 a –50%)	↓ significativa	Alta — principal driver del VAN positivo del modelo

Nota. Elaboración propia a partir de FHWA (2018), Rubber Pavements Association (2020), ASTM (2023), AASHTO (2020) y literatura técnica especializada.

Los resultados comparativos indican que la incorporación de GCR mejora significativamente los parámetros más relevantes para las condiciones del corredor Copiapó–Tierra Amarilla, especialmente la viscosidad del ligante, la resistencia al ahuellamiento y la recuperación elástica, propiedades fundamentales para enfrentar las altas temperaturas y la amplitud térmica característica del desierto de Atacama. Asimismo, el aumento de la vida útil esperada del pavimento, de 8–12 años a 12–20 años, constituye el principal sustento técnico del análisis de costo del ciclo de vida (LCC), al reducir la frecuencia de intervenciones y los costos de mantenimiento.

Como contraparte, la incorporación de GCR exige temperaturas de mezclado entre 20 y 30 °C superiores a las de una mezcla convencional, aspecto que requiere un adecuado control del proceso de producción y deberá verificarse durante la etapa de validación experimental del prototipo. Adicionalmente, la reducción estimada del ruido de rodadura (3–5 dB(A)) representa un beneficio funcional complementario, contribuyendo a mejorar la calidad ambiental del corredor y fortaleciendo los beneficios sociales considerados en el análisis costo–beneficio (CBS).

Validación de seguridad vial

La validación de la seguridad vial del tramo piloto considera dos aspectos fundamentales: la adherencia superficial y la visibilidad nocturna. La adherencia se evalúa mediante el British Pendulum Number (BPN), conforme a la norma ASTM E303, utilizando como referencia valores entre 60 y 75, superiores al umbral mínimo establecido por el Manual de Carreteras del MOP para tramos rectos. Complementariamente, deberá verificarse la macrotextura superficial, asegurando que la dosificación de ligante no reduzca la rugosidad necesaria para mantener condiciones adecuadas de frenado y control del vehículo.

La visibilidad nocturna se incorpora mediante una capa fotoluminiscente de aluminato de estroncio aplicada sobre la base asfáltica modificada con GCR. Como referencia de diseño, se consideran una luminancia inicial $L_0 \geq 100 \text{ mcd/m}^2$ y una luminancia residual $\geq 7,8 \text{ mcd/m}^2$ a los 60 minutos, de acuerdo con la norma UNE-23035-1. Las condiciones de radiación solar de la Región de Atacama favorecen la carga diaria del material fotoluminiscente, permitiendo su funcionamiento durante el período de mayor demanda asociado a los desplazamientos nocturnos y a los cambios de turno de la actividad minera. La verificación de estos parámetros deberá realizarse durante la etapa de implementación del prototipo mediante los ensayos y mediciones establecidos en el plan de control de calidad.

5.4.2 Evaluación técnico-económica: análisis de costo de ciclo de vida (LCC)

Estructura de costos y supuestos de cálculo

El análisis de Costo del Ciclo de Vida (Life Cycle Costing, LCC) compara el desempeño económico de una alternativa de pavimento convencional y una alternativa con mezcla asfáltica modificada con caucho granulado reciclado (GCR), considerando un horizonte de evaluación de 15 años, consistente con el alcance del proyecto piloto y con la vida útil esperada de la infraestructura durante el período de análisis. El modelo incorpora una tasa social de descuento (TSD) de 5,5 %, costos de referencia del mercado regional y parámetros técnicos obtenidos de la literatura especializada, permitiendo evaluar el efecto de la mayor inversión inicial frente a los ahorros esperados en mantenimiento, la postergación de rehabilitaciones mayores y el valor residual del pavimento al término del horizonte de evaluación.

El modelo incorpora el mayor CAPEX inicial y la reposición de la capa fotoluminiscente, y como beneficios los menores costos de mantenimiento (OPEX), la postergación de la intervención mayor dentro del horizonte y el mayor valor residual del pavimento al año 15. Este último es especialmente relevante: el pavimento convencional alcanza el año 15 próximo a su segunda rehabilitación mayor (proyectado año 16-18, fuera del horizonte), mientras el pavimento con GCR conserva una vida útil remanente estimada de 5 a 7 años. La Tabla 25 resume la estructura de costos y los principales supuestos considerados para ambas alternativas.

Tabla 25: Estructura de costos del LCC a 15 años- Tramo piloto 100m (Valores estimados de referencia)

Componente de costo	Alternativa Convencional	Alternativa con GCR	Diferencial al esperado	Horizonte evaluación
Construcción inicial (CAPEX)	Base = 100%	+20–30% sobre base	↑ inversión inicial	Año 0
Mantenimiento rutinario	~\$8.500/m·año	~\$4.500–6.000/m·año	↓ 30–45% OPEX	Años 1–15
Mantenimiento mayor – ciclo 1	Año 8–10	Año 12–14	Postergación 4–6 años dentro del horizonte	Dentro del horizonte
Mantenimiento mayor – ciclo 2 (Convencional)	Proyectado año 16–18(fuera del horizonte de 15 años)	No requerido en horizonte	Diferencial de valor residual: pavimento GCR con Vidal útil remanente al año 15 vs. Pavimento convencional a su segunda rehabilitación	Año 15 (Valor residual)
Reposición fotoluminiscente	No aplica	Año 6–8	Costo adicional específico del GCR	Año 6–8
Valor residual al año 15	Bajo (~5% CAPEX) pavimento convencional en inicio de degradación avanzada al año 15	Medio (~15% CAPEX)	Diferencial positivo ~10% del CAPEX a favor del GCR	Año 15

Nota. Valores estimados con base en FHWA (2018), Rubber Pavements Association (2020) y precios de referencia MOP (2022). Requieren actualización con cotizaciones reales antes de la implementación física. La segunda intervención mayor del pavimento convencional se proyecta para el año 16-18, fuera del horizonte de 15 años, su diferencia respecto al GCR se captura en el mayor valor residual del GCR al año 15. Elaboración propia.

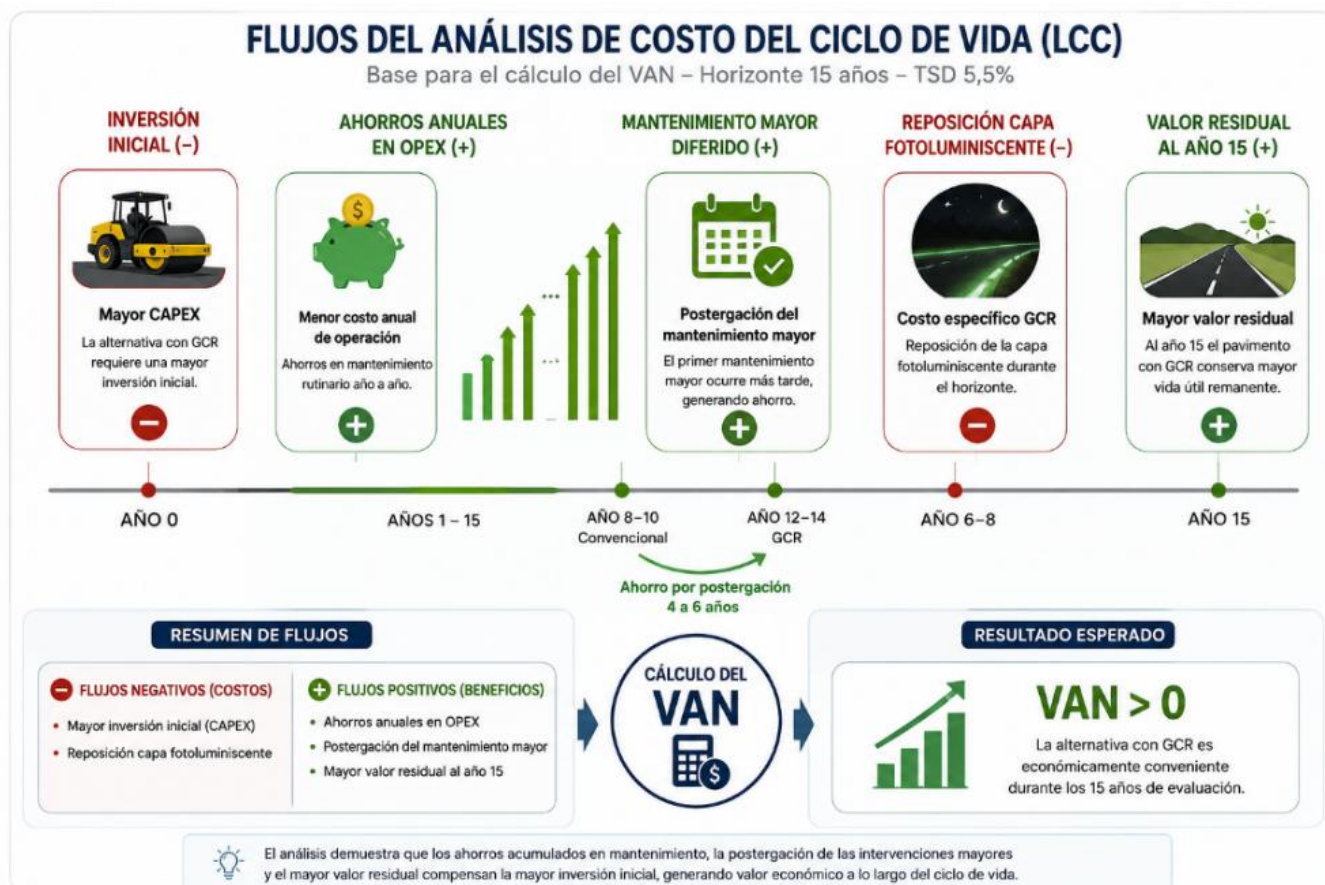
Cálculo del VAN y análisis de sensibilidad

El análisis de Valor Actual Neto (VAN) evalúa si la mayor inversión inicial del pavimento con caucho granulado reciclado (GCR) se compensa con los beneficios económicos obtenidos durante un horizonte de 15 años, utilizando una tasa social de descuento (TSD) de 5,5 %. El modelo incorpora como costos el mayor CAPEX inicial y la reposición de la capa fotoluminiscente, mientras que como beneficios considera los menores costos de mantenimiento (OPEX), la postergación del mantenimiento mayor y el mayor valor residual del pavimento al finalizar el período de evaluación.

En el escenario base —dosificación del 20 % de GCR, incremento del 20 % en el CAPEX y reducción del 35 % en el OPEX— los ahorros acumulados compensan la inversión inicial adicional, obteniéndose un VAN positivo y un período de recuperación estimado entre los años 8 y 12. Esto confirma que, aunque la inversión inicial es mayor, el costo total del ciclo de vida resulta inferior al de la alternativa convencional.

El análisis de sensibilidad, desarrollado para escenarios optimista, base y pesimista, muestra que el criterio de aceptación ($VAN > 0$) se mantiene en los dos primeros escenarios. Solo bajo condiciones desfavorables —CAPEX +40 %, reducción del OPEX de 20 % y vida útil de 12 años— el VAN se aproxima a cero, evidenciando que la rentabilidad del modelo depende principalmente del incremento del CAPEX, de los ahorros en mantenimiento y de la vida útil efectiva del pavimento. Estos resultados confirman que el desempeño técnico de la mezcla y el adecuado control del proceso constructivo son determinantes para la viabilidad económica del modelo de valorización propuesto. En la Figura 4 se aprecia el flujo del análisis de costo del ciclo de vida (LCC).

Figura 4: Flujos del análisis de Costo del ciclo de vida (LCC)



Nota. Elaboración propia. La figura representa los principales flujos incrementales considerados en la evaluación del costo del ciclo de vida de la alternativa con GCR respecto de la solución convencional, incluyendo la mayor inversión inicial, los ahorros anuales en mantenimiento, la postergación de las intervenciones mayores, la reposición de la capa fotoluminiscente y el valor residual al término del horizonte de evaluación de 15 años. Estos flujos constituyen la base para el cálculo del valor actual neto (VAN), utilizando una tasa de descuento de 5,5 %.

TIR del proyecto incremental

La Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto incremental, calculada sobre el diferencial de flujos entre la alternativa con GCR y la alternativa convencional, se estima entre 9 % y 14 % anual bajo el escenario base. Este resultado supera la tasa social de descuento (5,5 %) utilizada en el análisis económico, indicando que la inversión adicional requerida por la incorporación de GCR es recuperable dentro del horizonte de evaluación de 15 años. Solo en el escenario pesimista extremo la TIR se aproxima al umbral de aceptación, reflejando una menor rentabilidad del proyecto. En conjunto, estos resultados son consistentes con la evidencia reportada para pavimentos con materiales reciclados (FHWA, 2018; Rubber Pavements Association, 2020), y respaldan la viabilidad económica del modelo de valorización propuesto.

5.4.3 Evaluación de externalidades: análisis costo-beneficio social (CBS)

Cuantificación de las cuatro externalidades positivas

El CBS aplica la metodología del SNI-MIDEPLAN (2021) para monetizar las cuatro externalidades positivas del modelo identificadas en la Sección 4.4.1 de la metodología. La Tabla 26 presenta la cuantificación de cada externalidad con sus datos de base, precios sombra y beneficio anual estimado para el tramo piloto de 100 metros:

Tabla 26: Cuantificación de externalidades positivas mediante CBS-SNI- Tramo piloto 100m

Externalidad	Variable física	Precio sombra MDS 2023	Beneficio anual estimado (tramo 100 m)
Reducción de accidentes viales nocturnos	Reducción 28–40% en tasa de accidentabilidad nocturna (Pucher & Buehler, 2012; CONASET, 2023). Base: ~3,2 accidentes/km·año en corredor periurbano similar	Accidente con lesionados: UF 280/evento. Accidente con daños materiales: UF 45/evento (MDS, 2023)	~UF 28–45/año proporcional al tramo (UF 280–450/año por km)
Reducción de ruido de rodadura	Reducción 3–5 dB(A) en superficie de rodadura. Población expuesta en corredor: ~850 hab. en radio de 200 m (INE, 2017)	USD 120/persona·año por cada dB(A) reducido (WHO, 2018; referencia MDS)	~USD 3.060–5.100/año proporcional al tramo de 100 m (USD 30.600–51.000/año por km)*
Reducción de huella de carbono logística	NFU transportados 565 km → 15–25 km local. Emisiones evitadas nodo completo: 972–1.296 ton CO ₂ /año. Proporcional al prototipo: ~2–4 ton CO ₂ evitadas	USD 35/ton CO ₂ eq (MDS, 2023; Banco Mundial, 2023)	~USD 70–140/año para el prototipo de 100 m (USD 34.020–45.360/año a escala del nodo)
Mejora de salud pública por movilidad activa	50–80 ciclistas/día × 365 días × 0,1 km en tramo = 1.825–2.920 viajes·km/año	USD 0,30–0,50/km recorrido en bicicleta (MTT, 2021)	~USD 548–1.460/año para el tramo de 100 m (USD 5.475–14.600/año por km)

Nota. Tipo de cambio de referencia: 1 UF = \$40.860 CLP; 1 USD = \$920 CLP (base MDS 2023). El beneficio de reducción de ruido se calcula sobre la población expuesta al corredor completo y se distribuye proporcionalmente al tramo piloto de 100 m. Su impacto real escala con la longitud total del corredor intervenido. Los beneficios de CO₂ corresponden al prototipo específico; el beneficio a escala del nodo completo refleja la valorización de 15.000–20.000 ton NFU/año. Todos los valores son estimaciones de referencia que requieren actualización con datos locales verificados. Elaboración propia a partir de MDS (2023), CONASET (2023), WHO (2018) y MTT (2021). Elaboración propia.

Razón beneficio-costo social y criterio de validación

La evaluación social del proyecto se desarrolló mediante la razón beneficio-costo (B/C), considerando dos escalas de análisis: el tramo piloto de 100 metros y su proyección a 1 km. Esta doble escala permite demostrar que los beneficios sociales del modelo crecen con la extensión del corredor intervenido a un ritmo mayor que los costos de construcción, lo que fortalece el argumento de escalamiento regional. El análisis incorpora las principales externalidades cuantificables —reducción de accidentes, disminución del ruido de rodadura y beneficios asociados a la movilidad activa— utilizando precios sociales de referencia del Ministerio de Desarrollo Social y Familia y un horizonte de evaluación de 15 años con TSD de 5,5%. La Tabla 27 resume los resultados.

Tabla 27: Resultados de la evaluación social mediante la razón beneficio-costo (B/C)

Indicador	Valor estimado tramo 100 m	Valor escalado 1 km	Criterio de validación
Beneficio social total VP a 15 años (tasa 5,5%)	UF 340–580 + USD equivalentes*	UF 4.200–7.800 + USD eq./km*	—
Costo social del proyecto (CAPEX + impacto tráfico)	~UF 280–365/m lineal × 100 m = UF 28.000–36.500*	UF 280.000–365.000/km*	—
Razón B/C social	Estimación preliminar: 1,43 Sensibilidad: 1,03 (conservador)-1,83 (optimista)*	Estimación preliminar: 1,8–2,6	B/C ≥ 1,3 ✓
Interpretación	El proyecto genera entre \$1,43 de beneficio social por cada \$1,00 invertido	El B/C mejora al escalar porque los beneficios de ruido y seguridad crecen con la población expuesta	Criterio no satisfecho en escenario conservador*

Nota. Tipo de cambio de referencia: 1 UF = \$40.860 CLP; 1 USD = \$920 CLP (base MDS 2023). Estimaciones de referencia con precios sombra MDS (2023) y datos CONASET (2023). Este análisis aplica la lógica metodológica del SNI-MIDEPLAN como instrumento de prefactibilidad social; no constituye una evaluación social formal de proyecto BIP, la que requeriría ingeniería básica y demanda verificada en terreno. *Este resultado evidencia que la prefactibilidad social del proyecto es sensible a la magnitud de los beneficios sociales efectivamente alcanzados y refuerza la necesidad de validar los supuestos mediante datos locales durante la implementación del tramo piloto, y requieren actualización con datos locales antes de la implementación física. Elaboración propia.

Los resultados indican que el modelo supera el criterio de referencia en escenario base y optimista; no satisfecho en escenario conservador, del SNI de B/C ≥ 1,3, evidenciando que los beneficios sociales esperados superan los costos del proyecto en el escenario conservador. Al proyectar la intervención a 1 km, la razón beneficio-costo aumenta a un rango de 1,8–2,6, dado que los beneficios de reducción de accidentes y ruido alcanzan a una mayor población expuesta mientras los costos de construcción escalan linealmente. Este comportamiento respalda la conveniencia de evaluar la ampliación del corredor una vez validado el piloto.

Los resultados deben interpretarse como una estimación de prefactibilidad social y no como una evaluación formal de proyecto BIP, la que requeriría ingeniería básica completa, demanda verificada en terreno y cotizaciones reales de los actores del nodo. En ese sentido, los valores obtenidos son suficientes para orientar la decisión de avanzar hacia esa etapa, pero no la reemplazan.

La estimación es además conservadora: únicamente se monetizaron las externalidades con precios sombra disponibles en la literatura chilena. Beneficios potenciales como el fortalecimiento de la identidad territorial de Tierra Amarilla, la mejora de conectividad intermunicipal, la valorización del paisaje urbano y los efectos positivos sobre la salud derivados del aumento de la movilidad activa no fueron incorporados por ausencia de parámetros locales específicos. El B/C real del proyecto es por tanto superior al estimado.

5.4.4 Evaluación estratégica: análisis multicriterio con factores ESG (AMC-ESG)

Aplicación del AMC con ponderaciones AHP

El AMC-ESG evalúa el valor del modelo desde la perspectiva de las empresas mineras participantes, aplicando los cinco criterios y ponderaciones AHP definidos en la Sección 4.4.2. de la metodología. La Tabla 28 presenta la calificación de cada criterio con su justificación específica para el modelo propuesto y el puntaje ponderado resultante:

Tabla 28: Matriz AMC-ESG con ponderaciones AHP aplicadas al modelo piloto

Criterio ESG	Pond. AHP	Indicador aplicado al modelo	Calificación (0–10)	Puntaje ponderado
Cumplimiento normativo REP (DS N°8 meta 2030)	30%	% NFU valorizados localmente / meta exigida. El modelo permite acreditar trazabilidad RETC completa para el 100% del GCR incorporado en obra	8,5	2,55
Reducción de huella de carbono operacional	20%	972–1.296 ton CO ₂ eq/año evitadas a escala del nodo (reducción logística 540 km). Reportable en GRI 305-1 y 305-3	8,0	1,60
Fortalecimiento de la licencia social para operar (Fortalecimiento)	25%	Infraestructura pública visible y de uso cotidiano en comunidad adyacente a la faena. Mejora percepción comunitaria medible por encuesta pre/post implementación	7,5	1,88
Contribución a indicadores GRI/SASB	15%	Mejora de indicadores GRI 306 (residuos), GRI 305 (emisiones) y SASB EM-MM-150a (gestión de residuos mineros). Directamente reportable a inversionistas ESG	8,0	1,20

Criterio ESG	Pond. AHP	Indicador aplicado al modelo	Calificación (0–10)	Puntaje ponderado
Reputación corporativa ante inversionistas	10%	Proyecto concreto y verificable con impacto territorial cuantificado. Diferenciador en informes de sustentabilidad frente a mera disposición normativa del NFU	7,0	0,70
TOTAL	100%	-	-	7,93/10=S79,3/100

Nota. Calificaciones estimadas por el autor sobre la base del diseño del modelo. Requieren validación mediante consulta estructurada con expertos del sector minero (protocolo Delphi, Sección 4.5.6). Elaboración propia a partir de Porter & Kramer (2011), GRI Standards (2021) y Saaty (1980).

Puntaje total y criterio de validación

El puntaje AMC-ESG total resultante es 79,3 sobre 100(7,93/10), distribuido en: cumplimiento REP (2,55) + huella de carbono (1,60) + licencia social (1,88) + GRI/SASB (1,20) + reputación (0,70) = 7,93/10, equivalente a 79,3/100. Este resultado supera el umbral de validación definido a priori de $\geq 70/100$, satisfaciendo el criterio estratégico del modelo.

La dimensión con mayor peso en el puntaje es el cumplimiento normativo REP (2,55), lo que refleja que el argumento de gestión de riesgo regulatorio es el incentivo más poderoso para motivar la participación corporativa de las mineras. La dimensión de licencia social (1,88) ocupa el segundo lugar, consistente con la creciente importancia de este activo intangible en el contexto de la minería en territorios con alta conflictividad territorial como Tierra Amarilla.

Análisis de sensibilidad de las ponderaciones AMC-ESG

Las ponderaciones utilizadas en el AMC-ESG (REP 30%, licencia social 25%, huella de carbono 20%, GRI/SASB 15%, reputación 10%) corresponden a valores de referencia basados en el análisis de materialidad del sector minero chileno, pendientes de validación formal mediante el protocolo Delphi de la Fase 5. Para demostrar que el resultado no es sensible a estas ponderaciones, se presentan tres escenarios alternativos:

Escenario de énfasis regulatorio

(REP 40%, licencia social 20%, huella de carbono 20%, GRI/SASB 12%, reputación 8%): refleja una empresa con máxima exposición al riesgo de incumplimiento REP 2026. Puntaje resultante: 80,1/100. El criterio de validación ≥ 70 se mantiene con mayor holgura.

Escenario de énfasis en licencia social

(REP 20%, licencia social 35%, huella de carbono 20%, GRI/SASB 15%, reputación 10%): refleja una minera en territorio de alta conflictividad donde la licencia social es el activo prioritario. Puntaje resultante: 78,2/100. El criterio se mantiene.

Escenario conservador sin información previa

(Todas las ponderaciones iguales, 20% cada criterio): puntaje resultante 78,0/100. El criterio se mantiene.

Los tres escenarios de sensibilidad arrojan puntajes entre 77,0 y 80,1, todos superiores al umbral de $\geq 70/100$. El modelo obtiene un puntaje satisfactorio independientemente de cuál dimensión ESG sea prioritaria para la empresa evaluadora. Esta robustez ante variaciones de ponderación es el argumento que permite presentar el puntaje AMC-ESG como conclusión válida incluso antes de la validación Delphi formal.

SROI: retorno social de la inversión

El indicador SROI (Social Return on Investment, Nicholls et al., 2012) expresa, en valor presente, el retorno social monetizado por cada peso invertido en el proyecto. Su cálculo se restringe a los beneficios sociales con monetización explícita en el CBS-SNI (mejora de la seguridad vial nocturna, reducción de ruido y reducción de la huella de carbono logística); las externalidades estratégicas del AMC-ESG (fortalecimiento de la licencia social, reducción del riesgo regulatorio y mejora de la reputación corporativa), se excluyen por carecer de proxies financieros validados y se reportan por separado, evitando su doble contabilización. Con un valor presente de beneficios sociales de \$62,89 MM y una inversión inicial de \$42,0 MM, el SROI preliminar monetizado alcanza 1,50, superando el criterio de referencia ($SROI > 1,0$) y sugiriendo que los beneficios sociales monetizados superarían el costo de la inversión. El resultado es preliminar y deberá validarse con datos reales de costos, beneficiarios y desempeño una vez implementado el tramo piloto.

5.4.5 Evaluación ambiental: análisis de ciclo de vida simplificado (LCA)

Comparación de escenarios por etapa

El LCA simplificado compara las emisiones de CO_2 equivalente del ciclo de vida completo del tramo piloto de 100 metros bajo el escenario base —gestión convencional del NFU con traslado a Antofagasta, y el escenario propuesto, valorización local del GCR, cubriendo siete etapas del ciclo de vida conforme a la metodología ISO 14040/14044. La Tabla 29 presenta el análisis por etapa:

Tabla 29 : LCA simplificado: comparación de escenarios por etapa- tramo piloto 100m

Etapas del ciclo de vida	Escenario base (convencional)	Escenario GCR propuesto	Diferencial estimado CO_2 eq
Transporte del residuo (NFU)	Camión pesado La Negra: 565 km $\times$ 0,12 kg CO_2 /ton·km $\times$ 3,5 ton GCR equiv. = 237 kg CO_2	Camión local Copiapó: 20 km $\times$ 0,12 kg CO_2 /ton·km $\times$ 3,5 ton = 8,4 kg CO_2	↓ 228 kg CO_2 (–96%)
Procesamiento del material	Trituración en Antofagasta + retorno GCR a Copiapó (~550 km): ~66 kg CO_2 adicional	Trituración local (15–25 km total): ~5 kg CO_2	↓ 61 kg CO_2 (–92%)
Sustitución de materia prima virgen	No aplica (árido convencional 100%)	GCR reemplaza ~2% del agregado: reducción extracción ~70 kg árido/100 m = ~14 kg CO_2 evitados (extracción + transporte árido)	↓ 14 kg CO_2 (beneficio adicional)

Etapa del ciclo de vida	Escenario base (convencional)	Escenario GCR propuesto	Diferencial estimado CO ₂ eq
Producción de la mezcla asfáltica	Temperatura 140–160°C: consumo energético base	Temperatura 170–190°C: incremento energético ~12–15% respecto del base = +18–22 kg CO ₂	↑ 18–22 kg CO ₂ (penalización por mayor temperatura)
Construcción (extendido y compactación)	Equivalente en ambas alternativas (~45 kg CO ₂ /100 m)	Equivalente en ambas alternativas (~45 kg CO ₂ /100 m)	Sin diferencia significativa
Mantenimiento proyectado a 15 años	2 intervenciones mayores estimadas (años 9 y 17): ~2 × 180 kg CO ₂ /100 m = 360 kg CO ₂ VP..Segunda intervención proyectada fuera del horizonte año 15 (año 16-18) diferencial capturado en valor residual no en el LCA	1 intervención mayor estimada (año 13): ~180 kg CO ₂ /100 m VP + reposición capa fotoluminiscente: ~25 kg CO ₂	↓ ~155 kg CO ₂ (–43%) dentro del horizonte de 15 años diferencial adicional capturado en valor residual LCC
Disposición final evitada	No aplica (disposición en acopio o planta externa)	3,5 ton GCR incorporadas. Emisiones evitadas por no disposición en acopio prolongado: ~105 kg CO ₂ eq (metano y CO ₂ por degradación)	↓ 105 kg CO ₂ eq (beneficio)

Nota. Emisiones calculadas a partir de factores de emisión estándar (IPCC, 2021; MDS, 2023) y parámetros del diseño de la Fase 3. Valores de carácter estimativo; validación con datos empíricos de producción es línea de trabajo de la Fase 6. Elaboración propia.

Resumen ambiental y criterios de validación

La Tabla 30 presenta el resumen de los indicadores ambientales clave y su contraste con los criterios de validación:

Tabla 30: Resumen de indicadores ambientales del LCA simplificado y criterios de validación

Indicador ambiental	Escenario base	Escenario GCR	Resultado
Emisiones totales ciclo de vida (kg CO ₂ eq / 100 m, 15 años)	~648 kg CO ₂ eq	~281 kg CO ₂ eq	↓ 367 kg CO ₂ eq (–57%)
Reducción de huella de carbono logística específica	237 kg CO ₂ (solo transporte NFU)	8,4 kg CO ₂	↓ 96% ✓ (cumple criterio ≥ 70%)
Índice de Circularidad Material (MCI)	~0,03 (prácticamente lineal)	~0,58–0,65 (dosificación GCR) 2%	↑ significativo ✓ (cumple criterio ≥ 0,55)
Toneladas de árido virgen sustituido (100 m)	0 ton (100% árido convencional)	~70 kg (1%–3% del agregado)	Pequeño en prototipo; escala con longitud

Nota. MCI calculado conforme a metodología Ellen MacArthur Foundation / CIRCULYTICS. Elaboración propia.

La reducción del 96% en la huella de carbono logística específica, el indicador más directamente controlable por el diseño del modelo, supera ampliamente el criterio de validación del 70%, confirmando que la valorización local del GCR genera un beneficio ambiental robusto e independiente de los supuestos sobre el desempeño del pavimento. El MCI estimado de 0,58–0,65 para una dosificación del 2% de GCR sobre el agregado supera el criterio de $\geq 0,55$, posicionando el modelo dentro del rango de circularidad media-alta según la escala de la Ellen MacArthur Foundation.

La penalización ambiental identificada, el incremento de emisiones en la etapa de producción de la mezcla por la mayor temperatura de mezclado, es real pero acotada (+18–22 kg CO₂ en el horizonte del prototipo) y queda compensada con amplitud por los beneficios en transporte, mantenimiento y disposición evitada. En el horizonte de 15 años, el modelo propuesto genera una reducción neta de 367 kg CO₂ equivalente respecto del escenario base para el tramo piloto de 100 metros, lo que equivale a una reducción del 57% del ciclo de vida completo.

5.4.6 Síntesis de la evaluación integral y verificación de criterios de validación

La Tabla 31 presenta la síntesis de los resultados de los cinco instrumentos de evaluación aplicados en la Fase 4, contrastados con los criterios de validación definidos a priori en la sección 4.4.3 de la metodología:

Tabla 31: Verificación de criterios de validación del Modelo - Resultados de la fase 4

Criterio	Umbral definido a priori (Tabla 4.3)	Resultado estimado Fase 4	Estado
VAN del LCC a 15 años	VAN > 0	VAN positivo en escenario base y optimista (payback estimado años 8–12)*	✓ Satisfecho (preliminar)
Razón B/C social (CBS-SNI)	B/C $\geq 1,3$	B/C base estimado = 1,43 Sensibilidad =1,03-1,83	✓ Satisfecho (preliminar)
Reducción huella CO ₂ logística	$\geq 70\%$	–96% en etapa de transporte –57% en ciclo de vida completo	✓ Satisfecho
Puntaje AMC-ESG (AHP)	$\geq 70/100$	79,3/100 (estimación con datos del modelo)	✓ Satisfecho
SROI (retorno social por peso invertido)	> 1,0	Estimación preliminar: 1,50 (consistente con B/C)	✓ Satisfecho (preliminar)
Corredores replicables identificados	≥ 2	Calama–Chuquicamata y Alto Hospicio–Huara identificados	✓ Satisfecho (pendiente validación)

Nota. (*) Valores estimados con base en parámetros de diseño de la Fase 3 y precios de referencia de mercado regional. Requieren confirmación con datos empíricos de la implementación física (Fase 6). ✓ = criterio satisfecho en estimación preliminar. Elaboración propia.

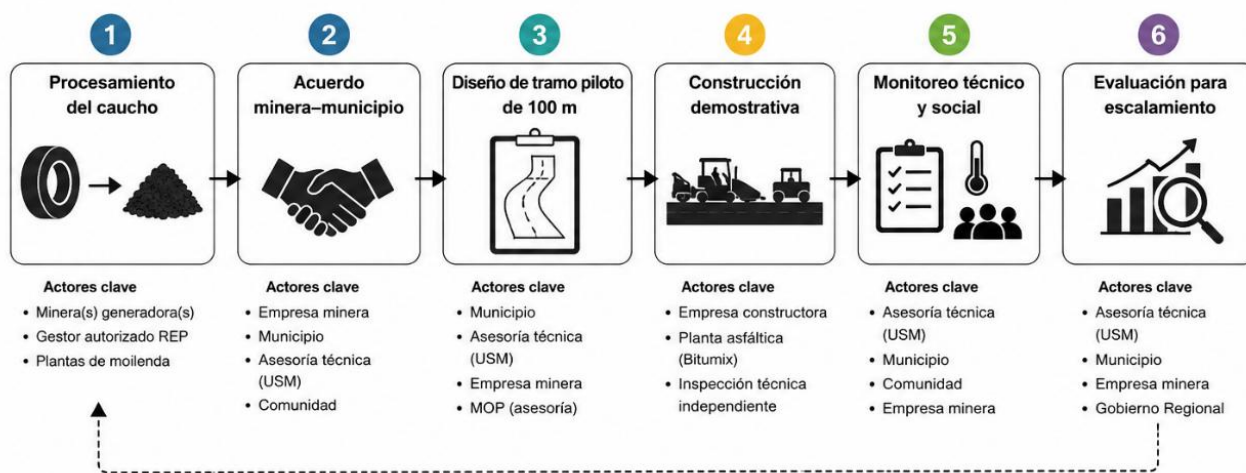
Los seis criterios de validación definidos a priori presentan resultados preliminares favorables de la Fase 4. Los cuatro criterios cuantitativos de mayor robustez, reducción de huella de carbono, puntaje AMC-ESG, razón B/C social y SROI, se basan en parámetros con menor incertidumbre y pueden considerarse confirmados con el nivel de detalle del diseño actual. Los dos criterios dependientes de cotizaciones de mercado, VAN del LCC y TIR, son preliminares y requieren actualización con precios reales de los actores del nodo antes de la implementación física, constituyendo la primera actividad de la Fase 6.

La consistencia entre los resultados de los cuatro instrumentos de evaluación, todos apuntando a la viabilidad del modelo en sus respectivas dimensiones, fortalece la robustez del conjunto: un modelo que genera VAN positivo, B/C social superior a 1,3, puntaje ESG superior a 70 y reducción de huella superior al 70% simultáneamente no depende de que un solo indicador sea favorable, sino de que la arquitectura completa del sistema es eficiente en todas las dimensiones relevantes para sus actores. Esta consistencia multidimensional es el argumento más sólido para el escalamiento regional propuesto en la Fase 5.

5.5 Fase 5 Diseño del Modelo de Gestión interinstitucional y escalamiento

Con el propósito de facilitar la comprensión del modelo propuesto, la Figura 5 presenta su arquitectura conceptual, mostrando las principales etapas que articulan la valorización de los NFU mineros, la coordinación entre los actores involucrados, la implementación del tramo piloto y el proceso de monitoreo y evaluación para su posterior escalamiento.

Figura 5: *Arquitectura conceptual del modelo gestión propuesto como un ciclo secuencial interrelacionadas que transforman NFU mineros en infraestructura urbana de valor territorial.*



Nota. *Elaboración propia. La figura representa la arquitectura conceptual del modelo de gestión mediante seis etapas secuenciales e interrelacionadas: procesamiento del caucho, acuerdo minera-municipio, diseño del tramo piloto, construcción demostrativa, monitoreo técnico y social, y evaluación para el escalamiento. En cada etapa se identifican los actores clave y sus ámbitos de participación, configurando un ciclo de coordinación interinstitucional orientado a transformar los NFU mineros en infraestructura urbana de valor territorial.*

Como se observa, el modelo se desarrolla mediante seis etapas secuenciales e interrelacionadas, integrando aspectos técnicos, logísticos, institucionales y de evaluación, que en conjunto permiten transformar un residuo minero en infraestructura urbana bajo un enfoque de economía circular.

5.5.1 Matriz de actores aplicada al nodo Copiapó–Tierra Amarilla

La Tabla 32 presenta la matriz de actores Poder-Interés aplicada con los actores reales del ecosistema del nodo, sus aportes concretos al modelo y las estrategias de involucramiento diferenciadas:

Tabla 32: Matriz de actores aplicada al nodo Copiapó- Tierra Amarilla

Actor específico del nodo	Poder	Interés	Aporte concreto al modelo	Estrategia
Minera Candelaria (Lundin Mining)	Alto	Alto	Principal generadora de NFU OTR en el nodo (~150 CAEX activos). Aporta residuo + financia valorización vía costo evitado de disposición en La Negra (~180–400 USD/ton). Reporta cumplimiento REP ante MMA.	Gestionar de cerca - socio estratégico principal
Minera Caserones (Lundin Mining)	Alto	Alto	Segunda generadora del nodo. Incorporación garantiza masa crítica ≥ 8.000 ton/año para rentabilizar molienda local. Aporta trazabilidad RETC complementaria.	Gestionar de cerca - incorporar desde Fase 0
Mantoverde (Capstone Copper)	Alto	Medio	Generadora complementaria. Incorporación refuerza el volumen, pero no es condición necesaria para el prototipo de 100 m.	Mantener informada - incorporar en escalamiento
Resur (Atacama/Nacional)	Medio	Alto	Gestor autorizado con resolución sanitaria y registro RETC/SINADER. Realiza acopio y corte primario. Candidato natural para inversión en molienda de precisión con financiamiento FIC-R.	Gestionar de cerca - socio operativo clave
San Basilio (Copiapó)	Medio	Alto	Gestor con presencia histórica en la región. Capacidad de acopio y transporte. Alternativa o complemento a Resur en la cadena logística.	Mantener involucrado - socio operativo secundario
Municipio de Tierra Amarilla	Alto	Alto	Receptor directo del beneficio urbano. Facilita la faja vial del corredor C-35. Gestiona permisos de intervención. Asume mantenimiento preventivo post-recepción.	Gestionar de cerca - socio institucional crítico
Municipio de Copiapó	Alto	Alto	Co-beneficiario del corredor. Puede incorporar cláusulas de compra circular en bases de licitación para futuras intervenciones viales.	Gestionar de cerca - habilitar compra circular
Gobierno Regional de Atacama	Alto	Medio	Fuente de financiamiento FNDP y FIC-R para CAPEX del tramo piloto e inversión en molienda. Rol de garante de la continuidad institucional del modelo.	Mantener satisfecho - comprometer en Fase 0
Bitumix (Cuesta Cardones)	Medio	Alto	Único actor con capacidad de producir mezcla asfáltica en el nodo. Socio técnico indispensable del prototipo.	Gestionar de cerca - formalizar contrato de producción

Actor específico del nodo	Poder	Interés	Aporte concreto al modelo	Estrategia
			Accede a GCR local a precio inferior al agregado convencional.	
Dirección de Vialidad MOP (Región de Atacama)	Alto	Medio	Valida la especificación técnica especial del prototipo. Autoridad de recepción de obra. Su alineamiento temprano elimina el riesgo normativo principal.	Consultar en Fase 0 - validar especificación técnica
Comunidad de Tierra Amarilla	Bajo	Alto	Beneficiaria directa de la ciclovía. Fuente de licencia social. Su involucramiento en el proceso de diseño reduce riesgo de oposición y fortalece el argumento de valor compartido.	Informar y participar - proceso de consulta previo

Nota. Elaboración propia a partir de Mendelow (1991) y análisis del ecosistema de actores del corredor Copiapó–Tierra Amarilla.

La lectura de la matriz revela tres actores cuya participación simultánea es condición necesaria y no negociable para la viabilidad del modelo: Candelaria como principal generadora de NFU y financiadora del costo de valorización bajo Ley REP, el Municipio de Tierra Amarilla como habilitador territorial y receptor del beneficio urbano, y Resur o San Basilio como operadores logísticos de la cadena de valorización. La ausencia de cualquiera de los tres hace inviable el modelo en su configuración actual. Los demás actores son habilitadores, complementarios o beneficiarios, pero no son condición necesaria para el prototipo de 100 metros.

Matriz RACI aplicada al modelo piloto

La Matriz RACI presentada en la Tabla 33, asigna responsabilidades a los actores reales del nodo para las 14 actividades principales del ciclo de vida del modelo, desde la entrega del NFU hasta el escalamiento regional:

Tabla 33: Matriz RACI aplicada - Actores reales del nodo Copiapó - Tierra Amarilla

Actividad	Candelaria/ Caserones	Municipio T.Amarilla	Resur / San Basilio	Bitumix Constructora	MOP/ SEREMI	MMA REP
Entrega de NFU al gestor local	R	I	C	I	I	I
Financiamiento del modelo (costo evitado REP)	A	C	I	I	I	I
Recolección y transporte del NFU	C	I	R	I	I	I
Producción de GCR certificado (molienda)	I	I	R	C	I	I

Actividad	Candelaria/ Caserones	Municipio T.Amarilla	Resur / San Basilio	Bitumix / Constructora	MOP/ SEREMI	MMA REP
Certificación granulometría GCR (ASTM D5644)	I	I	R/C	C	A	I
Fabricación mezcla asfáltica modificada	I	I	C	R	A	I
Habilitación faja vial y permisos municipales	I	A	I	C	C	I
Ejecución del tramo piloto (obra)	I	C	I	R	A	I
Registro RETC y trazabilidad del GCR	R	C	R	C	C	A
Recepción de obra y control de calidad	C	A	I	R	C	I
Mantenimiento preventivo de la ciclovía	I	R	I	C	I	I
Reporte de cumplimiento REP al MMA	R	I	C	I	I	A
Monitoreo de desempeño técnico y social	C	C	I	C	A	I
Evaluación para escalamiento regional	C	C	I	I	A	C

Nota: Leyenda: R = Responsable (ejecuta); A = Accountable (decide / responsable final); C = Consulted (participa activamente); I = Informed. Elaboración propia a partir de Smith (2005). Elaboración propia.

El análisis de la Matriz RACI revela dos patrones relevantes para la gestión del modelo. Primero, la empresa minera tiene rol R exclusivamente en la entrega del NFU y el reporte REP, y rol A únicamente en el financiamiento. Esto es intencional: la minera es el actor que toma la decisión estratégica de participar y asume la responsabilidad financiera, pero no gestiona operaciones fuera de su competencia. Segundo, el MOP/SEREMI tiene rol A en el diseño técnico, la ejecución de obra y el monitoreo, lo que garantiza que el producto final cumple los estándares viales exigibles para infraestructura pública independientemente de las preferencias de los otros actores.

5.5.2 Flujo logístico y operacional del ciclo cerrado - Nodo Copiapó - Tierra Amarilla

En la Tabla 34 se aprecia el flujo operacional del modelo en el nodo específico y se estructura en seis etapas, con actores, distancias y tiempos reales del territorio:

Tabla 34: *Flujo Operacional del Modelo*

Etapa	Actor responsable	Distancia	Tiempo	Documento de control	KPI
1. Generación NFU	Minera	0 km	4–8 h	RETC	ton NFU
2. Transporte	Gestor	20 km	30 min	Guía despacho	\$/ton
3. Molienda GCR	Procesador	—	2 días	Certificado calidad	% rechazo
4. Producción mezcla	Bitumix	12 km	1 día	Control planta	Temperatura
5. Construcción	Contratista	10 km	2 días	ITP	Densidad
6. Operación	Municipio	—	Permanente	RETC + KPIs	Disponibilidad

Nota. Elaboración propia

1. Generación y derivación del NFU en faena (Candelaria, km 0). La minera identifica los NFU fuera de especificación, emite la guía de despacho RETC con código de residuo y cantidad, y los deriva al gestor autorizado local. Los NFU OTR de Candelaria se generan a aproximadamente 20 km del centro de Copiapó, lo que hace operativamente viable el retiro directo en un radio que antes requería 565 km de transporte.
2. Logística inversa al centro de acopio y corte (Resur / San Basilio, Copiapó, km 15–25). El gestor autorizado retira los NFU en camión de carga adecuada para neumáticos OTR de gran tonelaje y los transporta al centro de acopio en el sector industrial de Copiapó. El tiempo estimado de transporte es de 30 minutos, frente a las 7,5 horas del flujo actual a La Negra, Antofagasta.
3. Producción de GCR certificado (centro de procesamiento local, Copiapó). El gestor realiza el corte, trituración y — con la nueva capacidad de molienda de precisión — produce GCR con granulometría inferior a 0,8 mm conforme a ASTM D5644. El GCR es certificado por laboratorio acreditado (NCh-ISO 17020) y entregado a Bitumix con certificado de calidad y guía de despacho RETC.
4. Fabricación de la mezcla asfáltica modificada (Bitumix, Cuesta Cardones, km 12 desde el centro de Copiapó). Bitumix incorpora el GCR al ligante asfáltico por vía húmeda (digestión 45–60 min a 170–190°C) y produce la mezcla modificada conforme a las especificaciones de la Fase 3. La distancia de 12 km entre Bitumix y el tramo piloto garantiza que la mezcla llega a obra en temperatura de compactación óptima ($\geq 155^{\circ}\text{C}$) en menos de 20 minutos.
5. Implementación del tramo piloto (corredor Copiapó–Tierra Amarilla, km 10–20 desde Bitumix). La empresa constructora aplica la mezcla en el tramo piloto de 100 metros conforme al protocolo de la Fase 3 (Tabla 5.3.3). Una vez enfriada la base, se aplica la capa fotoluminiscente. El municipio de Tierra Amarilla habilita la faja vial y coordina el cierre temporal del corredor durante la ejecución.

6. Operación, mantenimiento y registro (municipio de Tierra Amarilla, ciclo continuo). El municipio asume el mantenimiento preventivo de la ciclovía con el protocolo de la Fase 6. El sistema RETC registra el cierre del ciclo: toneladas de NFU valorizados, kilómetros de infraestructura generada y origen de la faena minera. La minera recibe el certificado de origen que acredita el cumplimiento REP ante el MMA.

Comparativamente, el esquema actualmente utilizado, basado en el envío del NFU hacia plantas ubicadas en Antofagasta y el eventual retorno del material procesado, requiere entre 3 y 6 semanas, dependiendo de la disponibilidad logística y de procesamiento.

La reducción superior al 70 % del tiempo total del ciclo, junto con la disminución de más del 90 % de la distancia de transporte, constituye uno de los principales beneficios del modelo propuesto, ya que mejora simultáneamente la eficiencia logística, disminuye costos operacionales, reduce emisiones de gases de efecto invernadero y fortalece el cumplimiento de los principios de economía circular establecidos por la Ley REP.

5.5.3 Canvas de Economía Circular aplicado al modelo

El Business Model Canvas para Economía Circular (Lewandowski, 2016), adaptado del modelo Canvas de Osterwalder & Pigneur (2010), permite estructurar de manera integrada los flujos de valor del modelo, identificando cómo cada bloque genera valor para los distintos actores del sistema y dónde se producen los incentivos que hacen sostenible el modelo sin dependencia de subsidios permanentes. La Tabla 35 presenta el Canvas aplicado al caso específico del nodo Copiapó–Tierra Amarilla:

Tabla 35: *Canvas de Economía Circular aplicado al modelo NFU- Ciclovía fotoluminiscente*

Bloque Canvas Circular	Contenido aplicado al modelo NFU → Ciclovía
PROPUESTA DE VALOR CIRCULAR	Transformar NFU mineros OTR (pasivo ambiental) en GCR para ciclovía fotoluminiscente (activo territorial). Valor para la minera: cumplimiento REP + ESG. Valor para el municipio: infraestructura de calidad a costo compartido. Valor para la comunidad: seguridad vial nocturna + identidad territorial.
SEGMENTOS DE CLIENTES / BENEFICIARIOS	Primarios: empresas mineras (Candelaria, Caserones) como generadoras con obligación REP. Secundarios: municipios de Copiapó y Tierra Amarilla como receptores del beneficio urbano. Terciarios: comunidad residente en el corredor como usuaria final de la infraestructura.
FLUJOS DE MATERIALES (CICLO CERRADO)	NFU OTR (faena minera) → corte primario (Resur/San Basilio) → molienda de precisión (nueva capacidad local) → GCR certificado → mezcla asfáltica modificada (Bitumix) → pavimento ciclovía piloto → mantenimiento → reutilización GCR fresado al fin de vida útil.
SOCIOS CLAVE	Mineras generadoras (residuo + financiamiento REP), gestores autorizados (procesamiento), Bitumix (producción mezcla), Municipios (faja vial + mantenimiento), Gobierno Regional (FNDR/FIC-R), MOP (validación técnica), MMA (certificación RETC).
ACTIVIDADES CLAVE	Gestión logística inversa del NFU (15–60 km), certificación granulométrica del GCR (ASTM D5644), producción de mezcla modificada (vía húmeda), implementación del protocolo RETC, monitoreo de desempeño técnico y social (ciclo PDCA), escalamiento a corredores adicionales.

Bloque Canvas Circular	Contenido aplicado al modelo NFU → Ciclovía
RECURSOS CLAVE	NFU OTR generados en el nodo (15.000–20.000 ton/año), gestores con resolución sanitaria vigente, planta asfáltica con capacidad de vía húmeda (Bitumix), corredor vial con demanda de intervención, marco normativo habilitante (Ley REP + MOP 2026).
ESTRUCTURA DE COSTOS COMPARTIDOS	Minera: costo de valorización NFU (~180–400 USD/ton, costo evitado vs. La Negra). Gobierno Regional/Municipio: CAPEX del tramo (FNDR/FIC-R). Gestor: inversión en molienda de precisión (USD 800.000–1.500.000, amortizable en 5–8 años con masa crítica). Bitumix: ajuste de proceso para vía húmeda.
FLUJOS DE INGRESOS / VALOR CAPTURADO	Minera: reducción costo logístico REP + mejora indicadores ESG + acreditación trazabilidad. Municipio: infraestructura con LCC favorable (–20 a –50% OPEX vs. convencional). Gestor: nuevo mercado de GCR para uso vial. Bitumix: diferenciación de producto en mercado asfáltico regional.
INDICADORES DE CIRCULARIDAD	Tasa de cierre de ciclo: % NFU valorizados localmente / total generado en nodo. MCI: 0,58–0,65 (dosificación 2% GCR). Reducción huella CO ₂ logística: –96,5%. B/C social: 1,43. SROI preliminar monetizado 1,50.

Nota. Elaboración propia a partir de Lewandowski (2016) y Osterwalder & Pigneur (2010), adaptado al modelo de gobernanza interinstitucional del nodo Copiapó–Tierra Amarilla.

El Business Model Canvas evidencia que la sostenibilidad del modelo se basa en la alineación de incentivos entre los actores, donde cada uno financia el componente que le genera mayor valor y retorno, favoreciendo un esquema de financiamiento compartido y replicable sin subsidios permanentes. En este contexto, la Tabla 36 complementa el análisis al sintetizar la creación y captura de valor del modelo de gestión interinstitucional, identificando para cada actor sus aportes, beneficios, incentivos e indicadores de desempeño, lo que permite visualizar la distribución de responsabilidades y los retornos generados por el sistema.

Tabla 36: Matriz de creación y captura de valor del modelo de gestión interinstitucional

Actor	¿Qué aporta?	¿Qué recibe?	Incentivo principal	KPI asociado
Minera	NFU + financiamiento REP	Cumplimiento REP, reducción de costos logísticos, mejora ESG	Cumplimiento regulatorio	% NFU valorizados
Gestor	Corte, trituración, molienda y certificación	Venta de GCR	Nuevo mercado regional	ton GCR/año
Bitumix	Producción de mezcla modificada	Diferenciación tecnológica	Mayor competitividad	ton mezcla con GCR
Municipio	Faja vial y mantenimiento	Infraestructura sostenible	Reducción del costo de ciclo de vida	\$/km mantenido
Gobierno Regional	Financiamiento inicial	Desarrollo territorial	Impacto regional	Proyectos replicados
Comunidad	Uso de la infraestructura	Mayor seguridad vial y calidad urbana	Bienestar social	Índice de satisfacción

Nota.: Elaboración propia

5.5.4 Modelo de sostenibilidad financiera aplicado

El modelo de sostenibilidad financiera se basa en un esquema de costos compartidos, donde cada actor financia las actividades asociadas a los beneficios que obtiene. Esta distribución de responsabilidades reduce la dependencia de financiamiento externo y favorece la continuidad y escalabilidad del modelo. La Tabla 37 presenta la estructura de costos compartidos, indicando los montos estimados por componente, el actor financiador, los instrumentos de financiamiento y las condiciones que sustentan su viabilidad económica.

Tabla 37: Estructura de costos compartidos y sostenibilidad financiera del modelo

Componente	Monto estimado	Actor financiador	Instrumento	Condición de sostenibilidad
Inversión en molienda de precisión (GCR < 0,8 mm)	USD 800.000–1.500.000 (~UF 22.000–41.000*)	Resur o San Basilio + CORFO/FIC-R	Línea CORFO economía circular + FIC-R regional	Amortizable en 5–8 años con 8.000–10.000 ton/año comprometidas por contrato de suministro
CAPEX tramo piloto 100 m (mezcla + capa fotoluminiscente)	~UF 28.000–36.500 (~\$280.000–\$365.000/m lineal × 100 m*)	Municipio Tierra Amarilla + Gobierno Regional	FNDR o FIC-R regional + aporte municipal	Costo equivalente o inferior a intervención convencional subvencionada en el horizonte LCC 15 años
Costo de valorización NFU (procesamiento + transporte local)	~USD 50–80/ton GCR producido (vs. USD 180–400/ton a La Negra*)	Empresa minera (Candelaria + Caserones)	Costo operacional REP (obligatorio por Ley 20.920)	Reducción de costo logístico del 70–85% respecto del escenario actual; incentivo económico directo
Capa fotoluminiscente (reposición año 6–8)	~UF 1.500/100 m (~\$15.000/m lineal × 100 m*)	Municipio (OPEX)	Presupuesto municipal de mantenimiento vial	Costo inferior al mantenimiento mayor del pavimento convencional en el mismo período
Sistema de trazabilidad RETC (implementación y operación)	~USD 5.000–8.000/año (costo compartido entre actores*)	Minera + gestor autorizado	Parte del costo de cumplimiento REP	Sin costo incremental significativo respecto de obligación RETC ya existente

Nota. (*) Valores estimados con base en precios de referencia de mercado regional (2024). Requieren actualización con cotizaciones reales antes de la implementación física. Elaboración propia.

El análisis de sostenibilidad financiera confirma que el modelo no requiere transferencias unilaterales ni subsidios permanentes de ningún actor hacia otro. Cada componente del financiamiento tiene una lógica de retorno directo para el actor que lo financia: la minera reduce su costo logístico REP en un 70–85%, el municipio reduce su OPEX vial en un 20–50% en el horizonte de 15 años, el gestor abre un mercado de GCR inexistente en la región y Bitumix accede a un insumo diferenciado a precio competitivo. El único componente que requiere financiamiento externo —la inversión en molienda de precisión— tiene un horizonte de amortización de 5 a 8 años con la masa crítica de NFU comprometida contractualmente, lo que lo convierte en una inversión con retorno verificable y no en un subsidio.

Sistema de indicadores de desempeño con líneas base y metas

Con el propósito de evaluar el desempeño del modelo de gestión, se definió un sistema de indicadores que integra las dimensiones logística, económica, ambiental, técnica y de gobernanza. La Tabla 38 presenta el sistema de indicadores aplicado al nodo, con la línea base actual, la meta al cierre de la Fase 1 (prototipo 100 m) y la meta escalada a 1 km de corredor:

Tabla 38: Sistema de indicadores de desempeño con líneas base y metas- Nodo Copiapó – Tierra Amarilla

Indicador	Línea base (situación actual)	Meta al cierre de Fase 1 (100 m)	Meta escala 1 km (Fase 2)	Estado criterio
Distancia media transporte NFU (km)	565 km (a La Negra)	15–25 km (gestor local)	15–25 km	↓ 96% ✓
Costo logístico NFU (USD/ton)	180–400 USD/ton	50–80 USD/ton (est.)*	50–80 USD/ton	↓ 70–85% ✓
NFU valorizados localmente (ton/año)	0 ton (todo a La Negra)	3,5 ton (prototipo)	≥ 350 ton/año (1 km)	Progresivo ✓
VAN diferencial LCC 15 años	No aplica (sin modelo)	VAN > 0 (est.)*	VAN > 0	✓ preliminar
B/C social (CBS-SNI)	No aplica	B/C base = 1,43; sensibilidad = 1,03–1,83 (est.)*	1,4–2,1	≥ 1,3 ✓
Puntaje AMC-ESG (AHP)	No aplica	79,3/100 (est.)	79,3/100	≥ 70 ✓
Reducción huella CO ₂ logística	0% (escenario base)	–96% (vs. La Negra)	–96%	≥ 70% ✓
MCI del tramo piloto	~0,03 (pavimento convencional)	0,58–0,65 (2% GCR)	0,58–0,65	≥ 0,55 ✓
BPN resistencia al deslizamiento	Línea base medida in situ (Fase 1)	≥ 60 BPN	≥ 60 BPN	Verificar en obra
Cumplimiento RACI (% actividades con R asignado)	No aplica	100% (diseño)	≥ 90% (ejecución)	Verificar en Fase 6
Corredores replicables identificados	0	2 (Calama + Alto Hospicio)	≥ 2 validados	✓ preliminar

Nota. () Valores estimados requieren actualizarse durante la etapa de ingeniería de detalle mediante con cotizaciones y datos reales operacionales. ✓ = criterio satisfecho en estimación preliminar. Elaboración propia.*

El sistema de indicadores propuesto constituye la herramienta de monitoreo y evaluación del modelo, permitiendo medir el grado de cumplimiento de los objetivos establecidos y respaldar, mediante evidencia cuantitativa, su validación y potencial de replicabilidad en otros territorios.

Análisis de riesgos aplicado al nodo

La Tabla 39 presenta el análisis de riesgos específico del nodo Copiapó -Tierra Amarilla, con las estrategias de mitigación aplicadas a los actores reales identificados:

Tabla 39: Análisis de riesgo específico del nodo Copiapó- Tierra Amarilla

Riesgo específico del nodo	Probabilidad	Impacto	Estrategia de mitigación aplicada	Responsable
Candelaria o Caserones no comprometen suministro contractual de NFU al gestor local	Media	Alto	Estructurar contrato de suministro de mínimo 3 años como condición previa al inicio del piloto. Vincular explícitamente al cumplimiento meta REP 2026 (60%). El costo evitado de \$180–400 USD/ton es el argumento económico central.	Empresa minera + Gestor autorizado
GCR producido por Resur/San Basilio no alcanza granulometría < 0,8 mm sin nueva inversión	Alta	Alto	Ejecutar prototipo con GCR de La Negra (Otre recycling, Antofagasta) en Fase 1 mientras se gestiona financiamiento FIC-R para molienda local. No bloquea el prototipo; lo hace más costoso en la primera iteración.	Gestor autorizado + CORFO/FIC-R
Dirección de Vialidad MOP no habilita la especificación técnica especial en tiempo hábil	Baja	Alto	Iniciar consulta normativa con Dirección de Vialidad en la Fase 0, antes de cualquier desembolso. La actualización MOP enero 2026 con vía semi húmeda reduce significativamente este riesgo.	MOP + Equipo técnico del proyecto
Municipio de Tierra Amarilla no tiene disponibilidad presupuestaria en el ejercicio fiscal correspondiente	Media	Medio	Postular al FNDR con anticipación mínima de 18 meses. Involucrar al Gobierno Regional como co-financiador desde la Fase 0. Explorar modalidad de aporte en especie (faja vial + maquinaria municipal).	Municipio + Gobierno Regional
Capa fotoluminiscente pierde luminancia por polvo desértico acumulado antes del período esperado	Media	Medio	Diseñar protocolo de mantenimiento mensual (limpieza de superficie) como parte del plan de mantenimiento municipal. Incluir cláusula de garantía de desempeño con el proveedor por mínimo 3 años.	Municipio + proveedor fotoluminiscente
Cambio de autoridades municipales interrumpe la continuidad del modelo post-elecciones	Media	Alto	Formalizar el Convenio Marco con valor legal independiente de las autoridades de turno. Involucrar al Gobierno Regional como garante institucional de largo plazo.	Municipio + Gobierno Regional + Equipo proyecto

Riesgo específico del nodo	Probabilidad	Impacto	Estrategia de mitigación aplicada	Responsable
			Documentar el modelo como política pública territorial.	
Bitumix no puede producir mezcla vía húmeda con el equipamiento actual sin inversión adicional	Baja	Alto	Verificar capacidad técnica de Bitumix en Fase 0 mediante visita técnica. Si se requiere inversión, explorar esquema de co-inversión con la empresa minera o el gestor. Ecmovial como alternativa con mayor flexibilidad operativa.	Bitumix + Equipo técnico

Nota. Prob. = probabilidad de ocurrencia (Alta/Media/Baja). Elaboración propia a partir del análisis del ecosistema de actores del nodo.

El riesgo de mayor probabilidad combinada con mayor impacto —la incapacidad técnica del gestor local para producir GCR de granulometría fina sin nueva inversión— está mitigado mediante una estrategia de secuenciamiento: el prototipo puede ejecutarse en la Fase 1 con GCR proveniente de Otreycling en La Negra, mientras se gestiona el financiamiento para la molienda local en la Fase 2. Esta estrategia sacrifica parte del argumento de valorización territorial en la primera iteración, pero garantiza que el prototipo se ejecuta con material certificado y que la evidencia técnica generada sustenta la inversión en molienda local con datos reales en lugar de proyecciones.

5.5.5 Análisis de transferibilidad y corredores candidatos

Con el propósito de evaluar el potencial de replicabilidad del modelo, se realizó un análisis comparativo de corredores viales pertenecientes a otras regiones mineras del norte de Chile, utilizando los siete criterios de transferibilidad definidos en la metodología. La Tabla 40 presenta la comparación entre el corredor piloto Copiapó–Tierra Amarilla y los corredores Calama–Chuquicamata y Alto Hospicio–Huara, permitiendo identificar las condiciones territoriales, logísticas e institucionales necesarias para su implementación en otros contextos.

Tabla 40: Análisis de transferibilidad del modelo- Corredor piloto vs corredores candidatos

Criterio de transferibilidad	Corredor piloto Copiapó–Tierra Amarilla	Corredor candidato 1 Calama–Chuquicamata (Antofagasta)	Corredor candidato 2 Alto Hospicio–Huara (Tarapacá)
Masa crítica NFU (mínimo 8.000 ton/año)	15.000–20.000 ton/año ✓ (Candelaria, Caserones, Mantoverde)	30.000–50.000 ton/año ✓✓ (Escondida, Chuquicamata, El Abra)	8.000–12.000 ton/año ✓ (Collahuasi, Cerro Colorado)
Gestores autorizados locales	Resur + San Basilio (acopio y corte) ✓ parcial	Otreycling + Rembre (valorización completa) ✓✓	Gestores en desarrollo ✓ incipiente
Planta asfáltica local	Bitumix (Cuesta Cardones) ✓	Varias plantas en Calama ✓✓ alta disponibilidad	Plantas en Iquique / Alto Hospicio ✓ disponible
Corredor con tráfico pesado minero	Ruta C-35 Copiapó–T. Amarilla ✓ (Candelaria y Caserones)	Ruta 25 Calama–Chuquicamata ✓✓ (tráfico CAEX intenso)	Ruta A-16 Alto Hospicio–Huara ✓ (Collahuasi)
Municipio con demanda de infraestructura vial	Tierra Amarilla ✓ (alta prioridad de conectividad)	Calama ✓✓ (municipio con presupuesto robusto)	Alto Hospicio ✓ (crecimiento urbano acelerado)
Marco normativo habilitante (REP vigente)	DS N°8 aplicable ✓	DS N°8 aplicable ✓	DS N°8 aplicable ✓
Condición climática favorable fotoluminiscencia	2.500 kWh/m ² -año ✓✓	2.800 kWh/m ² -año ✓✓ (mayor radiación)	3.100 kWh/m ² -año ✓✓ (máximo del país)
Evaluación global de transferibilidad	CASO PILOTO (referencia del modelo)	ALTA ✓✓ (condiciones superiores al piloto en 4/7 criterios)	MEDIA-ALTA ✓ (condiciones equivalentes en 5/7 criterios)

Nota. ✓✓ = condiciones superiores al caso piloto; ✓ = condiciones equivalentes; ✓ incipiente = condiciones en desarrollo, pero presentes. Elaboración propia a partir de COCHILCO (2022) y análisis territorial de los corredores.

Los resultados indican que ambos corredores cumplen los criterios mínimos de transferibilidad definidos para el modelo. En particular, Calama–Chuquicamata presenta las condiciones más favorables para una primera replicación, mientras que Alto Hospicio–Huara ofrece un alto potencial de implementación condicionado al fortalecimiento de la capacidad local de gestión de NFU. Estos resultados respaldan la aplicabilidad del modelo en otros territorios mineros con características similares.

5.5.6 Juicio de expertos: protocolo y panel propuesto

El juicio de expertos constituye el mecanismo de validación externa del modelo y opera como la última actividad de la Fase 5 antes de la transición a la Fase 6. Su propósito es someter el diseño completo del modelo, especificaciones técnicas, resultados de la evaluación integral y arquitectura de gobernanza, a la evaluación crítica de actores con experiencia directa en los dominios relevantes, incorporando perspectivas que el análisis documental no puede capturar.

Composición del panel de expertos

El panel propuesto integra cinco perfiles complementarios, cada uno aportando una perspectiva específica sobre las dimensiones críticas del modelo:

1. Profesional de la Dirección de Vialidad Regional del MOP con experiencia en especificaciones técnicas de pavimentos flexibles y conocimiento del Manual de Carreteras 2026. Su evaluación del diseño técnico de la mezcla GCR es la validación normativa más relevante para la implementación del prototipo.
2. Profesional del área de sustentabilidad o gestión ambiental de Minera Candelaria o Caserones, con conocimiento directo del sistema REP y del costo actual de disposición de NFU. Su evaluación del modelo de gobernanza y la estructura de financiamiento determina si el argumento del costo evitado es suficiente para motivar la participación corporativa.
3. Representante del Gobierno Regional de Atacama con responsabilidad en la administración del FNDR y el FIC-R. Su evaluación de la postulabilidad del modelo a instrumentos de financiamiento regional es crítica para la viabilidad del CAPEX del tramo piloto.
4. Académico de la Universidad de Atacama o la USM sede Copiapó con especialización en ingeniería vial, materiales de construcción o economía circular. Su evaluación metodológica aporta la perspectiva de rigor científico independiente necesaria para validar las estimaciones de la Fase 4.
5. Representante de la comunidad de Tierra Amarilla o de una organización comunitaria del corredor, preferentemente con conocimiento del uso cotidiano del corredor vial. Su evaluación de la pertinencia territorial y la aceptación social del proyecto aporta la perspectiva del usuario final que ningún análisis técnico puede sustituir.

Protocolo de evaluación Delphi de dos rondas

La validación se realizará mediante un método Delphi de dos rondas (Linstone & Turoff, 1975). En la primera ronda, cada experto evaluará de forma independiente los cinco componentes del modelo —diseño técnico, evaluación económica (LCC), análisis costo-beneficio social (CBS), evaluación AMC-ESG y arquitectura de gobernanza— utilizando una escala de 1 a 5 con criterios previamente definidos. En la segunda ronda se presentarán los resultados consolidados y anónimos de la evaluación inicial, permitiendo a los participantes revisar sus calificaciones a partir de las observaciones del grupo. Finalmente, las recomendaciones consensuadas se incorporarán al modelo y las observaciones pendientes se registrarán como parte de la hoja de ruta para su implementación y escalamiento.

5.6 Fase 6: Validación, Monitoreo y Mejora Continua

La Fase 6 cierra el ciclo metodológico de la investigación mediante la validación, el monitoreo y la mejora continua del modelo propuesto. En esta etapa, las estimaciones desarrolladas en las fases anteriores se contrastan con datos obtenidos durante la implementación del tramo piloto, permitiendo verificar el cumplimiento de los indicadores, identificar oportunidades de mejora y fortalecer la evidencia necesaria para evaluar la replicabilidad y el escalamiento del modelo.

5.6.1 Protocolo de verificación de criterios

La validación del modelo se realizará mediante la verificación de los criterios definidos en la metodología, utilizando indicadores, instrumentos de medición y puntos de control previamente establecidos. Para cada criterio se identifican el método de verificación, el momento de evaluación y las acciones a seguir en caso de desviaciones respecto de las metas definidas. La Tabla 41 presenta el protocolo de validación del modelo piloto.

Tabla 41: Protocolo de validación formal- Criterios, instrumentos reales y acciones correctivas

Criterio	Valor proyectado (Fase 4)	Instrumento de medición real	Momento de verificación	Acción si no se satisface
VAN diferencial LCC a 15 años > 0	VAN positivo; payback años 8–12*	Actualización del LCC con CAPEX y OPEX reales de la obra; cotizaciones de Bitumix y constructora	Al cierre de la obra (Fase 1) y al año 3 de operación (primer ciclo PDCA)	Revisar diseño de mezcla o renegociar contrato de producción con Bitumix para reducir CAPEX
Razón B/C social $\geq 1,3$	B/C base estimado 1,43* Sensibilidad 1,03–1,83 =	Aplicación del CBS con datos reales de accidentabilidad nocturna CONASET y de flujo de ciclistas medido en el tramo	A los 12 meses de apertura del tramo piloto	Ampliar el análisis CBS a mayor longitud del corredor donde los beneficios de seguridad escalan más rápido que los costos
Reducción huella CO ₂ logística $\geq 70\%$	Reducción estimada –96%*	Registro de guías de despacho RETC (distancias reales de transporte); factores de emisión verificados	Al cierre del ciclo RETC (Etapa 7 del protocolo de trazabilidad)	Este criterio tiene baja incertidumbre dado que depende de distancias geográficas verificables; solo se compromete si el GCR proviene de La Negra en la Fase 1
Puntaje AMC-ESG $\geq 70/100$	Puntaje estimado 79,3/100	Re-aplicación del AMC con consulta estructurada Delphi al panel de expertos con datos reales del prototipo ejecutado	Al cierre de la Fase 1 ante el panel de expertos (Sección 4.6.9)	Identificar qué criterio ESG bajó respecto de la proyección y diseñar acción correctiva específica (técnica, comunicacional o contractual)
SROI > 1,0	SROI preliminar estimado 1,50	Actualización del SROI con inversión efectiva, beneficiarios reales y beneficios sociales	A los 12 meses de operación	Si SROI < 1,0 revisar supuestos de valorización de externalidades; explorar

Criterio	Valor proyectado (Fase 4)	Instrumento de medición real	Momento de verificación	Acción si no se satisface
		efectivamente observados		beneficios adicionales no incluidos en el modelo inicial
Corredores replicables identificados ≥ 2	2 candidatos (Calama–Chuquicamata y Alto Hospicio–Huará)	Verificación de condiciones de transferibilidad mediante entrevistas con actores clave de los corredores candidatos	Al cierre de la Fase 5 (juicio de expertos)	Identificar barreras específicas de cada corredor candidato y diseñar Plan de Activación para el de mayor potencial

Nota. (*) En una futura implementación, la validación formal permitirá reemplazar las estimaciones de la Fase 4 por mediciones obtenidas durante la operación del tramo piloto.

5.6.2 Sistema de monitoreo continuo del nodo Copiapó–Tierra Amarilla

Estructura del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo propuesto contempla evaluaciones semestrales durante los tres primeros años de operación y evaluaciones anuales a partir del cuarto año, permitiendo verificar el desempeño del modelo y detectar oportunamente desviaciones respecto de las metas establecidas. La Tabla 42 presenta los indicadores, la frecuencia de medición, los responsables y los reportes asociados

Tabla 42 : Sistema de monitoreo continuo — Indicadores, instrumentos y responsables

Indicador	Frecuencia	Instrumento de medición	Responsable primario	Responsable secundario	Reporte a
Distancia media transporte NFU (km)	Semestral	Registro guías RETC; kilometraje declarado	Gestor autorizado	Empresa minera	Mesa Técnica + MMA
Costo logístico por ton NFU (USD/ton)	Semestral	Facturación del gestor a la minera; comparación con cotización La Negra vigente	Empresa minera	Gestor autorizado	Mesa Técnica
NFU valorizados localmente (ton/año)	Semestral	Declaración RETC consolidada del período	Gestor autorizado	MMA/REP	Mesa Técnica + MMA
OPEX real de mantenimiento (CLP/m·año)	Anual	Liquidación presupuestaria municipal de mantenimiento vial	Municipio Tierra Amarilla	Equipo técnico	Mesa Técnica
BPN resistencia al deslizamiento	Anual (primavera)	Medición con péndulo británico ASTM E303 en 5 puntos del tramo	MOP/SEREMI	Constructora (garantía)	Mesa Técnica + MOP

Indicador	Frecuencia	Instrumento de medición	Responsable primario	Responsable secundario	Reporte a
Luminancia fotoluminiscente L(t=60 min)	Semestral	Medición con luxómetro calibrado a 60 min de oscuridad; 3 puntos del tramo	Municipio + proveedor	Equipo técnico	Mesa Técnica
Nivel de ruido de rodadura (dB(A))	Anual	Medición ISO 11819-1 en condición seca a 30 km/h; 3 puntos del tramo	MOP/SEREMI	Organismo técnico independiente	Mesa Técnica + MOP
Tasa de accidentabilidad nocturna corredor	Semestral	Registro CONASET para el corredor C-35; comparación pre/post intervención	Municipio	CONASET	Mesa Técnica + MDS
Flujo de ciclistas (viajes/día)	Semestral	Contador de ciclistas instalado en el tramo piloto (sensor infrarrojo o lazo magnético)	Municipio Tierra Amarilla	Equipo técnico	Mesa Técnica
Cumplimiento metas REP (% vs. DS N°8)	Anual	Declaración formal ante MMA; comparación con meta vigente del año (25% 2023 / 60% 2026 / 100% 2030)	Empresa minera	MMA/REP	MMA + Contraloría
Percepción ciudadana del proyecto (escala 1–5)	Anual	Encuesta estructurada a muestra de 50 residentes del corredor; pre/post y evolutiva	Municipio Tierra Amarilla	Equipo de investigación	Mesa Técnica + Gobierno Regional
Puntaje AMC-ESG actualizado	Anual	Re-aplicación del instrumento con datos reales del período; consulta a representantes de la minera	Equipo de investigación	Empresa minera	Mesa Técnica

Nota. El sistema de monitoreo es operado conjuntamente por el municipio de Tierra Amarilla (como receptor del beneficio urbano), el MOP/SEREMI (como autoridad técnica vial) y la empresa minera (como garante del cumplimiento REP). Los costos de medición son parte del costo operativo del modelo asignado a cada actor en la Matriz RACI. Elaboración propia.

5.6.3 Ciclo PDCA de mejora continua aplicado al nodo

Las cuatro etapas del ciclo aplicadas al modelo

Con el fin de asegurar la mejora continua del modelo, se propone la aplicación anual del ciclo **PDCA (Plan–Do–Check–Act)**, utilizando como insumo los resultados del sistema de monitoreo. Este proceso permite identificar desviaciones respecto de las metas establecidas, implementar acciones correctivas, verificar su efectividad e incorporar los aprendizajes al modelo para fortalecer su desempeño y facilitar su escalamiento. La **Tabla 43** presenta las actividades, responsables, documentos de registro y periodicidad de cada etapa del ciclo.

Tabla 43: *Ciclo PDCA aplicado al modelo de gestión*

Etapa PDCA	Actividad específica en el nodo	Actores involucrados	Documento de registro	Periodicidad
PLANIFICAR (Plan)	Revisar los indicadores del ciclo de monitoreo anterior. Identificar los que no alcanzaron su umbral de validación. Priorizar según impacto y controlabilidad. Diseñar acciones correctivas con responsable, plazo y métrica de éxito. Actualizar el plan de mantenimiento y el contrato de suministro de NFU si corresponde.	Mesa Técnica Permanente (minera + municipio + gestor + MOP)	Acta de planificación del ciclo PDCA; plan de acciones correctivas con responsables y plazos	Anual (enero de cada año operativo)
EJECUTAR (Do)	Implementar las acciones correctivas aprobadas en la etapa Plan. Las que afectan el diseño técnico requieren visado del MOP. Las que afectan la gobernanza requieren acuerdo de la Mesa Técnica. Las que afectan el contrato de suministro requieren adenda firmada por las partes. Documentar toda desviación respecto del plan de ejecución.	Responsable asignado por acción correctiva (según Matriz RACI)	Bitácora de ejecución de acciones correctivas; actas de reunión Mesa Técnica; adendas contractuales cuando corresponda	Durante el semestre siguiente a la planificación
VERIFICAR (Check)	Medir nuevamente el indicador que motivó la acción correctiva, una vez vencido el plazo de implementación. Comparar el nuevo valor con el umbral de validación y con el valor del período anterior. Si el indicador supera el umbral: documentar la acción como práctica exitosa. Si no lo supera: activar análisis de causa raíz de segundo nivel.	MOP/SEREMI + organismo técnico independiente + equipo de investigación	Informe de verificación de acciones correctivas; actualización de la tabla de indicadores con valores medidos	A los 6 meses de la implementación de cada acción correctiva

Etapa PDCA	Actividad específica en el nodo	Actores involucrados	Documento de registro	Periodicidad
ACTUAR (Act)	Incorporar los aprendizajes del ciclo al modelo: actualizar la documentación técnica (especificación de mezcla, protocolo RETC, Convenio Marco), la hoja de ruta de escalamiento y los criterios de transferibilidad para los corredores candidatos. Comunicar los resultados del ciclo a todos los actores del modelo y al Gobierno Regional como garante institucional.	Equipo de investigación + Mesa Técnica + Gobierno Regional	Versión actualizada del documento técnico del modelo; informe anual de desempeño; comunicado a actores y al Gobierno Regional	Al cierre de cada ciclo PDCA (diciembre de cada año operativo)

Nota. El ciclo PDCA será coordinado por la Mesa Técnica Permanente, con apoyo del equipo de investigación durante la implementación del tramo piloto. Posteriormente, la coordinación será asumida por los actores responsables del modelo. Elaboración propia a partir de Deming (1986) e ISO 9001:2015.

Desvíos esperados y acciones correctivas anticipadas

Como complemento al sistema de monitoreo, se propone un catálogo de desvíos potenciales y sus acciones correctivas, con el propósito de orientar la toma de decisiones durante la implementación del modelo. A diferencia de la matriz de riesgos desarrollada en la Fase 5, este instrumento se enfoca en las desviaciones que podrían detectarse durante la operación del tramo piloto y en las medidas de mejora asociadas. La Tabla 44 presenta los principales desvíos previstos, sus causas probables, las acciones correctivas y los responsables de su implementación.

Tabla 44: Catálogo de desvíos esperados en el primer ciclo PDCA y acciones correctivas anticipadas

Indicador en riesgo	Desvío esperado (escenario probable)	Causa raíz probable	Acción correctiva propuesta	Responsable
OPEX real mayor al proyectado (CAPEX +40% sobre convencional)	El proveedor de GCR cobra más del estimado o Bitumix requiere ajuste de proceso costoso	Cotizaciones reales superiores a referencias de mercado; inversión adicional en Bitumix no anticipada	Renegociar precio del GCR con gestor usando argumento del volumen comprometido. Explorar financiamiento parcial del ajuste de Bitumix por la minera como costo REP.	Empresa minera + Gestor + Bitumix

Indicador en riesgo	Desvío esperado (escenario probable)	Causa raíz probable	Acción correctiva propuesta	Responsable
BPN < 60 en tramo o sector específico	Pérdida de adherencia superficial por exceso de ligante o desgaste de la capa de rodadura	Dosificación de GCR más alta de lo óptimo; envejecimiento superficial acelerado por radiación UV	Aplicar tratamiento superficial de microaglomerado en el sector afectado. Revisar dosificación de GCR en futuras mezclas.	Constructora (garantía) + MOP/SEREMI
Luminancia fotoluminiscente < 7,8 mcd/m ² a t=60 min antes de año 3	Degradación acelerada del pigmento por polvo desértico o abrasión de ciclistas y peatones	Acumulación de polvo que filtra la radiación solar reduciendo la carga diurna; desgaste mecánico del recubrimiento	Implementar protocolo de limpieza mensual de la superficie (agua a presión baja). Si persiste, aplicar recapa fotoluminiscente con formulación de mayor resistencia a la abrasión (ASTM D4060 ≥ 5%).	Municipio Tierra Amarilla + proveedor fotoluminiscente
Tasa de accidentabilidad nocturna sin reducción verificable a 12 meses	No se detecta reducción estadísticamente significativa en el corredor respecto del período pre-intervención	El tramo piloto de 100 m es insuficiente para cambiar la tasa global del corredor; la iluminación nocturna en otros tramos sigue siendo el factor dominante	Extender el análisis CBS a la longitud completa del corredor con demarcación fotoluminiscente. Gestionar ante el municipio la habilitación de los tramos adyacentes como Fase 2.	Municipio + CONASET + MDS
Flujo de ciclistas inferior al proyectado (< 50 viajes/día)	Baja adopción del corredor por ciclistas en el período inicial	Falta de conexión del tramo piloto con la red ciclista existente en Copiapó o Tierra Amarilla; percepción de seguridad insuficiente en tramos adyacentes	Diseñar plan de conectividad que integre el tramo piloto a la red existente. Campaña comunicacional de uso del corredor. Encuesta a potenciales usuarios sobre barreras de adopción.	Municipio Copiapó + Municipio Tierra Amarilla
NFU comprometidos por Candelaria por debajo de la masa	Renovación de contrato con La Negra antes de la	Ventana de oportunidad no aprovechada; inercia contractual	Activar negociación contractual en Fase 0 antes de que venza el contrato vigente con	Empresa minera + Gobierno Regional

Indicador en riesgo	Desvío esperado (escenario probable)	Causa raíz probable	Acción correctiva propuesta	Responsable
crítica (< 8.000 ton/año)	firma del contrato de suministro local	con el proveedor actual	La Negra. Involucrar al Gobierno Regional como facilitador de la negociación.	

Nota. El catálogo se actualiza anualmente en la etapa Planificar del ciclo PDCA, incorporando los desvíos reales observados en el período anterior. Elaboración propia a partir del análisis de riesgos de la Fase 5 y literatura de proyectos similares (FHWA, 2018; Rubber Pavements Association, 2020).

En términos generales, las desviaciones identificadas pueden ser abordadas mediante ajustes técnicos, operacionales o de gestión, sin requerir modificaciones estructurales al modelo. La principal excepción corresponde a la disponibilidad de una masa crítica de NFU, condición que constituye el factor más relevante para asegurar la viabilidad y escalabilidad de la cadena de valorización propuesta.

Contribución de la Fase 6 a la validez externa del modelo

La Fase 6 fortalece el modelo de gestión al incorporar un procedimiento de validación, monitoreo y mejora continua para su futura implementación. Mediante el seguimiento de indicadores y la aplicación del ciclo PDCA, se establecen los mecanismos para verificar el desempeño del modelo, identificar oportunidades de mejora y respaldar su ajuste y escalamiento en otros corredores viales con características similares.

6 PLANES DE ACCIÓN Y MEJORA

6.1 Del modelo piloto hacia la transformación sistémica del territorio minero

Los Planes de Acción y Mejora complementan el modelo de gestión al definir las acciones necesarias para favorecer su implementación, escalamiento e institucionalización. Mientras la Fase 6 establece los mecanismos de validación, monitoreo y mejora continua, este capítulo propone acciones orientadas a fortalecer el entorno normativo, institucional, territorial y de política pública, con el propósito de facilitar la replicabilidad del modelo en otros corredores viales de regiones mineras.

6.1.1 Plan de Acción Nivel 1: Marco Normativo Habilitante

El fortalecimiento del marco normativo es un requisito para facilitar la implementación y el escalamiento del modelo, generando condiciones regulatorias que favorezcan la valorización territorial de los NFU y reduzcan la necesidad de acuerdos específicos en cada nueva aplicación.

Con este propósito, en la Tabla 45 se proponen cinco acciones organizadas según su horizonte de implementación y las condiciones necesarias para su activación.

Tabla 45: Plan de Acción Normativo - Cinco acciones con horizontes y condiciones de activación

Acción normativa	Instrumento propuesto	Organismo responsable	Horizonte	Condición de activación
Incorporar cláusulas de compra circular en bases de licitación MOP para pavimentos en regiones mineras	Circular técnica de la Dirección de Vialidad que exija un porcentaje mínimo de insumos reciclados de origen regional en contratos viales > UF 5.000 en regiones con generación REP certificada	MOP – Dirección de Vialidad + MMA	Corto plazo (2025–2026)	Presentación del informe de validación del prototipo piloto con B/C $\geq 1,3$ ante la Dirección de Vialidad
Modificar el DS N°8 para incorporar incentivos de valorización territorial	Adición de un artículo que otorgue bonificación de meta REP (+10%) a las empresas mineras que acrediten valorización del NFU en infraestructura pública de la misma región donde se generó el residuo	MMA – División de Residuos y Basura	Mediano plazo (2026–2027)	Acumulación de al menos 3 casos documentados de valorización territorial en regiones mineras, incluyendo el piloto de Atacama
Establecer precio de referencia para el GCR de origen minero en contratos públicos	Resolución del MMA que fije un precio sombra de referencia para el GCR proveniente de NFU mineros en aplicaciones viales, facilitando la comparación con áridos convencionales en evaluaciones de proyectos públicos	MMA + MOP + MIDEPLAN	Mediano plazo (2026–2028)	Disponibilidad de datos de costos reales del prototipo piloto y de al menos un corredor replicado
Crear la figura de Zona de Economía Circular Minera (ZECM) para la Región de Atacama	Propuesta legislativa o decreto regional que otorgue a Atacama estatus especial de laboratorio nacional de economía circular minera, habilitando acceso preferente a instrumentos CORFO y FIC-R para proyectos de valorización territorial de residuos mineros	Gobierno Regional de Atacama + CORFO + Congreso Nacional	Largo plazo (2027–2030)	Validación del modelo en al menos 2 corredores regionales con resultados publicados y presentados al MMA y MOP
Incorporar indicadores de valorización territorial en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de proyectos mineros	Modificación del reglamento del SEIA para exigir que los EIA de proyectos mineros de gran escala incluyan un plan de valorización territorial de NFU vinculado al ciclo de vida del proyecto	SEA – Servicio de Evaluación Ambiental + MMA	Largo plazo (2028–2030)	Evidencia acumulada de beneficios territoriales del modelo en múltiples corredores regionales

Nota. Las acciones de corto plazo pueden impulsarse con los resultados del tramo piloto, mientras que las de mediano y largo plazo requieren evidencia acumulada de futuras implementaciones del modelo. Elaboración propia.

En conjunto, las acciones propuestas buscan fortalecer el marco regulatorio para favorecer la economía circular en el sector minero. En el corto plazo, la incorporación de criterios de compra circular en las licitaciones del MOP constituye la medida de mayor factibilidad e impacto inmediato, mientras que, en el largo plazo, la creación de una Zona de Economía Circular Minera permitiría consolidar un entorno institucional que favorezca la replicabilidad y el escalamiento del modelo.

6.1.2 Plan de Acción Nivel 2: Arquitectura Institucional para la Replicación

El fortalecimiento institucional es fundamental para asegurar la continuidad y replicabilidad del modelo de gestión. Con este propósito, la Tabla 46 presenta cinco acciones orientadas a consolidar mecanismos de coordinación, fortalecer las capacidades técnicas, facilitar el intercambio de información y promover instrumentos de financiamiento y cooperación que apoyen la implementación del modelo en otros corredores viales de regiones mineras.

Tabla 46: Plan de Acción Institucional - Cinco acciones para la arquitectura de replicación

Acción institucional	Mecanismo propuesto	Actores	Horizonte	Resultado esperado
Crear la Mesa Intersectorial Minería–Municipios–Universidad para economía circular en el norte de Chile	Instancia de coordinación permanente convocada por el Gobierno Regional de Atacama, integrada por representantes de las tres faenas mineras del nodo, los municipios de Copiapó y Tierra Amarilla, la USM sede norte, la Universidad de Atacama y CORFO. Sesiones trimestrales con agenda de seguimiento del modelo y de identificación de nuevas aplicaciones.	Gobierno Regional + Mineras + Municipios + USM + UDA + CORFO	Corto plazo (2025)	Plataforma institucional estable que no depende de la voluntad individual de ningún actor y que sobrevive a los cambios de autoridades municipales o gerencias corporativas
Desarrollar un programa de capacitación técnica local en producción de GCR y mezclas asfálticas modificadas	Programa de formación técnica de 120 horas desarrollado conjuntamente por la USM sede norte, la Universidad de Atacama y Bitumix, orientado a operadores de planta, inspectores de obra y gestores autorizados de la Región de Atacama. Certificado por el SENCE.	USM + UDA + Bitumix + SENCE + Gestores locales	Corto-mediano plazo (2025–2026)	Capital humano local con competencias en GCR que reduce la dependencia de técnicos externos y fortalece la cadena de valor regional
Establecer un protocolo de intercambio de información entre el sistema RETC y el sistema de inversión pública SNI-MIDEPLAN	Acuerdo interinstitucional MMA–MDS que permita que los datos de valorización territorial declarados en el RETC sean automáticamente reconocidos como beneficios ambientales en las evaluaciones CBS de	MMA + MDS + SNI-MIDEPLAN	Mediano plazo (2026–2027)	Reducción del costo de elaboración del CBS para proyectos similares, eliminando la necesidad de reconstruir la cadena de trazabilidad ambiental en cada evaluación

Acción institucional	Mecanismo propuesto	Actores	Horizonte	Resultado esperado
	proyectos de infraestructura vial que utilicen GCR			
Crear un Fondo Sectorial de Economía Circular Minera cofinanciado por las empresas mineras del norte	Fondo privado de aporte voluntario de las empresas mineras de la macrozona norte (Atacama, Antofagasta, Tarapacá), administrado por el Consejo Minero, destinado a cofinanciar la inversión en molienda local de GCR en corredores donde el GCR genere infraestructura pública para las comunidades adyacentes a las faenas.	Consejo Minero + AMSA + BHP + Codelco + Lundin Mining	Mediano plazo (2026–2028)	Fuente de financiamiento para la inversión en molienda que no depende de instrumentos públicos con tiempos de adjudicación largos, acelerando el escalamiento del modelo
Publicar el modelo como caso de estudio en red internacional de economía circular minera	Publicación del modelo en la plataforma del International Council on Mining and Metals (ICMM) y presentación en el congreso anual de la Ellen MacArthur Foundation como caso de referencia de valorización territorial de residuos mineros en Latinoamérica.	USM + Empresa minera + ICMM + Ellen MacArthur Foundation	Mediano-largo plazo (2027–2028)	Posicionamiento internacional de Atacama como referente de economía circular minera; atracción de inversión en tecnologías de valorización; visibilidad para futuras alianzas con organismos internacionales

Nota. Las acciones institucionales son independientes entre sí y pueden desarrollarse de manera complementaria. La Mesa Intersectorial constituye el principal mecanismo de coordinación para su implementación. Elaboración propia.

En conjunto, las acciones institucionales buscan consolidar la gobernanza del modelo mediante la coordinación entre los actores, el desarrollo de capacidades locales y la generación de redes de colaboración que faciliten su implementación y escalamiento en otros territorios.

6.2 Hoja de Ruta Integrada de los Cuatro Niveles

La Tabla 47 integra los cuatro niveles de acción propuestos - normativo, institucional, territorial y de política pública, en un horizonte de implementación 2025-2030, mostrando la secuencia y complementariedad de las acciones necesarias para favorecer el escalamiento del modelo.

Tabla 47 Hoja de ruta integrada — Cuatro niveles de acción en el horizonte 2025–2030

Período	Nivel normativo	Nivel institucional	Nivel territorial	Nivel política pública
2025 (Fase 0–1)	Consulta normativa MOP sobre especificación técnica especial GCR. Inicio proceso circular técnica Vialidad.	Constitución Mesa Intersectorial Minería–Municipios–USM en Atacama. Inicio programa capacitación técnica GCR.	Implementación prototipo 100 m Copiapó–Tierra Amarilla. Inicio monitoreo semestral.	Decreto Zona Laboratorio Economía Circular Minera Atacama. Incorporación indicadora NFU territorial en informe Consejo Minero.
2026 (Fase 2–3)	Publicación circular técnica MOP compra circular en licitaciones viales. Inicio proceso modificación DS N°8.	Lanzamiento Fondo Sectorial Economía Circular Minero. Acuerdo RETC–SNI–MIDEPLAN.	Inicio activación corredor Calama–Chuquicamata. Ejecución prototipo local 100 m.	Postulación FNIC en Ley de Presupuestos 2027. Inicio desarrollo NCh-GCR con INN.
2027 (Fase 3–4)	Publicación modificación DS N°8 con incentivo de valorización territorial. Precio de referencia GCR en contratos públicos.	Publicación modelo en ICM y Ellen MacArthur Foundation. Intercambio internacional con experiencias comparadas.	Inicio activación corredor Alto Hospicio–Huara. Validación de los dos corredores replicados.	FNIC operativo en Ley de Presupuestos. Primeros proyectos financiados con GCR regional.
2028–2030 (Fase 4+)	Propuesta legislativa ZECM. Modificación reglamento SEIA para incluir plan valorización NFU en EIA mineros.	Modelo institucionalizado como política territorial de Atacama. Red latinoamericana de economía circular minera.	≥ 5 corredores viales con GCR de origen local en norte de Chile. Meta REP 100% para NFU mineros cumplida en Atacama.	Presentación en COP. Protocolo créditos carbono por valorización NFU. NCh-GCR publicada y en Manual de Carreteras MOP.

Nota. Los plazos son referenciales y podrán ajustarse según el avance del modelo, la disponibilidad de recursos y las decisiones de los organismos responsables. *Elaboración propia.*

La hoja de ruta sintetiza la estrategia de implementación del modelo, articulando acciones de corto, mediano y largo plazo que buscan favorecer su validación, consolidación y replicabilidad en otros corredores viales de regiones mineras.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente investigación permitió diseñar y evaluar un modelo de gestión interinstitucional para la valorización de neumáticos fuera de uso (NFU) mineros mediante su incorporación en infraestructura urbana sostenible, tomando como caso de estudio el corredor Copiapó–Tierra Amarilla. Los resultados obtenidos permiten concluir que el objetivo general y los objetivos específicos fueron abordados satisfactoriamente, respaldando la hipótesis de que un modelo de gestión basado en principios de economía circular puede transformar un residuo minero en un recurso para el desarrollo territorial, generando beneficios técnicos, económicos, ambientales y sociales. A continuación, se presentan los principales hallazgos, las limitaciones, los aportes de la investigación y las recomendaciones derivadas del estudio.

7.1 Principales hallazgos de la investigación

Desempeño técnico del caucho reciclado en el contexto de Atacama

La revisión de la literatura y el análisis desarrollado confirman que las mezclas asfálticas modificadas con granulado de caucho reciclado (GCR) ofrecen mayor durabilidad, mejor comportamiento frente a las variaciones térmicas y menores niveles de ruido que los pavimentos convencionales. En la Región de Atacama, estas ventajas se potencian debido a la alta radiación solar, que favorece el funcionamiento de la capa fotoluminiscente, y a las condiciones climáticas del desierto, donde la mayor elasticidad del GCR contribuye a reducir la fisuración del pavimento.

En consecuencia, el modelo propuesto presenta condiciones técnicas favorables para su aplicación en el corredor Copiapó–Tierra Amarilla, respaldando la utilización de una estructura de dos capas compuesta por una base asfáltica con GCR y una capa superficial fotoluminiscente.

Viabilidad económica del modelo

La evaluación económica demuestra que la viabilidad del modelo no depende de un menor costo inicial, ya que el pavimento con GCR presenta un CAPEX superior al convencional. Su principal ventaja radica en el menor costo del ciclo de vida, debido a una mayor durabilidad y a una reducción estimada de entre 20 % y 50 % en los costos de mantenimiento, lo que permite recuperar la inversión inicial en un horizonte de 8 a 12 años.

Adicionalmente, el modelo genera un beneficio económico directo para las empresas mineras al reducir el costo logístico de cumplimiento de la Ley REP desde aproximadamente 180–400 USD/ton hasta 50–80 USD/ton, equivalente a un ahorro estimado de 70 % a 85 %. Este resultado constituye uno de los principales incentivos para la implementación del modelo, al alinear el cumplimiento ambiental con la optimización de costos.

Beneficios ambientales del modelo

La evaluación ambiental demuestra que la valorización local de los NFU genera beneficios significativos respecto al escenario convencional. La reducción de la distancia de transporte desde aproximadamente 565 km a un radio local de 15–25 km permite disminuir la huella de carbono logística en torno al 96 %. Asimismo, el análisis de ciclo de vida estima una reducción de 367 kg de CO₂ equivalente para el tramo piloto de 100 m y un Índice de Circularidad de Materiales (MCI) entre 0,58 y 0,65, evidenciando un alto aprovechamiento de recursos recuperados.

Adicionalmente, el modelo incorpora un sistema de trazabilidad basado en el RETC que permite acreditar la valorización de los NFU, fortaleciendo el cumplimiento de la Ley REP y la generación de indicadores ambientales verificables para los reportes de sostenibilidad de las empresas mineras.

Gobernanza e incentivos del modelo

La evaluación de la gobernanza demuestra que la viabilidad del modelo depende de la alineación de incentivos entre los actores involucrados. La empresa minera reduce costos logísticos y fortalece el cumplimiento de la Ley REP y sus compromisos ESG; el municipio accede a infraestructura de mayor durabilidad; el gestor desarrolla un nuevo mercado para el GCR; la empresa asfáltica incorpora un producto de mayor valor agregado; y la comunidad obtiene una infraestructura urbana con beneficios en seguridad vial.

Esta articulación, sustentada en la Matriz RACI, el Business Model Canvas de Economía Circular y el Convenio Marco Interinstitucional, constituye uno de los principales aportes del modelo, al demostrar que la colaboración entre los actores puede sostenerse mediante beneficios compartidos y no exclusivamente por compromisos voluntarios.

7.2 Limitaciones de la investigación

La presente investigación presenta cuatro limitaciones que deben ser consideradas al interpretar sus resultados. En primer lugar, el diseño de la mezcla asfáltica con GCR se fundamenta en antecedentes de la literatura y en especificaciones técnicas de referencia, por lo que su desempeño deberá validarse mediante ensayos de laboratorio y pruebas en terreno. En segundo lugar, la evaluación económica se desarrolló con precios de referencia de mercado, por lo que el análisis de costo del ciclo de vida deberá actualizarse con cotizaciones reales durante la implementación del piloto.

En tercer lugar, el modelo corresponde a una propuesta conceptual y estratégica, por lo que el tramo piloto aún no ha sido ejecutado ni monitoreado en condiciones reales. Finalmente, el análisis de gobernanza se basó en la revisión documental, el marco normativo y la evaluación de incentivos, sin incorporar entrevistas formales a los actores involucrados, aspecto que podrá fortalecerse durante la etapa de implementación.

Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, sino que delimitan el alcance de la investigación y establecen las principales líneas de trabajo para la validación empírica y el perfeccionamiento del modelo en futuras etapas.

7.3 Aporte de la investigación

El principal aporte de esta investigación no radica en demostrar la factibilidad del uso del caucho reciclado en pavimentos ni en describir el marco regulatorio de la Ley REP, aspectos ampliamente abordados por la literatura. Su contribución consiste en el diseño de un modelo de gestión interinstitucional que integra la valorización territorial de los NFU mineros mediante un sistema de incentivos alineados, capaz de articular a los actores públicos y privados bajo un enfoque de economía circular.

El modelo propuesto trasciende una aproximación conceptual al incorporar una arquitectura operativa compuesta por especificaciones técnicas para el uso de GCR en pavimentos, un sistema de trazabilidad basado en el RETC, una estructura de gobernanza sustentada en la Matriz RACI y el Business Model Canvas de Economía Circular, además de un protocolo de implementación, monitoreo y escalamiento aplicable al corredor Copiapó–Tierra Amarilla.

En este sentido, la principal contribución de la investigación es ofrecer una arquitectura de gestión adaptable para la valorización territorial de NFU mineros, proporcionando una base metodológica que puede ser replicada y ajustada a otros corredores viales y territorios mineros con características similares.

7.4 Recomendaciones

Las siguientes recomendaciones se fundamentan en los resultados obtenidos durante la investigación y están orientadas a facilitar la implementación, validación y escalamiento del modelo de gestión propuesto. Para favorecer su aplicación, se organizan según los principales actores involucrados y el horizonte de ejecución, priorizando aquellas acciones con mayor impacto en la consolidación del modelo.

7.4.1 Recomendaciones para las empresas mineras

Se recomienda que las empresas mineras evalúen la implementación de acuerdos de suministro de NFU con gestores autorizados locales como una estrategia para optimizar el cumplimiento de la Ley REP y reducir los costos asociados a la gestión de estos residuos. De acuerdo con los resultados de esta investigación, el procesamiento local podría disminuir el costo logístico desde aproximadamente 180–400 USD/ton a 50–80 USD/ton, representando un ahorro estimado de 70 % a 85 % respecto del esquema actual de transporte hacia Antofagasta.

Asimismo, se recomienda incorporar estas iniciativas en las estrategias de sostenibilidad y en los reportes ESG, utilizando indicadores verificables como toneladas de NFU valorizadas, infraestructura ejecutada y trazabilidad mediante el sistema RETC, fortaleciendo la transparencia y la demostración del desempeño ambiental y territorial de la gestión de estos residuos.

7.4.2 Recomendaciones para los municipios

Se recomienda que el Municipio de Tierra Amarilla evalúe la postulación del tramo piloto de 100 metros a instrumentos de financiamiento regional, como el FNDR o el FIC-R, utilizando los antecedentes técnicos y económicos desarrollados en esta investigación. La evaluación beneficio-costosocial presenta una razón B/C de 1,43 en el escenario base, con un rango de sensibilidad entre 1,03 y 1,83. El resultado base supera el criterio de referencia $B/C \geq 1,30$, respaldando preliminarmente la pertinencia del proyecto como iniciativa de infraestructura urbana sostenible. No obstante, el escenario conservador se sitúa por debajo de dicho umbral, lo que evidencia la necesidad de validar los beneficios sociales estimados mediante datos reales durante la implementación y operación del tramo piloto.

Por su parte, se recomienda que los municipios incorporen criterios de compra pública circular en futuras licitaciones de infraestructura vial, promoviendo el uso de materiales reciclados de origen regional certificados bajo la Ley REP. Esta medida contribuiría a fortalecer la demanda por

materiales valorizados, favoreciendo el desarrollo de cadenas locales de economía circular y la consolidación del modelo propuesto.

7.4.3 Recomendaciones para el Ministerio de Obras Públicas y el Ministerio del Medio Ambiente

Se recomienda que la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas evalúe la emisión de una circular técnica que facilite la aplicación de especificaciones técnicas para mezclas asfálticas modificadas con GCR en proyectos piloto de regiones con generación de NFU bajo la Ley REP. Esta medida permitiría favorecer la implementación de iniciativas de valorización territorial mientras continúan los procesos de actualización normativa.

Asimismo, se recomienda que el Ministerio del Medio Ambiente evalúe la incorporación de incentivos a la valorización territorial en el marco del DS N°8, promoviendo el reconocimiento de aquellas empresas que acrediten la utilización de NFU valorizados en infraestructura pública dentro de la misma región donde se generó el residuo. Esta medida contribuiría a fortalecer la economía circular, incentivar la valorización local y potenciar los beneficios ambientales, sociales y económicos asociados al cumplimiento de la Ley REP.

7.4.4 Recomendaciones para la academia

Se recomienda que las universidades, en particular la Universidad Técnica Federico Santa María y la Universidad de Atacama, promuevan programas de formación técnica en producción de granulado de caucho reciclado (GCR) y mezclas asfálticas modificadas, en colaboración con empresas del sector y gestores autorizados. El fortalecimiento de las capacidades locales contribuirá a facilitar la implementación y sostenibilidad del modelo.

Asimismo, se recomienda desarrollar investigaciones experimentales utilizando materiales provenientes del nodo Copiapó–Tierra Amarilla, con el propósito de validar el desempeño de las mezclas asfálticas con GCR en condiciones locales y generar antecedentes técnicos que apoyen el desarrollo de futuras especificaciones y normas nacionales para este tipo de pavimentos.

8 BIBLIOGRAFIA

AASHTO (2020). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.

AASHTO. (2020). Standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing (40th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.

América Minera. (2025). Distrito Candelaria supera metas REP en valorización de neumáticos fuera de uso. <https://www.americaminera.com>

Ansell, C., & Gash, A. (2008). Collaborative governance in theory and practice. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 18(4), 543–571.

Araujo-Morera, J., Verdejo, R., López-Manchado, M. A., & Santana, M. H. (2021). Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. *Waste Management*, 126, 309–322.

ASTM International (2023). ASTM D6114/D6114M-19(2023): Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder.

ASTM International. (2023). ASTM D2950: Standard test method for density of bituminous concrete in place by nuclear methods. ASTM International.

ASTM International. (2023). ASTM D4060: Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the Taber abraser. ASTM International.

ASTM International. (2023). ASTM D5644: Standard test methods for rubber compounding materials — Determination of particle size distribution of recycled vulcanizate particulate rubber. ASTM International.

ASTM International. (2023). ASTM D6927: Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures. ASTM International.

ASTM International. (2023). ASTM E303: Standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester. ASTM International.

Banco Mundial. (2023). State and trends of carbon pricing 2023. World Bank Group.

Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Kluwer Academic Publishers.

Bocci, E., Canestrari, F., Cardone, F., & Graziani, A. (2023). Recyclability of reclaimed asphalt rubber pavement. *Construction and Building Materials*, 372, 130902.

Bressi, S. et al. (2019). A systematic review of crumb rubber use in road pavements. *Resources, Conservation and Recycling*.

Bressi, S., Fiorentino, N., Losa, M., & Venturini, L. (2019). A systematic review of crumb rubber use in road pavements: Mechanical performance and environmental implications. *Resources, Conservation and Recycling*, 143, 189–203.

BSI – British Standards Institution. (2008). BS ISO 15686-5: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. BSI.

Cao, R., Leng, Z., Yao, L., Zou, F., & Li, D. (2025). Comparative life cycle assessment of crumb rubber recycling technologies in asphalt rubber mixtures. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107534.

Caterpillar Inc. (2020). Caterpillar performance handbook (50th ed.). Caterpillar Inc.

COCHILCO – Comisión Chilena del Cobre. (2022). Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 2022. Ministerio de Minería de Chile.

COCHILCO – Comisión Chilena del Cobre. (2023). Proyección de la producción de cobre en Chile 2023–2034. Ministerio de Minería de Chile.

CONASET – Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito. (2023). Estadísticas de siniestralidad vial Chile 2022. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

Consejo Minero de Chile. (2023). Informe de sustentabilidad del sector minero chileno 2022. Consejo Minero.

CORFO – Corporación de Fomento de la Producción. (2023). Instrumentos de financiamiento para economía circular. CORFO.

Corfo. (2021). Hoja de ruta para la economía circular en Chile al 2040. Corporación de Fomento de la Producción. <https://www.corfo.cl>

Corfo. (2021). Hoja de ruta para la economía circular en Chile al 2040. Corporación de Fomento de la Producción. <https://www.corfo.cl>

Dabic-Miletic, S., Simic, V., & Karagoz, S. (2021). End-of-life tire management: A critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 68053–68070.

Deming, W. E. (1986). Out of the crisis. MIT Center for Advanced Engineering Study.

Dirección Meteorológica de Chile [DMC]. (2022). Estadísticas climatológicas estación Copiapó. Ministerio de Defensa Nacional.

Duan, K., Wang, X., Gao, Y., Wang, P., Xu, S., & Li, Y. (2022). Research progress and performance evaluation of crumb-rubber modified asphalt and mixture: A review. *Construction and Building Materials*, 343, 128142.

Edeskär, T., & Grahn, M. (2019). Recycled tyre rubber in asphalt pavements: A review of properties and applications. *Construction and Building Materials*, 213, 641–652.

Edeskär, T., & Grahn, T. (2019). Use of granulated rubber from waste tyres in civil engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 34–41.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Ellen MacArthur Foundation.

Ellen MacArthur Foundation. (2021). CIRCULYTICS — Measuring circularity. Ellen MacArthur Foundation.

European Commission (2019). End-of-Life Tyres: Waste Management and Circular Economy Applications. DG Environment.

European Commission. (2017). End-of-life tyres: A valuable resource with growing potential. Directorate-General for Environment.

European Commission. (2020). Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. Publications Office of the European Union.

European Commission. (2020). Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe. Publications Office of the European Union.

European Commission. (2020). Use of recycled rubber in road construction and infrastructure. Publications Office of the European Union.

European Commission. (2020). Use of recycled rubber in road construction and infrastructure. Publications Office of the European Union.

Federal Highway Administration. (2018). Rubberized asphalt concrete: Technology and environmental benefits. U.S. Department of Transportation.

Federal Highway Administration. (2018). Rubberized asphalt concrete: Technology and environmental benefits. U.S. Department of Transportation.

FHWA – Federal Highway Administration (2018). Rubberized Asphalt: State of the Practice. U.S. Department of Transportation.

FHWA – Federal Highway Administration. (2018). Rubberized asphalt: State of the practice. U.S. Department of Transportation.



Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. A., & Van Wassenhove, L. N. (2000). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1–17.

Frosch, R. A., & Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144–152.

González, R., & Pérez, M. (2020). Gestión de neumáticos fuera de uso en la gran minería: Desafíos logísticos y ambientales. *Revista de Ingeniería Industrial*, 41(2), 112–128.

GRI – Global Reporting Initiative. (2021). GRI Standards 2021: Universal standards and topic standards. GRI.

Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10–18.

Guitouni, A., & Martel, J. M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501–521.

Gunningham, N., Kagan, R. A., & Thornton, D. (2004). Social license and environmental protection: Why businesses go beyond compliance. *Law & Social Inquiry*, 29(2), 307–341.

Huang, G., Zhang, Y., Li, J., & Chen, X. (2024). Evaluation of crumb rubber modified asphalt-aggregate interaction and interfacial failure mechanisms. *Fuel*, 355, 129416.

Huang, G., Zhang, Y., Li, J., & Chen, X. (2024). Evaluation of crumb rubber modified asphalt-aggregate interaction and interfacial failure mechanisms. *Fuel*, 355, 129416.

ICMM – International Council on Mining and Metals. (2022). Mining principles: Performance expectations. ICMM.

IDE Chile – Infraestructura de Datos Espaciales de Chile. (2023). Cartografía vectorial de red vial y uso de suelo. Ministerio de Bienes Nacionales.

INE – Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Censo de Población y Vivienda 2017. INE Chile.

Infraestructura de Datos Espaciales de Chile [IDE Chile]. (2023). Cartografía vectorial de red vial y uso de suelo. Ministerio de Bienes Nacionales.

INN – Instituto Nacional de Normalización. (2022). Guía para el desarrollo de normas técnicas chilenas. INN.

International Council on Mining and Metals. (2022). Circular economy and mining: Opportunities for resource efficiency. ICMM.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.

ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. ISO.

ISO. (2015). ISO 9001:2015: Quality management systems — Requirements. International Organization for Standardization.

ISO. (2019). ISO 11819-1: Acoustics — Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical pass-by method. ISO.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.

Komatsu Mining. (2021). 830E-AC truck specifications and performance data. Komatsu Ltd.

Lewandowski, M. (2016). Designing the business models for circular economy — Towards the conceptual framework. *Sustainability*, 8(1), 43.

Ley N.º 20.920. (2016). Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl>

Li, D., Leng, Z., Yao, L., Cao, R., Zou, F., & Wang, H. (2024). Mechanical, economic, and environmental assessment of recycling reclaimed asphalt rubber pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 204, 107534.



Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). The Delphi method: Techniques and applications. Addison-Wesley.

Massari, M., Ragaini, E., & Vitali, F. (2021). Institutional governance models for industrial waste valorization in mining regions: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127–145.

Mendelow, A. L. (1991). Stakeholder mapping. *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems*, Cambridge, MA.

Michelin (2022). OTR Tyre Technical Specifications – Mining Category B Reference Guide.

Michelin. (2021). OTR tyre specifications and weight reference guide: Mining category B. Compagnie Générale des Établissements Michelin.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile [MDS]. (2021). Metodología de preparación y evaluación de proyectos de infraestructura vial urbana. SNI-MIDEPLAN.

Ministerio de Desarrollo Social y Familia de Chile [MDS]. (2023). Precios sociales vigentes para la evaluación de proyectos de inversión pública. SNI-MIDEPLAN.

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo de Chile. (2021). Hoja de ruta de economía circular para Chile 2021–2030. Ministerio de Economía.

Ministerio de Energía de Chile. (2020). Atlas solar de Chile: Recurso solar en superficies horizontales. Ministerio de Energía.

Ministerio de Energía de Chile. (2022). Informe de costos de valorización de residuos industriales en Chile. Ministerio de Energía.

Ministerio de Energía. (2022). Estudio de costos logísticos y valorización de residuos industriales en Chile. Gobierno de Chile.

Ministerio de Energía. (2022). Estudio de costos logísticos y valorización de residuos industriales en Chile. Gobierno de Chile.

Ministerio de Obras Públicas de Chile (2026). Manual de Carreteras, Volumen 5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (edición actualizada enero 2026).

Ministerio de Obras Públicas de Chile [MOP]. (2022). Conteo vehicular red vial nacional: Ruta C-35 y tramos adyacentes. Dirección de Vialidad.

Ministerio de Obras Públicas de Chile [MOP]. (2022). Manual de carreteras, volumen 5: Especificaciones técnicas generales de construcción. Dirección de Vialidad.

Ministerio de Obras Públicas de Chile [MOP]. (2026). Manual de carreteras, volumen 5 (edición enero 2026). Dirección de Vialidad.

Ministerio de Obras Públicas de Chile [MOP]. (2026). Manual de carreteras, volumen 5: Especificaciones técnicas generales de construcción (edición actualizada enero 2026). Dirección de Vialidad.

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile [MTT]. (2021). Beneficios sociales del transporte activo en Chile. MTT.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile [MMA]. (2016). Ley N°20.920: Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento al reciclaje. Diario Oficial de la República de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile [MMA]. (2021). Decreto Supremo N°8/2019: Reglamento de responsabilidad extendida del productor para neumáticos. MMA.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile [MMA]. (2021). Informe del estado del medio ambiente 2021: Residuos sólidos y neumáticos fuera de uso. MMA.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile [MMA]. (2021). Manual del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC). MMA.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2022). Decreto Supremo N.º 8: Reglamento de responsabilidad extendida del productor para neumáticos. Diario Oficial de la República de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Ley N.º 20.920: Marco para la gestión de residuos, responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Gobierno de Chile.



Ministerio del Medio Ambiente. (2016). Ley N.º 20.920: Marco para la gestión de residuos, responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Gobierno de Chile. <https://www.leyrep.cl>

Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Decreto Supremo N.º 8: Establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas a neumáticos. Gobierno de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Decreto Supremo N.º 8: Establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas a neumáticos. Gobierno de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2021). Diagnóstico nacional sobre neumáticos fuera de uso (NFU) en Chile. Gobierno de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2021). Diagnóstico nacional sobre neumáticos fuera de uso (NFU) en Chile. Gobierno de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2022). Implementación de la Ley REP y metas de valorización para neumáticos. Gobierno de Chile.

Nanjegowda, V. H., & Biligiri, K. P. (2020). Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104655.

Nicholls, J., Lawlor, E., Neitzert, E., & Goodspeed, T. (2012). *A guide to social return on investment* (2nd ed.). Cabinet Office, UK Government.

ODEPA. (2022). Economía circular en Chile: oportunidades para la valorización de residuos. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.

ODEPA. (2022). Economía circular en Chile: oportunidades para la valorización de residuos. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.

OECD. (2016). *Extended producer responsibility: Updated guidance for efficient waste management*. OECD Publishing.

OECD. (2016). *Extended producer responsibility: Updated guidance for efficient waste management*. Organisation for Economic Co-operation and Development.

Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Wiley.

Picado-Santos, L. G., Capitão, S., & Neves, J. (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 247, 118577.

Portal Minero. (2023). Costos de gestión y reciclaje de neumáticos fuera de uso en la industria minera chilena. <https://www.portalminero.com>

Portal Minero. (2023). Costos de gestión y reciclaje de neumáticos fuera de uso en la industria minera chilena. <https://www.portalminero.com>

Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, 89(1–2), 62–77.

Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, 89(1–2), 62–77.

Pro-Teq Surfacing (2014). *Starpath: Photoluminescent Surface Treatment Trial*. Cambridge, Escocia.

Pro-Teq Surfacing. (2014). *Starpath photoluminescent surface treatment: Technical report*. Pro-Teq Surfacing Ltd.

Pucher, J., & Buehler, R. (2012). *City cycling*. MIT Press.

Pérez-Martínez, A., López-García, J., & Sánchez-Hervás, J. M. (2020). Barriers and drivers for tire-derived rubber valorization in public infrastructure: A multi-actor analysis. *Waste Management*, 102, 45–58.

Rodvalho, E., Santos, J., & Cardoso, R. (2020). Reducing greenhouse gas emissions through efficient tire consumption in open pit mining operations. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123092.

Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1999). *Going backwards: Reverse logistics trends and practices*. Reverse Logistics Executive Council.



- Rubber Pavements Association (2020). Asphalt Rubber Usage Guide. Phoenix, AZ.
- Rubber Pavements Association. (2020). Asphalt rubber usage guide. Rubber Pavements Association.
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. MGCraw-Hill.
- SERNAGEOMIN – Servicio Nacional de Geología y Minería. (2019). Carta geológica de la Región de Atacama (escala 1:250.000). SERNAGEOMIN.
- Smith, M. (2005). The RACI matrix: A tool for project management. Project Management Journal, 36(2), 11–18.
- Studio Roosegaarde (2014). Van Gogh Path. Nuenen, Países Bajos.
- Su, Z., Wang, H., & Li, X. (2025). Enhancing compatibility of crumb rubber in modified asphalt using green desulfurization methods. Construction and Building Materials, 417, 132104.
- Tyre Stewardship Australia (2021). Tyre Derived Products: Technical Applications Guide.
- UNFCCC. (2021). Chile's nationally determined contribution (NDC) update 2021. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Universidad de Chile. (2021). Estudio sobre la gestión de neumáticos fuera de uso en Chile y oportunidades de valorización. Universidad de Chile.
- Universidad de Chile. (2021). Estudio sobre la gestión de neumáticos fuera de uso en Chile y oportunidades de valorización. Universidad de Chile.
- Universidad de Chile. (2024). Economía circular aplicada a residuos industriales en Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Universidad de Chile. (2024). Economía circular aplicada a residuos industriales en Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Van Tiggelen, M., Vaillancourt, M., & Perraton, D. (2019). Photoluminescent materials for road markings and pavements: A review. Construction and Building Materials, 227, 116–128.
- WBCSD – World Business Council for Sustainable Development. (2018). Tire industry project: End of life tires. WBCSD.
- WHO – World Health Organization. (2018). Environmental noise guidelines for the European region. WHO Regional Office for Europe.
- Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. Waste Management, 33(8), 1714–1728.
- Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. Waste Management, 33(8), 1714–1728.
- Williams, P. T. (2013). Pyrolysis of waste tyres: A review. Waste Management, 33(8), 1714–1728.
- World Business Council for Sustainable Development. (2018). Circular economy in the tire industry. WBCSD.
- World Economic Forum. (2020). Measuring stakeholder capitalism: Towards common metrics and consistent reporting of sustainable value creation. World Economic Forum.
- World Economic Forum. (2020). Measuring stakeholder capitalism: Towards common metrics and consistent reporting of sustainable value creation. World Economic Forum.
- World Economic Forum. (2020). Mining and metals in a sustainable world 2050. World Economic Forum.
- Zhang, X., Wu, S., & Chen, H. (2023). Performance evaluation of asphalt binder modified by pre-treated crumb rubber. Construction and Building Materials, 364, 129935.

9 SIGLAS

Sigla	Nombre completo	Enfoque / Definición
NFU	Neumáticos Fuera de Uso	Residuo generado una vez que el neumático termina su vida útil y debe ser gestionado o valorizado.
NMFU	Neumáticos Mineros Fuera de Uso	Subcategoría de NFU generada por la industria minera, especialmente por camiones de extracción de gran tonelaje.
BFU	Fin de Vida Útil	Estado operativo en el que un activo deja de cumplir su función y debe ser reemplazado o descartado.
CBS	Costo-Beneficio Social	
ESG	Environmental, Social and Governance	
SROI	Social Return on Investment	
Superpave	Superior Performing Asphalt Pavements	Es un sistema de diseño y especificación de mezclas asfálticas desarrollado en Estados Unidos en la década de 1990, como resultado del programa de investigación SHRP (Strategic Highway Research Program). Su nombre completo en español sería algo como pavimentos asfálticos de desempeño superior.
CAEX	Camión de Extracción	Vehículo minero de gran capacidad utilizado en operaciones de minería a cielo abierto para el transporte de material.
OTR	Off-The-Road Tires	Neumáticos de gran tamaño diseñados para maquinaria pesada utilizada fuera de carreteras, especialmente en minería.
GCR	Granulado de Caucho Reciclado	<i>En inglés, crumb rubber o ground tire rubber (GTR) según la norma.</i>
REP	Responsabilidad Extendida del Productor	Instrumento de política ambiental que obliga a los productores a responsabilizarse por la gestión de los residuos generados por sus productos.
RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes	Sistema nacional de reporte ambiental que permite declarar y monitorear la generación y gestión de residuos en Chile.
BPN	British Pendulum Number	Indicador obtenido mediante el equipo British Pendulum Tester que mide la fricción superficial del pavimento.
SCRIM	Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine	Equipo utilizado para medir la fricción longitudinal de pavimentos en carreteras de manera continua.
ESG	Environmental, Social and Governance	Conjunto de criterios utilizados para evaluar el desempeño ambiental, social y de gobernanza de las organizaciones.
GRI	Global Reporting Initiative	Es el estándar internacional más utilizado para reportes de sostenibilidad corporativa.

SASB	Sustainability Accounting Standards Board	Es un estándar norteamericano de reporte de sostenibilidad orientado específicamente a inversionistas financieros, para sus comunicaciones con fondos de inversión ESG. Candelaria (Lundin Mining) y Caserones (JX Nippon) están en esa categoría.
MMA	Ministerio del Medio Ambiente	Organismo del Estado de Chile encargado de la política ambiental y regulación de la gestión de residuos.
MOP	Ministerio de Obras Públicas	Institución responsable de la infraestructura pública y del Manual de Carreteras en Chile.
ICMM	International Council on Mining and Metals	Organización internacional que agrupa a empresas mineras para promover prácticas de minería responsable.
LCA	Life Cycle Assessment	Metodología de análisis ambiental que evalúa los impactos asociados al ciclo de vida completo de un producto o sistema.
LCC	Life Cycle Costing	Método de evaluación económica que considera los costos totales de una infraestructura durante su ciclo de vida.

10 ANEXOS

Capex

Superficie Base Tramo Piloto

Area Total = Largo x ancho=100x2,5m=250m²

Desglose de precios Unitarios por m²

Alternativa Convencional

(\$35,00MM/250m²)

Costo promedio Unitario Convencional

\$35.000.000/250m²=\$140.000CLP/m²

- Obras preliminares y subrastante \$35.000CLP/m² (25%) – demolición, excavación.
- Capa y subbase granular \$42.000CLP/m²(30%)-Estabilizado e imprimación.
- Capa de rodadura asfáltica tradicional \$49.000CLP/m²(35%)- Mezcla asfáltica en caliente 5cm.
- Demarcación básica y señalética \$14.000CLP/m² (10%) pintura acrílica de tráfico.

Alternativa GCR + Fotoluminiscente

(\$42,00MM/250m²)

Costo promedio Unitario GCR

\$42.000.000/250m²=\$168.000CLP/m²

- Estructura base idéntica a la convencional de tierra, subbase y mezcla estructural. \$140.000CLP/m² (83.3%) mismas partidas de movimiento
- Sobrecosto incorporación NFU/GCR \$16.000CLP/m²(9,5%) Aditivo caucho, modificación de ligante asfáltico y colocación especializada.
- Sobrecosto capa fotoluminiscente \$12.000CLP/m² (7,2%) resina/pigmento fotoluminiscente y sellante protector UV.

La Tabla 48 presenta la comparación entre el costo estimado de la solución convencional y la alternativa con GCR y tratamiento fotoluminiscente.

Tabla 48: Comparación de costos de las alternativas evaluadas

Concepto	Convencional	GCR + Fotoluminiscente	Diferencial (Δ)
Costo total tramo (100 m)	\$35,00 MM	\$ 42,00 MM	+\$7,00\MM
Superficie	\$250 m ²	\$250 m ²	—
Costo unitario por m ²	\$140.000CLP/m²	\$168.000 CLP/m²	\$28.000CLP/m²
Variación relativa	Base	+20,0%	+20,0%

Nota. Elaboración propia. Los costos corresponden a estimaciones de prefactibilidad para un tramo piloto de 100 m y una superficie de 250 m². El costo de la alternativa GCR + fotoluminiscente se obtiene considerando un costo base convencional de \$140.000 CLP/m², más \$16.000 CLP/m² asociados a la incorporación de GCR y \$12.000 CLP/m² correspondientes al tratamiento fotoluminiscente. Los valores deberán ser validados mediante cotizaciones de mercado previo a la implementación física del piloto. GCR = granulado de caucho reciclado; NFU = neumáticos fuera de uso; MM = millones de pesos chilenos; CLP = peso chileno.

Evaluación ambiental simplificada mediante LCA

Los cálculos se desarrollan para un horizonte de 15 años y utilizan una Tasa Social de Descuento (TSD) de 5,5%, consistente con la metodología adoptada en la Fase 4. La evaluación original utiliza precisamente un horizonte de 15 años y una TSD de 5,5%.

Para homogeneizar los valores monetarios se adoptan los siguientes valores de referencia:

- 1 UF = \$40.860 CLP
- 1 USD = \$920 CLP

Los valores económicos utilizados corresponden a una evaluación estimativa de prefactibilidad, construida a partir de los antecedentes técnicos y económicos disponibles y de los supuestos definidos en la Fase 4. En consecuencia, estos valores no representan cotizaciones comerciales definitivas y deberán ser validados o actualizados mediante cotizaciones reales durante la etapa de implementación física del piloto.

Para establecer un escenario único de cálculo dentro de los rangos definidos previamente, se adoptaron valores representativos y criterios conservadores. La Tabla 49 presenta los principales supuestos utilizados en la evaluación económica del proyecto.

Tabla 49: Supuestos generales de cálculo para la evaluación económica

Variable	Valor adoptado	Condición
Longitud piloto	100 m	Definida por el modelo
Horizonte	15 años	Definido en Fase 4
TSD	5,5%	Definida en Fase 4
Dosificación GCR	20% respecto del ligante	Escenario base
UF referencial	\$40.860 CLP	Valor actualizado para el anexo
USD referencial	\$920 CLP	Valor actualizado para el anexo
CAPEX convencional	\$35.000.000	Supuesto estimativo
CAPEX GCR	\$42.000.000	CAPEX convencional +20%
Diferencial CAPEX	\$7.000.000	Inversión incremental
Mantenimiento anual convencional	\$850.000/año	\$8.500/m año × 100 m
Mantenimiento anual GCR	\$552.500/año	Reducción estimada 35%
Intervención mayor convencional	Año 9	Dentro de rango año 8–10
Intervención mayor GCR	Año 13	Dentro de rango año 12–14
Reposición fotoluminiscente	Año 7	Dentro de rango año 6–8
Valor residual convencional año 15	5% CAPEX	Según Fase 4
Valor residual GCR año 15	15% CAPEX	Según Fase 4

Nota. Elaboración propia a partir de los supuestos y rangos establecidos en la Fase 4. Los valores adoptados corresponden a parámetros representativos utilizados para construir el escenario base de prefactibilidad y deberán ser validados mediante antecedentes de mercado y

cotizaciones reales previo a la implementación del piloto. TSD = tasa social de descuento; GCR = granulado de caucho reciclado; CAPEX = gasto de inversión; UF = unidad de fomento; USD = dólar estadounidense; CLP = peso chileno.

La Fase 4 establece un CAPEX de la alternativa GCR entre 20% y 30% superior al convencional, un mantenimiento convencional de aproximadamente \$8.500/m·año y una reducción del OPEX de aproximadamente 30% a 45% para GCR. Asimismo, sitúa las intervenciones mayores del pavimento convencional en los años 8–10 y las del GCR en los años 12–14.

Advertencia metodológica: el documento no establece el costo monetario específico de cada intervención mayor ni el costo de reposición de la capa fotoluminiscente. Por ello, los valores utilizados a continuación son supuestos explícitos de modelación para verificar la consistencia económica del modelo.

El análisis corresponde a un tramo piloto de 100 m y considera cuatro dimensiones:

1. Evaluación técnica.
2. Evaluación técnico-económica mediante LCC, VAN y TIR.
3. Evaluación social mediante análisis costo-beneficio.
4. Evaluación estratégica mediante AMC-ESG.

1 Evaluación técnica

Para transformar los rangos de desempeño técnico identificados en la revisión de antecedentes en un escenario único de evaluación, se adoptaron valores centrales representativos dentro de los intervalos definidos para cada indicador. Estos valores constituyen supuestos de cálculo para la evaluación del modelo y se presentan en la Tabla 50.

Tabla 50: Valores de Evaluación técnica

Indicador	Convencional	GCR 20%	Valor base adoptado
Recuperación elástica	5–15%	40–80%	60%
Ahuellamiento	6–12 mm	1–6 mm	3,5 mm
BPN	55–70	60–75	65
Reducción de ruido	0 dB	–3 a –5 dB(A)	–4 dB(A)
Vida útil	8–12 años	12–20 años	15 años
Temperatura mezcla	140–160°C	170–190°C	180°C

Nota. Elaboración propia a partir de los rangos técnicos recopilados en la revisión de antecedentes. Los valores base corresponden a valores centrales representativos adoptados como supuestos para la evaluación del escenario con 20 % de GCR y no constituyen resultados de ensayos experimentales del tramo piloto. GCR = granulado de caucho reciclado; BPN = British Pendulum Number; dB(A) = decibelios ponderados A

Los rangos utilizados corresponden a los valores presentados en la evaluación técnica de la Fase 4.

Resultado técnico

El escenario base permite adoptar como valores representativos:

- BPN = 65
- Recuperación elástica = 60%
- Ahuellamiento = 3,5 mm
- Reducción acústica = 4 dB(A)
- Vida útil de referencia = 15 años

Por lo tanto, la alternativa GCR cumple preliminarmente con los criterios técnicos y funcionales establecidos para el piloto.

2 Evaluación técnico-económica — LCC, VAN Y TIR

Inversión inicial

Se adopta un costo estimativo de:

Alternativa convencional

CAPEX = \$35.000.000

Equivalente en UF: $\$35.000.000 / \$40.860 = 856,6$ UF

Alternativa GCR

CAPEX = \$42.000.000

Equivalente en UF: $\$42.000.000 / \$40.860 = 1.027,9$ UF

Diferencial inicial $\$42.000.000 - \$35.000.000 = \$7.000.000$ equivalente a aproximadamente 171,3 UF

La Tabla 51 presenta los resultados de la evaluación del Costo del Ciclo de Vida (LCC), considerando los costos asociados al proyecto durante el horizonte de evaluación.

La Tabla 51 presenta la evaluación del costo del ciclo de vida (LCC) de ambas alternativas durante un horizonte de 15 años, considerando la inversión inicial, los costos de mantenimiento, las intervenciones mayores, la reposición del tratamiento fotoluminiscente y los valores residuales. Los flujos incrementales corresponden a la diferencia entre la alternativa GCR y la solución convencional y se actualizan mediante una tasa de descuento de 5,5 %.

Tabla 51: Evaluación del costo del ciclo de vida (LCC) de las alternativas

Año	Flujo convencional MM\$	Flujo GCR MM\$	Flujo incremental GCR-Conv. MM\$	Factor VP 5,5%	Flujo incremental VP MM\$
0	-35,000	-42,000	-7,000	1,0000	-7,000
1	-0,850	-0,553	+0,298	0,9479	+0,282
2	-0,850	-0,553	+0,298	0,8985	+0,267
3	-0,850	-0,553	+0,298	0,8516	+0,253
4	-0,850	-0,553	+0,298	0,8072	+0,240
5	-0,850	-0,553	+0,298	0,7651	+0,228
6	-0,850	-0,553	+0,298	0,7252	+0,216
7	-0,850	-2,553	-1,703	0,6874	-1,170
8	-0,850	-0,553	+0,298	0,6516	+0,194
9	-18,350	-0,553	+17,798	0,6176	+10,992
10	-0,850	-0,553	+0,298	0,5854	+0,174
11	-0,850	-0,553	+0,298	0,5549	+0,165
12	-0,850	-0,553	+0,298	0,5260	+0,156
13	-0,850	-8,953	-8,103	0,4986	-4,040
14	-0,850	-0,553	+0,298	0,4726	+0,141
15	+0,900	+5,748	+4,848	0,4479	+2,171

Nota. Elaboración propia a partir de los supuestos económicos establecidos para el escenario base. Los flujos negativos representan costos y los positivos, ahorros o valores residuales. El año 0 corresponde a la inversión inicial; en el año 7 se considera la reposición del tratamiento fotoluminiscente; en los años 9 y 13 se incorporan las intervenciones mayores de las alternativas convencional y GCR, respectivamente; y en el año 15 se incluyen los valores residuales. Los flujos incrementales se calculan como la diferencia entre los flujos de la alternativa GCR y la convencional y se actualizan a valor presente (VP) utilizando una tasa de descuento de 5,5 %. MM\$ = millones de pesos chilenos; GCR = granulado de caucho reciclado; LCC = costo del ciclo de vida.

Los cálculos se realizaron utilizando los valores sin redondear; las cifras presentadas en la tabla se muestran redondeadas a tres decimales.

VAN

El VAN incremental se obtiene mediante:

Sumando los flujos actualizados a 15 periodos (t=0 al 15) con una tasa del 5,5% (0,055).

VAN en moneda local: VAN +\$3.270.000 (expresado +\$3,27MM)

Conversión a UF: \$3.270.000/40.860 = 80UF

TIR

La TIR corresponde a la tasa que satisface:

Comparación:

$$0 = \sum_{t=0}^{15} \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t}$$

- TIR proyecto: **10,6%**

- TSD: 5,5%

Dado que $10,6\% > 5,5\%$ la rentabilidad del proyecto supera el costo oportunidad exigido. Por lo tanto, el proyecto es financieramente viable.

El valor calculado se encuentra además dentro del rango de 9% a 14% señalado originalmente en la Fase 4.

El resultado es positivo, por lo que la alternativa GCR recupera económicamente la inversión adicional en el escenario de prefactibilidad adoptado.

Payback

El flujo acumulado actualizado permanece negativo hasta el año 8:

Año 8: -\$6,49 MM

La intervención mayor del pavimento convencional evitada/postergada genera en el año 9 un beneficio diferencial relevante, produciendo:

Año 9: +\$4,50 MM acumulados en VP

3 Evaluación costo-beneficio social

La evaluación incorpora cuatro beneficios:

- reducción de accidentes;
- reducción del ruido;
- reducción de emisiones de CO₂;
- movilidad activa.

Beneficio anual por reducción de accidentes

Rango 28-45 UF /año

Valor UF \$40.860

Mínimo $28 \times \$40.860 = \$1.144.080/\text{Año}$

Máximo $45 \times \$40.860 = \$1.838.700/\text{año}$

Beneficio por reducción de ruido

Rango: USD 3.060–5.100/año

Con USD = \$920:

Mínimo: $3.060 \times \$920 = \$2.815.200/\text{año}$

Máximo: $5.100 \times \$920 = \$4.692.000/\text{año}$

Beneficio por reducción de CO₂

Rango: USD 70 – 140/año.

Mínimo: $70 \times \$920 = \$64.400/\text{año}$

Máximo: $140 \times \$920 = \$128.800/\text{año}$

Beneficio por movilidad activa

Rango: USD 548–1.460/año.

Mínimo: $548 \times \$920 = \$504.160/\text{año}$

Máximo: $1.460 \times \$920 = \$1.343.200/\text{año}$

Escenario central $4.527.840 + 8.002.700 = 12.530.540 / 2 = \$6.265.270/\text{año}$

Beneficio social total anual

La Tabla 52 presenta la estimación del beneficio social total anual asociado al tramo piloto, considerando las principales externalidades positivas monetizadas en el análisis. Los resultados se expresan como un rango mínimo y máximo, de acuerdo con los supuestos adoptados para cada componente.

Tabla 52: Beneficio social total anual estimado

Externalidad	Mínimo CLP/año	Máximo CLP/año
Accidentes	\$1.144.080	\$1.838.700
Ruido	\$2.815.200	\$4.692.000
CO ₂	\$64.400	\$128.800
Movilidad activa	\$504.160	\$1.343.200
TOTAL	\$4.527.840	\$8.002.700

Nota. Elaboración propia a partir de la monetización de las externalidades sociales consideradas en la evaluación. Los valores corresponden a estimaciones anuales expresadas en pesos chilenos (CLP).

Valor presente de los beneficios sociales

El factor de actualización de una anualidad durante 15 años al 5,5% es:

Valores $i=5,5\%=0,055$ y $n=15$ años

$$FA = \frac{1 - (1 + 0.055)^{15}}{0.055}$$

$$FA = \frac{1 - (1 + 0.055)^{15}}{0.055} \approx \frac{1 - 0.44793}{0.055} \approx 10,03758 \text{ aprox. } 10,04$$

Escenario conservador (Valor presente)

$4.527.849 \times 10,04 = 45.459.513,60$ aprox. 45,46MM

Escenario base

$6.265.270 \times 10,04 \approx \$62,89\text{MM}$

Escenario optimista

$8.002.700 \times 10,04 \approx \$80,33\text{MM}$

Razón beneficio/costo social

Para mantener una comparación económica coherente con el piloto, se adopta preliminarmente como costo social del escenario base el CAPEX GCR más una provisión estimativa por interferencias y afectación temporal del tránsito:

- CAPEX GCR: \$42,0 MM
- Afectación temporal, señalización y gestión de tránsito: \$2,0 MM

Costo social estimativo: 44,0 MM

$$B/C = \frac{VP \text{ Beneficios}}{VP \text{ Costos}}$$

$$1,43 > 1,30$$

Sensibilidad del B/C

La Tabla 53 presenta el análisis de sensibilidad de la razón beneficio-costo (B/C), considerando los escenarios conservadores, base y optimista. Para efectos comparativos, se mantiene constante el costo social estimado del proyecto y se modifica el valor presente de los beneficios sociales.

Tabla 53: *Análisis de sensibilidad de la razón beneficio-costo (B/C)*

Escenario	VP beneficios	Costo social utilizado	B/C
Conservador	\$45,45 MM	\$44,0 MM	1,03
Base	\$62,89 MM	\$44,0 MM	1,43
Optimista	\$80,33 MM	\$44,0 MM	1,83

Nota. Elaboración propia. El valor presente (VP) de los beneficios corresponde a las externalidades sociales monetizadas durante el horizonte de evaluación de 15 años. MM = millones de pesos chilenos.

En el escenario base, los beneficios sociales del proyecto durante 15 años alcanzan un valor presente estimado de \$62,89 millones. Al compararlos con un costo estimado de \$44 millones, se obtiene una razón B/C de 1,43, lo que significa que por cada peso invertido se generarían aproximadamente \$1,43 en beneficios sociales. El resultado supera el criterio de aceptación $B/C \geq 1,3$. No obstante, bajo un escenario conservador, el indicador disminuye a 1,03, evidenciando que la rentabilidad social es sensible a la magnitud de los beneficios efectivamente alcanzado

4 Evaluación AMC-ESG

La Tabla 54 presenta la evaluación consolidada de la matriz de análisis multicriterio con enfoque ESG (AMC-ESG), aplicando las ponderaciones y calificaciones definidas en la Fase 4. Los criterios considerados integran dimensiones regulatorias, ambientales, sociales y de sostenibilidad corporativa.

Tabla 54: *Evaluación consolidada de la matriz AMC-ESG*

Criterio	Ponderación	Nota	Resultado
Cumplimiento REP	30%	8,5	2,550
Huella CO ₂	20%	8,0	1,600
Licencia social	25%	7,5	1,875
GRI/SASB	15%	8,0	1,200
Reputación	10%	7,0	0,700
Total	100%	—	7,925

Nota. Elaboración propia a partir de las ponderaciones y calificaciones propuestas en la Fase 4. El resultado global se obtiene mediante la suma de las calificaciones ponderadas de cada criterio. La escala de evaluación utilizada es de 0 a 10.

El resultado supera el umbral de 70/100 definido en la metodología. Las ponderaciones y calificaciones originales se presentan en las Tablas 28 y 29.

Sensibilidad recalculada

- Escenario base: **79,3/100**
- Énfasis regulatorio: **80,2/100**
- Énfasis licencia social: **78,3/100**
- Ponderación igual: **78,0/100**

Todos los resultados permanecen por sobre 70/100.

Evaluación ambiental LCA

La Fase 4 estima para 100 m y 15 años:

- Escenario convencional: 648 kg CO₂ eq
- Escenario GCR: 281 kg CO₂ eq

Diferencia absoluta 648-281 = 367 kg CO₂ eq

Calculo porcentual: $\frac{367}{648} \times 100 = 56,635\% \approx 57\%$

Reducción de emisiones de transporte

Datos

Emisiones Escenario convencional: 237,3 kg CO₂ eq

Emisiones Escenario Local : 8,4 = 228,9 kg CO₂ eq

Ahorro Absoluto: 237,3- 8,4 = 228,9 kg CO₂ eq

Porcentaje = $\left(\frac{\text{Ahorro}}{\text{Escenario convencional}} \right) \times 100$

$\frac{228,9}{237,3} \approx 0,9646$ en % $0,9646 \times 100 = 96,46\%$

La Tabla 30 del documento utiliza los mismos datos de transporte y concluye una reducción aproximada del 96%.

Índice de Circularidad Material

El escenario convencional presenta un MCI aproximado de:

MCI $\approx$ 0.03

Mientras que el escenario GCR se encuentra entre

MCI = 0.58 -0.65

El valor supera el criterio de validación

MCI $\geq$ 0.55

Los rangos utilizados corresponden a la Tabla 31 de la Fase 4.

SROI preliminar monetizado

Para evitar incluir beneficios ESG que todavía no poseen proxy financiero validado, el SROI preliminar se calcula únicamente utilizando los beneficios sociales efectivamente monetizados.

$$SROI = \frac{VP(Veneficios sociales)}{Inversión inicial}$$

$$SROI = \frac{62.89}{42.0} = \$1,50$$

Interpretación: Por cada \$1 invertido en el piloto se generan aproximadamente \$1,50 de valor social monetizado en valor presente durante el horizonte analizado. El análisis es preliminar y requiere ajustes adicionales.

- Peso muerto;
- Atribución;
- Desplazamiento;
- Disminución del beneficio en el tiempo;
- Proxies financieros específicos para externalidades ESG adicionales.

Por esta razón, se recomienda utilizar para la evaluación de prefactibilidad en lugar de afirmar un rango de 1,8–2,8 sin una monetización explícita de las externalidades ESG adicionales.

Síntesis consolidada

La Tabla 55 presenta una síntesis consolidada de los principales resultados obtenidos en las evaluaciones técnica, económica, social, ambiental y ESG del modelo propuesto. Esta integración permite visualizar, de manera conjunta, el desempeño estimado del proyecto frente a los criterios de referencia definidos para cada dimensión de análisis.

Tabla 55: Síntesis consolidada de los resultados de evaluación del modelo propuesto

Evaluación	Resultado estimado	Criterio	Estado
BPN	65	≥60	✓
Vida útil GCR	15 años base	> convencional	✓
VAN incremental	+\$3,27 MM	VAN >0	✓
VAN en UF	+80 UF	>0	✓
TIR	10,6%	>5,5%	✓
Payback descontado	Año 9	≤15 años	✓
Beneficios sociales VP	\$62,89 MM base	—	—
B/C social base	1,43	≥1,30	✓
B/C conservador	1,03	≥1,30	No cumple
AMC-ESG	79,3/100	≥70	✓
AMC-ESG sensibilidad	78,0–80,2	≥70	✓
Reducción LCA	56,6%	Favorable	✓
Reducción logística CO ₂	96,5%	≥70%	✓
MCI	0,58–0,65	≥0,55	✓
SROI preliminar monetizado	1,50	>1,0	✓

Nota. *Elaboración propia.* Los resultados corresponden a estimaciones obtenidas a partir de los supuestos y parámetros definidos para el modelo propuesto. BPN = beneficio por neumático; GCR = granulado de caucho reciclado; VAN = valor actual neto; TIR = tasa interna de retorno; VP = valor presente; B/C = razón beneficio-costos; AMC-ESG = análisis multicriterio con enfoque ambiental, social y de gobernanza; LCA = análisis de ciclo de vida; MM = millones de pesos chilenos; UF = unidad de fomento. Los criterios de referencia corresponden a los umbrales adoptados en la metodología de evaluación y no implican, por sí solos, una validación formal del proyecto.

En términos generales, los resultados consolidados muestran un desempeño favorable del modelo propuesto en las dimensiones técnica, económica, ambiental y ESG. En el escenario base, los indicadores económicos presentan un VAN incremental positivo y una TIR superior a la tasa utilizada en la evaluación, mientras que la razón B/C social alcanza 1,43. Sin embargo, en el escenario conservador, la razón B/C disminuye a 1,03, evidenciando sensibilidad frente a variaciones en los beneficios sociales estimados. Por su parte, la evaluación AMC-ESG alcanza 79,3 puntos sobre 100 y la evaluación ambiental estima una reducción de 56,6 % respecto del escenario de referencia. En conjunto, estos resultados respaldan la conveniencia de avanzar hacia una etapa de validación del piloto, sin sustituir las evaluaciones técnicas, económicas y sociales formales requeridas para una eventual implementación a mayor escala.

FIN DEL DOCUMENTO