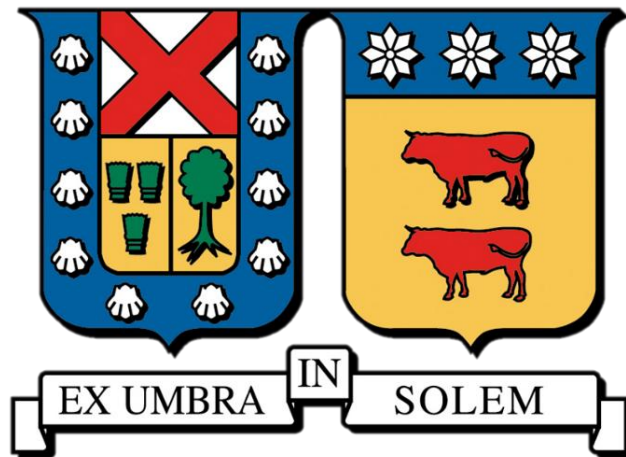

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE AERONAUTICA
SANTIAGO – CHILE



ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA PARA LA
CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE SERVICIOS TOPOGRÁFICOS CON
DRONES AUTÓNOMOS EN LA INDUSTRIA MINERA CHILENA

ALEJANDRO NICOLÁS MENDOZA TILLERÍA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUIA : SR. MARTINUS POTTERS
PROFESOR CORREFERENTE: SR FÉLIX ÁLVAREZ

JUNIO 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: ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA DE SERVICIOS TOPOGRÁFICOS CON DRONES AUTÓNOMOS EN LA INDUSTRIA MINERA CHILENA

Nombre del candidato(a): ALEJANDRO NICOLÁS MENDOZA TILLERÍA

Carrera / Grado: INGENIERÍA EN AVIACIÓN COMERCIAL

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** AERONÁUTICA

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Martinus Potters, 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: 08/07/2026; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08/07/2026 ; **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.

BIB-FO2385 01

“Dedico esta memoria a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa como estudiante.

En especial, a mi querida madre Alejandra Tilleria y mis hermanos, por todo el apoyo, cariño y confianza que me han brindado a lo largo de este camino. Sin ustedes, no habría sido posible llegar hasta donde estoy hoy.

También agradezco a la consultora MTC Technology por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, a mis amigos Cristóbal y Raúl, gracias por estar presentes hasta el final.”

Resumen ejecutivo

Este estudio analiza la prefactibilidad técnica, económica, operacional y normativa de implementar un servicio de levantamiento topográfico con drones autónomos en la minería chilena. Para ello, se compara una operación manual tradicional con una alternativa autónoma basada en una estación DJI Dock 2 y drones DJI Matrice 3D. El caso de estudio corresponde a Compañía Minera Lomas Bayas, ubicada en la Región de Antofagasta, por ser una faena representativa de la minería a rajo abierto y contar con áreas relevantes como pilas de lixiviación, botaderos y tajos.

La investigación se desarrolló mediante un análisis de mercado, técnico, legal y económico-financiero. A partir de estos estudios, se identificó que existe una oportunidad concreta para aplicar soluciones autónomas en faenas mineras, especialmente por la necesidad de disponer de información topográfica actualizada, reducir la exposición del personal en terreno y mejorar la continuidad de los levantamientos.

En el análisis técnico, el sistema DJI Dock 2 fue seleccionado por presentar un equilibrio adecuado entre autonomía, precisión, resistencia ambiental y costo. Para el caso de Lomas Bayas, el dimensionamiento operacional estimó una campaña tipo de 5 horas y 13 minutos de vuelo puro, con una captura total de 10.007 imágenes, lo que permite dimensionar la capacidad del sistema para cubrir las principales áreas de interés de la faena.

Desde el punto de vista financiero, la evaluación a cinco años mostró que el escenario autónomo es viable, considerando una inversión inicial de \$58.988.731, un OPEX mensual de \$23.627.624, un VAN de \$138.586.848, una TIR de 51,5% y un Payback de 2,08 años. Aunque el escenario base presenta indicadores levemente superiores, la diferencia no resulta significativa al considerar los beneficios operacionales que entrega la automatización. En términos generales, los resultados permiten señalar que el escenario autónomo presenta condiciones favorables para su implementación, ya que combina viabilidad financiera con beneficios operacionales asociados a la reducción de exposición del personal, mayor continuidad del servicio y mejor estandarización de la captura de datos.

Abstract

This study analyzes the technical, economic, operational, and regulatory pre-feasibility of implementing a topographic surveying service using autonomous drones in the Chilean mining industry. To this end, a traditional manual operation is compared with an autonomous alternative based on a DJI Dock 2 station and DJI Matrice 3D drones. The case study focuses on Compañía Minera Lomas Bayas, located in the Antofagasta Region, as it represents an open-pit mining operation with relevant operational areas such as leach pads, waste dumps, and open pits.

The research was developed through market, technical, legal, and economic-financial analyses. Based on these studies, a concrete opportunity was identified for the application of autonomous solutions in mining operations, particularly due to the need for updated topographic information, reduced personnel exposure in the field, and improved continuity of surveying activities.

From a technical perspective, the DJI Dock 2 system was selected because it provides an adequate balance between autonomy, precision, environmental resistance, and cost. For the Lomas Bayas case, the operational flight planning estimated a typical campaign of 5 hours and 13 minutes of pure flight time, with a total capture of 10,007 images, allowing the system's capacity to cover the main areas of interest within the mining site to be assessed.

From a financial perspective, the five-year evaluation showed that the autonomous scenario is viable, considering an initial investment of CLP \$58,988,731, a monthly OPEX of CLP \$23,627,624, a NPV of CLP \$138,586,848, an IRR of 51.5%, and a Payback period of 2.08 years. Although the base scenario presents slightly better financial indicators, the difference is not significant when considering the operational benefits provided by automation. Overall, the results indicate that the autonomous scenario presents favorable conditions for implementation, as it combines financial viability with operational benefits related to reduced personnel exposure, greater service continuity, and improved standardization of data capture.

Índice

Resumen ejecutivo.....	1
Abstract.....	2
Índice	3
Introducción.....	8
Capítulo I. Antecedentes Generales.....	10
1.1 Justificación	11
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo general.	13
1.2.2 Objetivos específicos.	13
1.3 Metodología.....	14
1.4 Alcance.	15
Capítulo II. Estado del arte	16
2.1 Antecedentes	17
2.1.1 Contexto de la industria minera	17
2.1.2 Casos relacionados	19
2.1.2.1 Experiencias internacionales en entornos de alta montaña (Irán y Nepal)	19
2.1.2.2 Operación remota y automatización de monitoreo en faenas (Chile)....	20
2.1.2.3 Vigilancia autónoma BVLOS y normativa SORA en industria (España)	22
2.1.2.4 Exploración mineral mediante integración de GIS y teledetección (Turquía).....	24
2.1.2.5 Síntesis de estudios y tendencias tecnológicas recientes (2021-2025).....	27
2.2 Marco teórico	28

2.2.1 Conceptos	28
2.2.1.1 Taquimetría	28
2.2.1.2 Estación RTK	29
2.2.1.3 Vehículo aéreo no tripulado (VANT)	30
2.2.1.4 Tipos de drones	30
2.2.1.5 Operación con visibilidad directa visual (VLOS, Visual Line Of Sight)	31
2.2.1.6 Operación Más Allá De La Visibilidad DIRECTA VISUAL (BVLOS, Beyond Visual Line Of Sight)	31
2.2.1.7 Definiciones de Infraestructura y Gestión de Residuos Mineros	31
2.2.2 Teorías	33
2.2.2.1 Evaluación de Proyectos (Nassir Sapag Chain, 2007)	33
2.2.2.2 Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (MCDM)	35
2.3 Propuesta metodológica	37
Capítulo III. Desarrollo	39
3.1 Estudio de mercado	40
3.1.1 Análisis del Macroentorno	41
3.1.1.1 Variables Económicas	41
3.1.1.2 Marco Regulatorio	44
3.1.1 Análisis de oferta	46
3.1.2 Análisis de demanda	48
3.1.2.1 Entorno operativo y localización de la demanda	48
3.1.2.2 Metodología	50
3.1.2.3 Resultados	51
3.1.2.4 Proyección de demanda	52
3.1.2.5 Selección y Justificación del Escenario de Operación	60

3.1.2.6 Definición de servicios	63
3.2 Estudio Técnico	65
3.2.1 Determinación de requerimientos técnicos	66
3.2.2.1 Matriz de Especificaciones Técnicas y Costos de Inversión	70
3.2.2.2 Evaluación Multicriterio (MCDM)	71
3.2.2.3 Resolución Técnica y Selección	72
3.2.2.4 Especificaciones del Sistema Seleccionado	74
3.2.3 Diseño del Proceso Operativo	78
3.2.4 Infraestructura operativa	80
3.2.4.1 Unidad de Administración y Soporte (Oficina Central)	80
3.2.4.2 Infraestructura de Soporte Local (Instalación Faena)	81
3.2.4.3 Infraestructura Civil de Resguardo (Estación Dock 2)	82
3.2.4.4 Valorización de la Infraestructura	84
3.2.5 Dimensionamiento operacional del plan de vuelo	85
3.2.5.1 Resultados del plan de vuelo	86
3.2.6 Estructura Organizacional y Requerimientos de Capital Humano	88
3.2.7.1 Identificación de Costos Base	91
3.2.7.2 Estructura del Servicio de la Deuda	91
3.2.7.3 Determinación de la Tarifa Mensual Final	92
3.3 Estudio Legal	93
3.3.1 Marco normativo aeronáutico aplicable a RPAS y drones autónomos	93
3.3.1.1 DAN 91: reglas generales del aire	94
3.3.1.2 DAN 151: operaciones de RPAS sobre áreas pobladas	96
3.3.1.3 DAN 137: regulación del servicio como trabajo aéreo	98
3.3.1.4 DAN 119: requisitos legales de la empresa y obtención del AOC	99

3.3.2 Permisología SUBTEL: uso del espectro radioeléctrico.....	102
3.3.3 Reglamento de Seguridad Minera (SERNAGEOMIN)	103
3.3.4 Permisología eléctrica: SEC e instalaciones de consumo	106
3.4 Estudio económico-financiero	108
3.4.1 Definición del escenario base.....	109
3.4.1.1 Equipamiento principal del escenario base.....	109
3.4.1.2 Recursos humanos del escenario base	111
3.4.1.3 Dimensionamiento operativo de la campaña	111
3.4.1.4 Traslado en camioneta y tiempo total de operación	112
3.4.1.5 Fijación de precios del escenario base	113
3.4.1.6 Síntesis del escenario base.....	114
3.4.4 Análisis de costos	117
3.4.4 Costos ambientales.....	119
3.4.5 Evaluación financiera.....	121
3.4.5.1 Evaluación financiera del escenario autónomo	122
3.4.5.2 Evaluación financiera del escenario base	132
3.4.5.3 Comparación de resultados financieros.....	133
3.5 Análisis de sensibilidad.....	135
3.5.1 Variables consideradas en el análisis.....	136
3.5.2 Definición de escenarios	137
3.5.3 Resultados del análisis de sensibilidad	138
3.5.3 Punto de equilibrio financiero	139
3.5.4 Identificación de variables críticas	140
Conclusiones y recomendaciones	141
Anexos	143

Anexo A: Superficie de ha estimada por tipo de infraestructura minera y faena.	143
Tabla de Superficie estimada por tipo de infraestructura minera y faena.	143
Anexo B: Estructura de costos del escenario autónomo	145
Tabla de gastos operacionales (OPEX) del escenario autónomo	145
Tabla de Inversión Inicial (CAPEX) del escenario autónomo	147
Anexo C: Estructura de costos del escenario base.....	148
Tabla de gastos operacionales (OPEX) del escenario base	148
Tabla de inversión inicial (CAPEX) del escenario base	150
Anexo D: Flujos de cajas	153
Tabla del de flujo de caja proyectado del escenario autónomo	153
Tabla del de flujo de caja proyectado del escenario base.....	155
Bibliografía	157

Introducción

La industria minera de Chile es una de las principales fuentes de ingresos de la economía nacional y, actualmente, se encuentra en una etapa de transición tecnológica, impulsada por la necesidad de incrementar la eficiencia operativa. Esta transformación se ve motivada por diversos factores, entre ellos la presión por operar en yacimientos de menor ley, las exigencias ambientales y la necesidad de reducir costos sin comprometer la seguridad. Un informe de Deloitte (2024) destaca que el uso de soluciones como inteligencia artificial, automatización y drones ha permitido reducir significativamente los incidentes de seguridad y mejorar el rendimiento operativo, particularmente en entornos complejos como la minería. Estas innovaciones reflejan el avance hacia una minería más eficiente y segura, clave para sostener el liderazgo de Chile en el mercado internacional de minerales.

La utilización de los drones permite desarrollar levantamientos y análisis espaciales de alta precisión, facilitando la planificación, monitoreo y control operativo en terrenos de difícil acceso. Estos se han utilizado con éxito en la agricultura, el petróleo y el gas, la construcción, la protección del medio ambiente y la minería (Sikakwe, G. U., 2023). En particular, dentro del sector minero, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) son herramientas versátiles utilizadas en la planificación estratégica de minas a cielo abierto, permitiendo optimizar el diseño de pozos, caminos y zonas de exploración. Además, su aplicación se ha extendido a la minería subterránea, donde permiten realizar tareas de monitoreo geotécnico, detección de gases, análisis de fragmentación y apoyo en misiones de rescate en entornos de difícil acceso (Shahmoradi et al., 2020).

Los sensores utilizados en los drones dependerán del propósito y capacidad del equipo para portarlo eficientemente, y los que más se utilizan son RGB, sensores ultrasónicos, sensores infrarrojos (IR), cámara estéreo, telémetros láser (LRFs), radar de banda ultra ancha (UWB) (Shahmoradi et al., 2020).

Según datos del Consejo Minero (2025), Chile mantuvo su liderazgo mundial en producción de cobre con más de 5,5 millones de toneladas, aunque enfrenta una creciente competencia internacional, especialmente por el alza de 12,1% en la producción de la República Democrática del Congo, equivalente a 322 mil toneladas adicionales. Ante este escenario, la minería ha incorporado tecnologías emergentes orientadas a mejorar la eficiencia, seguridad y continuidad operacional. Entre ellas, los vehículos aéreos no tripulados (VANT) han adquirido una relevancia creciente por su aplicación en tareas de levantamiento topográfico, inspección, monitoreo y análisis operacional. Según el artículo *Applications of UAVs in Mine Industry: A Scoping Review*, su uso se ha expandido en distintos países, incluido Chile, destacando diversas aplicaciones que se ilustran en el **gráfico 1**.

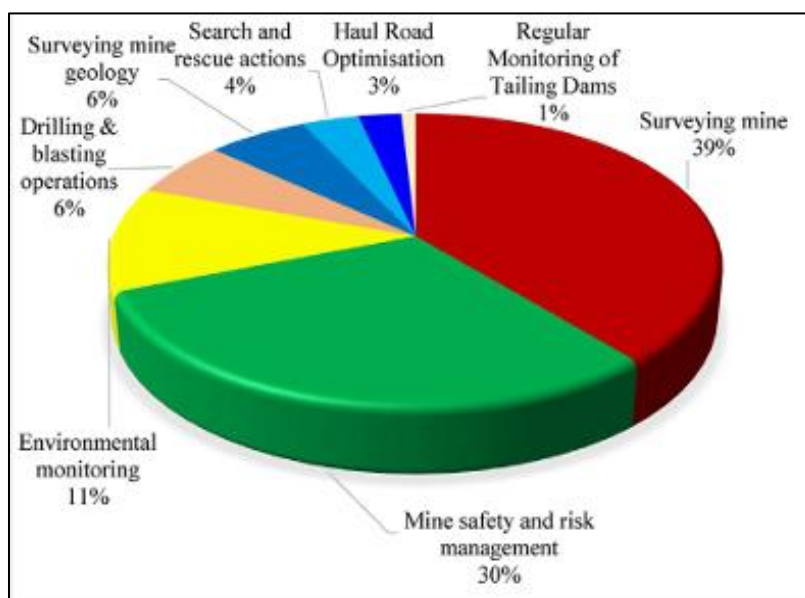


Gráfico 1. Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la industria minera.

Fuente: Minh & Dung (2023).

Capítulo I. Antecedentes Generales

Este capítulo establece el marco inicial de la investigación. Se presentan las razones que justifican el estudio, los objetivos que guían su desarrollo, la metodología empleada y el alcance que se propone. Con ello, se sientan las bases para comprender la relevancia del problema y la pertinencia de abordarlo mediante un análisis de prefactibilidad.

1.1 Justificación

La digitalización se ha convertido en un factor decisivo para el desarrollo de la minería moderna. Según Portal Minero (2025), citando antecedentes de McKinsey, las empresas que adoptan tecnologías digitales pueden aumentar su productividad entre un 15% y un 20%. Este antecedente refuerza la importancia de incorporar soluciones basadas en automatización, captura remota de datos y análisis digital, especialmente en un sector que enfrenta mayores exigencias de eficiencia, seguridad y control operacional.

En este contexto, diversos estudios han demostrado la eficacia de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) en tareas de levantamiento topográfico, cálculo volumétrico, mapeo e inspección en faenas mineras. En comparación con métodos tradicionales, los drones permiten reducir los tiempos de trabajo en terreno, mantener niveles de precisión compatibles con los estándares de la industria y generar productos geoespaciales como ortomosaicos, modelos digitales de elevación, nubes de puntos y cubicaciones. Estas capacidades resultan especialmente relevantes en operaciones a rajo abierto, donde el monitoreo periódico de rajos, botaderos, pilas de lixiviación, caminos y frentes de trabajo es fundamental para la planificación y continuidad operacional (Matsimbe, 2022; Beretta, 2018; Park et al., 2020; Minh & Dung, 2023).

Asimismo, la incorporación de estaciones autónomas permite avanzar desde una operación puntual hacia un modelo de captura recurrente, programable y estandarizado. Este tipo de solución favorece la trazabilidad de los datos, disminuye la dependencia de cuadrillas móviles en terreno y reduce la exposición del personal a zonas de riesgo propias de la actividad minera. Por ello, resulta pertinente evaluar la prefactibilidad técnica y económica de implementar servicios topográficos con sistemas autónomos en la minería chilena,

considerando sus beneficios operacionales, sus requerimientos normativos y su viabilidad financiera.

Finalmente, esta propuesta se vincula con la Política Nacional Minera 2050, particularmente con el Eje 1, orientado a una producción responsable, sustentable, competitiva e innovadora. Asimismo, se relaciona con el Factor Crítico de Decisión 5, que promueve la incorporación de herramientas digitales para fortalecer la productividad y la innovación en la industria minera.

En este sentido, la adopción de drones y estaciones autónomas de captura de información contribuye directamente a dichos lineamientos, al facilitar la obtención de información topográfica precisa, actualizada y trazable. De esta manera, la tecnología propuesta se alinea con la visión de una minería chilena más eficiente, segura y sostenible de cara al año 2050.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

- Evaluar la prefactibilidad técnica, económica, operacional y normativa para la creación de una empresa de servicios topográficos con drones autónomos en la industria minera chilena, con el fin de determinar su viabilidad y aporte a la optimización de procesos, reducción de costos y cumplimiento de las regulaciones pertinentes.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Analizar los requerimientos técnicos, operativos y normativos necesarios para la implementación de drones autónomos en levantamientos topográficos mineros, considerando condiciones geográficas, climáticas, operacionales y regulatorias aplicables.
- Caracterizar el mercado potencial de servicios con drones en la industria minera chilena, identificando la oferta existente, la demanda actual y proyectada, y las oportunidades de aplicación en faenas a rajo abierto.
- Evaluar la rentabilidad del proyecto mediante un análisis comparativo entre un escenario base de operación manual y un escenario autónomo, considerando inversión inicial, costos operacionales, tarifa del servicio e indicadores financieros.
- Aplicar un análisis de sensibilidad sobre las variables críticas del modelo económico-financiero, tales como precio, OPEX, tasa de descuento, demanda y meses facturados, para determinar su impacto en la viabilidad del proyecto.

1.3 Metodología

El presente estudio adopta como enfoque metodológico la Teoría de Evaluación de Proyectos propuesta por Nassir Sapag Chain, ampliamente reconocida en América Latina como marco referencial para estudios de prefactibilidad y viabilidad de inversiones. Esta teoría permite analizar la conveniencia técnica y económica de una iniciativa mediante una estructura lógica, secuencial y multidisciplinaria. Se puede ver este enfoque metodológico en la **figura 2**.

Adicionalmente, se incorpora la Teoría de Evaluación Multicriterio (MCDM), la cual facilita la toma de decisiones complejas en proyectos que involucran múltiples dimensiones de impacto, tales como aspectos económicos, técnicos, operacionales, sociales y ambientales. Este enfoque permite comparar alternativas y ponderar criterios de manera equilibrada, entregando una base más objetiva para determinar la viabilidad integral del proyecto.

De esta forma, la metodología combina la evaluación técnico-económica tradicional con un enfoque multicriterio, permitiendo analizar no solo la rentabilidad financiera del proyecto, sino también su factibilidad operativa, su aporte a la eficiencia del proceso y su coherencia con las condiciones del entorno minero en el cual se busca implementar.

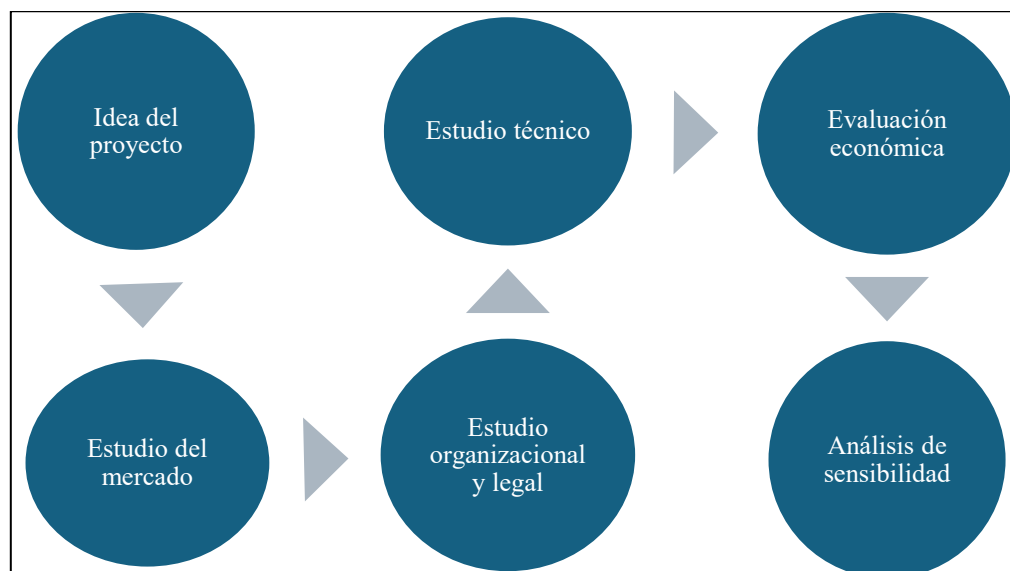


Figura 1. Metodología de Nassir Sapag.

Fuente: Elaboración propia.

1.4 Alcance.

El alcance del presente estudio se define como **descriptivo y proposicional**, ya que busca caracterizar el uso de drones autónomos en la industria minera chilena y, a partir de ello, proponer la creación de una empresa de servicios topográficos orientada a faenas mineras a rajo abierto.

El alcance descriptivo se refleja en la revisión del contexto minero nacional, la identificación de aplicaciones actuales de drones en minería, el análisis de tecnologías disponibles y la revisión de la normativa vigente aplicable a operaciones con RPAS en faenas mineras. Para ello, se consideran aspectos aeronáuticos, mineros, eléctricos y de telecomunicaciones, asociados principalmente a la DGAC, SERNAGEOMIN, SEC y SUBTEL.

El alcance proposicional se evidencia en el diseño y evaluación de una alternativa de negocio basada en servicios topográficos con drones autónomos. Para ello, se compara un escenario base de operación manual con un escenario autónomo basado en una estación fija para el despliegue, carga y operación remota de drones. Esta comparación considera variables técnicas, operacionales y económicas, tales como inversión inicial, costos operacionales, tiempos de operación, exposición del personal en terreno, emisiones de CO₂, VAN, TIR, Payback y análisis de sensibilidad.

El alcance temporal considera antecedentes tecnológicos, normativos y de mercado publicados principalmente entre 2015 y 2026. Para la proyección de demanda se utiliza un horizonte comprendido entre 2025 y 2034, mientras que la evaluación económico-financiera se desarrolla en un período de cinco años, coherente con el horizonte de análisis del proyecto.

Finalmente, el alcance geográfico es principalmente nacional, con énfasis en faenas mineras chilenas a rajo abierto. No obstante, se incorporan antecedentes internacionales como referencia comparativa para contextualizar experiencias, tendencias tecnológicas y casos relevantes de aplicación en la industria minera.

Capítulo II. Estado del arte

En este capítulo se presenta una contextualización de la industria minería, y una revisión general de los avances y conocimientos existentes en torno al uso de drones, con especial énfasis en su aplicación en la industria minera. El análisis permite situar la investigación en un marco de referencia teórico y práctico, destacando aportes, experiencias y tendencias que orientan la comprensión del tema de estudio.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Contexto de la industria minera

La industria minera chilena constituye uno de los pilares fundamentales de la economía nacional, tal como se muestra en el **gráfico 2**. A lo largo de los años, su participación en el Producto Interno Bruto (PIB) de Chile se ha mantenido entre los primeros lugares. En 2020, la minería fue la segunda actividad económica con mayor contribución al PIB, superada únicamente por los servicios financieros y empresariales. Esta tendencia reafirma la importancia estratégica del sector minero en el desarrollo económico del país.

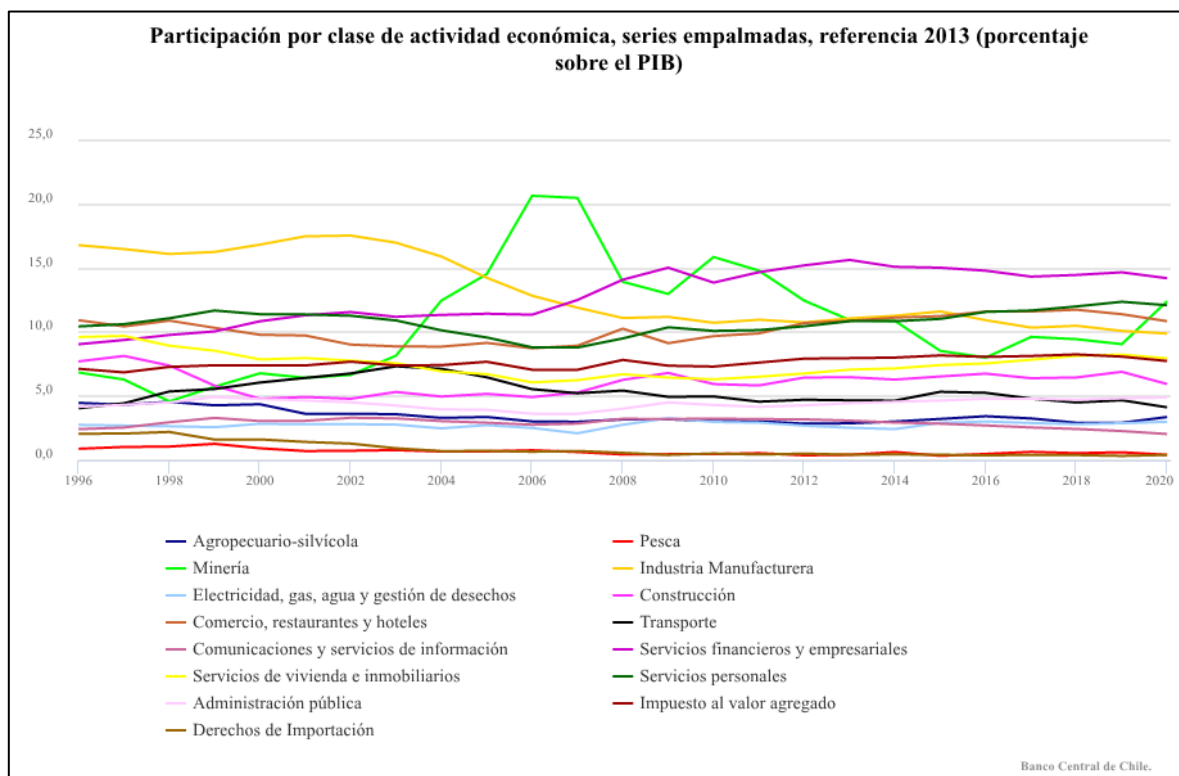


Gráfico 2. Participación por clase de actividad sobre el PIB en Chile.

Fuente: Banco Central de Chile. (2024).

La dinámica de la inversión de mediano y largo plazo en Chile se encuentra estrechamente vinculada a la evolución de la industria minera. Según datos de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2023), de cada siete pesos invertidos a nivel nacional, uno corresponde a proyectos relacionados con la minería.

Asimismo, la minería continúa siendo el principal sector económico receptor de Inversión Extranjera Directa (IED) en Chile, como se observa en el **gráfico 3**. Durante el período 2012-2020, este sector concentró el 29% del total de la inversión extranjera, seguido por los servicios financieros, que representaron un 17%.

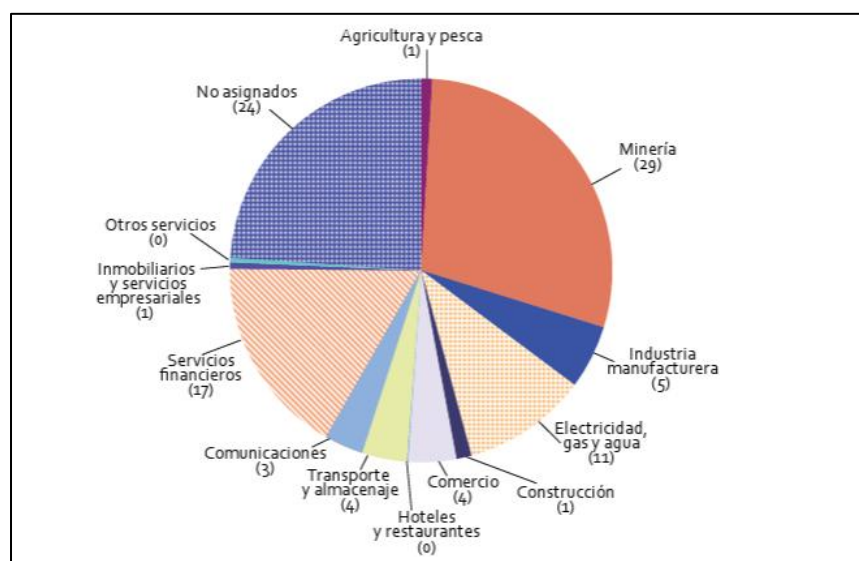


Gráfico 3. IED por actividad económica en Chile, 2012-2020.

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), (2022).

El aumento de la participación de la minería en el PIB y la IED refuerza la necesidad de optimizar las operaciones mineras a través de la implementación de tecnologías emergentes, como los drones, que pueden transformar la forma en la que se gestionan los recursos naturales y se realiza la planificación minera.

2.1.2 Casos relacionados

Para comprender el alcance y la viabilidad técnica de la propuesta, resulta fundamental analizar las experiencias previas y el estado del arte a nivel internacional. La adopción de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) ha demostrado ser una solución transversal para diversas problemáticas industriales, generando antecedentes valiosos que permiten comparar metodologías y resultados. A continuación, se presenta una revisión de casos de estudio relevantes que contextualizan la aplicación de estas tecnologías en entornos operativos reales.

2.1.2.1 Experiencias internacionales en entornos de alta montaña (Irán y Nepal)

La minería, particularmente en zonas remotas y de difícil acceso, enfrenta diversos desafíos relacionados con la seguridad, la eficiencia operativa y los altos costos. Las minas ubicadas en áreas geográficas complejas, como montañas o desiertos, presentan barreras significativas para las exploraciones y operaciones diarias, además de exponer a los trabajadores a condiciones de alto riesgo. Existen estudios que se realizaron en zonas de difícil acceso como en el Himalaya en Nepal o en el deposito de Shahzadeh Abbas, ubicado en una región montañosa de Irán (e.g. Shrestha, 2022; Honarmand & Shahriari, 2021). La **tabla 1** presenta un resumen de estos estudios.

Zona de Estudio	Estudio	Tecnología Usada	Resolución Espacial	Ventajas	Resultados Obtenidos
Shahzadeh Abbas, Irán	Honarmand & Shahriari (2021)	Fotogrametría basada en drones (DJI Phantom 4 Pro V2.0)	3.26 cm	Reducción significativa de costos y tiempo, con mayor precisión y seguridad en zonas de difícil acceso.	Elaboración de mapas geológicos detallados, identificación de zonas mineralizadas de cobre y delimitación de estructuras geológicas.
Himalaya, Nepal	Shrestha et al. (2022)	Drones UAV (Phantom 4 Pro)	Menos de 10 cm	Levantamiento topográfico 30 veces más rápido que los métodos tradicionales, mejor seguridad y reducción de costos.	Generación de modelos 3D, ortofotos, DSM y DTM para mapeo de áreas mineras y depósitos minerales.

Tabla 1. Resumen de estudios sobre la aplicación de drones (VANT).

Fuente: Elaboración propia basada en Honarmand & Shahriari (2021) y Shrestha et al. (2022).

2.1.2.2 Operación remota y automatización de monitoreo en faenas (Chile)

El caso de éxito de ELECCON Maquinarias en la mina Mantoverde representa un ejemplo destacado de la implementación de tecnologías emergentes en la minería chilena. Mediante la integración de la plataforma DJI Dock 2 (ver **ilustración 1**), provista por GEOCOM, se logró automatizar operaciones de mapeo e inspección en el tranque de relaves de la faena, ubicada en la Región de Atacama (ver **ilustración 2**). LitoralPress (2025).

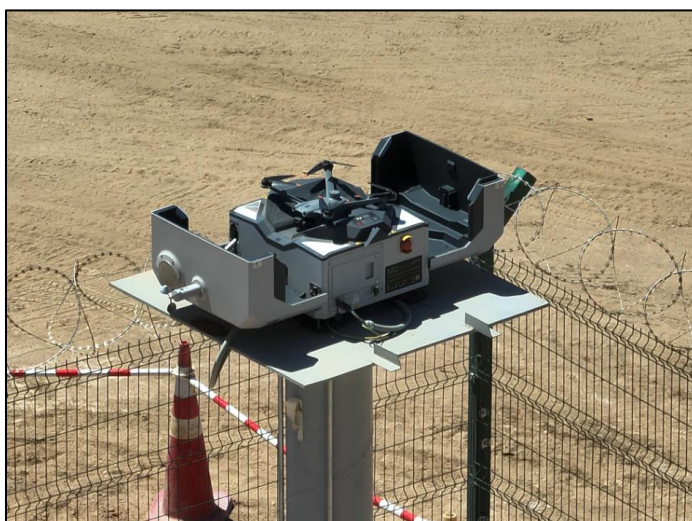


Ilustración 1. Torre de control del DJI Dock 2 listo para despegar.

Fuente: DJI. (2025). Dock: gestión minera en Chile. DJI Enterprise Insights.



Ilustración 2. Vistas del proyecto.

Fuente: DJI. (2025). Dock: gestión minera en Chile. DJI Enterprise Insights.

La solución implementada incluyó los drones DJI Matrice 3D y 3TD, junto con el software FlightHub 2 (ver **ilustración 3**), permitiendo la planificación y ejecución remota de vuelos sin necesidad de operadores en terreno. Esto resultó en una mejora significativa en la seguridad operativa y una reducción de hasta un 35% en los tiempos de trabajo en comparación con métodos tradicionales. LitoralPress (2025).

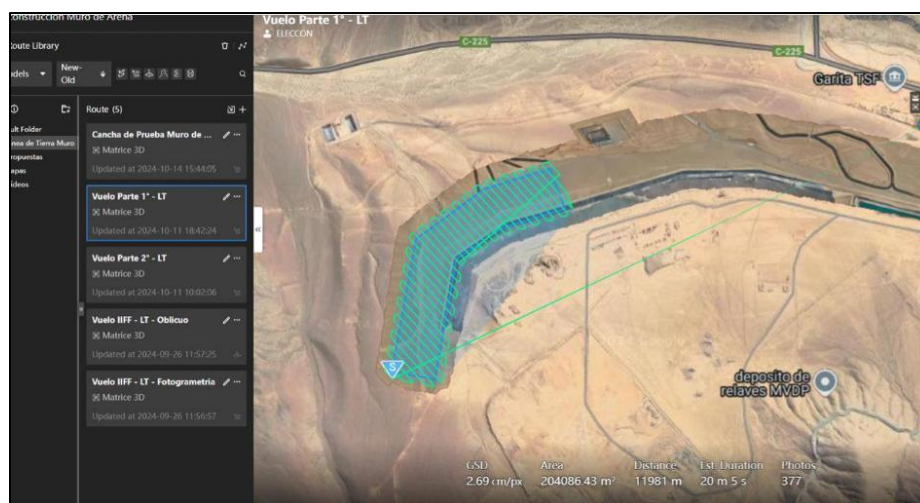


Ilustración 3. Preparación de vuelo en DJI FlightHub 2.

Fuente: DJI. (2025). Dock: gestión minera en Chile. DJI Enterprise Insights.

Durante el proyecto, se realizaron cuatro vuelos fotogramétricos y dos de video semanalmente, cubriendo un área total de 51 hectáreas. Se capturaron 963 fotografías con una resolución de 2,7 cm por píxel, generando productos como ortofotos, nubes de puntos y modelos 3D. El tiempo total de procesamiento fue de aproximadamente 2 horas y 46 minutos. Las mejoras obtenidas a partir del DJI Dock 2 fueron un aumento en la seguridad en las labores, un flujo de trabajo completo en una única plataforma, obtención de productos en un tiempo reducido, aumento en el rendimiento de HH, conectividad remota al Dock 2 desde cualquier lugar con conexión a internet y optimización la gestión de proyecto.

Este caso demuestra cómo la adopción de tecnologías avanzadas, como los drones y plataformas de operación remota, puede optimizar las operaciones mineras, mejorar la seguridad y eficiencia, y facilitar la toma de decisiones basada en datos precisos y actualizados.

2.1.2.3 Vigilancia autónoma BVLOS y normativa SORA en industria (España)

En la evolución reciente de la tecnología de drones aplicada a contextos industriales, destaca la propuesta desarrollada por Fernández López (2024), quien diseñó un sistema de vigilancia automatizado para naves industriales privadas, basado en drones operados de forma remota mediante estaciones automáticas tipo “nido” (drone-in-a-box). Su estudio, enfocado en la categoría específica bajo metodología SORA, estableció un marco completo de documentación técnica y regulatoria que incluyó manuales de operación, evaluación de riesgos, estudios económicos y procedimientos de coordinación aérea.

El sistema tecnológico implementado consistió en una estación DJI Dock 2 y el dron DJI Matrice 3TD, equipado con cámaras térmicas y sensores de alta precisión, capaces de operar hasta 50 minutos por vuelo y realizar vigilancia en modalidad BVLOS (más allá de línea visual). La operación fue controlada desde un centro remoto, eliminando la necesidad de personal en terreno. Según su análisis económico, el sistema completo tuvo un costo anual de €56.700, lo que representó un ahorro del 56,38% respecto a un esquema tradicional de seguridad con vigilantes presenciales (estimado en €130.000 anuales por sitio).

El estudio anterior utilizó como metodología principal la SORA (Specific Operations Risk Assessment), que es el modelo recomendado por EASA (Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea) para operaciones con drones en categoría específica, es decir, aquellas con nivel de riesgo medio y que no pueden acogerse a escenarios estándar ni evaluaciones de riesgo predefinidas.

El SORA se compone de 10 pasos estructurados que evalúan:

1. Concepto de operación (ConOps)
 2. Determinación del riesgo terrestre intrínseco (GRC inicial)
 3. Aplicación de mitigaciones al riesgo terrestre (GRC final)
 4. Determinación del riesgo en aire (ARC inicial)
 5. Aplicación de mitigaciones estratégicas (ARC residual)
 6. Requisitos de mitigaciones tácticas y nivel de robustez
 7. Determinación del nivel SAIL (Specific Assurance and Integrity Level)
 8. Asignación de Objetivos de Seguridad Operacional (OSO)
-

9. Evaluación del espacio aéreo adyacente

10. Informe de seguridad integral

El estudio de Fernández López (2024) demuestra la viabilidad de utilizar drones autónomos en modalidad BVLOS para vigilancia, logrando una reducción del 56,38% en costos anuales en comparación con métodos tradicionales. Usando la metodología SORA, se estructuró una operación segura según los estándares regulatorios europeos, lo que valida su aplicabilidad en entornos industriales exigentes. Aunque el caso corresponde a instalaciones privadas, los principios tecnológicos, económicos y normativos son transferibles al sector minero, donde la eficiencia operativa, la automatización y la reducción de riesgos humanos son claves.

2.1.2.4 Exploración mineral mediante integración de GIS y teledetección (Turquía)

Otro estudio relevante para la presente investigación es el desarrollado por Alzubade y Alkan (2022), quienes aplicaron fotogrametría con drones, sensores remotos (ASTER) y Sistemas de Información Geográfica (GIS) (**ver ilustración 4**) para la detección de zonas mineralizadas en la provincia de Çorum, Turquía. El trabajo fue realizado en condiciones geográficas complejas, con diferencias de elevación significativas, donde los métodos tradicionales resultaban costosos y limitados. En la etapa inicial, se generaron modelos digitales de elevación (DEM) mediante vuelos a 90 metros de altura con drones, y posteriormente se integraron datos espectrales de alta resolución satelital para determinar la distribución de minerales metálicos como cobre (Cu) y oro (Au).

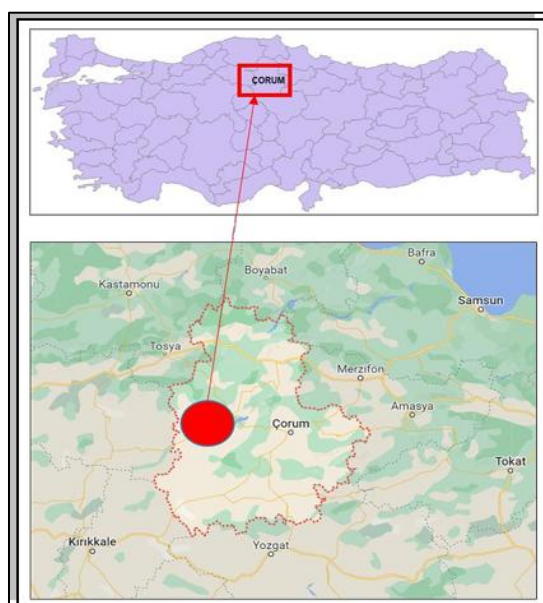


***Ilustración 4.** Área de estudio.*

Fuente: Alzubade, M. K. H., & Alkan, O. (2022).

Para la validación de resultados, se utilizaron 55 puntos de control terrestre (GCP) y se aplicaron algoritmos de clasificación como Maximum Likelihood Classification (MLC) y Spectral Correlation Mapper (SCM), obteniendo precisiones superiores al 90% y valores de Kappa estadístico de 0,91 (MLC) y 0,94 (SCM). Además, se evidenció que el uso combinado de drones con imágenes ASTER permite identificar zonas de alteración hidrotermal asociadas a mineralización, optimizando el análisis previo a perforaciones.

La metodología que se utilizó fue la siguiente (ver **ilustración 5**):

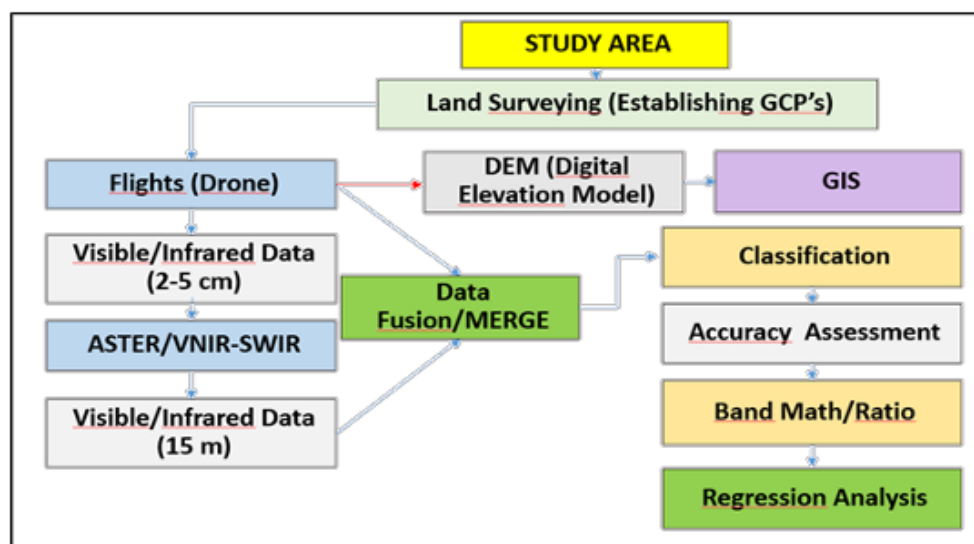


Ilustración 5. Metodología de trabajo.

Fuente: Alzubade, M. K. H., & Alkan, O. (2022).

El estudio emplea una metodología integrada que combina fotogrametría con drones, teledetección y Sistemas de Información Geográfica (GIS) para la exploración minera. El proceso se lleva a cabo en varias etapas clave:

1. **Levantamiento Terrestre y Puntos de Control:** Se establecen puntos de control terrestre (GCP's) para garantizar la precisión geoespacial de los datos.
2. **Captura de Datos Aéreos:** Los drones, equipados con sensores de alta resolución (2-5 cm), capturan imágenes en rangos visibles e infrarrojos, complementadas con datos de satélites ASTER.

-
3. **Fusión de Datos y DEM:** Los datos obtenidos de drones y satélites se fusionan para crear un Modelo Digital de Elevación (DEM) que representa detalladamente la topografía del área.
 4. **Análisis con GIS:** Los datos fusionados se analizan en GIS, facilitando la clasificación de áreas mineralizadas y la evaluación de la precisión de los resultados.
 5. **Clasificación y Evaluación de Precisión:** Se utilizan métodos de clasificación no supervisada y relaciones de bandas para identificar áreas con alta densidad mineral, validando la precisión mediante puntos de control.
 6. **Análisis de Regresión:** Se realiza un análisis de regresión para correlacionar los datos de campo con los resultados obtenidos, identificando áreas con potencial mineral.

Estos resultados demuestran que la tecnología drone-fotogramétrica, combinada con sensores satelitales, es una herramienta eficaz para exploración minera preliminar. Su uso en zonas de difícil acceso, como faenas mineras chilenas, permitiría reducir costos de perforación, mejorar la planificación de campañas y aumentar la seguridad operacional.

2.1.2.5 Síntesis de estudios y tendencias tecnológicas recientes (2021-2025)

Al objeto de sintetizar la información técnica de los casos mostrados anteriormente, la siguiente tabla resume los estudios recientes (2022-2025). Esta compilación permite visualizar de manera integrada el impacto de los drones en los distintos escenarios geográficos y operativos analizados, facilitando la comparación de sus resultados.

Estudio	Año	Lugar	Metodología	Impactos
Estudio de Mantoverde (Chile)	2025	Región de Atacama, Chile	Implementación de plataforma DJI Dock 2 para automatización, planificación remota de vuelos y análisis de seguridad operativa mediante FlightHub 2.	Reducción del 35% en los tiempos de trabajo, mejora de la seguridad operativa, optimización de la gestión del proyecto, aumento en la eficiencia.
Estudio de Fernández López (España)	2024	Girona, España	Metodología SORA (Specific Operations Risk Assessment), para evaluar riesgos operativos y diseñar protocolos de seguridad para drones autónomos.	Ahorro del 56,38% en costos anuales en comparación con métodos tradicionales, automatización y reducción de personal, operación BVLOS.
Estudio de Alzubade y Alkan (Turquía)	2022	Provincia de Çorum, Turquía	Uso integrado de fotogrametría, sensores remotos ASTER y GIS, con algoritmos de clasificación MLC y SCM para detectar zonas mineralizadas.	Identificación precisa de áreas mineralizadas, aumento de la precisión en exploración, reducción de perforaciones exploratorias innecesarias.

Tabla 2.: Síntesis de estudios seleccionados y sus impactos operativos (2021-2025).

Fuente: Elaboración propia.

Los estudios analizados de la **tabla 2** demuestran que los drones, equipados con tecnologías avanzadas como sensores remotos y sistemas de automatización, han revolucionado diversos campos de la minería. Su capacidad para operar en entornos complejos (BVLOS - Beyond Visual Line of Sight), su precisión en la captura de datos (con resoluciones inferiores a 10 cm) y su eficiencia en la reducción de costos y tiempos operativos los convierten en una herramienta indispensable en la era digital.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Conceptos

2.2.1.1 Taquimetría

En topografía clásica, la taquimetría se define como un método indirecto que, mediante la lectura del intervalo interceptado por los hilos estadimétricos de un teodolito (**ver ilustración 6**) sobre una mira graduada, permite calcular simultáneamente la distancia horizontal y la diferencia de alturas entre dos puntos; para ello se multiplica dicho intervalo por una constante de escala K (habitualmente 100) y se añade una constante aditiva C (normalmente 0), obteniéndose la distancia inclinada y su componente vertical (Ali, 1995).

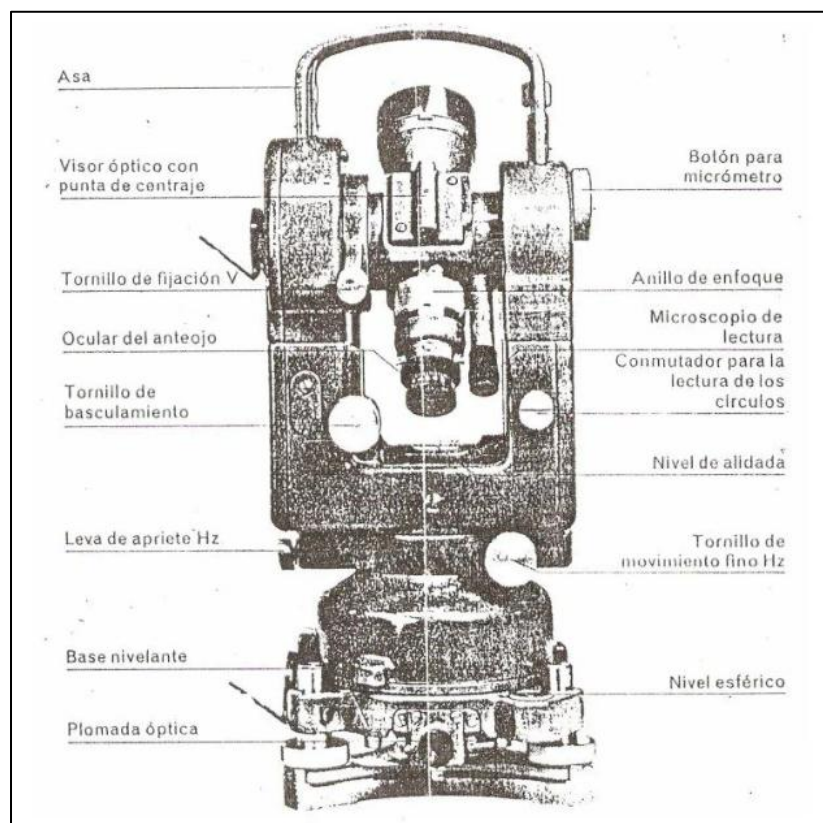


Ilustración 6. Partes de un taquímetro.

Fuente: Villner. (2021, 29 de junio). Taquímetro topográfico: ¿Qué es y para qué sirve?

2.2.1.2 Estación RTK

Una estación RTK (Real-Time Kinematic) es un sistema de posicionamiento satelital que permite obtener coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica, utilizando la diferencia de fases de señales GNSS entre dos receptores: uno fijo (base o maestro) y otro móvil (rover). Este método requiere que el receptor rover reciba no solo las señales satelitales, sino también las correcciones diferenciales transmitidas desde la estación base. Estas correcciones permiten compensar errores comunes a ambos receptores, como los causados por la ionosfera o por relojes satelitales. Según Tavasci et al. (2024), el RTK (**ver ilustración 7**) es fundamental en aplicaciones como navegación de drones en inspecciones de infraestructura, donde el posicionamiento preciso es esencial y las condiciones de visibilidad del cielo pueden afectar gravemente la calidad del posicionamiento.



***Ilustración 7.** Estación RTK.*

Fuente: Tavasci, L., Nex, F., & Gandolfi, S. (2024)

2.2.1.3 Vehículo aéreo no tripulado (VANT)

Un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) también denominado UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o, en su concepto sistémico, RPAS/UAS es una aeronave que opera sin piloto a bordo y que, según la Circular 328 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), “vuela sin un piloto al mando a bordo y se controla a distancia y plenamente desde otro lugar (tierra, otra aeronave o espacio) o ha sido programada y es plenamente autónoma”; esto implica que mantiene un vuelo controlado y sostenido mediante propulsión eléctrica, de explosión o a reacción, y que, pese a la ausencia física de tripulación, queda sujeta al marco regulatorio aeronáutico vigente para garantizar la seguridad y la integridad del espacio aéreo civil.

2.2.1.4 Tipos de drones

El artículo de Tahir et al. (2019) propone una clasificación de los drones en función de su configuración estructural, destacando cuatro tipos principales: ala fija, ala fija híbrido, rotor único y multirrotores. Cada una de estas categorías presenta características técnicas, ventajas operativas y limitaciones específicas que permiten comprender sus ámbitos de aplicación y sus restricciones de uso. La **tabla 3** sintetiza esta tipología y resume sus principales atributos:

Tipo de dron	Características principales	Ventajas	Limitaciones
Ala fija	Estructura similar a un avión. Requieren pista o espacio para despegar y aterrizar.	Gran autonomía (hasta 16 h), alta velocidad, cobertura de grandes áreas.	No pueden realizar vuelo estacionario (<i>hovering</i>). Poco maniobrables en espacios reducidos.
Ala fija híbrido	Combinan ala fija con capacidad de despegue y aterrizaje vertical (VTOL).	Potencial para combinar eficiencia y maniobrabilidad. Usados en entregas (ej. Amazon).	Aún en desarrollo, bajo desempeño tanto en vuelo estacionario como en vuelo horizontal.
Rotor único	Similares a helicópteros, con una pala principal y estabilizadores.	Alta capacidad de carga útil (ej. sensores LiDAR). Vuelos prolongados con motor a gasolina.	Complejidad mecánica, alto costo y riesgos operativos. Requieren operadores especializados.
Multirrotores	Incluyen tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros.	Bajo costo, fáciles de usar, populares para fotografía y vigilancia. Gran estabilidad en vuelo.	Autonomía limitada. No aptos para grandes distancias o vuelos largos.

Tabla 3. Clasificación de drones.

Fuente: Elaboración propia basada en Tahir et al. (2019)

2.2.1.5 Operación con visibilidad directa visual (VLOS, Visual Line Of Sight)

Operación en la cual el piloto a distancia mantiene contacto visual directo con la aeronave para dirigir su vuelo y satisfacer las responsabilidades de separación y anticolisión. Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024).

2.2.1.6 Operación Más Allá De La Visibilidad DIRECTA VISUAL (BVLOS, Beyond Visual Line Of Sight)

Operación con adecuada información sobre el entorno en el que vuela la RPA para proporcionar al piloto a distancia, suficiente conciencia de la situación para permitir el vuelo seguro de la RPA. Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024).

2.2.1.7 Definiciones de Infraestructura y Gestión de Residuos Mineros

Para la correcta interpretación de las operaciones mineras analizadas en esta investigación, es fundamental establecer un lenguaje técnico común que diferencie las estructuras productivas de aquellas destinadas a la gestión de residuos. La infraestructura minera se clasifica generalmente según su función en la cadena de valor: áreas de extracción y beneficio (mina y planta), y áreas de disposición final de estériles y relaves.

A continuación, la **tabla 4** sistematiza las definiciones técnicas de los principales componentes e instalaciones de una faena minera. Estas definiciones han sido sintetizadas basándose en el estándar internacional de ingeniería de minas establecido por Darling (2011) en el SME Mining Engineering Handbook, y alineadas con la normativa nacional vigente para la seguridad de depósitos de relaves, regulada por el Decreto Supremo N° 248 (Ministerio de Minería, 2007).

Concepto	Definición Técnica	Función Principal
Tajos	Excavación superficial a cielo abierto, desarrollada mediante un sistema escalonado de bancos y taludes con geometría de cono invertido.	Extracción: Permitir el acceso y arranque masivo de minerales desde la superficie de forma segura.
Acopio	Pila de almacenamiento temporal de material (mineral o estéril) ubicada estratégicamente entre la mina y la planta.	Regulación: Actuar como "pulmón" para asegurar la alimentación continua a la planta, independizando su ritmo de la mina.
Pilas (Lixiviación)	Estructura de ingeniería donde el mineral chancado se apila sobre una base impermeable con sistema de drenaje para ser irrigado.	Procesamiento: Funcionar como reactor químico para disolver y recuperar los metales de interés mediante soluciones ácidas.
Botadero	Lugar destinado a la disposición final de la roca estéril (lastre) extraída de la mina que no posee valor económico.	Descarte: Almacenar de forma estable y perpetua el material sin valor que debe moverse para acceder al mineral.
Depósito	Término genérico legal para toda obra construida para contener los residuos sólidos o líquidos provenientes del tratamiento de minerales.	Contención: Asegurar el aislamiento físico y químico de los residuos mineros del medio ambiente circundante.
Tranque de Relaves	Tipo de depósito cuyo muro de contención se construye utilizando la fracción gruesa (arenas) del propio relave, separada mediante ciclones.	Almacenamiento: Contener los relaves aprovechando el propio residuo estéril para levantar el muro de la presa.
Embalse de Relaves	Tipo de depósito cuyo muro de contención (presa) se construye íntegramente con materiales de empréstito (tierra y rocas) ajenos al relave.	Almacenamiento: Contener los relaves utilizando una barrera independiente de alta seguridad, similar a una represa de agua.
Espesado	Estado del relave que ha sido sometido a sedimentación para reducir su volumen de agua, logrando una consistencia de pasta de alta densidad.	Recuperación de Agua: Densificar el residuo para recircular agua al proceso y reducir el volumen que ocupa en el depósito.
Filtrado	Estado del relave sometido a deshidratación mecánica intensa (filtros) para ser depositado como un sólido húmedo y no como pulpa.	Estabilidad: Obtener un residuo "seco" (<20% humedad) para maximizar la recuperación de agua y permitir un apilamiento compactado y estable.

Tabla 4. Infraestructura Minera y Gestión de Residuos.

Fuente: Elaboración propia basada en las definiciones técnicas del SME Mining Engineering Handbook (Darling, 2011) y la normativa del Decreto Supremo N° 248 (Ministerio de Minería, 2007).

2.2.2 Teorías

2.2.2.1 Evaluación de Proyectos (Nassir Sapag Chain, 2007)

La metodología de preparación y evaluación de proyectos propuesta por Sapag Chain (2014) estructura la decisión de inversión en cinco estudios secuenciales mercado, técnico, legal, y económico-financiero, cuyo propósito es reducir la incertidumbre y sustentar la viabilidad con evidencias cuantitativas. En la etapa financiera, el autor enfatiza tres indicadores basados en el valor temporal del dinero, los cuales se describen la siguiente notación:

Símbolo	Definición	Fuente de cálculo en la metodología
$BN_t = Y_t - E_t$	Beneficio neto del año t (ingresos proyectados menos egresos operativos)	Resulta del estudio de mercado (pronósticos de demanda y precio) y del estudio técnico (CAPEX/OPEX).
I_0	Desembolso inicial (inversión fija + inversión intangibles + capital de trabajo + imprevistos)	Concluye el estudio técnico.
i	Tasa de descuento (costo ponderado de capital)	Derivada de la estructura de financiamiento analizada en el estudio económico.

Tabla 5. Variables claves.

Fuente: Elaboración propia basa en la teoría de Nassir Sapag (2014).

Una vez identificadas las variables financieras resumidas en la tabla anterior, la evaluación avanza hacia tres métricas fundamentales que materializan el principio del valor temporal del dinero y permiten juzgar la conveniencia de invertir en la tecnología propuesta:

Valor Actual Neto (VAN)

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

El proyecto se acepta si $VAN \geq 0$, criterio que cuantifica la creación de valor atribuible a la inversión.

Aplicación: En el caso del levantamiento topográfico minero, el VAN permite demostrar la riqueza incremental que genera la automatización con drones frente al método tradicional (reducción de tiempos de campo, menor riesgo operativo y disponibilidad de datos en tiempo real).

Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$TIR = \sum_{t=1}^n \frac{BNt}{(1+r)^t} - Io = 0$$

La TIR (r) representa la rentabilidad implícita del proyecto, este se aprueba cuando r (tasa interna de retorno) supera el costo de capital i. Sapag advierte que, para proyectos mutuamente excluyentes, el VAN debe prevalecer cuando ambos criterios divergen, dado que la TIR supone la reinversión de flujos al propio r.

Período de Recuperación (Payback)

$$PR = \frac{Io}{BN}$$

Con flujos variables, el PR corresponde al año en que la suma acumulada de BNt igual a Io. Aunque útil como indicador de liquidez relevante en contextos de volatilidad, Sapag subraya que no considera el valor temporal del dinero ni los beneficios posteriores al PR, por lo que su uso debe ser complementario.

Integración con el proceso de evaluación

1. Estudio de mercado: Define Y_t (ingresos) y, por extensión, BN_t .
2. Estudio técnico: Dimensiona I_o (CAPEX) y los costos operativos Et
3. Estudio económico: Consolida los flujos, aplica VAN, TIR y PR, y realiza análisis de sensibilidad variando variables críticas, tal como recomienda el autor para robustecer la decisión frente a la incertidumbre.

2.2.2.2 Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (MCDM)

El MCDM se define como un problema de decisión que **“busca determinar la mejor alternativa considerando más de un criterio de evaluación”** (Taherdoost & Madanchian, 2023). Este enfoque se fundamenta en la necesidad de estructurar decisiones complejas técnicas, económicas, ambientales y de seguridad que no pueden resolverse con un único indicador.

Según lo propuesto por Hwang y Yoon (1981), los problemas de decisión multicriterio se clasifican en Multi-Objective Decision Making (MODM) y Multi-Attribute Decision Making (MADM). El criterio distintivo es la cantidad de alternativas que el analista maneja: MODM aborda espacios de solución “innumerables”, con infinitas combinaciones factibles, mientras que MADM opera sobre conjuntos “numerables”, es decir, listas finitas y explícitas de opciones. Por esto mismo, la selección de drones corresponde a un problema MADM porque parte de un conjunto finito y explícito de alternativas previamente identificadas.

Un problema MADM se expresa mediante un conjunto finito de alternativas $A=\{A_i\}$, un conjunto de criterios $C=\{C_j\}$ y un vector de pesos normalizados $W=\{w_j\}$. La información se organiza en la matriz de decisión $M=[x_{ij}]$ que concentra el desempeño de cada alternativa en cada criterio, el objetivo es ordenar A del mejor al peor según una regla de agregación. Las definiciones operativas de alternativa, atributo y criterio se apoyan en la literatura clásica del campo.

La literatura ofrece un amplio abanico de técnicas para resolver problemas de decisión discreta, entre las que destacan el Simple Additive Weighting (SAW) o *Método de Suma Ponderada*—considerado la forma básica y más intuitiva de agregación lineal—, el Analytic

Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1980), TOPSIS (ideal positivo/negativo) (Hwang & Yoon, 1981), las familias ELECTRE y PROMETHEE de sobre clasificación (Roy, 1991; Brans & Vincke, 1985), así como enfoques basados en lógica difusa (Zavadskas & Turskis, 2011). Todas estas metodologías permiten integrar múltiples criterios, pero difieren en la carga computacional, la transparencia de los supuestos y la facilidad de comunicación de resultados a los tomadores de decisión.

La metodología que se usará en este proyecto será el método de evaluación por puntos (MEP), la cual es una variante de la suma aditiva ponderada (SAW), reconocida por su simplicidad y trazabilidad (Churchman & Ackoff, 1954). Su aplicación seguirá cuatro pasos secuenciales:

1. Identificación de criterios y escalas: se definen los criterios relevantes para la selección tecnológica, considerando autonomía operativa, calidad técnica del sistema, robustez ambiental y costo de inversión.
2. Determinación de pesos (W) mediante juicio experto, cumpliendo $\sum w_j = 1$.
3. Calificación de alternativas (x_{ij}) y cálculo del puntaje compuesto $A_i = \sum w_j x_{ij}$.
4. Selección de alternativas en base al cálculo de A_i .

2.3 Propuesta metodológica

La presente investigación se estructurará bajo los lineamientos de la Teoría de Evaluación de Proyectos, siguiendo el enfoque de Nassir Sapag Chain, con el propósito de determinar la prefactibilidad técnica, económica, normativa y operacional de la implementación de drones autónomos en servicios de levantamiento topográfico para la industria minera chilena. Para ello, el estudio se organiza en etapas sucesivas: estudio de mercado, estudio técnico, estudio legal-organizacional, evaluación económico-financiera y análisis de sensibilidad.

2.3 Propuesta metodológica

La presente investigación se estructura bajo los lineamientos de la Teoría de Evaluación de Proyectos de Nassir Sapag Chain, con el propósito de determinar la prefactibilidad técnica, económica, normativa y operacional de implementar drones autónomos en servicios de levantamiento topográfico para la industria minera chilena. Para ello, el estudio se organiza en las siguientes etapas:

1. Estudio de mercado

- Análisis del macroentorno económico y regulatorio.
- Análisis de oferta de servicios con drones aplicados a minería.
- Análisis de demanda mediante levantamiento espacial de faenas mineras a rajo abierto.
- Proyección de demanda para el período 2025-2034.
- Selección del escenario operativo representativo.
- Definición general de los servicios a evaluar.

2. Estudio técnico

- Determinación de requerimientos técnicos del sistema.
- Comparación tecnológica de alternativas mediante análisis multicriterio.
- Selección del sistema autónomo a implementar.
- Diseño general del proceso operativo.
- Definición de infraestructura de soporte.
- Dimensionamiento operacional del plan de vuelo.
- Definición de recursos humanos requeridos.
- Estimación de tarifa mediante metodología Cost-Plus.

3. Estudio legal y organizacional

- Revisión del marco normativo aeronáutico aplicable.
- Revisión de requisitos de telecomunicaciones y uso del espectro radioeléctrico.
- Revisión de exigencias de seguridad minera aplicables a faenas.
- Análisis de permisología eléctrica asociada a infraestructura de carga.

4. Estudio económico-financiero

- Definición del escenario base de operación manual.
- Comparación de costos CAPEX y OPEX.
- Estimación de costos ambientales asociados a emisiones de CO₂.
- Construcción de flujos de caja proyectados.
- Evaluación financiera mediante VAN, TIR y Payback.
- Comparación económica entre ambos escenarios.

5. Análisis de sensibilidad

- Identificación de variables críticas del modelo financiero.
- Evaluación de escenarios pesimista, base y optimista.
- Análisis del impacto de variaciones en precio, OPEX, tasa de descuento y demanda.
- Determinación del punto de equilibrio financiero del proyecto.

Capitulo III. Desarrollo

Este capítulo desarrolla el estudio de prefactibilidad para la creación de una empresa de servicios topográficos con drones autónomos en la minería chilena. Para ello, se analizan las condiciones de mercado, los requerimientos técnicos, el marco legal aplicable y la evaluación económico-financiera del proyecto. El análisis permite comparar un escenario base de operación manual con un escenario autónomo, con el fin de determinar la viabilidad de la propuesta desde una perspectiva integral.

3.1 Estudio de mercado

El estudio de mercado tiene como objetivo analizar las condiciones externas y sectoriales que influyen en la creación de una empresa de servicios topográficos con drones autónomos para la industria minera chilena. Para ello, se examinan variables económicas, regulatorias y operacionales que pueden incidir en la demanda del servicio, así como en las barreras de entrada para nuevos oferentes.

En primer lugar, se revisa el macroentorno económico y regulatorio, considerando la relevancia de la minería dentro de la economía nacional, las proyecciones del sector y las exigencias normativas asociadas a la operación de RPAS en faenas mineras. Posteriormente, se analiza la oferta actual de servicios con drones aplicados a minería, con el fin de identificar el nivel de especialización existente y las tecnologías utilizadas por los principales proveedores.

Asimismo, se desarrolla un análisis de demanda a partir del levantamiento espacial de faenas mineras a rajo abierto en Chile, considerando superficies asociadas a rajos, botaderos, pilas de lixiviación, depósitos de relaves y otras infraestructuras operativas. Esta información permite estimar la magnitud del mercado potencial, proyectar la demanda para el período 2025-2034 y seleccionar un escenario representativo para el análisis aplicado.

Finalmente, se define una cartera de servicios orientada a topografía, monitoreo operacional y apoyo geológico-geotécnico, que servirá como base para el estudio técnico y la posterior evaluación económico-financiera del proyecto.

3.1.1 Análisis del Macroentorno

El análisis del macroentorno permite identificar las variables externas que pueden influir en la viabilidad del proyecto, tanto desde el punto de vista económico como regulatorio. En el caso de los servicios con drones autónomos aplicados a la minería, estos factores resultan relevantes, ya que condicionan la capacidad de inversión de las empresas mineras, la demanda potencial de soluciones tecnológicas y las barreras de entrada para nuevos oferentes del mercado.

3.1.1.1 Variables Económicas

El entorno económico impacta directamente en la capacidad de inversión de las compañías mineras, tanto en términos de gasto de capital (CAPEX) como de gasto operacional (OPEX). Por esta razón, resulta necesario analizar las principales variables económicas que pueden incidir en la demanda de servicios tecnológicos asociados a levantamientos topográficos, monitoreo operacional y control de infraestructura minera.

Proyección del Precio del Cobre y Demanda

El precio del cobre es un indicador macroeconómico con una gran correlación respecto a la demanda de servicios tercerizados en minería. Según el Informe de Tendencias del Mercado del Cobre (noviembre 2025) de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), se proyecta un precio promedio de US\$ 4,45 la libra para 2025, anticipando un alza a US\$ 4,55 la libra para el año 2026. Se puede apreciar en el **gráfico 4**.

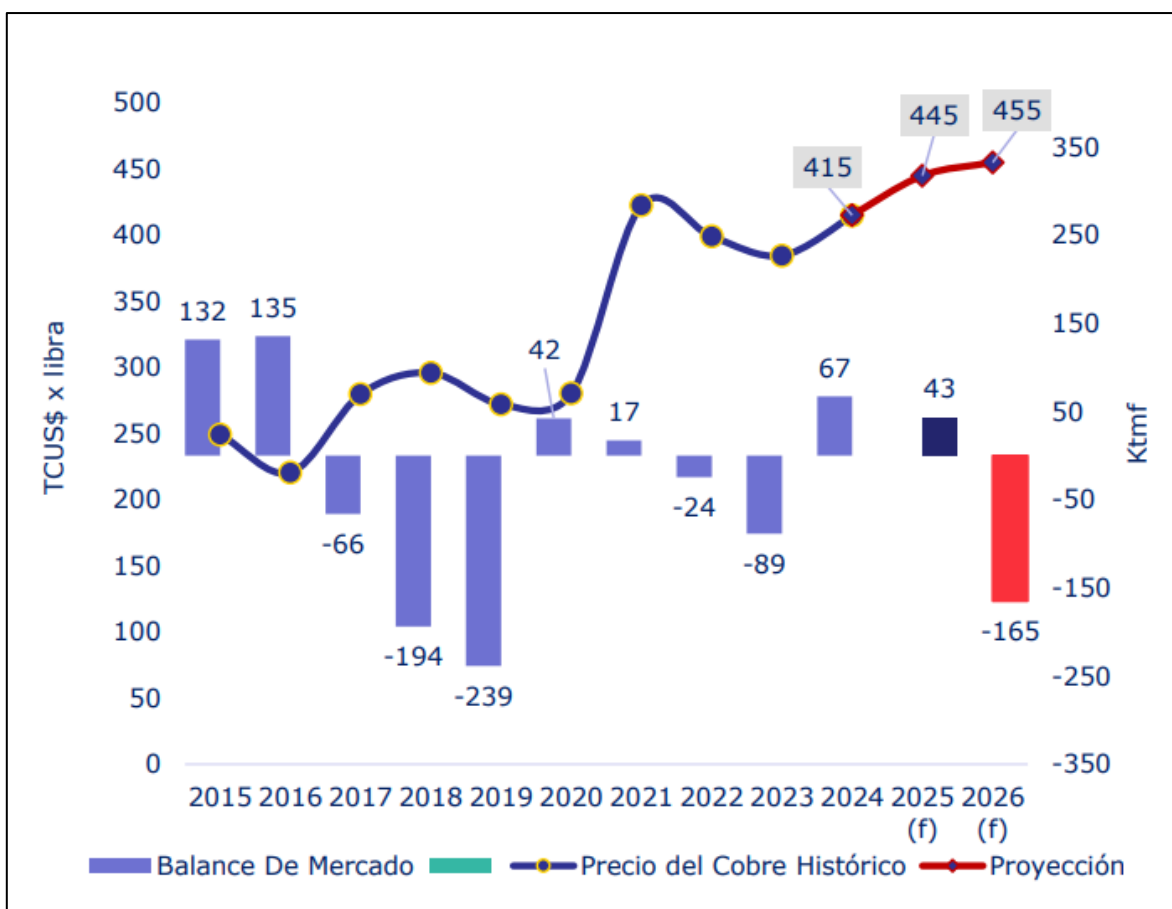


Gráfico 4. Proyección del precio del cobre (cUS\$/lb) periodo 2024-2026.

Fuente: Cochilco (2025). Informe de Tendencias del Mercado del Cobre, Proyecciones 2025-2026.

Este escenario de precios elevados, impulsado por el déficit estructural de oferta frente a la demanda por la electromovilidad, genera dos posibles efectos en la demanda del servicio de drones:

Este escenario de precios favorables puede generar un efecto positivo sobre la demanda de servicios con drones, principalmente por dos razones. En primer lugar, una mayor disponibilidad de ingresos permite a las compañías mineras destinar recursos a innovación, digitalización y tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia operacional. En segundo lugar, precios elevados del cobre pueden hacer rentable la explotación de minerales de menor ley, lo que incrementa el volumen de material removido y, por tanto, la necesidad de realizar levantamientos topográficos, control de avances, cubicaciones y monitoreo frecuente de botaderos, rajes y pilas de lixiviación.

Producción Nacional de Cobre

La producción nacional de cobre representa una aproximación al nivel de actividad física de la industria minera y, en consecuencia, permite estimar la demanda potencial por servicios de topografía y monitoreo aéreo. Según las proyecciones de Cochilco, se estima que la producción chilena de cobre alcance los 5,6 millones de toneladas métricas en 2026, lo que representa un incremento respecto al año base.

No obstante, para dimensionar de manera más precisa la demanda de servicios con drones, no basta con considerar únicamente el cobre fino producido. También es necesario tener en cuenta el volumen total de material extraído, debido a que este determina la extensión de áreas operativas que requieren control topográfico, tales como rajos, botaderos, depósitos de relaves y zonas de acopio.

Efecto de la caída en la Ley del Mineral

La antigüedad de los yacimientos en Chile ha provocado una disminución sostenida en la ley del mineral (porcentaje de cobre por tonelada de roca). Para mantener o aumentar la producción fina a 5,6 millones de toneladas, las mineras se ven obligadas a remover una cantidad exponencialmente mayor de material estéril.

Este aumento en la razón Lastre/Mineral incrementa la superficie activa de los rajos y botaderos. Esto exige un control topográfico diario para valorizar el pago a empresas contratistas de movimiento de tierra y verificar el cumplimiento del plan minero, tarea donde la fotogrametría con drones reduce los tiempos de trabajo de hasta un 35% frente a la topografía tradicional.

3.1.1.2 Marco Regulatorio

El sector de servicios aéreos en minería posee altas barreras de entrada regulatorias, lo que protege a las empresas establecidas y profesionales frente a competidores informales.

Normativa Aeronáutica

Para prestar servicios profesionales con drones en la gran minería, no basta con disponer de equipos RPAS, sino que es necesario cumplir con las exigencias establecidas por la Dirección General de Aeronáutica Civil. En particular, cuando la actividad corresponde a trabajos aéreos con fines comerciales, la empresa debe contar con un Certificado de Operador Aéreo (AOC), conforme a lo establecido en la DAN 119 y la DAN 137.

Este certificado permite acreditar que el operador cuenta con una estructura organizacional, procedimientos operacionales, manuales, personal habilitado y condiciones de seguridad operacional adecuadas para prestar servicios aéreos especializados. En este sentido, la exigencia del AOC constituye una barrera de entrada relevante para el mercado, ya que obliga a las empresas a formalizar su operación y cumplir estándares técnicos y documentales superiores a los de un uso recreativo o informal del dron (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2021; Dirección General de Aeronáutica Civil, 2023a).

Asimismo, la prestación de servicios con RPAS en minería debe considerar las reglas generales de operación establecidas por la DAN 91, especialmente en lo relativo a la autorización previa de operación, delimitación del área de vuelo, identificación del operador, modalidad de operación, altura prevista y presentación de antecedentes ante la autoridad aeronáutica (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2023c).

Normativa de Seguridad Minera

Además del cumplimiento aeronáutico, la implementación de estaciones autónomas tipo *drone-in-a-box*, como el DJI Dock 2, debe ajustarse a las condiciones generales de seguridad aplicables dentro de una faena minera. El Reglamento de Seguridad Minera, aprobado mediante el DS N.º 132/2002, establece que sus disposiciones son aplicables a las actividades, instalaciones, servicios de apoyo e infraestructura necesaria para el funcionamiento de la industria extractiva minera (Ministerio de Minería, 2004).

En este contexto, aunque la normativa minera no regula directamente la operación aérea del RPAS, sí resulta relevante para la infraestructura fija asociada al sistema autónomo, tales como plataformas de soporte, zonas de emplazamiento, instalaciones eléctricas, áreas segregadas y condiciones de seguridad operacional dentro de la faena. Por ello, la instalación del sistema debe ser compatible con la protección de las personas, la continuidad operacional y el resguardo de la infraestructura minera, quedando sujeta a los procedimientos internos del titular minero y, cuando corresponda, a la fiscalización de SERNAGEOMIN (Ministerio de Minería, 2004).

De esta manera, el marco regulatorio actúa como una barrera de entrada técnica y organizacional, ya que exige que el proveedor del servicio cuente no solo con capacidad aeronáutica, sino también con una planificación adecuada de seguridad minera, infraestructura de soporte y cumplimiento normativo sectorial.

3.1.1 Análisis de oferta

El mercado chileno de servicios de levantamiento topográfico con drones presenta una oferta consolidada y en proceso de especialización, especialmente en sectores estratégicos como la minería. La Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) regula a estos operadores mediante la obtención del Certificado de Operador Aéreo (AOC), lo que garantiza un marco de seguridad y estandarización en las operaciones con RPAS. Dentro de este contexto, se identifican empresas que han orientado su propuesta de valor hacia la generación de datos geospaciales de alta precisión mediante tecnologías como LiDAR aerotransportado, fotogrametría con RTK/PPK y magnetometría aérea, destacando por su capacidad de integrar los resultados en flujos de trabajo de ingeniería, estudios de terrenos y exploraciones mineras.

En la **tabla 6** se presentan algunas de las principales empresas que cuentan con autorización vigente para realizar trabajos aéreos con drones, ofreciendo servicios aplicados a la minería:

Empresa	Descripción	Tecnologías declaradas
	Levantamientos LiDAR con RPAS y escaneo láser para faena orientados a ingeniería y minería.	LiDAR (RPAS), escáner láser, fotogrametría
	Geofísica para minería complementada con aerofotogrametría para exploración y modelamiento.	Magnetometría en RPAS, fotogrametría
	Geotecnia y geología minera; integra levantamientos topográficos según alcance para diseño y control de faenas.	Geotecnia/geología, integración de datos topográficos
	Integran GIS/análítica con datos capturados por RPAS para modelos 2D/3D y visualización operativa.	GIS, analítica de datos, integración de datos RPAS

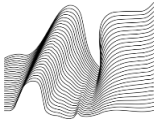
Empresa	Descripción	Tecnologías declaradas
	Operador multisector que realiza cartografía y modelado 3D con drones: ortomosaicos, MDT/MDS y análisis geoespacial.	Fotogrametría, flujo GIS, modelado 3D

Tabla 6. Principales proveedores de servicios topográficos con drones para minería

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, la oferta de servicios con drones en el sector minero en Chile se caracteriza por un creciente nivel de especialización y por la diversidad de enfoques entre las empresas. Algunas destacan por el uso de tecnologías avanzadas para obtener datos de gran precisión, mientras que otras aportan valor a través de la integración de estos datos en estudios de terreno, análisis y gestión de proyectos. Esta variedad permite atender distintas necesidades de la minería, desde la planificación y control de obras hasta la exploración y el seguimiento de faenas, conformando un mercado competitivo que impulsa la adopción de drones en el país.

3.1.2 Análisis de demanda

3.1.2.1 Entorno operativo y localización de la demanda

La adopción de drones en la gran y mediana minería se ha acelerado en la última década por su capacidad de entregar modelos digitales de terreno, control de avance y de acopios, monitoreo de taludes, depósitos de relaves y botaderos con mayor frecuencia, seguridad y trazabilidad que los métodos tradicionales. En este contexto, el presente análisis caracteriza la demanda efectiva y potencial de servicios con drones a partir de 31 faenas activas, distribuidas en diversas regiones del país. Considerando únicamente aquellas de explotación a rajo abierto, ya que en el caso de las operaciones subterráneas no es posible realizar una delimitación espacial precisa mediante imágenes satelitales. En la siguiente tabla se sintetizan los datos utilizados para el presente análisis.

Región	Faenas incluidas	Participación (%)
Antofagasta	El Abra; Chuquicamata; Spence; Sierra Gorda; Esperanza; Mantos Blancos; Zaldívar; Escondida; Ministro Hales; Radomiro Tomic; Gabriela Mistral; Antucoya; Lomas Bayas; Michilla; El Peñón	48,4 %
Atacama	Salvador; Mantoverde; La Coipa; Candelaria; Caserones	16,1 %
Tarapacá	Quebrada Blanca; Collahuasi; Cerro Colorado	9,7 %
Coquimbo	El Romeral; TECK-CDA; Los Pelambres	9,7 %
Valparaíso	Cerro Negro; El Soldado; Andina	9,7 %
Región Metropolitana	Cerro Blanco; Los Bronces	6,5 %
Total general	—	100 % (31 faenas)

Tabla 7. Localización y participación porcentual de las faenas mineras incluidas en el estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se presenta de manera visual la localización de las faenas consideradas en el estudio. El mapa evidencia una fuerte concentración de operaciones en la Región de Antofagasta, seguida por Atacama y Coquimbo, conformando el principal corredor minero del país.

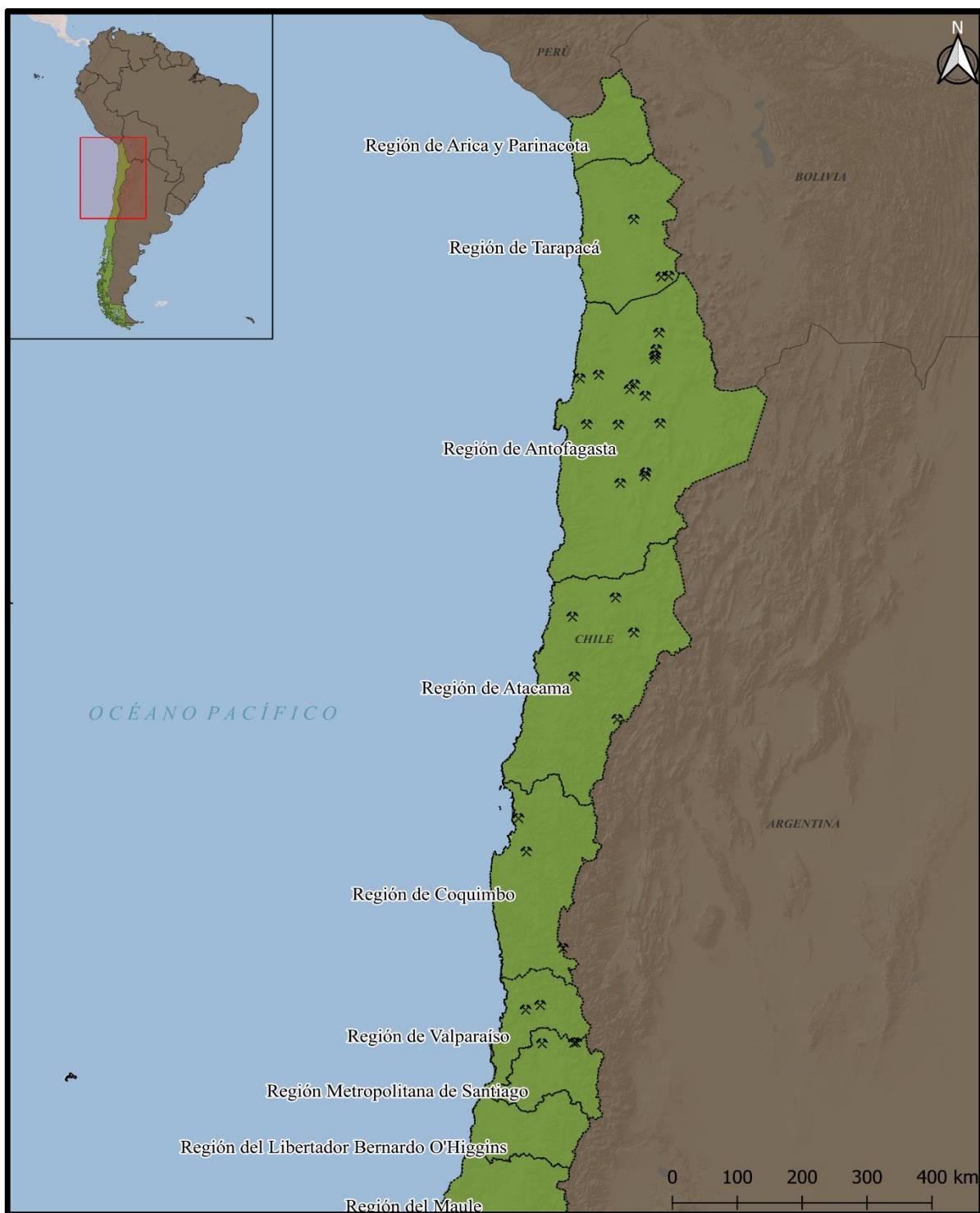


Figura 2. Distribución geográfica de las faenas.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.2 Metodología

Dado que no existen registros públicos estandarizados sobre la superficie ocupada por las distintas infraestructuras mineras como embalses, espesadores, tranques de relaves, botaderos y depósitos, fue necesario realizar un levantamiento espacial independiente utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para ello, se empleó QGIS, digitalizando manualmente las áreas visibles en imágenes satelitales correspondientes al año 2025, y clasificándolas según su función principal.

La **figura 3** muestra un ejemplo del proceso aplicado a tres faenas de la Región de Antofagasta, donde se delimitan los polígonos correspondientes a cada tipo de instalación minera. Este procedimiento permitió estimar la superficie total (en hectáreas) asociada a cada categoría, sirviendo de base para el análisis de la demanda.

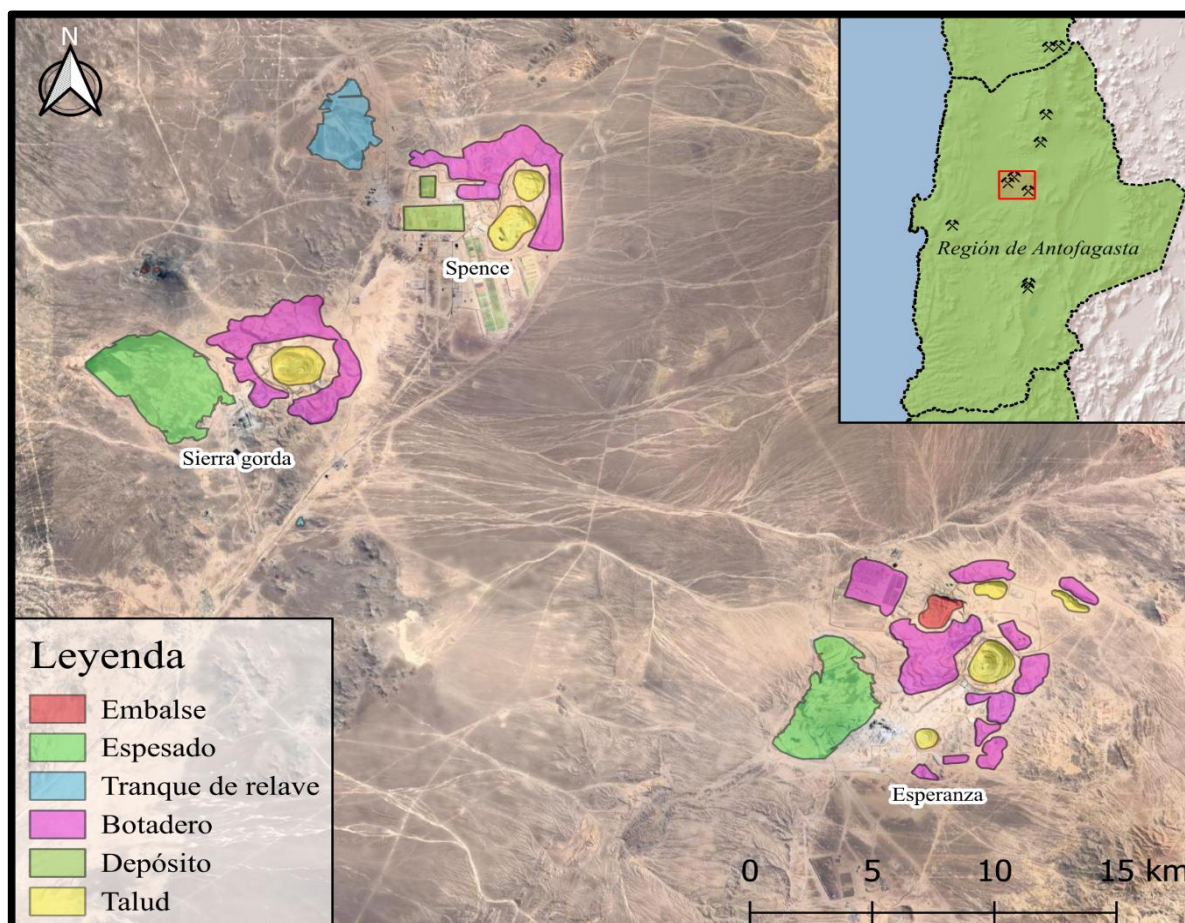


Figura 3. Clasificación espacial de depósitos y estructuras mineras.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2.3 Resultados

A partir del proceso de digitalización y clasificación de las áreas mineras en QGIS, se cuantificaron las superficies totales correspondientes a **31 faenas activas** distribuidas en seis regiones del país. Los polígonos resultantes fueron categorizados según su función operacional, incluyendo taludes, tranques de relaves, embalses, espesadores, áreas de filtrado, botaderos, pilas, depósitos y acopios.

Como resultado global, cuyos datos desglosados por faena e infraestructura se presentan en el Anexo A, el estudio abarca una **superficie total de 58.960 hectáreas**. Del análisis de estas cifras se desprende que los tajos (rajos) y botaderos constituyen las mayores extensiones territoriales, seguidos por los tranques de relaves y embalses; por su parte, las áreas de procesos como espesado, filtrado y acopio ocupan superficies comparativamente menores.

La información detallada en el **Anexo A** evidencia una marcada concentración de superficie en la Región de Antofagasta, la cual reúne cerca de la mitad del área total levantada. Esta predominancia responde a la envergadura de las operaciones de minería a rajo abierto en la zona como Escondida, Chuquicamata, Radomiro Tomic, Sierra Gorda y Spence, caracterizadas por integrar extensos tajos, grandes botaderos y sistemas masivos de disposición de relaves. La magnitud de los movimientos de material en estas faenas justifica que las áreas de estéril y relaves superen ampliamente a otras unidades operativas, subrayando la necesidad de un monitoreo volumétrico continuo.

Por otro lado, las regiones de Atacama, Coquimbo y Tarapacá muestran superficies intermedias, asociadas a faenas de mediana y gran escala como Candelaria, Mantoverde, Los Pelambres y Quebrada Blanca. Finalmente, en la zona central (Valparaíso y Región Metropolitana) se registra una menor extensión total, vinculada a operaciones con huellas superficiales más acotadas, entre las que destacan Andina, El Soldado, Los Bronces y Cerro Blanco.

3.1.2.4 Proyección de demanda

Con el fin de sustentar la proyección de la demanda de servicios con drones, se utilizó como referencia la evolución esperada de la producción de cobre en Chile elaborada por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). Si bien la producción de cobre fino no refleja directamente el volumen total de material movido por una faena, su variación anual constituye un indicador ampliamente aceptado del nivel de actividad minera. Debido a que información detallada sobre leyes del mineral, toneladas minadas o estéril removido no es pública para cada operación, la proyección se basa en la tendencia regional del cobre fino como aproximación conservadora del crecimiento de las áreas operativas. La **tabla 8** presenta la producción proyectada por región para el período 2024–2034, información que constituye la base para estimar la expansión potencial de las superficies que requieren levantamientos mediante drones.

Región / Producto	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Tarapacá (Total)	777	867	894	905	843	839	848	888	847	785	775
Antofagasta (Total)	2.933	3.060	3.118	3.092	2.882	2.762	2.817	2.903	2.841	2.861	2.782
Atacama (Total)	581	644	724	736	705	724	777	712	621	655	650
Coquimbo (Total)	345	353	357	385	385	393	404	532	560	594	585
Valparaíso (Total)	238	267	279	375	386	360	285	253	252	268	240
Región Metropolitana (Total)	156	116	226	310	307	278	324	337	316	305	286
O'Higgins (Total)	380	343	328	341	385	388	347	331	340	358	342

Tabla 8. Proyección esperada de producción de cobre a nivel regional según área productiva, 2023 – 2034.

Fuente: COCHILCO (2025), *Proyección de la Producción de Cobre en Chile. Período 2024–2034*.

Los datos presentados muestran que la producción nacional de cobre presenta variaciones significativas entre regiones, evidenciando una mayor dinámica en el Norte Grande y Norte Chico, especialmente en **Antofagasta, Atacama y Coquimbo**, donde se proyectan aumentos o estabilidad operacional. En contraste, algunas regiones del centro sur presentan leves disminuciones o estabilidad, como es el caso de O'Higgins. Estas tendencias permiten establecer tasas de crecimiento diferenciadas por región, que se utilizan para modelar la proyección de superficie potencialmente sujeta a levantamientos con drones. Bajo este enfoque, el crecimiento o disminución de la producción minera funciona como un indicador indirecto de la actividad operacional y, en consecuencia, de la demanda futura de servicios con los drones.

Con base en este marco, la proyección de superficies se construye aplicando la variación anual de la producción regional estimada por COCHILCO al valor base obtenido mediante el levantamiento espacial del año 2025. Para cada región r y año t , la superficie proyectada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Ha_{r,t} = Ha_{r,2025} \times \frac{Prod_{r,t}}{Prod_{r,2025}}$$

Donde:

- $Ha_{r,t}$ corresponde a las hectáreas proyectadas para la región r en el año t .
- $Ha_{r,2025}$ es la superficie base levantada en QGIS para el año 2025.
- $Prod_{r,t}$ corresponde a la producción regional de cobre fino proyectada por COCHILCO para la región r en el año t .
- $Prod_{r,2025}$ corresponde a la producción regional del año base.

Este procedimiento permite generar una proyección anual conservadora y consistente con la información pública disponible, estimando así la evolución potencial de las superficies que requerirán levantamientos con drones durante la próxima década.

A continuación, y aplicando la metodología descrita, se presentan las tablas de proyección de superficie para el período 2025–2034. Estas tablas muestran, para cada región, la producción anual proyectada por COCHILCO, el factor de variación relativo respecto al año base 2025 y las hectáreas estimadas para cada año según el modelo de escalamiento proporcional adoptado. La información permite visualizar la evolución esperada de la superficie operativa minera y constituye la base para el análisis posterior de la demanda de servicios con drones.

Región: Tarapacá

Año	Prod (kt)	Factor	Ha
2025	867	1,000	6719.6
2026	894	1.031	6928.8
2027	905	1.044	7014.1
2028	843	0.972	6533.6
2029	839	0.968	6502.6
2030	848	0.978	6572.3
2031	888	1.024	6882.3
2032	847	0.977	6564.6
2033	785	0.905	6084.1
2034	775	0.894	6006.5

***Tabla 9.** Proyección de superficie estimada para la Región de Tarapacá (2025–2034).*

Fuente: Elaboración propia.

Región: Antofagasta

Año	Prod (kt)	Factor	Ha
2025	3.060	1.000	39951.6
2026	3.118	1.019	40708.8
2027	3.092	1.010	40369.4
2028	2.882	0.942	37627.6
2029	2.762	0.903	36060.9
2030	2.817	0.921	36778.9
2031	2.903	0.949	37901.8
2032	2.841	0.928	37092.3
2033	2.861	0.935	37353.4
2034	2.782	0.909	36322.0

Tabla 10. Proyección de superficie estimada para la Región de Antofagasta (2025–2034).

Fuente: Elaboración propia.

Región: Atacama

Año	Prod (kt)	Factor	Ha
2025	644	1.000	5356.4
2026	724	1.124	6021.8
2027	736	1.143	6121.6
2028	705	1.095	5863.8
2029	724	1.124	6021.8
2030	777	1.207	6462.6
2031	712	1.106	5922.0
2032	621	0.964	5165.1
2033	655	1.017	5447.9
2034	650	1.009	5406.3

Tabla 11. Proyección de superficie estimada para la Región de Atacama (2025–2034).

Fuente: Elaboración propia.

Región: Coquimbo

Año	Prod (kt)	Factor	Ha
2025	353	1.000	2848.4
2026	357	1.011	2880.7
2027	385	1.091	3106.6
2028	385	1.091	3106.6
2029	393	1.113	3171.1
2030	404	1.144	3259.9
2031	532	1.507	4292.7
2032	560	1.586	4518.7
2033	594	1.683	4793.0
2034	585	1.657	4720.4

***Tabla 12.** Proyección de superficie estimada para la Región de Coquimbo (2025–2034).*

Fuente: Elaboración propia.

Región: Valparaíso

Año	Prod (kt)	Factor	Ha
2025	267	1.000	2259.8
2026	279	1.045	2361.4
2027	375	1.404	3173.9
2028	386	1.446	3267.0
2029	360	1.348	3046.9
2030	285	1.067	2412.2
2031	253	0.948	2141.3
2032	252	0.944	2132.9
2033	268	1.004	2268.3
2034	240	0.899	2031.3

***Tabla 13.** Proyección de superficie estimada para la Región de Valparaíso (2025–2034).*

Fuente: Elaboración propia.

Región: Metropolitana

Año	Prod (kt)	Factor	Ha
2025	116	1.000	1824.8
2026	226	1.948	3555.3
2027	310	2.672	4876.7
2028	307	2.647	4829.5
2029	278	2.397	4373.3
2030	324	2.793	5096.9
2031	337	2.905	5301.4
2032	316	2.724	4971.1
2033	305	2.629	4798.0
2034	286	2.466	4499.1

Tabla 14. Proyección de superficie estimada para la Región Metropolotina (2025–2034).

Fuente: Elaboración propia.

Nivel Nacional

Año	Ha
2025	58960.6
2026	62456.8
2027	64662.2
2028	61228.0
2029	59176.6
2030	60582.9
2031	62441.6
2032	60444.6
2033	60744.7
2034	58985.7

Tabla 15. Proyección de superficie estimada a nivel nacional (2025–2034).

Fuente: Elaboración propia.

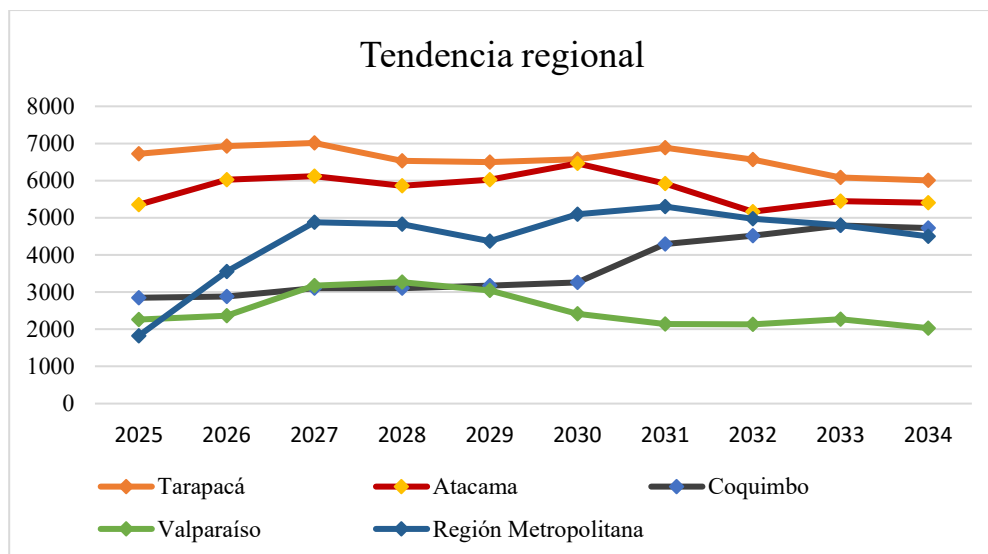


Gráfico 5. Proyección de superficie estimada a nivel nacional (2025–2034).

Fuente: Elaboración propia.

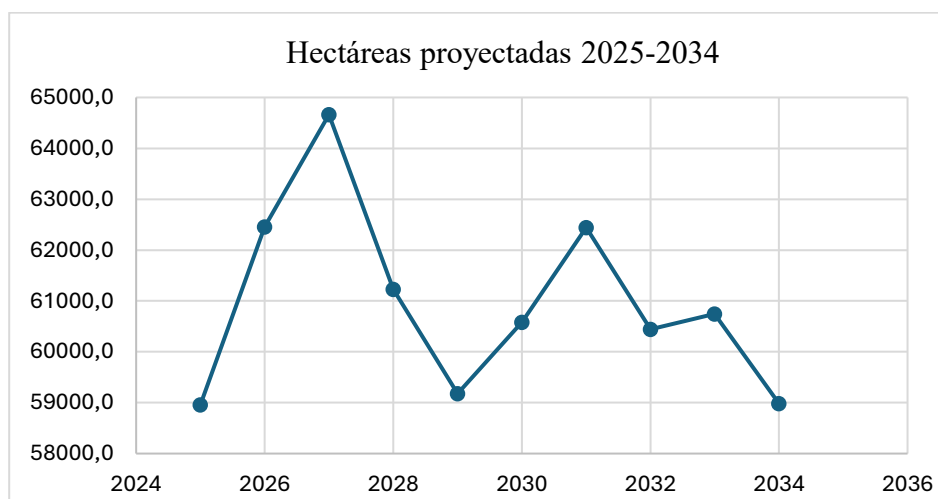


Gráfico 6. Proyección de superficie estimada a nivel nacional (2025–2034).

Fuente: Elaboración propia.

Las proyecciones regionales evidencian diferencias relevantes en la evolución de la superficie operativa estimada durante el período 2025–2034. Para facilitar la lectura del **gráfico 5**, se excluyó la Región de Antofagasta, debido a que su superficie proyectada es considerablemente superior a la del resto de las regiones analizadas. Su inclusión en el mismo gráfico habría generado una diferencia de escala que dificultaría la visualización de las tendencias regionales menores.

En este sentido, Tarapacá presenta un comportamiento relativamente estable, aunque con una leve disminución hacia el año 2034. Atacama muestra variaciones moderadas durante el período, alcanzando sus mayores valores en torno a 2030. Por su parte, Coquimbo registra un crecimiento sostenido, asociado a una mayor expansión relativa de su superficie proyectada. Valparaíso presenta un aumento importante hacia 2027, seguido de una disminución progresiva, mientras que la Región Metropolitana exhibe una mayor variabilidad, reflejando cambios más marcados en la proyección de actividad de sus principales operaciones.

En el caso de Antofagasta, si bien no se incluye en el **gráfico 5** por motivos de escala, esta región concentra con amplitud la mayor superficie operativa proyectada durante todo el período. Esta situación responde al peso de sus grandes faenas a rajo abierto y confirma su relevancia dentro del mercado potencial para servicios de levantamiento topográfico con drones.

A nivel nacional, como se observa en el **gráfico 6**, la superficie operativa proyectada presenta variaciones moderadas entre 2025 y 2034, fluctuando entre aproximadamente 58.960 ha y 64.662 ha. El promedio del período alcanza las **60.968,4 hectáreas**, lo que refleja una evolución relativamente estable de la demanda potencial. Las disminuciones observadas en algunos años pueden asociarse a cambios en la intensidad productiva regional, ajustes operacionales o transiciones entre fases de explotación, mientras que los incrementos corresponden a períodos de mayor actividad estimada según la producción regional de cobre fino proyectada por COCHILCO.

3.1.2.5 Selección y Justificación del Escenario de Operación

Sobre la base del análisis de demanda y la caracterización territorial expuesta en los puntos anteriores, se ha determinado seleccionar a **Compañía Minera Lomas Bayas** como el escenario objetivo para la implementación y validación técnica del servicio de drones autónomos. Esta decisión estratégica se sustenta en la convergencia de factores geográficos, dimensionales y operacionales que la posicionan como un caso de estudio representativo para la industria.

En primer lugar, desde una perspectiva de localización estratégica, la faena se emplaza en la Región de Antofagasta, zona que, conforme a lo establecido en el análisis del entorno operativo (**punto 3.1.2.1**), constituye el principal clúster minero del país, concentrando el 48,4% de las operaciones estudiadas y proyectando la mayor superficie operativa para la próxima década.

En segundo lugar, respecto a sus características dimensionales, los datos levantados en la tabla del **anexo A** indican que Lomas Bayas posee una superficie operativa estimada de 1.380,1 hectáreas. Esta magnitud la sitúa como una operación de gran escala, pero con una extensión territorial acotada en comparación con mega-yacimientos como Escondida o Chuquicamata. Esta cualidad es crítica para la factibilidad del proyecto, pues permite abarcar la totalidad de las áreas de interés mediante una flota optimizada, facilitando el control de variables y la validación de la tecnología sin incurrir en las complejidades logísticas excesivas de una faena de mayor envergadura.

Finalmente, la configuración espacial de sus activos físicos ofrece la diversidad necesaria para validar las distintas aplicaciones del servicio. Según el desglose de infraestructura, la faena integra componentes críticos como **botaderos de estéril (487,7 ha)**, **pilas de lixiviación (633,1 ha)** y **tajos abiertos (259,3 ha)**, cuya distribución territorial se detalla en la **Figura 4**.

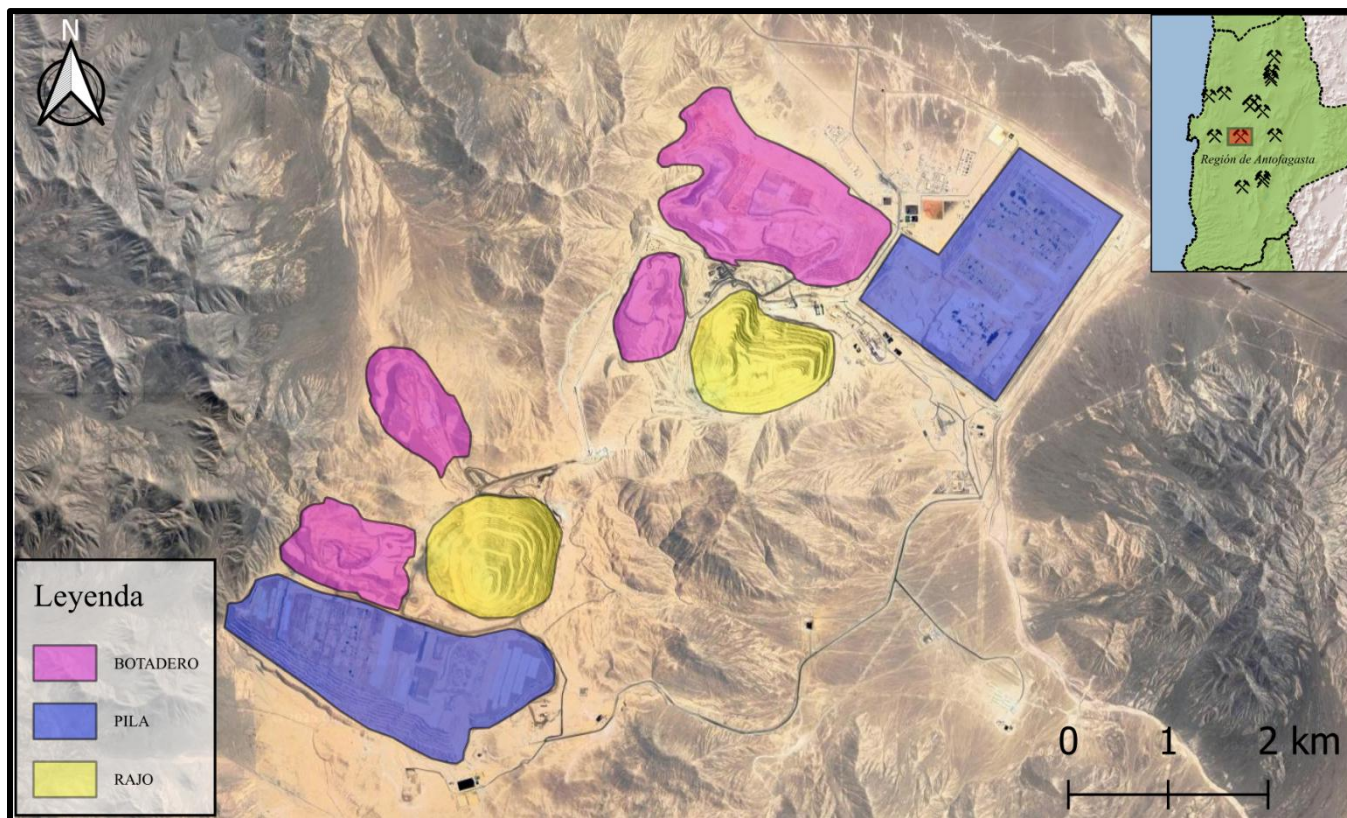


Figura 4. Lugar de ejecución y áreas de interés operativo en Cía. Minera Lomas Bayas.

Fuente: Elaboración Propia.

Para garantizar la viabilidad técnica de estas operaciones, se evaluó la ubicación de una estación base automatizada respecto a los frentes de trabajo. Como se evidencia en la Figura 7, las distancias desde la base operacional hacia los distintos puntos de interés se mantienen dentro del radio de acción efectivo estándar de los equipos industriales actuales, consolidando así a Lomas Bayas como el escenario idóneo para la demostración técnica y económica de la propuesta mediante una única estación de despliegue.



Figura 5. Distancia de los Puntos de Interés respecto a la Base Operacional.

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.2.6 Definición de servicios

Para satisfacer los requerimientos técnicos y operativos de Compañía Minera Lomas Bayas, y tomando como referencia los estándares de cumplimiento exigidos actualmente en la gran minería chilena, se ha estructurado un catálogo integral de servicios basado en plataformas aéreas autónomas. Esta propuesta de valor busca cubrir toda la cadena de captura y procesamiento de datos espaciales, dividiéndose estratégicamente en dos grandes áreas de aplicación.

Para estructurar la propuesta, los servicios se dividen en dos modelos operativos. El **Modelo 1** agrupa los levantamientos topográficos recurrentes, asociados a rajos, pilas, botaderos, caminos y frentes de trabajo. Su objetivo es mantener información espacial actualizada para apoyar la planificación y el seguimiento operacional de la faena.

El **Modelo 2** considera servicios complementarios de monitoreo, inspección y apoyo geológico-geotécnico, aplicables a sectores específicos que requieren mayor revisión técnica o control visual. Estos servicios permiten ampliar el uso del sistema de drones autónomos más allá de la topografía general.

A continuación, se detallan las actividades específicas estandarizadas para cada modelo operativo:

Item (1)	Descripción del Servicio
1.1	Levantamiento topográfico de Ripios y Pilas de Lixiviación (mensual)
1.2	Análisis de rugosidad en Rutas Principales (mensual)
1.3	Levantamiento topográfico de avances por fases (semanal)
1.4	Levantamiento topográfico de avances por Botaderos (mensual)
1.5	Emisión de Informe topográfico de Rajos (diario)
1.6	Levantamiento de borde de banco según requerimiento cliente geotécnico (diario)
1.7	Levantamiento de pozos de tronadura (diario)
1.8	Registro en Videos por fases, palas, botaderos y caminos (mensual)
1.9	Topografía actualizada con botaderos, remanentes en kton y mallas de perforación (semanal)

Tabla 16. Modelo 1 - Servicios de Topografía, Mina 3D y Autonomía

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes proporcionados por Mining Technology Consulting.

Ítem (2)	Descripción del Servicio
2.1	Plataforma de visualización web 3D de rajos, Planos de Riesgo Geotécnico, caminos y mediciones básicas
2.2	Levantamiento y Procesamiento Geológico & Geotécnico (G&G) con Nota Técnica
2.3	Servicios de Monitoreo mediante tecnología UAV para áreas de Plan de Cierre
2.4	Levantamiento Geotécnico en polígonos de patios de perforación
2.5	Levantamiento Geotécnico de puntos de vaciado en Botaderos

Tabla 17. Modelo 2 - Servicios de Levantamientos Geológicos y Geotécnicos

Fuente: Elaboración propia a partir de antecedentes proporcionados por Mining Technology Consulting.

3.2 Estudio Técnico

El estudio técnico tiene como objetivo definir las condiciones necesarias para implementar un servicio de levantamiento topográfico y monitoreo mediante drones autónomos en una faena minera a rajo abierto. Para ello, se establecen los requerimientos técnicos, operativos y organizacionales que debe cumplir el sistema, considerando las características propias de la minería del norte de Chile, tales como grandes extensiones territoriales, ambientes desérticos, presencia de polvo, condiciones de viento, exigencias de seguridad y necesidad de precisión geomática.

A partir de estos requerimientos, se realiza una comparación de alternativas tecnológicas disponibles en el mercado, con el propósito de seleccionar la solución más adecuada para el proyecto. Esta evaluación considera variables como autonomía, precisión, resistencia ambiental, capacidad de operación remota, costos de inversión y compatibilidad con los requerimientos del servicio.

Posteriormente, se define la configuración del sistema seleccionado, incluyendo el equipamiento principal, la infraestructura de soporte, el diseño del proceso operativo, el dimensionamiento del plan de vuelo y los requerimientos de capital humano. Estos elementos permiten estimar la capacidad operativa del servicio, la continuidad de las misiones y los recursos necesarios para su funcionamiento en terreno.

En conjunto, este análisis permite establecer la base técnica del proyecto y entregar los insumos necesarios para la posterior evaluación económica-financiera, especialmente en lo relativo a inversión inicial, costos operacionales, estructura organizacional y tarifa mensual del servicio.

3.2.1 Determinación de requerimientos técnicos

Para asegurar la viabilidad técnica y operativa del proyecto en un entorno de minería a cielo abierto, se establecen las siguientes especificaciones críticas. Estas variables se han definido tomando como referencia normas técnicas internacionales de protección de equipamiento y estándares de precisión geomática.

Tipología de Sensores y Captura de Datos

Las faenas ubicadas en el norte de Chile presentan condiciones áridas con escasa flora, lo que permite priorizar la frecuencia de captura visual por sobre la capacidad de penetrar vegetación densa.

Se requiere un sensor óptico RGB de alta resolución (mínimo 20 megapíxeles) equipado obligatoriamente con Obturador Mecánico Global (*Global Shutter*). Según Luhmann et al. (2019), el uso de obturadores mecánicos es crítico en fotogrametría aérea de baja altitud para eliminar el efecto de *Rolling Shutter*, el cual introduce deformaciones geométricas en la imagen cuando el sensor se mueve a alta velocidad. Esta especificación garantiza la integridad métrica de los modelos digitales sin necesidad de correcciones de software complejas, asegurando un error de re-proyección mínimo acorde a los estándares de mapeo de ingeniería.

Eficiencia Energética y Tiempo de Vuelo

Dada la vasta extensión de los rajes mineros y la necesidad de maximizar la productividad operativa, el sistema debe poseer una autonomía energética suficiente para cubrir áreas significativas en una sola operación. Se establece como requisito deseable un tiempo de vuelo superior a 40 minutos por ciclo de batería. Esto minimiza los tiempos muertos asociados al retorno a casa para cambio de baterías y maximiza la cobertura de hectáreas por jornada.

Nivel de Autonomía y Seguridad Operacional

Alineándose con los principios de la norma ISO 45001, la estrategia operativa debe priorizar la eliminación del personal de terreno. Por ello, se propone la utilización de sistemas de captura de datos autónomos como estándar para el monitoreo de zonas complejas.

A diferencia de la operación manual, los equipos autónomos permiten desacoplar la frecuencia de monitoreo de la presencia física del topógrafo. Esto justifica realizar un análisis técnico-económico para determinar la viabilidad de reemplazar los equipos convencionales por plataformas desatendidas.

Robustez y Resistencia Ambiental

El equipo enfrentará condiciones de "Invierno Altiplánico" y desierto extremo: radiación UV, vientos superiores a 10 m/s y polvo en suspensión.

Es por esto por lo que es recomendable utilizar equipos con certificación de grado de protección IP55 según la Norma Chilena NCh-IEC 60529. Adicionalmente, el sistema debe garantizar una resistencia al viento operativa mínima de 12 m/s para soportar las corrientes convectivas del rajo.

La norma NCh-IEC 60529, homologada por el Instituto Nacional de Normalización (INN), establece que el primer dígito (5) garantiza la protección contra el ingreso de polvo en cantidades perjudiciales, requisito vital en la minería nacional para evitar fallos por material particulado conductivo. El segundo dígito (5) certifica la resistencia a chorros de agua, asegurando la supervivencia del activo ante lluvias repentinas y facilitando los protocolos de limpieza industrial.

Navegación y Georreferenciación Directa

La instalación de Puntos de Control Terrestre (GCPs) es una actividad de alto riesgo y costo logístico en minería activa. Es por esto importante la integración de módulo RTK (Real-Time Kinematic) multifrecuencia, capaz de cumplir con los estándares de precisión horizontal Clase I.

La tecnología RTK permite corregir la posición de la cámara con un error instrumental típico de 1 cm + 1 ppm (según especificaciones del fabricante), lo cual es indispensable para satisfacer los estrictos márgenes de error vertical (RMSE_z) establecidos en las tablas del Apéndice B de los estándares de la ASPRS (2014) para cartografía de alta precisión, sin la necesidad de desplegar una densidad masiva de puntos de control en zonas de riesgo.

3.2.2 Comparación Tecnológica y Selección de Alternativas

Una vez definidos los requisitos técnicos en la sección anterior, es necesario analizar qué opciones ofrece realmente el mercado actual para cumplir con estas exigencias. Hoy en día, la industria de los drones ha avanzado significativamente, ofreciendo desde equipos portátiles de operación manual hasta sistemas industriales capaces de funcionar de manera totalmente autónoma.

Para seleccionar la solución más adecuada para el proyecto, se realizará una comparación exhaustiva que cubre las distintas tecnologías disponibles. Este análisis no se fija solo en el precio de compra, sino que evalúa factores que son vitales para la operación diaria en la mina, la autonomía de vuelo del dron, la capacidad de trabajar sin depender de un piloto en terreno, la resistencia al clima adverso (viento y polvo) y la calidad de las cámaras para asegurar mapas precisos.

A continuación, se evalúan cuatro alternativas que representan las principales opciones del mercado (desde equipos manuales básicos hasta sistemas autónomos avanzados), utilizando una matriz de decisión para elegir al ganador de manera objetiva.

Sin embargo, antes de proceder a la evaluación de modelos específicos, se ha definido una restricción estratégica respecto al proveedor tecnológico para asegurar la viabilidad logística del proyecto.

Para este estudio, se ha establecido limitar la evaluación exclusivamente a la tecnología del fabricante DJI Enterprise. Esta decisión no es arbitraria, sino que responde a factores logísticos y de postventa críticos para la continuidad operacional en Chile:

-
1. **Soberanía Logística y Soporte Local:** La marca seleccionada cuenta con la red de servicios técnicos autorizados más robusta en territorio nacional. En minería, la reducción del *Mean Time to Repair* (MTTR) es crítica; contar con laboratorios certificados y stock de repuestos inmediato en Chile evita la paralización de la captura de datos por envíos internacionales.
 2. **Unificación del Flujo de Datos:** El uso de una arquitectura de sistemas común (DJI FlightHub 2) permite integrar tanto las estaciones de carga autónoma como las unidades manuales de apoyo bajo una misma interfaz de control y procesamiento, optimizando la curva de aprendizaje del personal y la integridad de los datos.
 3. **Certificación de Activos:** La madurez de esta línea de productos permite cumplir con las exigencias de seguridad de la norma ISO 45001 y los protocolos de ciberseguridad corporativa, fundamentales para operar dentro de redes industriales mineras.

Bajo este marco de estandarización estratégica, se evalúan a continuación cuatro alternativas que representan la evaluación técnica del proyecto, utilizando una matriz de decisión para elegir la configuración que mejor se adapte a las condiciones extremas del rajo:

- **Opción A:** DJI Dock 2 (con Matrice 3D).
- **Opción B:** DJI Matrice 4 Enterprise (M4E).
- **Opción C:** DJI Matrice 350 RTK + Zenmuse P1.
- **Opción D:** DJI Dock 3 (con Matrice 4D).

3.2.2.1 Matriz de Especificaciones Técnicas y Costos de Inversión

A continuación, en la **tabla 18**, se contrastan las capacidades reales de cada equipo, incorporando el detalle de sus características técnicas.

Variable Técnica	Op. A: Dock 2 (M3D)	Op. B: M4 Enterprise	Op. C: M350 RTK + P1	Op. D: Dock 3 (M4D)
Tipo de Operación	100% Autónoma	Manual (Piloto)	Manual (Piloto)	100% Autónoma
Tiempo Máx. Vuelo	50 min	55 min	55 min	50 min
Cámara (Sensor)	4/3 CMOS (20 MP)	4/3 CMOS (24 MP)	Full Frame (45 MP)	4/3 CMOS (24 MP)
Tipo de Obturador	Mecánico Global	Mecánico Global	Mecánico Global	Mecánico Global
Protección IP	IP55 (Dock) / IP54 (Dron)	No estándar	IP55 (Dron)	IP56 (Dock) / IP55 (Dron)
Resistencia Viento	12 m/s	12 m/s	12 m/s	15 m/s
Modulo RTK	Integrado	Integrado (Externo)	Integrado	Integrado
Costo Real (CAPEX)	\$15.970.000 CLP	\$7.955.000 (costo + estación RTK) CLP	\$15.357.000 CLP	\$18.154.000 CLP

Tabla 18. Comparativa técnica de los diferentes dispositivos tecnológicos de DJI.

Fuente: Elaboración propia en base a fichas técnicas de DJI Enterprise y cotizaciones de proveedores locales

3.2.2.2 Evaluación Multicriterio (MCDM)

Para objetivar la selección, se utiliza una escala de valoración de 1 a 5. La definición de los criterios y la asignación de estos puntajes se realizaron bajo la metodología de Juicio de Expertos, validando las calificaciones con especialistas en proyectos mineros para así asegurar que representen fielmente la realidad operativa.

La escala definida por los expertos es la siguiente:

- 1 - Muy Insuficiente: La alternativa presenta brechas severas que impiden el cumplimiento de los objetivos del proyecto.
- 2 - Insuficiente: Cumplimiento parcial con limitaciones técnicas o riesgos operativos que requieren mitigación constante.
- 3 - Estándar: La alternativa cumple con el promedio de la industria actual (cumplimiento aceptable).
- 4 - Superior: La solución presenta características técnicas por sobre el estándar de mercado.
- 5 - Óptimo: La tecnología cumple perfectamente con el objetivo estratégico, maximizando el beneficio operativo.

La **tabla 19** presenta la matriz de decisión con los puntajes validados según esta escala:

Criterio (Ponderación)	Op. A: Dock 2	Op. B: M4 Enterprise	Op. C: M350 RTK	Op. D: Dock 3
Autonomía Operativa (35%)	5	1	1	5
Calidad Técnica (25%)	4	4	5	4
Robustez Ambiental (25%)	4	3	4	5
Costo / Inversión (15%)	4	5	3	2
PUNTAJE FINAL	4.35	2.85	3.05	4.30

Tabla 19. Matriz de decisión ponderada para la selección del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.3 Resolución Técnica y Selección

Selección Técnica (Opción A - DJI Dock 2): Con un puntaje ponderado de 4.35, el sistema DJI Dock 2 se impone como la solución seleccionada para el proyecto. El análisis multicriterio privilegia la eficiencia de la inversión, este equipo cumple con el requisito crítico de Autonomía Operacional (eliminar al piloto de la zona de riesgo) y ofrece un nivel de protección IP55 suficiente para operar la mayor parte del año. Su selección responde a una estrategia de "optimización de recursos", donde se prefiere una solución de despliegue ágil, menor peso y costo competitivo, asumiendo la detención de operaciones únicamente en los días más críticos del invierno altiplánico para maximizar la rentabilidad del activo.

Análisis Comparativo y Descarte de Alternativas:

Para validar esta decisión, se detallan las razones técnicas y económicas por las cuales se desestimaron las otras tres configuraciones evaluadas:

- **Descarte de Opción D - DJI Dock 3 (Sobredimensionamiento):** A pesar de obtener el segundo lugar (4.30) y ofrecer una robustez superior (IP56) para climas extremos, fue descartado por factores económicos. La inversión adicional para adquirir el Dock 3 (\$18.1M) no se justifica plenamente cuando el Dock 2 (\$15.9M) ya cubre el 90-95% de la disponibilidad operativa anual requerida. Se concluye que optar por el Dock 3 sería una inversión sobredimensionada para las condiciones promedio de la faena.
- **Descarte de Opción C - DJI Matrice 350 RTK (Ineficiencia de Inversión):** Esta opción representa la peor relación costo-beneficio del análisis (Puntaje: 3.05). Su costo de adquisición (\$15.3M) es prácticamente idéntico al del sistema autónomo Dock 2, pero no elimina la dependencia del piloto. Invertir tal suma de capital (CAPEX) sin obtener los beneficios de la automatización (reducción de OPEX y riesgo) se considera una decisión financiera y técnicamente errada para este proyecto.

- **Descarte de Opción B - DJI Matrice 4 Enterprise (Limitación Operativa):**

Aunque obtuvo el mejor puntaje en el criterio "Costo" por ser la inversión más baja (\$7.9M), fue descartada como solución final (Puntaje: 2.85) por no cumplir con el objetivo estratégico de la tesis: la automatización. Al depender de operación manual, perpetúa la exposición del personal a la "línea de fuego" y los tiempos muertos por traslados. No obstante, debido a su bajo costo de adquisición y su estatus como estándar de la industria, el M4 Enterprise se utilizará como la referencia base para la evaluación económica, permitiendo contrastar el ahorro que genera la automatización frente a la operación manual.

3.2.2.4 Especificaciones del Sistema Seleccionado

Descripción General del Sistema

El DJI Dock 2 se define como una estación de despliegue autónomo ("Drone-in-a-Box") de nueva generación. Su diseño compacto y su integración de hardware y software permiten la automatización de flujos de trabajo críticos en minería, eliminando la necesidad de pilotos en terreno para tareas repetitivas.

Hardware del sistema

El sistema operativo se compone de dos unidades físicas:

- **Estación Base (Dock):** Actúa como hangar de protección, centro de carga rápida y nodo de comunicaciones. Posee certificación IP55, garantizando hermeticidad contra el polvo en suspensión (chuca) y chorros de agua. Integra antenas RTK duales y una batería de respaldo interna para 5 horas de autonomía ante cortes de red.



Ilustración 8. Vista de la estación base (Dock).

Fuente: DJI Enterprise.

-
- **Aeronave (Matrice 3D):** Dron diseñado específicamente para el acoplamiento en el Dock. Cuenta con protección IP54 y un sistema de cámaras híbrido (Gran Angular + Telecámara) con obturador mecánico, esencial para evitar distorsiones en el modelado topográfico.



***Ilustración 9.** Vista de la aeronave (Matrice 3D).*

Fuente: DJI Enterprise.

Resumen técnico

A continuación, se presenta la ficha técnica con los parámetros críticos que validan su uso en faena minera:

Parámetro	Especificación Técnica	Ventaja Operativa
Radio de Operación	10 km (Efectivo)	Cobertura de grandes rajos o tranques de relave desde un punto fijo.
Tiempo de Carga	32 min (20% al 90%)	Alta tasa de rotación (permite múltiples vuelos por turno).
Resistencia al Viento	12 m/s	Operatividad garantizada en tardes ventosas típicas del norte.
Protección	IP55 (Dock) / IP54 (Dron)	Hermeticidad ante polución minera
Precisión	RTK (Centimétrica)	Generación de topografía válida para ingeniería de detalle.

Tabla 20. Especificaciones Técnicas DJI Dock 2

Fuente: Elaboración propia en base a fichas técnicas de DJI Enterprise

Metodología de Operación y Control

La gestión de las misiones se ejecuta mediante la plataforma en la nube DJI FlightHub 2, siguiendo una secuencia lógica de cuatro etapas que aseguran la trazabilidad del dato:

1. **Planificación Remota (Oficina):** El operador define los polígonos de vuelo sobre la interfaz 3D, estableciendo parámetros de GSD (Ground Sample Distance), altura de vuelo y tasa de traslape (solape) frontal y lateral.
2. **Evaluación de Pre-Vuelo (Automática):** Antes del despegue, el Dock verifica autónomamente sus sensores meteorológicos (lluvia, velocidad del viento y temperatura). Si las condiciones exceden los límites de seguridad, el sistema bloquea la misión automáticamente.

3. **Ejecución y Gestión Energética:** El dron despegue y ejecuta la fotogrametría. Si la batería desciende al nivel crítico durante la misión, la aeronave retorna automáticamente, realiza una carga rápida y retoma el vuelo en el punto exacto de interrupción.
4. **Procesamiento y Entrega:** Al finalizar, los datos (imágenes y logs) se cargan automáticamente a la nube para generar los entregables: ortomosaicos 2D y modelos digitales de elevación (DEM).

Requisitos de Infraestructura e Instalación

Para el despliegue en faena, se deben cumplir los siguientes estándares de ingeniería:

- **Suministro Eléctrico:** Red monofásica (100-240 V) con puesta a tierra certificada. Potencia máx: 1000 W.
- **Conectividad de Datos:** Enlace vía puerto Ethernet (RJ45). Se valida el uso de internet satelital (Starlink) para zonas sin cobertura 4G.
- **Obra Civil:** Losa de hormigón nivelada y cerco perimetral de seguridad para restringir el acceso a zonas de partes móviles.

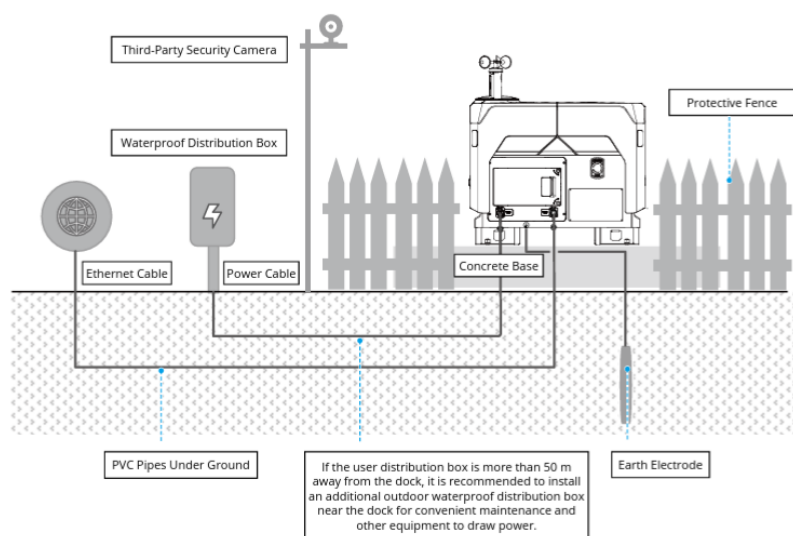


Figura 7. Esquema de dimensiones y requerimientos de instalación.

Fuente: Manual de Usuario DJI.

3.2.3 Diseño del Proceso Operativo

Para garantizar la estandarización y reproducibilidad del servicio de topografía autónoma, se ha diseñado un flujo de trabajo estructurado bajo un modelo de cuatro fases secuenciales: Planificación, Captura, Procesamiento y Análisis. Este diseño operativo no solo define la ruta lógica de actividades desde la solicitud del cliente hasta la entrega final, sino que integra puntos críticos de control para asegurar la integridad de los equipos y la calidad de los datos recolectados.

El diagrama presentado a continuación modela la interacción entre el componente humano (responsable de la supervisión y validación) y el componente autónomo (DJI Dock 2 y algoritmos de procesamiento en la nube). Asimismo, establece protocolos claros de actuación frente a contingencias meteorológicas o fallas técnicas, asegurando la continuidad operativa y el cumplimiento de los estándares de seguridad en el entorno minero.

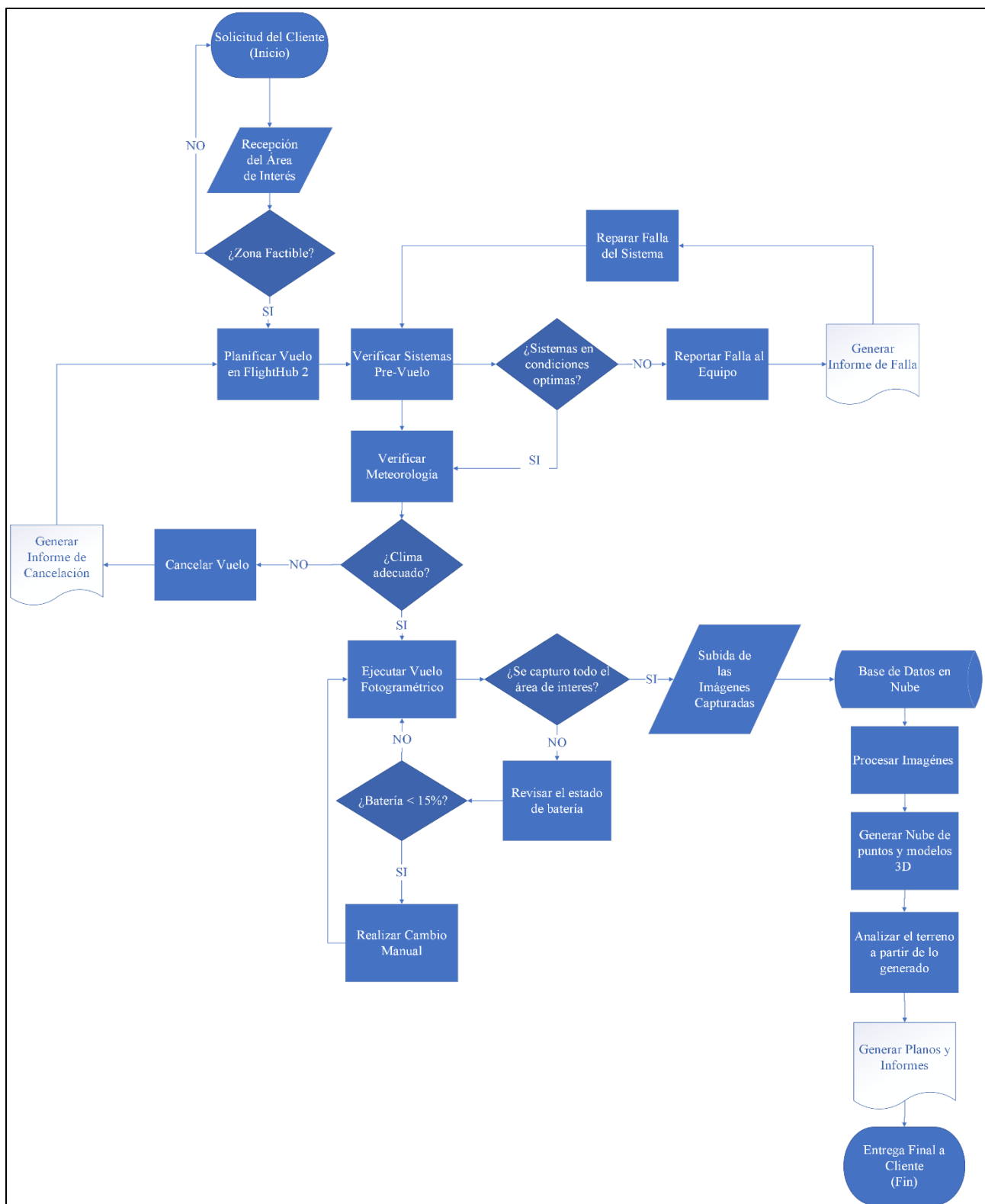


Figura 8. Diagrama de Flujo del Servicio de Topografía Autónoma.

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4 Infraestructura operativa

La definición de la infraestructura física del proyecto no responde únicamente a criterios logísticos, sino que se alinea estratégicamente con los resultados del Estudio de Mercado (**Sección 3.1.2**), el cual identificó una alta concentración de la demanda en la Región de Antofagasta. En consecuencia, se ha diseñado un modelo operativo híbrido y descentralizado que busca maximizar la eficiencia financiera y garantizar la continuidad operacional en dos frentes simultáneos.

Esta arquitectura organizacional distingue dos entornos con funciones críticas diferenciadas: la Unidad de Administración (Ciudad) y la Infraestructura de Soporte (Faena). A continuación, se detalla la configuración técnica, la evaluación de alternativas de emplazamiento y la funcionalidad de cada componente.

3.2.4.1 Unidad de Administración y Soporte (Oficina Central)

Este nodo constituye la sede principal de la empresa. Para su emplazamiento, se llevó a cabo un proceso de evaluación técnica y económica de tres polos de desarrollo en Antofagasta: el Barrio Industrial La Negra, el Sector Norte (La Chimba) y el Sector Sur (Ciudad).

Evaluación de Alternativas y Descarte:

Barrio Industrial La Negra (Km 1355): Si bien constituye el centro neurálgico de los proveedores mineros, la oferta inmobiliaria del sector se caracteriza por galpones de gran envergadura (>400 m²) con cánones de arriendo superiores a las UF 175, cifra que excede el presupuesto operativo de una empresa de servicios tecnológicos.

Sector Industrial La Chimba (Zona Norte): Se evaluó esta zona por su carácter mixto. Sin embargo, fue desestimada por una ineficiencia logística crítica, ubicar la base en el extremo norte obligaría a la flota a atravesar todo el radio urbano de Antofagasta para acceder a las rutas mineras del sur (Ruta 28/Ruta 5), generando pérdidas de tiempo por congestión vehicular incompatibles con los tiempos de respuesta exigidos.

Selección Estratégica (Sector Sur):

Tras el análisis, se seleccionó el Edificio Las Empresas (Sector Sur) como la ubicación óptima. Esta posición ofrece acceso directo a la Ruta 28 en menos de 15 minutos, facilitando el despliegue hacia faenas como Escondida y Zaldívar.

- **Funcionalidad Operativa:** Este recinto centraliza la administración general del negocio, el soporte técnico remoto y el procesamiento de fotogrametría avanzada, actividades que requieren conectividad de fibra óptica dedicada y estaciones de trabajo de alto rendimiento.
- **Estrategia de Adquisición:** Se privilegia la flexibilidad contractual (Arriendo), permitiendo escalar la infraestructura conforme al crecimiento de la dotación de ingeniería sin inmovilizar capital en activos inmobiliarios.

3.2.4.2 Infraestructura de Soporte Local (Instalación Faena)

Para el despliegue en terreno, se requiere una instalación física capaz de alojar el hardware autónomo y asegurar su operatividad continua. La especificación técnica define el uso de contenedores de bodegaje y oficinas de estándar minero, los cuales proporcionan el resguardo necesario para los equipos de control y mantenimiento.

A diferencia de la sede administrativa, para esta infraestructura se ha definido una estrategia de adquisición patrimonial (Compra). Esta decisión de inversión se sustenta en una oportunidad de mercado validada mediante la cotización de la empresa Flanders, la cual ofrece unidades usadas a un precio de liquidación de \$5.113.900 CLP por unidad. Esta opción resulta financieramente superior al arrendamiento a largo plazo, permitiendo capitalizar el activo a un costo competitivo y eliminando los gastos fijos mensuales asociados al alquiler de módulos en faena.

3.2.4.3 Infraestructura Civil de Resguardo (Estación Dock 2)

Para el emplazamiento físico del sistema autónomo en la faena, se ha desarrollado la ingeniería de detalle de una obra civil denominada "**Central Dron Minería**" (ver *Ilustración 10*). Esta estructura es un componente crítico diseñado para garantizar la estabilidad del aterrizaje y proteger el activo, evaluado en más de 15 millones de pesos, ante siniestros operacionales o condiciones climáticas adversas.

Según el plano de detalle, la estación se compone de tres elementos estructurales jerarquizados:

1. **Fundación de Estabilidad:** Losa de hormigón armado prefabricada de dimensiones 2.400 x 2.400 x 600 mm. Su masa inercial tiene por objetivo desacoplar al equipo de las vibraciones del terreno provocadas por el tránsito de maquinaria pesada, evitando descalibraciones en el sistema GNSS-RTK.
2. **Jaula de Protección Perimetral:** Corresponde a una estructura modular de seguridad fabricada con perfiles de acero, considerando perfiles principales de **50x50x3 mm** y perfiles secundarios de **30x20x3 mm**. La baranda perimetral contempla una altura aproximada de **2,20 m**, permitiendo proteger la zona de operación del sistema, restringir el acceso no autorizado y resguardar el pilar central ante impactos accidentales. Asimismo, incorpora una **puerta lateral de acceso de 2,00 m de altura**, destinada exclusivamente al ingreso de personal técnico o del piloto responsable, especialmente para labores de inspección, mantenimiento menor y cambio manual de baterías cuando sea requerido.
3. **Soporte de Anclaje Superior (Pedestal):** corresponde a una estructura vertical compuesta por un pilar central robusto de perfil **C 200x200x6 mm**, con una altura aproximada de **1,40 m**. En su extremo superior se dispone una placa de acero de **1.150 x 1.150 x 10 mm**, sobre la cual se instala y fija el **DJI Dock 2**. La altura del pilar se define considerando criterios operacionales y ergonómicos, ya que el piloto o personal técnico deberá acceder al sistema para realizar cambios de batería, inspecciones o intervenciones menores. Por ello, se descarta una altura de 2,00 m, al resultar poco práctica para una operación manual recurrente. De esta forma, el Dock

se mantiene elevado respecto del nivel de suelo para favorecer el despegue, aterrizaje y señal de enlace, pero sin superar la altura de la baranda perimetral, manteniendo condiciones adecuadas de seguridad y accesibilidad.

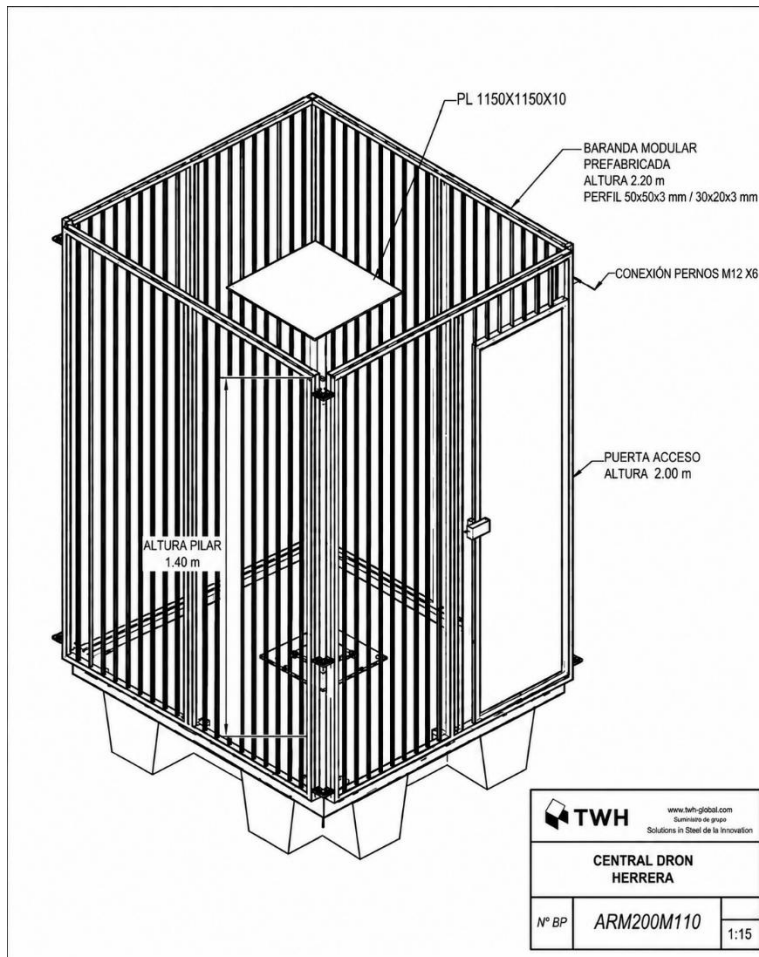


Ilustración 10. Plano estructural para el DJI Dock2.

Fuente: Ingeniería de detalle TWH.

3.2.4.4 Valorización de la Infraestructura

A continuación, se presenta la valorización económica de los activos físicos y costos operacionales.

Ítem	Detalle Técnico y Justificación	Clasificación	Valor (CLP)	Fuente / Referencia
Arriendo Oficina Central	Planta libre 130 m ² (Sector Sur Antofagasta).	OPEX (Mensual)	\$2.385.289	<i>Portal Inmobiliario (2025).</i>
Contenedor Bodega/Oficina	Unidad de bodegaje y oficinas (Compra por desmovilización).	CAPEX (Inversión)	\$5.113.900	Flanders - Lomas Bayas (2025).
Plataforma Dock 2	Obra Civil TWH: Fundación + Jaula + Pedestal Soporte.	CAPEX (Inversión)	\$5.910.360	<i>Ingeniería de Detalle TWH.</i>
Logística de Despliegue	Servicio de Camión Pluma para traslado y montaje.	CAPEX (Inversión)	\$800.000	<i>Transportes Locales.</i>
Conectividad Satelital	Kit de Hardware Starlink Business de Alto Rendimiento.	CAPEX (Inversión)	\$337.000	<i>Starlink Chile.</i>

Tabla 21. Presupuesto de Infraestructura.

Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones.

3.2.5 Dimensionamiento operacional del plan de vuelo

Con el propósito de validar técnicamente la capacidad operativa del sistema seleccionado, se elaboró un plan de vuelo para los principales sectores de interés de la faena Compañía Minera Lomas Bayas. Para ello, se utilizó la plataforma **DroneDeploy**, herramienta especializada en planificación de misiones fotogramétricas, la cual permitió estimar de manera sistemática los tiempos de vuelo, la cantidad de imágenes capturadas y la demanda energética asociada a cada polígono evaluado. La planificación se configuró con una **altitud de vuelo de 100 m** y una **resolución espacial aproximada de 2,8 cm/píxel**, parámetros consistentes con los requerimientos de levantamiento topográfico de alta precisión definidos para el proyecto.

La Figura 7 presenta un ejemplo del plan de vuelo generado en DroneDeploy para uno de los sectores evaluados, donde se observa la geometría del polígono, la malla de cobertura y la ruta de misión definida para la captura fotogramétrica.

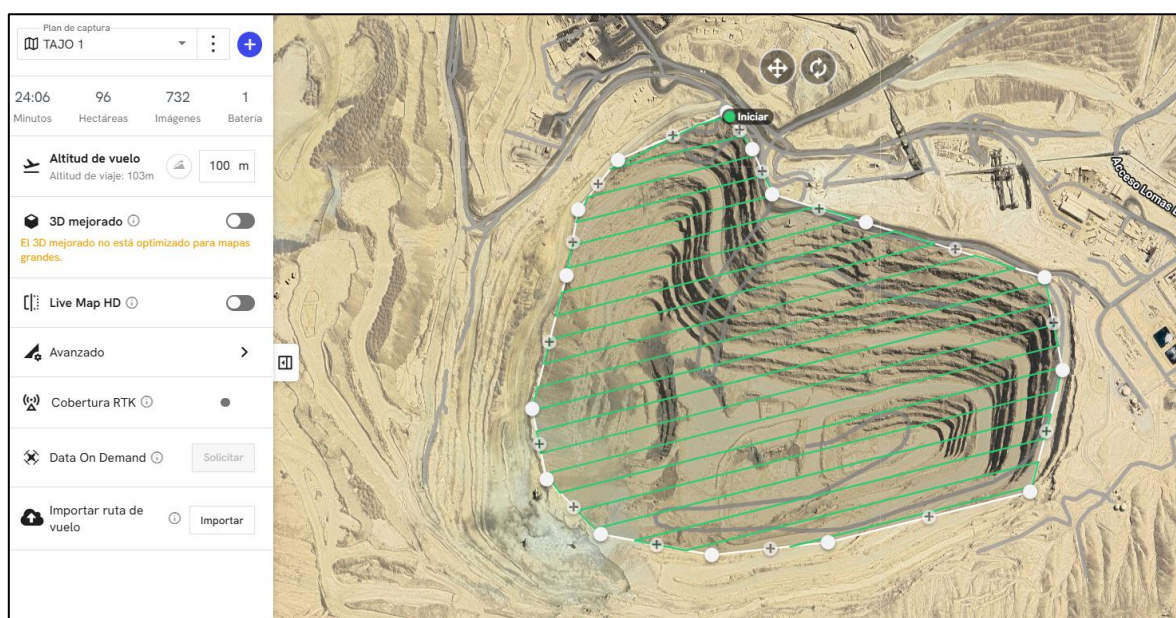


Ilustración 11. Ejemplo de planificación de misión fotogramétrica en DroneDeploy para un sector de la faena.

Fuente: Elaboración propia a partir de DroneDeploy.

Este análisis se desarrolló sobre la base de los polígonos representativos del caso de estudio, considerando **pilas de lixiviación, botaderos y tajos**, en coherencia con la configuración espacial de la faena (ver punto 3.1.2.5) y con la cartera de servicios definidos para el

proyecto. Su objetivo fue cuantificar la carga de trabajo aérea asociada a una campaña tipo de levantamiento, estimando el tiempo de vuelo, la cantidad de imágenes capturadas y la demanda de baterías requerida para cubrir la totalidad de los sectores evaluados.

La pertinencia de este análisis radica en que el tiempo de vuelo puro constituye solo una parte del esfuerzo operativo real del sistema. En un entorno minero, la planificación del servicio debe considerar no solo la capacidad de la aeronave para levantar un polígono, sino también la escala territorial de la faena, la cantidad de sectores a monitorear, la continuidad operacional requerida y la demanda de procesamiento derivada del volumen de imágenes capturadas. Por ello, el dimensionamiento operacional del plan de vuelo actúa como un insumo fundamental para la posterior definición de recursos humanos, logística, consumo energético y estructura de costos del proyecto.

3.2.5.1 Resultados del plan de vuelo

Sector	Tiempo de vuelo	Ida y vuelta a base	Baterías-equivalentes	Imágenes	Tiempo total con traslados
Pila 1	1:09:01	0:03:03	5	2.303	1:12:04
Pila 2	1:12:27	0:21:07	5	2.339	1:33:34
Botadero 1	0:58:07	0:05:00	4	1.918	1:03:07
Botadero 2	0:15:05	0:08:53	1	425	0:23:58
Botadero 3	0:20:31	0:16:23	2	606	0:36:54
Botadero 4	0:24:55	0:19:27	2	762	0:44:22
Tajo 1	0:24:06	0:07:30	2	732	0:31:36
Tajo 2	0:29:38	0:16:40	2	922	0:46:18
Total	5:13:50	1:38:03	23	10.007	6:51:53

Tabla 22. Resultados del plan de vuelo de la campaña tipo.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la campaña tipo exige un total de 5:13:50 h de vuelo puro, que aumenta a 6:51:53 h al incorporar los trayectos de ida y retorno entre la base operacional y los distintos sectores evaluados, los cuales fueron estimados utilizando una velocidad promedio de desplazamiento de 12 m/s. A su vez, la campaña considera una captura acumulada de 10.007 imágenes y una demanda energética equivalente a 23 baterías, valor que representa el consumo acumulado de la misión y no necesariamente la cantidad de baterías físicas requeridas en terreno. Finalmente, al incluir los cambios manuales de batería, con un tiempo estimado **de 2 a 3 minutos por recambio**, el tiempo total de operación se aproxima a **7 horas y 45 minutos**. Considerando que el operador de vuelo asignado a faena opera bajo un sistema de turno **4x3**, se proyecta que la captura de información se desarrollará durante **16 días efectivos de trabajo** en un ciclo mensual de referencia, lo que equivale a una producción potencial de **160.112 imágenes**, en caso de replicarse una campaña tipo diaria durante todo el período operativo.

3.2.6 Estructura Organizacional y Requerimientos de Capital Humano

Para asegurar la continuidad operacional, el cumplimiento normativo y la eficiencia financiera del servicio, se ha definido una estructura organizacional compuesta por siete colaboradores. Esta dotación ha sido dimensionada para cubrir los turnos rotativos en faena bajo un régimen de jornada excepcional (sistema 15x15), gestionar la seguridad industrial y garantizar el soporte tecnológico de la flota.

A continuación, se describen los perfiles definidos:

1. Administrador de Contrato (Líder de Proyecto)

Es el representante legal y técnico ante el cliente minero. Vela por la rentabilidad del contrato, la facturación y la relación comercial.

- **Perfil:** Ingeniero Industrial o Comercial.
- **Ubicación:** Oficina Central (Ciudad).
- **Jornada y Turno:** Administrativo 5x2. (Lunes a Viernes en horario de oficina. Sin pernoctación en faena, salvo reuniones de arranque).

2. Asesor en Prevención de Riesgos (HSEC)

Rol crítico exigido por la normativa (DS 132) para validar el ingreso a faena. Gestiona las matrices de riesgo, acredita al personal y asegura el cumplimiento de los Estándares de Control de Fatalidades (ECF).

- **Perfil:** Ingeniero en Prevención de Riesgos con certificación Sernageomin B.
- **Ubicación:** Híbrido (Visitas a faena según programa).
- **Jornada y Turno:** Sin Turno Fijo / Régimen de Asesoría (Se contempla 1 visita mensual a faena para auditoría de cumplimiento y renovación de charlas ODI)

3. Ingeniero Geomensor (Jefe de Ingeniería)

Encargado de la calidad del dato. Planifica las misiones, valida la precisión topográfica y procesa la fotogrametría para generar los entregables finales.

- **Perfil:** Ingeniero Geomensor con licencia RPA.
- **Ubicación:** Oficina Central (Ciudad).

-
- **Jornada y Turno: Administrativo 5x2 con Visitas de Campo.** (Sube a faena 2 a 4 días al mes para instalación de puntos de control y validación).

4. Especialista IT y Ciberseguridad

Asegura la estabilidad de la red de datos (Starlink/Fibra) y protege la telemetría del sistema autónomo. Es vital para evitar desconexiones que detengan la operación remota.

- **Perfil:** Ing. Informática o Telecomunicaciones.
- **Ubicación:** Oficina Central (Soporte Remoto).
- **Jornada y Turno:** Soporte Remoto a Requerimiento.

5. Operador de Sistemas Autónomos (Supervisor Remoto)

Responsable de la ejecución y monitoreo de los vuelos desde la ciudad mediante *FlightHub*

2. Toma el control ante emergencias.

- **Perfil:** Piloto RPA certificado (DGAC).
- **Ubicación:** Instalación Faena.
- **Jornada y Turno: Turno Corto 4x3.** (Lunes a Jueves en Faena pernoctando en campamento / Viernes administrativo en ciudad / Sábado y Domingo libre).6 y 7.

6. Técnicos de Soporte en Terreno (Turno A y Turno B)

Para garantizar una cobertura de 365 días al año, se establece un sistema de Turno Rotativo 15x15. Mientras un técnico cubre la operación en faena durante 15 días continuos, su relevo se encuentra en descanso, optimizando los costos logísticos de traslado y cambios de turno.

- **Función:** Mantenimiento físico del Dock, limpieza de sensores y gestión de contingencias en terreno.
- **Perfil:** Técnicos Electromecánicos con licencia interna, licencia conducción clase B y salud compatible con altura geográfica.
- **Ubicación:** Instalación Faena.
- **Jornada y Turno:** Turno Rotativo 15x15. (15 días trabajados corridos en faena, seguidos de 13/15 días de descanso).

Organigrama Funcional del Proyecto

Para garantizar un flujo de órdenes claro y una delimitación precisa de responsabilidades, se ha definido una estructura organizacional jerárquica vertical. Este diseño centraliza la toma de decisiones administrativas en la gerencia del proyecto, mientras delega la ejecución técnica en las jefaturas de área.

La estructura se divide en tres niveles de autoridad:

- 1. Nivel Estratégico (Gerencia):** Liderado por el Administrador de Contrato, quien posee la autoridad máxima y es el responsable final ante el cliente.
- 2. Nivel Planificación (Jefaturas y Staff):** Compuesto por los especialistas que planifican y dan soporte (Ingeniería, Seguridad e IT). Aquí se define cómo se hacen las cosas.
- 3. Nivel Operativo (Ejecución):** Compuesto por el Supervisor de Vuelo y los Técnicos de Faena, quienes ejecutan las tareas diarias en terreno y gabinete.

A continuación, se presenta el diagrama de la estructura organizacional:

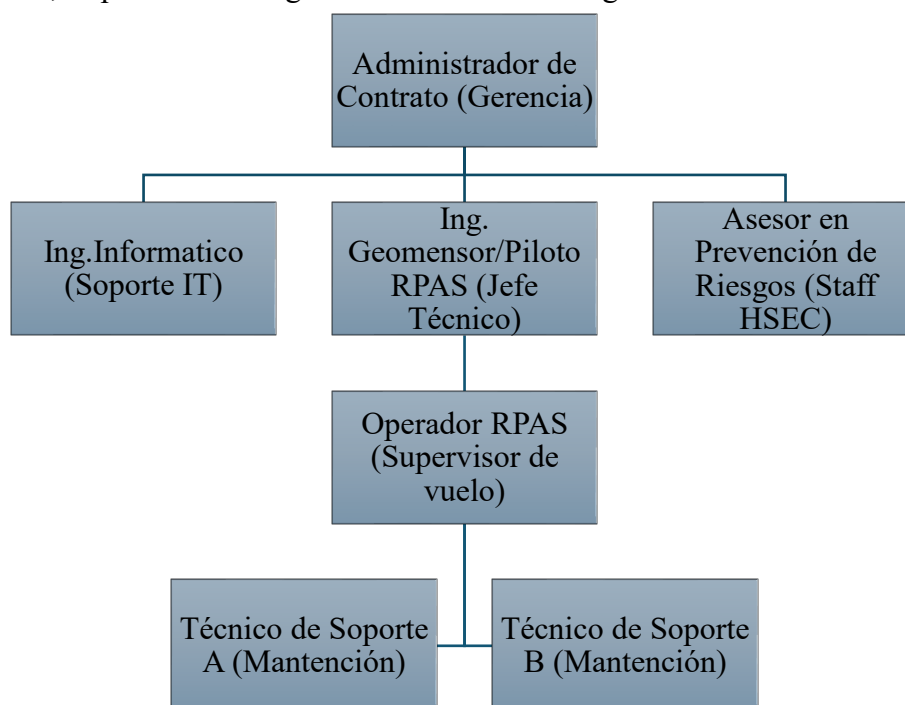


Figura 9. Organigrama jerárquico del servicio.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.7 Fijación de Precios

Para garantizar la sostenibilidad financiera y la rentabilidad del proyecto durante su ciclo de vida, se ha implementado un modelo de precios basado en la metodología de Cost-Plus Pricing. Este enfoque permite asegurar la recuperación de la inversión inicial, la cobertura integral de los costos operativos y la obtención de una utilidad neta ajustada a los riesgos del sector minero.

El cálculo de la tarifa mensual se estructura bajo tres pilares financieros: los gastos operacionales (OPEX), el servicio de la deuda por inversión de capital (CAPEX) y el margen de beneficio empresarial.

3.2.7.1 Identificación de Costos Base

Los valores fundamentales para este modelo se desglosan en detalle en el **Anexo B**, donde se especifican las tablas de inversión inicial y gastos operativos mensuales. En resumen, se consideran los siguientes montos:

- Inversión Inicial (CAPEX): \$58.988.731 (**Ver Tabla B.1**).
- Gasto Operacional Mensual (OPEX): \$23.627.624 (**Ver Tabla B.2**).

3.2.7.2 Estructura del Servicio de la Deuda

Dada la naturaleza del proyecto con una duración de 5 años (60 meses), se proyecta el financiamiento total del CAPEX mediante un crédito comercial para empresas. Bajo las condiciones de mercado proyectadas a una tasa del 8,0% anual (Banco Central de Chile, 2026), la cuota de amortización se calcula mediante la fórmula de anualidad:

$$Cuota = CAPEX \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde:

- $i = 8\%$ (Tasa anual)
- $n = 5$ años
- Cuota = \$15.377.949

3.2.7.3 Determinación de la Tarifa Mensual Final

La tarifa mensual final se determina a partir de la suma de los costos operacionales mensuales, la cuota de financiamiento asociada al monto inicial requerido y un margen de utilidad empresarial del 30%. Este margen permite cubrir gastos administrativos corporativos, contingencias operacionales y el retorno esperado de la inversión.

Para la determinación de la tarifa mensual se consideró que el financiamiento del proyecto debe cubrir no solo la inversión inicial en activos, sino también cuatro meses de costos operacionales, correspondientes al período inicial de puesta en marcha y desfase de pago del servicio. Por ello, el monto financiado se calculó como la suma del CAPEX y cuatro meses de OPEX, amortizado linealmente en un plazo de cinco años.

Componente de costo	Definición	Valor mensual (CLP)
Gasto Operacional (OPEX)	RR.HH., logística, insumos y conectividad	\$23.627.624
Monto financiado	CAPEX + 4 meses de OPEX	\$153.499.227
Porcentaje financiado	Financiamiento externo considerado	40%
Cuota de financiamiento	Crédito a 60 meses	\$1.281.496
Costo base de servicio	Suma de OPEX + cuota de financiamiento	\$24.909.120
Utilidad empresarial (30%)	Margen de rentabilidad sobre costo base	\$7.472.736
Tarifa mensual final (neta)	Monto a facturar por el servicio	\$32.381.856
Tarifa por hectárea	Tarifa mensual final / 1.380,1 ha	\$23.464/ha

Tabla 23. Resumen de Estructura de Tarifa Mensual.

Fuente: Elaboración propia en base al Anexo B.

La tarifa mensual neta estimada permite cubrir íntegramente los costos operativos, la amortización del monto financiado y un margen de rentabilidad para la empresa. En este modelo, el financiamiento inicial incorpora tanto el CAPEX como cuatro meses de OPEX, lo que permite enfrentar el período de puesta en marcha y el desfase del primer pago sin requerir inyecciones adicionales de capital durante la etapa inicial del servicio.

3.3 Estudio Legal

El presente estudio tiene como propósito identificar el marco normativo e institucional que regula la implementación y operación del servicio propuesto. En el contexto de la industria minera chilena, la incorporación de drones autónomos para levantamientos topográficos requiere cumplir con un conjunto de exigencias aeronáuticas, mineras, eléctricas y de telecomunicaciones, destinadas a resguardar la seguridad operacional, la continuidad de las faenas y el cumplimiento de los estándares exigidos por las autoridades competentes.

En este sentido, el análisis legal se centra en revisar las principales normativas aplicables a la operación de vehículos aéreos no tripulados en entornos industriales. Para ello, se consideran las disposiciones de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), especialmente aquellas relacionadas con operaciones RPAS, trabajos aéreos y obtención del Certificado de Operador Aéreo. Asimismo, se analizan los requisitos asociados al Reglamento de Seguridad Minera, el uso del espectro radioeléctrico y la normativa eléctrica aplicable a la infraestructura de soporte del sistema autónomo.

La identificación de estas exigencias permite evaluar la viabilidad institucional del proyecto y establecer las condiciones mínimas necesarias para su implementación dentro del marco legal vigente en Chile. De esta forma, el estudio legal no solo permite reconocer las autorizaciones y obligaciones aplicables, sino también anticipar los aspectos regulatorios que podrían incidir en la puesta en marcha y operación del servicio.

3.3.1 Marco normativo aeronáutico aplicable a RPAS y drones autónomos

En Chile, la operación de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) se encuentra regulada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) mediante distintas Normas Aeronáuticas (DAN). Sin embargo, **aún no existe una DAN específica que regule de manera integral la operación de drones autónomos**. Actualmente, este tipo de tecnología se encuentra en una etapa de desarrollo regulatorio, en la cual la autoridad aeronáutica ha ido incorporando experiencia obtenida desde la operación misma y desde la retroalimentación entregada por empresas con AOC que operan con RPAS. Esto se observa expresamente en la edición

vigente de la DAN 151, cuya actualización señala que recoge experiencia operacional y comentarios formulados por operadores autorizados.

En consecuencia, mientras no exista una normativa específica para drones autónomos, su operación debe analizarse conforme al marco aeronáutico vigente, particularmente a través de las normas **DAN 91, DAN 119, DAN 137 y DAN 151**, las cuales regulan, respectivamente, las reglas generales del aire, la obtención del Certificado de Operador Aéreo, la prestación de trabajos aéreos y las operaciones con RPAS sobre áreas pobladas.

3.3.1.1 DAN 91: reglas generales del aire

La DAN 91 – Reglas del Aire establece el marco general para la utilización del espacio aéreo chileno y contiene definiciones esenciales para la operación de RPAS. Entre ellas, reconoce la operación autónoma como aquella en la cual una aeronave pilotada a distancia vuela sin intervención del piloto en la gestión de vuelo, y define además las operaciones VLOS y BVLOS, conceptos relevantes para el análisis de sistemas autónomos y semiautónomos como el propuesto en esta tesis (ver marco teórico, puntos 2.2.1.5 y 2.2.1.6).

Desde el punto de vista práctico, la DAN 91 es la norma principal para la autorización operacional del vuelo en faenas mineras ubicadas en áreas no pobladas. La norma establece que toda operación con aeronaves pilotadas a distancia requiere autorización previa del Subdepartamento de Operaciones (SDO) de la DGAC, otorgada caso a caso, previa evaluación de que la operación no represente un riesgo para las personas ni para otras aeronaves.

Asimismo, la DAN 91 establece las reglas generales de operación. En particular, prohíbe el sobrevuelo sobre instalaciones militares, bases aéreas, recintos penitenciarios e instalaciones estratégicas del Estado, salvo autorización especial de la institución competente y aprobación de la DGAC, notificada mediante NOTAM. También prohíbe operar de forma descuidada o temeraria, afectar derechos de terceros, volar sobre zonas prohibidas, peligrosas o restringidas sin autorización, operar sin revisar los NOTAM vigentes, hacerlo bajo efectos de alcohol o drogas, o interferir con áreas donde actúan aeronaves tripuladas, como en operaciones de combate de incendios. Del mismo modo, establece limitaciones específicas

en el entorno aeroportuario, particularmente en relación con distancias mínimas a pistas y alturas máximas de operación, salvo en casos especialmente autorizados por la autoridad aeronáutica. Cuando la operación se ejecute sobre áreas pobladas, la propia norma dispone el cumplimiento adicional de la DAN 151.

En su Anexo D, referido a la solicitud para operación con aeronaves tipo RPA, la DGAC exige la presentación ordenada de los siguientes antecedentes:

1. Identificación de la empresa solicitante.
2. Número de Certificado de Operador Aéreo (AOC), cuando corresponda.
3. Identificación del operador RPAS.
4. Tipo de trabajo aéreo a realizar.
5. Fecha y horario de la operación.
6. Sector o área a sobrevolar.
7. Archivo KMZ con la delimitación geográfica del área de operación.
8. Distancia al aeródromo más cercano.
9. Altura prevista de vuelo.
10. Modalidad de operación, según corresponda a la naturaleza del vuelo.
11. Autorización del dueño, administrador o responsable del lugar a operar.

Asimismo, el formulario exige que el solicitante declare conocimiento de la DAN 91, DAN 151 y DAN 137, y establece que la solicitud debe presentarse con una anticipación de 7 días hábiles ante la autoridad aeronáutica. Por su parte, la autorización otorgada por la DGAC puede tener una vigencia de hasta 6 meses, plazo dentro del cual deberán actualizarse los antecedentes en caso de incorporarse o retirarse RPAS u operadores.

En consecuencia, para el proyecto propuesto, la DAN 91 obliga a estructurar operacionalmente cada misión, definir con precisión el área de trabajo, el perfil del vuelo y las restricciones espaciales aplicables, constituyendo la base documental para obtener la autorización aeronáutica de cada operación.

3.3.1.2 DAN 151: operaciones de RPAS sobre áreas pobladas

La DAN 151 – Operaciones de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS) sobre áreas pobladas tiene relevancia complementaria en el presente proyecto, principalmente en lo relativo al registro del RPAS y a la habilitación del piloto a distancia. No obstante, sus reglas generales de operación no se consideran como base principal para esta investigación, dado que la operación propuesta se desarrollará en faenas mineras ubicadas en áreas no pobladas, por lo que la referencia normativa principal en materia operacional será la DAN 91.

En el contexto del presente estudio, la DAN 151 resulta útil en dos dimensiones específicas:

1. Formalización del equipo, a través del registro del RPAS ante la DGAC.
2. Habilitación del operador, mediante la obtención de la credencial de piloto a distancia.

Por ello, aun cuando la operación principal del proyecto se desarrolla en faenas mineras ubicadas en áreas no pobladas, las disposiciones contenidas en los Capítulos C y D de la DAN 151 siguen siendo relevantes como base de formalización del equipo y del personal que intervendrá en la operación.

Como respaldo documental de estos requisitos, resulta pertinente incorporar en anexos los siguientes instrumentos normativos:

- Apéndice B: Solicitud de registro de RPA.
- Apéndice C: Declaración jurada simple de haber recibido instrucción.

Requisitos de registro del RPAS

De acuerdo con el **Capítulo C** de la DAN 151, para registrar un RPAS ante la DGAC se deben cumplir, entre otros, los siguientes requisitos:

1. Presentar la solicitud de registro conforme al formato establecido en el Apéndice B.
2. Firmar la solicitud y acompañarla con la identificación del propietario, ya sea mediante firma manual con huella digital y copia de cédula de identidad, o mediante Firma Electrónica Avanzada (FEA).

-
3. Informar los antecedentes técnicos del RPAS, incluyendo:
 - fabricante y país,
 - marca,
 - modelo,
 - número de serie,
 - peso de fábrica.
 4. Adjuntar las especificaciones del fabricante para acreditar el peso de fábrica del equipo.
 5. Una vez efectuado el registro, la DGAC emite una tarjeta de registro del RPA, en la que se consignan:
 - nombre del propietario,
 - RUT,
 - dirección,
 - teléfono,
 - marca,
 - modelo,
 - peso de fábrica,
 - número de registro otorgado por la DGAC,
 - número de serie, cuando corresponda.

En consecuencia, para efectos del proyecto, cada aeronave a utilizar debe encontrarse formalmente inscrita ante la DGAC y contar con su correspondiente tarjeta de registro, la cual permite acreditar la identificación y trazabilidad del equipo.

Requisitos para la obtención de la credencial de piloto a distancia

Por su parte, el Capítulo D de la DAN 151 prescribe los requisitos para obtener la credencial de piloto a distancia de RPAS. Para ello, el postulante debe cumplir con las siguientes condiciones:

-
1. Haber cumplido dieciocho (18) años.
 2. Presentar una declaración jurada simple de haber recibido instrucción teórica y práctica respecto del modelo de RPA a volar, conforme al Apéndice C.
 3. Acompañar el certificado de la empresa con AOC o CEO que impartió la instrucción al operador.
 4. Aprobar un examen escrito sobre:
 - DAN 151,
 - DAN 91,
 - NOTAM,
 - Meteorología (METAR),
 - Aerodinámica.La nota mínima de aprobación es 75%.
 5. Realizar la solicitud de obtención de credencial a través del sistema SIPA de la DGAC.
 6. Pagar la tasa aeronáutica correspondiente, de acuerdo con el reglamento aplicable.
 7. En caso de incorporar una nueva habilitación para otro modelo de RPA, debe acreditarse nuevamente la instrucción correspondiente para ese equipo.

De este modo, la credencial de piloto a distancia no solo acredita conocimientos generales del operador, sino también formación específica respecto del modelo de aeronave que utilizará.

3.3.1.3 DAN 137: regulación del servicio como trabajo aéreo

La DAN 137 – Trabajos Aéreos regula la ejecución de servicios aéreos especializados en territorio nacional y constituye la norma que mejor encuadra la naturaleza del servicio propuesto en esta investigación. En efecto, el proyecto contempla la prestación de servicios de levantamiento topográfico, captura de imágenes y procesamiento de información geoespacial, actividades que pueden ser comprendidas dentro de categorías como

fotogrametría, prospección con sensores, fotografía aérea u otros trabajos técnicos especializados contemplados en esta normativa.

La DAN 137 establece expresamente que, para efectuar servicios de trabajos aéreos, el interesado debe obtener previamente su Certificado de Operador Aéreo (AOC) conforme a la DAN 119. Asimismo, dispone que sus requisitos aplican a operadores de RPAS que estén inscritos en el registro de la DGAC, hayan obtenido un AOC y presten servicios de trabajo aéreo en el territorio nacional.

Por ello, en el contexto del presente proyecto, la DAN 137 cumple una doble función: por una parte, define jurídicamente el servicio como trabajo aéreo y, por otra, establece que su ejecución requiere que el operador esté debidamente certificado. En consecuencia, esta norma constituye el sustento regulatorio directo para la oferta del servicio topográfico con drones en faenas mineras.

3.3.1.4 DAN 119: requisitos legales de la empresa y obtención del AOC

La DAN 119 – Normas para Obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC) regula el proceso de certificación que deben cumplir las empresas que deseen prestar servicios de transporte o trabajos aéreos con fines de lucro. En el caso del presente proyecto, esta norma resulta central, ya que la prestación comercial de servicios con RPAS en minería requiere necesariamente la obtención de un AOC.

Requisitos legales de la empresa solicitante

Desde la perspectiva societaria, uno de los requisitos más relevantes es que la empresa se encuentre jurídicamente habilitada para desarrollar actividad aeronáutica comercial. Para ello, su objeto social debe incorporar expresamente la prestación de “servicios de transporte aéreo y/o trabajos aéreos, con fines de lucro”, en conformidad con la DAN 119 y el Código Aeronáutico. La guía institucional de la DGAC para empresas con RPAS señala expresamente que, conforme a la sección 119.211 de la DAN 119, el objeto social de la empresa debe ajustarse al artículo 95 del Código Aeronáutico.

Adicionalmente, la empresa debe acreditar ante la DGAC que dispone de al menos una aeronave de explotación permanente y exclusiva a nombre de la razón social, junto con los seguros correspondientes validados por la Junta de Aeronáutica Civil (JAC). Este requisito demuestra que la operación no se sustenta únicamente en la disponibilidad tecnológica, sino en una estructura empresarial formalmente preparada para desarrollar actividad aeronáutica comercial.

Requisitos técnicos y documentales del AOC

En el caso de empresas que operan con RPAS, la DAN 119 exige presentar, entre otros antecedentes:

- Manual de Operaciones, donde se describan la organización operacional, el personal, los procedimientos y las responsabilidades asociadas a la operación con RPAS.
- Especificaciones Relativas a las Operaciones (EE.OO.), asociadas al tipo de operación y a los RPAS utilizados.
- Identificación del representante legal, del encargado de operaciones y de los pilotos a distancia, acompañando sus credenciales.
- Acreditación de un domicilio comercial, para efectos de notificación y fiscalización.
- Identificación del o los RPAS de explotación permanente y exclusiva, indicando serie de fabricante o número de registro DGAC.
- Pruebas de demostración de uno o más tipos de operación declarados en el Manual de Operaciones.

Proceso de obtención del AOC

El procedimiento se inicia mediante el envío de una Carta de Intención dirigida a la DGAC, en la que la empresa manifiesta formalmente su voluntad de iniciar el proceso de certificación. Una vez recepcionada la carta, la autoridad asigna un expediente y coordina una reunión informativa con el solicitante.

A partir de ello, el proceso se desarrolla en cinco fases de certificación:

1. Reunión informativa de formación de la empresa.
2. Aplicación formal, mediante la entrega de la documentación del solicitante.
3. Evaluación documental, realizada por las unidades competentes de la DGAC.
4. Demostración e inspección, incluyendo revisión técnica, operativa y, cuando corresponda, vuelos de demostración.
5. Aprobación y otorgamiento del Certificado AOC, junto con las correspondientes Especificaciones Operativas.
6. Matriz de riesgo de la operación, conforme a la sección 119.213 Gestión de la Seguridad Operacional, la cual debe permitir la identificación permanente de los principales peligros asociados a la operación, así como la descripción de las medidas de gestión y mitigación de los riesgos derivados de ellos, con el fin de mantener la seguridad operacional en los trabajos aéreos que se pretenda realizar.

La DAN 119 establece que, una vez entregada la totalidad de los antecedentes requeridos, la DGAC dispone de un plazo máximo de 60 días hábiles para desarrollar el proceso formal de certificación. No obstante, el plazo total para completar todas las fases no debe exceder seis meses. Complementariamente, la guía práctica de la DGAC para empresas con RPAS estima una duración total de entre 2 y 6 meses, dependiendo del grado de preparación documental y técnica del solicitante.

3.3.2 Permisología SUBTEL: uso del espectro radioeléctrico

La **Subsecretaría de Telecomunicaciones (2006)** aprobó, mediante el **DS N.º 127**, el **Plan General de Uso del Espectro Radioeléctrico**, que constituye uno de los marcos regulatorios generales aplicables al uso del espectro en Chile.

Desde el punto de vista del proyecto, esta materia es relevante porque la operación del RPAS depende del uso de enlaces de mando, control y transmisión de datos. En términos de cumplimiento, el proyecto debe:

- **Verificar que los equipos de comunicación operen dentro de bandas permitidas** por la normativa aplicable.
- **Operar dentro de los parámetros técnicos permitidos para bandas de uso libre**, tales como frecuencia, potencia y condiciones de no interferencia con otros sistemas.
- **Evitar interferencias perjudiciales** con otros sistemas de telecomunicaciones.
- **Revisar técnicamente la infraestructura complementaria**, como repetidores, antenas o enlaces reforzados, para confirmar si permanece dentro del régimen de uso libre o si requiere evaluación sectorial adicional.

En una faena minera, esta revisión es especialmente importante por la coexistencia con otros sistemas de comunicación operativa, industrial o de monitoreo. En consecuencia, además del permiso aeronáutico, el proyecto debe asegurar la **compatibilidad radioeléctrica** de su sistema de comunicaciones con el entorno de la faena. Esta es una inferencia técnica razonable derivada del régimen general del espectro.

3.3.3 Reglamento de Seguridad Minera (SERNAGEOMIN)

La Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2004), al publicar el **DS N.º 132/2002 del Ministerio de Minería**, establece que el Reglamento de Seguridad Minera fija el marco regulatorio general al que deben someterse las faenas de la industria extractiva minera nacional. Su propósito es **proteger la vida e integridad física de las personas y también las instalaciones e infraestructura que hacen posible las operaciones mineras y la continuidad de sus procesos**. Asimismo, el reglamento dispone que sus normas son aplicables a todas las actividades desarrolladas en la industria extractiva minera, y define que las faenas mineras comprenden no solo minas y plantas, sino también campamentos, talleres, bodegas, servicios de apoyo e infraestructura necesaria para su funcionamiento. La misma norma asigna a SERNAGEOMIN la competencia general y exclusiva para fiscalizar su cumplimiento.

En este contexto, aunque el Reglamento de Seguridad Minera no regula específicamente la operación aeronáutica del dron, sí constituye un marco sectorial relevante para cualquier actividad o sistema que se incorpore al interior de una faena minera. En consecuencia, el proyecto debe entenderse como una actividad que debe integrarse a las condiciones generales de seguridad de la faena y quedar sujeta, cuando corresponda, a la evaluación interna del titular minero y a la fiscalización de la autoridad sectorial. Esta última es una inferencia fundada en el alcance general del reglamento y en su aplicación a todas las actividades de la industria extractiva minera.

Disposiciones generales de seguridad minera aplicables al proyecto

En términos prácticos, las principales disposiciones generales del Reglamento de Seguridad Minera que resultan aplicables al proyecto son las siguientes:

- **Aplicación general del reglamento a toda actividad desarrollada en la industria extractiva minera:**

El reglamento dispone expresamente que sus normas se aplican a todas las actividades desarrolladas en la industria extractiva minera. Por ello, cualquier sistema o actividad

que se incorpore a la operación de la faena debe ajustarse a este marco general de seguridad.

- **Inclusión de infraestructura, servicios de apoyo e instalaciones dentro del concepto de faena minera:**

La normativa señala que las faenas mineras comprenden minas, plantas de tratamiento, campamentos, talleres, bodegas, servicios de apoyo e infraestructura necesaria para asegurar el funcionamiento de la industria extractiva minera. Esto implica que los sistemas auxiliares incorporados al entorno minero deben analizarse dentro de dicho espacio regulado.

- **Protección de personas, instalaciones e infraestructura minera:**

El reglamento no solo protege a las personas que se desempeñan en la industria, sino también a las instalaciones e infraestructura que permiten las operaciones y la continuidad de sus procesos. En consecuencia, cualquier tecnología incorporada al proyecto debe ser compatible con la seguridad del personal, la infraestructura existente y la continuidad operacional de la faena.

- **Competencia de SERNAGEOMIN para fiscalizar el cumplimiento del reglamento:**

La norma establece que corresponde a SERNAGEOMIN la competencia general y exclusiva para la aplicación y fiscalización del cumplimiento del Reglamento de Seguridad Minera. Por ello, cualquier actividad desarrollada al interior de la faena puede quedar sujeta al control sectorial en materias de seguridad minera.

- **Facultad del Servicio para inspeccionar y evaluar las condiciones de funcionamiento de las instalaciones de la faena.**

El reglamento faculta a los funcionarios de SERNAGEOMIN para inspeccionar y evaluar las condiciones de funcionamiento de la totalidad de las instalaciones que formen parte de la faena minera, con el objeto de controlar el cumplimiento normativo. La empresa minera debe facilitar el acceso y disponer de personal competente para atender las fiscalizaciones.

- **Facultad de exigir acciones correctivas.**

Dentro de sus atribuciones, SERNAGEOMIN puede exigir el cumplimiento de

acciones correctivas derivadas de sus funciones de control y fiscalización. Por ello, cualquier observación o requerimiento que se formule en relación con la actividad o sistema implementado en la faena debe ser atendido dentro del marco de seguridad minera aplicable.

Alcance para el presente proyecto

Desde la perspectiva del proyecto, estas disposiciones permiten concluir que la implementación del sistema debe cumplir, al menos, con las siguientes condiciones generales:

- **No poner en riesgo la vida e integridad física de las personas** que trabajan o circulan en la faena.
- **No afectar instalaciones, infraestructura ni continuidad operacional** del recinto minero.
- **Integrarse al sistema de seguridad y control operacional** de la empresa titular o mandante de la faena.
- **Quedar disponible para fiscalización sectorial**, cuando corresponda.
- **Dar cumplimiento a observaciones o medidas correctivas** que eventualmente formule SERNAGEOMIN.

En consecuencia, el Reglamento de Seguridad Minera no opera en este caso como una autorización específica para el vuelo del RPAS, sino como el marco sectorial que obliga a que la actividad propuesta sea compatible con las condiciones generales de seguridad minera exigibles al interior de la faena.

3.3.4 Permisología eléctrica: SEC e instalaciones de consumo

La Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (1998) contiene el **DS N.º 327/1997**, que fija el Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos y constituye el marco general aplicable a las instalaciones eléctricas de consumo. En el caso del presente proyecto, esta normativa resulta relevante en la medida en que la operación del sistema requiere infraestructura eléctrica de soporte, como estaciones de carga, gabinetes energizados o puntos de alimentación para el funcionamiento del sistema autónomo.

Desde el punto de vista práctico, la regularización más cercana para este tipo de infraestructura corresponde al trámite **TE1**, definido por la **Superintendencia de Electricidad y Combustibles** como la **declaración de instalación eléctrica interior**. La propia SEC, en su instructivo para proyectos que les aplica el **DS N.º 8**, establece que las instalaciones eléctricas de consumo deben declararse mediante este trámite en la plataforma institucional.

En consecuencia, si el proyecto incorpora alimentación eléctrica fija o semipermanente para la operación del sistema, deberá considerarse al menos lo siguiente:

1. **Diseñar la instalación eléctrica como instalación de consumo**, conforme a la normativa técnica y de seguridad aplicable.
2. **Tramitar la declaración TE1** ante la SEC, cuando la configuración definitiva del proyecto así lo requiera.
3. **Contar con un instalador autorizado** para efectuar la declaración y respaldar técnicamente la instalación. La SEC mantiene este procedimiento en su sistema e-Declarador para perfiles de instaladores autorizados.
4. **Incorporar la documentación técnica exigible**, incluyendo los antecedentes del propietario, la descripción de la instalación y los adjuntos correspondientes; además, cuando proceda, la **memoria explicativa** exigida por la autoridad.
5. **Someter la instalación a revisión sectorial**, puesto que el trámite TE1 contempla una etapa de revisión por parte de la SEC una vez ingresada la declaración.

Por ello, la exigencia regulatoria en esta materia no recae sobre el dron como aeronave, sino sobre la **instalación eléctrica interior que permitirá su carga, alimentación y operación segura en terreno**. En el contexto del presente proyecto, esto significa que la infraestructura energética asociada al sistema debe concebirse como una instalación eléctrica de consumo y, en consecuencia, evaluarse bajo el régimen aplicable al trámite **TE1**.

3.4 Estudio económico-financiero

El presente capítulo tiene como propósito evaluar la conveniencia económica de implementar un servicio de levantamiento topográfico con drones autónomos en faenas mineras, comparándolo con una metodología convencional de operación manual en terreno. En coherencia con el enfoque de evaluación de proyectos adoptado en esta investigación, el análisis busca determinar si la alternativa autónoma genera valor suficiente para justificar su inversión, considerando costos, ingresos, financiamiento, rentabilidad y beneficios operacionales asociados.

Para ello, se definen y comparan dos escenarios: un escenario base, representado por una operación manual con personal en terreno, equipos topográficos, dron convencional y vehículo de apoyo; y un escenario autónomo, basado en el uso de drones integrados a una estación fija de operación remota. Esta comparación permite identificar diferencias en inversión inicial, costos operacionales, estructura de recursos, tiempos de ejecución, exposición del personal y continuidad del servicio.

A partir de estos antecedentes, se estiman los costos de inversión y operación de ambas alternativas, junto con una aproximación a los costos ambientales asociados al uso de vehículos terrestres. Posteriormente, se construyen los flujos de caja proyectados y se calculan los principales indicadores financieros, tales como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión o Payback. Finalmente, se incorpora un análisis de sensibilidad para evaluar el comportamiento del proyecto frente a variaciones en variables críticas como precio, OPEX, demanda, meses facturados y tasa de descuento.

3.4.1 Definición del escenario base

El escenario base del presente estudio corresponde a una operación manual de levantamiento topográfico en faena minera, estructurada para cubrir la campaña tipo definida para Compañía Minera Lomas Bayas. A diferencia del escenario autónomo, en este modelo la ejecución del servicio depende de la presencia física de personal en terreno, del traslado entre sectores mediante camioneta y del uso de equipos de apoyo para sostener la continuidad operacional durante la jornada.

La definición de este escenario se fundamenta en la configuración espacial del caso de estudio, el cual integra **pilas de lixiviación, botaderos de estéril y tajos abiertos**, distribuidos en distintos sectores de la faena. En particular, Lomas Bayas presenta una superficie representativa compuesta por **633,1 ha de pilas, 487,7 ha de botaderos y 259,3 ha de tajos**, lo que justifica la necesidad de una operación con desplazamiento entre frentes y apoyo técnico complementario.

Desde esta perspectiva, el escenario base no debe entenderse únicamente como el uso aislado de un dron, sino como una **operación manual reforzada**, donde el levantamiento aéreo se complementa con equipos topográficos terrestres, energía portátil y logística de terreno, a fin de responder a las exigencias de cobertura y continuidad del servicio.

3.4.1.1 Equipamiento principal del escenario base

La base tecnológica del escenario corresponde a un kit manual **DJI Matrice 4E + D-RTK 3**, de acuerdo con la cotización considerada en esta investigación. Dicho kit incluye:

- **1 dron DJI Matrice 4E**
- **1 estación D-RTK 3**
- **1 kit trípode**
- **1 control remoto con pantalla**
- **1 case de transporte**
- **3 baterías por kit**

El valor cotizado de este conjunto asciende a **\$7.954.499 CLP con IVA incluido**.

Para la ejecución de la campaña tipo, el escenario base considera como dotación principal:

- **1 dron DJI Matrice 4E**
- **1 estación D-RTK 3**
- **1 trípode**
- **1 control remoto**
- **1 case de transporte**
- **5 baterías de vuelo**
- **1 taquímetro**
- **1 estación portátil de energía para carga de baterías**
- **1 camioneta 4x4**
- **1 notebook de procesamiento**
- **1 notebook de apoyo administrativo**
- **elementos de protección personal**
- **herramientas menores de mantenimiento**

La ampliación a cinco baterías físicas permite sostener una operación más realista en terreno, bajo un esquema de rotación entre batería en uso, batería en carga y batería de respaldo. Asimismo, la incorporación de un **taquímetro** permite complementar el levantamiento aéreo con mediciones terrestres de apoyo, control y verificación en sectores específicos de la faena, mientras que la **estación portátil de energía** permite mantener continuidad operacional durante la jornada mediante la recarga de baterías en terreno.

3.4.1.2 Recursos humanos del escenario base

La operación manual requiere una cuadrilla mínima compuesta por personal técnico y logístico en terreno. Para el escenario base se consideran los siguientes cargos:

- **1 piloto RPAS:** Responsable de la ejecución del vuelo, chequeos operacionales y control de la misión.
- **1 geomensor o topógrafo:** responsable del control geomático, validación técnica y apoyo en mediciones complementarias.
- **1 técnico de apoyo / conductor:** Encargado del traslado, apoyo logístico, instalación del equipo y cambio de baterías.

Adicionalmente, para efectos de estructura organizacional del servicio, el escenario base contempla apoyo compartido de:

- **1 prevencionista de riesgos**
- **1 administrador de contrato**
- **1 apoyo de gabinete o procesamiento**

En consecuencia, la cuadrilla operativa directa en terreno queda constituida por 3 personas, mientras que la operación total asociada al servicio considera una dotación más amplia de soporte organizacional.

3.4.1.3 Dimensionamiento operativo de la campaña

El plan de vuelo elaborado para el escenario base con **Matrice 4E** arrojó los siguientes resultados:

Sector	Tiempo de vuelo	Baterías-equivalentes	Imágenes
Pila 1	1:09:01	3	2.303
Pila 2	1:12:27	3	2.339
Botadero 1	0:58:07	3	1.918
Botadero 2	0:15:05	1	425
Botadero 3	0:20:31	1	606

Botadero 4	0:24:55	1	762
Tajo 1	0:24:06	1	732
Tajo 2	0:29:38	2	922
Total	5:13:50	15	10.007

Tabla 24. Tiempo total estimado de operación del escenario base.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la campaña tipo exige un total de 5:13:50 h de vuelo puro, con una captura acumulada de 10.007 imágenes y una demanda energética equivalente a 15 baterías. En comparación con el Matrice 3D, el Matrice 4E presenta un requerimiento menor de baterías para una campaña de similar cobertura. Asimismo, para el escenario base se considera que el personal opera bajo un sistema de turno 15x15, por lo que la ejecución de las actividades se proyecta sobre **15 días efectivos de trabajo en faena**, lo que equivale a una captura potencial de **150.105 imágenes** durante un ciclo completo de turno.

No obstante, en el escenario base la duración real de la jornada debe incorporar también los tiempos de traslado terrestre y de cambio manual de baterías.

3.4.1.4 Traslado en camioneta y tiempo total de operación

Para el escenario base se consideró el desplazamiento terrestre entre la base operacional y los distintos sectores evaluados, utilizando una **camioneta 4x4** y adoptando una velocidad promedio de **30 km/h** en caminos internos de faena. Bajo este supuesto, el tiempo total de traslado de ida y vuelta asciende a **2:21:12 h**.

Adicionalmente, la campaña implica una demanda acumulada de **15 baterías-equivalentes**, lo que se traduce en **14 cambios manuales de batería**, considerando que el primer vuelo inicia con una batería ya instalada. Suponiendo un tiempo de **2 a 3 minutos por recambio**, ello agrega entre **28 y 42 minutos** a la jornada total.

En consecuencia, el tiempo total estimado de operación para ejecutar la campaña tipo del escenario base se resume de la siguiente manera:

Componente	Tiempo
Vuelo puro Matrice 4E	5:13:50
Traslados en camioneta (ida y vuelta)	2:21:12
Subtotal operativo	7:35:02
Cambios de batería (14 × 2 min)	0:28:00
Cambios de batería (14 × 3 min)	0:42:00
Tiempo total mínimo	8:03:02
Tiempo total máximo	8:17:02

Tabla 25. Tiempo total estimado de operación del escenario base.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, para efectos de análisis, puede adoptarse como valor representativo una duración aproximada de **8 horas y 10 minutos** para la ejecución completa de la campaña tipo.

3.4.1.5 Fijación de precios del escenario base

A partir de la configuración técnica y operativa previamente definida para el escenario base, se procedió a estimar la tarifa mensual del servicio, con el fin de traducir la estructura de recursos, tiempos de operación y costos asociados en un valor económico de referencia. En este caso, se utilizó la misma metodología de cálculo empleada para el escenario autónomo, considerando el **OPEX mensual**, la **amortización lineal del CAPEX en 60 meses** y la aplicación de un **margen de utilidad del 30%** sobre el costo base del servicio.

Bajo este criterio, y considerando los costos del escenario base detallados en el Anexo C, Tabla C.1 (OPEX) y Tabla C.2 (CAPEX), el monto financiado corresponde a la suma del CAPEX más cuatro meses de OPEX, alcanzando un total de \$144.261.466. Sin embargo, para efectos del servicio de la deuda se considera financiamiento externo equivalente al 40% de dicho monto. Considerando una cuota mensual de financiamiento de \$1.204.373,84, el costo base del servicio asciende a \$24.711.188,84. Sobre este valor se aplica una utilidad empresarial equivalente a \$7.413.356,65, obteniéndose una tarifa mensual final neta de \$32.124.545,49.

Componente de costo	Definición	Valor mensual (CLP)
OPEX mensual	Costos operacionales del servicio	\$23.506.815
Monto financiado referencial	CAPEX + 4 meses de OPEX	\$144.261.466
Porcentaje financiado con deuda	40% del monto financiado referencial	\$57.704.586
Cuota de financiamiento	Crédito a 60 meses sobre el 40% financiado	\$1.204.374
Costo base del servicio	Suma de OPEX + cuota de financiamiento	\$24.711.189
Utilidad empresarial (30%)	Margen sobre el costo base	\$7.413.357
Tarifa mensual final (neta)	Valor mensual a facturar	\$32.124.545
Tarifa por hectárea	Tarifa mensual final / 1.380,1 ha	\$23.277/ha

Tabla 26. Fijación de precios del escenario base

Fuente: Elaboración propia en base al Anexo C

De esta manera, la definición del escenario base no solo permite caracterizar su lógica operativa, sino también establecer un valor económico de referencia para la prestación del servicio, el cual será posteriormente contrastado con la tarifa obtenida para el escenario autónomo en el análisis comparativo.

3.4.1.6 Síntesis del escenario base

En síntesis, el escenario base representa una **operación manual de levantamiento topográfico reforzada**, compuesta por un dron DJI Matrice 4E, estación D-RTK 3, taquímetro de apoyo, estación portátil de energía, una camioneta 4x4 y una cuadrilla operativa en terreno. Su principal característica es que la campaña depende del desplazamiento físico del personal y de la coordinación de recursos móviles para sostener la continuidad del servicio.

A diferencia del escenario autónomo, este modelo no requiere infraestructura fija especializada, pero sí mantiene una mayor dependencia del trabajo presencial, de los tiempos auxiliares de traslado y de la intervención directa del personal en cada misión. Por ello, constituye una base comparativa adecuada para evaluar las diferencias operativas y económicas frente a la alternativa autónoma.

A modo de síntesis, la **tabla 27** presenta una comparación general entre el escenario base y el escenario autónomo, considerando equipamiento operacional, recursos humanos y principales variables operativas del servicio.

Variable	Escenario base	Escenario autónomo
Modelo operacional	Operación manual en terreno	Operación automatizada con base fija
Aeronave principal	DJI Matrice 4E	DJI Matrice 3D
Sistema de posicionamiento	D-RTK 3	Integrado al sistema autónomo / soporte RTK
Tipo de apoyo topográfico	Dron + taquímetro	Dron autónomo
Cantidad de drones	1	1
Baterías físicas consideradas	5	5
Demanda acumulada de baterías	15 baterías-equivalentes	23 baterías-equivalentes
Vehículo de apoyo	1 camioneta 4x4	No indispensable para cada misión
Estación portátil de energía	Sí	No indispensable
Infraestructura fija especializada	No	Sí
Personal operativo en terreno	3 personas	1 piloto/supervisor en faena
Apoyo organizacional	Prevencionista, administrador y gabinete	Prevencionista, administrador, IT y gabinete
Tiempo de vuelo puro	5:13:50 h	5:13:50 h
Tiempo adicional por traslados	2:21:12 h (camioneta)	1:38:03 h (ida y retorno aéreo)

Cambios de batería	14 cambios manuales	22 cambios manuales
Tiempo total estimado de campaña	8:03:02 a 8:17:02 h	7:35:53 a 7:57:53 h
Dependencia del trabajo presencial	Alta	Media-baja
Exposición del personal en faena	Mayor	Menor
Continuidad operacional	Depende de cuadrilla móvil	Mayor automatización y repetitividad
Tarifa mensual final	\$32.124.545	\$32.381.856
Tarifa por hectárea	\$23.277/ha	\$23.464/ha

Tabla 27. Comparación general entre el escenario base y el escenario autónomo

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, ambos escenarios presentan tiempos de vuelo puro similares para la campaña tipo; sin embargo, difieren en la forma en que resuelven la operación en faena. Mientras el escenario base depende de mayor apoyo terrestre, recursos auxiliares y presencia directa del personal, el escenario autónomo reduce parte de esa carga mediante una lógica de operación más automatizada, lo que justifica su comparación posterior desde el punto de vista económico-financiero.

3.4.4 Análisis de costos

El análisis de costos se realizó mediante la comparación entre el escenario base y el escenario autónomo, considerando tanto la inversión inicial (**CAPEX**) como los costos operacionales mensuales (**OPEX**) requeridos para implementar y ejecutar el servicio de levantamiento topográfico. Para ello, se utilizaron las estructuras de costos desarrolladas para ambos escenarios, incorporando componentes de inversión, operación, mantenimiento, seguros, capacitación, logística e infraestructura de soporte.

Desde la perspectiva de la inversión inicial, el **escenario autónomo** presenta un **CAPEX total de \$58.988.731**, mientras que el **escenario base** alcanza un **CAPEX de \$50.234.206**. En consecuencia, la implementación de la alternativa autónoma requiere una inversión adicional de **\$8.754.525** respecto del escenario base. Esta diferencia se explica principalmente por la incorporación de infraestructura especializada, estación Dock 2, mayor equipamiento tecnológico y una configuración operacional orientada a la automatización del servicio.

En cuanto a los costos operacionales, el **escenario autónomo** registra un **OPEX mensual de \$23.627.624**, mientras que el **escenario base** presenta un **OPEX mensual de \$23.506.815**. Esto implica que la alternativa autónoma resulta **levemente más costosa en operación mensual**, con una diferencia de **\$120.809** respecto del escenario base.

Desde una perspectiva comparativa, esto muestra que la principal brecha económica entre ambos escenarios no se encuentra en el costo mensual de operación, sino en la inversión inicial requerida para implementar la solución autónoma. En otras palabras, el escenario autónomo no encarece de forma significativa la operación mensual, pero sí exige un desembolso inicial mayor para habilitar la infraestructura, el equipamiento y la capacidad tecnológica necesaria para sostener una operación automatizada.

En este contexto, la decisión entre ambos escenarios no depende únicamente de cuál presenta menor costo directo, sino de si la mayor inversión inicial del escenario autónomo se compensa con ventajas operacionales tales como automatización de misiones, menor exposición del personal en terreno, mayor continuidad operacional y potencial mejora en la

eficiencia del servicio. Por esta razón, la comparación de costos constituye la base para la posterior evaluación financiera del proyecto, en la cual se analizará si los beneficios esperados permiten justificar económicamente la implementación de la alternativa autónoma.

Concepto	Escenario base	Escenario autónomo	Diferencia
CAPEX total	\$50.234.206	\$58.988.731	\$8.754.525
OPEX mensual	\$23.506.815	\$23.627.624	\$120.809

Tabla 28 . Comparación de costos entre el escenario base y el escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, el escenario autónomo presenta una inversión inicial superior, pero una operación mensual levemente menor que el escenario base, por lo que la conveniencia económica de su implementación dependerá de si dicha diferencia de inversión puede ser compensada por sus beneficios operacionales en el mediano y largo plazo.

3.4.4 Costos ambientales

Los costos ambientales del proyecto se estiman a partir de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas al consumo de diésel de las camionetas de apoyo en cada escenario. Para ello, se comparó el consumo de combustible del **escenario base** con el del **escenario autónomo**, considerando que la combustión de diésel emite CO₂ en proporción directa al volumen consumido.

Para convertir litros de diésel en emisiones de CO₂, se utilizó el factor de emisión reportado por la **U.S. Environmental Protection Agency (EPA)**, que indica que la combustión de un galón de diésel genera **10.180 g de CO₂**. Expresado en litros, este valor equivale a aproximadamente **2,689 kg CO₂/L**.

En consecuencia, la estimación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = \text{Consumo de diésel (L)} \times 2,689 \text{ kg CO}_2/\text{L}$$

Aplicando esta fórmula a los consumos estimados para cada escenario:

- **Escenario base:** $323,9 \text{ L} \times 2,689 \text{ kg } \frac{\text{CO}_2}{\text{L}} = 871,17 \text{ kg CO}_2$
- **Escenario autónomo:** $167,6 \text{ L} \times 2,689 \text{ kg } \frac{\text{CO}_2}{\text{L}} = 450,68 \text{ kg CO}_2$

Concepto	Escenario base	Escenario autónomo
Consumo de diésel	323,9 L	167,6 L
Factor de emisión	2,689 kg CO ₂ /L	2,689 kg CO ₂ /L
Emisiones estimadas	871,17 kg CO ₂	450,68 kg CO ₂

Tabla 29. Estimación de emisiones de CO₂ asociadas al consumo de diésel.

Fuente: Elaboración propia en base al factor de emisión para diésel reportado por la (EPA)

Por lo tanto, la reducción de emisiones asociada a la implementación del escenario autónomo corresponde a:

$$(323,9 - 167,6)L \times 2,689kg \frac{CO_2}{L} = 420,49 kgCO_2$$

Si este diferencial se proyecta en términos anuales, la reducción estimada asciende a:

$420,49 \times 12 = 5.045,88 kg \frac{CO_2}{año}$, es decir, aproximadamente **5,05 toneladas de CO₂ evitadas por año.**

Desde una perspectiva ambiental, este resultado muestra que la implementación del escenario autónomo permitiría reducir de manera efectiva la huella de carbono asociada al transporte terrestre de apoyo. Si bien esta reducción no se traduce necesariamente en un ahorro financiero directo inmediato, sí constituye un beneficio ambiental cuantificable que puede vincularse al cumplimiento de metas de sostenibilidad, políticas de compensación, y fortalecimiento de la imagen corporativa del proyecto.

3.4.5 Evaluación financiera

La evaluación financiera tiene por objetivo determinar la viabilidad económica del proyecto, considerando tanto la alternativa autónoma basada en el uso de drones y estación fija de operación, como un escenario base asociado a una metodología más tradicional de levantamiento topográfico. Para ello, se construyen dos flujos de caja proyectados a cinco años, permitiendo comparar el comportamiento económico de ambas alternativas bajo los mismos criterios de ingresos, costos, inversión, financiamiento, depreciación, impuestos y recuperación de capital.

El primer flujo corresponde al **escenario autónomo**, el cual considera la implementación de una solución tecnológica compuesta por infraestructura fija, estación DJI Dock 2, drones DJI Matrice 3D, conectividad, equipos de apoyo y recursos humanos asociados a una operación automatizada. Este flujo permite evaluar si la incorporación de tecnología autónoma logra generar retornos suficientes para justificar su mayor complejidad técnica y su inversión inicial.

El segundo flujo corresponde al **escenario base**, entendido como una alternativa de operación más tradicional, con mayor dependencia de personal en terreno, apoyo topográfico manual, traslado mediante camioneta y ejecución presencial de las actividades de levantamiento. Este escenario funciona como punto de comparación para determinar si la solución autónoma presenta ventajas económicas frente a un modelo operacional convencional.

Ambos flujos consideran un horizonte de evaluación de **cinco años**, ingresos por prestación del servicio, costos variables y fijos, depreciación de activos, intereses, impuestos, inversión inicial, capital de trabajo, préstamo, amortización de deuda, valor residual de activos y recuperación parcial del capital de trabajo. A partir de estos flujos se calculan los principales indicadores financieros: **Valor Actual Neto (VAN)**, **Tasa Interna de Retorno (TIR)** y **Período de Recuperación de la Inversión (Payback)**.

De esta manera, la evaluación financiera permite analizar no solo si cada escenario es rentable de forma individual, sino también si el escenario autónomo resulta conveniente en comparación con métodos más tradicionales de operación topográfica en faena minera.

3.4.5.1 Evaluación financiera del escenario autónomo

La evaluación financiera del escenario autónomo se realizó mediante la construcción de un flujo de caja proyectado a cinco años, con el propósito de determinar la viabilidad económica de implementar una solución de levantamiento topográfico basada en una estación fija **DJI Dock 2** y drones **DJI Matrice 3D**. El detalle completo del flujo se presenta en el **Anexo D1: Flujo de caja proyectado del escenario autónomo**.

El flujo considera los principales componentes económicos del proyecto, incluyendo ingresos por prestación del servicio, costos variables, costos fijos, depreciación de activos, intereses, impuestos, inversión inicial, capital de trabajo, préstamo, amortización de deuda, valor residual de activos y recuperación parcial del capital de trabajo. A partir de estos elementos se obtiene el flujo de caja privado, utilizado posteriormente para calcular los indicadores financieros del proyecto: **Valor Actual Neto (VAN)**, **Tasa Interna de Retorno (TIR)** y **Payback**.

3.4.5.1.1 Estimación de ingresos

Los ingresos del escenario autónomo se calcularon a partir de la tarifa por hectárea y la superficie demandada durante cada año del horizonte de evaluación. Para esta estimación se consideró como superficie base la extensión operacional de **1.380,1 ha**, correspondiente a la faena minera analizada. Posteriormente, dicha superficie fue ajustada anualmente en función de la proyección de demanda definida para el proyecto, incorporando variaciones asociadas a la evolución esperada de la actividad minera en la Región de Antofagasta.

La expresión utilizada fue:

$$\textit{Ingresos por venta} = \textit{Precio por hectárea} \times \textit{Hectáreas demandadas}$$

Para el primer año se consideró que el servicio comienza a generar ingresos a partir del cuarto mes de operación. Por este motivo, solo se reconocen nueve meses de facturación:

$$1.380,1 \text{ ha} \times 9 \text{ meses} = 12.420,9 \text{ ha}$$

Desde el segundo año en adelante se considera una operación completa de doce meses, aplicando la superficie mensual proyectada para cada año:

Año	Ha mensual proyectada	Meses facturados	Ha demandada anual
1	1.380,1	9	12.420,9
2	1.406,3	12	16.875,9
3	1.394,6	12	16.735,1
4	1.299,8	12	15.597,3
5	1.245,7	12	14.948,1

Tabla 30. Proyección de demanda utilizada en el flujo de caja del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se aplicó un reajuste anual de **3%** al precio por hectárea, con el fin de reflejar una actualización progresiva de la tarifa durante el período de evaluación. Este reajuste se considera como un supuesto conservador asociado al efecto de la inflación esperada y al incremento gradual de los costos operacionales, tales como remuneraciones, insumos, energía, combustible, mantención y servicios contratados.

Bajo estos supuestos, los ingresos proyectados del escenario autónomo fueron los siguientes:

Año	Ingresos por venta
1	\$291.443.998
2	\$407.854.502
3	\$416.585.951
4	\$399.911.794
5	\$394.764.490

Tabla 31. Ingresos proyectados del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5.1.2 Costos operacionales

Los costos operacionales fueron clasificados en **costos variables** y **costos fijos**, con el objetivo de representar de mejor manera la estructura económica del servicio.

Los **costos variables** corresponden a aquellos directamente asociados al nivel de operación del sistema, tales como mantenimiento, combustible, energía eléctrica en faena, insumos de faena, insumos de oficina y alimentación. En cambio, los **costos fijos** corresponden a compromisos mensuales que se mantienen relativamente constantes, independiente del volumen de hectáreas levantadas, tales como remuneraciones, seguros, provisiones laborales, licencias, conectividad, arriendos, alojamiento y servicios básicos.

Costo variable	Monto mensual (CLP)
Mantenimiento / provisión	\$879.754
Combustible	\$299.400
Energía eléctrica faena	\$155.000
Insumos faena	\$85.000
Insumos de oficina	\$115.900
Alimentación faena	\$788.000
Total costo variable mensual	\$2.323.054

Tabla 32. Clasificación de costos variables del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia.

Costo fijo	Monto mensual (CLP)
Ing. Geomensor (Jefe)	\$4.000.000
Técnicos electromecánicos	\$3.000.000
Operador de vuelo	\$2.500.000
Prevencionista de riesgos	\$1.000.000
Administrador de contrato	\$500.000
Soporte informático (IT)	\$450.000
Seguro laboral obligatorio	\$297.700
Provisión beneficios laborales	\$2.687.626
Licencia procesamiento Strayos AI	\$800.000
Conectividad internet Movistar	\$16.990
Conectividad satelital Starlink	\$243.000
Arriendo camioneta 4x4	\$2.033.000
Arriendo oficina base	\$2.280.000
Alojamiento en faena	\$611.000
Alojamiento en ciudad	\$670.000
Suite Microsoft 365	\$20.254
Suministro de agua	\$35.000
Energía eléctrica oficina	\$160.000
Total costo fijo mensual	\$21.304.570

Tabla 33. Clasificación de costos fijos del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, el OPEX mensual del escenario autónomo asciende a:

$$\mathbf{\$2.323.054 + \$21.304.570 = \$23.627.624}$$

Tanto los costos variables como los costos fijos fueron reajustados anualmente en **3%**, manteniendo consistencia con el criterio utilizado para la actualización de la tarifa del servicio.

3.4.5.1.3 Capital de trabajo y valor residual

El capital de trabajo se estimó como una reserva de liquidez equivalente a cuatro meses de OPEX, necesaria para financiar la operación durante el período inicial sin ingresos. Para adoptar un criterio conservador, se consideró una recuperación del **80%** del capital de trabajo al finalizar el quinto año.

La recuperación estimada corresponde a:

$$\textbf{Recuperación de capital de trabajo} = \$94.510.496 \times 80\% = \$75.608.397$$

El 20% restante se reconoce como pérdida por capital de trabajo, considerando posibles gastos de cierre, diferencias de caja o compromisos operacionales pendientes. Además, se incorporó un valor residual de activos de **\$11.797.746**, correspondiente al valor de mercado estimado de los activos fijos al término del horizonte de evaluación.

3.4.5.1.4 Financiamiento del proyecto

El escenario autónomo considera una inversión inicial de **\$58.988.731** y un capital de trabajo de **\$94.510.496**, calculado como el equivalente a cuatro meses de OPEX. Este capital de trabajo permite cubrir el período inicial de puesta en marcha y el desfase existente hasta la recepción del primer pago del servicio.

Por lo tanto, el monto total requerido al inicio del proyecto corresponde a:

$$\begin{aligned} \textbf{Monto requerido} &= \textbf{Inversión inicial} + \textbf{Capital de trabajo} \\ \textbf{Monto requerido} &= \$58.988.731 + \$94.510.496 = \$153.499.227 \end{aligned}$$

De este monto, se consideró un préstamo equivalente al **40%**, es decir:

$$\textbf{Préstamo} = \$153.499.227 \times 40\% = \$61.399.691$$

El crédito se amortiza en un plazo de cinco años, con una tasa de interés anual de **8%**. La cuota anual resultante es de **\$15.377.949**, compuesta por intereses y amortización de capital. Los intereses se incorporan dentro del flujo operacional, mientras que la amortización del préstamo se registra en el flujo de caja de capitales.

Número de cuota	0	1	2	3	4	5
Préstamo	\$61.399.691	\$50.933.717	\$39.630.466	\$27.422.954	\$14.238.842	\$0
Cuota		\$15.377.949	\$15.377.949	\$15.377.949	\$15.377.949	\$15.377.949
Intereses		\$4.911.975	\$4.074.697	\$3.170.437	\$2.193.836	\$1.139.107
Amortización		\$10.465.974	\$11.303.251	\$12.207.512	\$13.184.113	\$14.238.842

Tabla 34. Calendario de amortización del préstamo del escenario autónomo

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5.1.5 Flujo de caja operacional

El flujo de caja operacional se obtuvo a partir de la utilidad después de impuestos, incorporando nuevamente aquellos conceptos contables que no representan una salida efectiva de dinero. En este caso, la depreciación se registra inicialmente como un gasto para efectos de determinar la utilidad antes de impuestos; sin embargo, al no constituir un desembolso real de caja, se suma nuevamente al resultado después de impuestos.

La estructura general utilizada fue la siguiente:

Flujo de caja operacional = Utilidad después de impuestos + Depreciación + ajustes contables

Para determinar la utilidad antes de impuestos, primero se descontaron de los ingresos por venta los costos variables, costos fijos, depreciación, intereses y los ajustes asociados a pérdida o ganancia de capital y capital de trabajo. Posteriormente, se aplicó el impuesto correspondiente sobre la utilidad positiva. En aquellos años donde la utilidad antes de impuestos resultó negativa, no se consideró pago de impuesto.

De esta forma, el flujo de caja operacional refleja la capacidad del proyecto para generar caja a partir de su operación regular, sin considerar todavía los movimientos de inversión, financiamiento, amortización del préstamo, valor residual de activos ni recuperación del capital de trabajo, los cuales se incorporan posteriormente en el flujo de caja de capitales.

En el escenario autónomo, el flujo de caja operacional obtenido fue el siguiente:

Año	Flujo de caja operacional
1	\$5.323.588
2	\$100.991.039
3	\$101.819.111
4	\$79.864.797
5	\$70.942.326

***Tabla 35.** flujo de caja operacional*

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados muestran que, pese a que el primer año presenta una menor generación de caja debido al desfase inicial de facturación, el flujo operacional se vuelve significativamente positivo desde el segundo año, como resultado de la operación completa de doce meses y del reajuste anual aplicado a la tarifa del servicio.

3.4.5.1.6 Flujo de caja de capitales

El flujo de caja de capitales considera los movimientos asociados a la inversión inicial, el capital de trabajo, el préstamo, la amortización de la deuda y las recuperaciones al cierre del proyecto.

En el Año 0 se registra la inversión inicial de **\$58.988.731** y el capital de trabajo de **\$94.510.496**, equivalente a cuatro meses de OPEX. A su vez, se incorpora un préstamo correspondiente al 40% del monto inicial requerido, equivalente a **\$61.399.691**. Por lo tanto, el flujo de caja de capitales inicial queda en **-\$92.099.536**.

Durante los años 1 al 5 se considera la amortización anual del préstamo como salida de caja. Finalmente, en el Año 5 se incorpora el valor residual de los activos, por **\$11.797.746**, y la recuperación del 80% del capital de trabajo, equivalente a **\$75.608.397**.

Año	Flujo de caja de capitales
0	-\$92.099.536
1	-\$10.465.974
2	-\$11.303.251
3	-\$12.207.512
4	-\$13.184.113

5	\$73.167.301
---	--------------

Tabla 36. flujo de caja de capitales

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, este flujo muestra que el mayor desembolso ocurre al inicio del proyecto, mientras que en el último año se genera una recuperación relevante por el valor residual de los activos y la liberación parcial del capital de trabajo.

3.4.5.1.7 Flujo de caja privado

El flujo de caja privado se obtuvo a partir de la suma del flujo de caja operacional y el flujo de caja de capitales. Este flujo representa la caja efectiva disponible para el inversionista después de considerar la operación del proyecto, el financiamiento, la inversión inicial, la amortización de deuda y las recuperaciones finales.

Los flujos obtenidos para el escenario autónomo fueron los siguientes:

Año	Flujo caja privado
0	-\$92.099.536
1	-\$5.142.385
2	\$89.687.787
3	\$89.611.599
4	\$66.680.684
5	\$144.109.628

Tabla 37. flujo de caja privado

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el proyecto presenta flujos negativos durante el Año 0 y Año 1, debido a la inversión inicial, el capital de trabajo requerido y el reconocimiento de solo nueve meses de ingresos durante el primer año. A partir del Año 2, el flujo se vuelve positivo; sin embargo, presenta una disminución en los años 4 y 5 debido al ajuste de la demanda proyectada en hectáreas.

3.4.5.1.8 Tasa de descuento

La tasa de descuento fue estimada mediante el modelo **CAPM**, el cual permite calcular la rentabilidad mínima exigida a un proyecto en función del riesgo asumido. La fórmula utilizada fue:

$$Ke = Rf + \beta \times (Rm - Rf)$$

Donde:

- **Rf** corresponde a la tasa libre de riesgo.
- **β** corresponde al beta del proyecto.
- **Rm** corresponde al retorno esperado del mercado.
- **Rm – Rf** corresponde a la prima de riesgo de mercado.

Para efectos del presente estudio, la **tasa libre de riesgo** se estimó en **5,46%**, utilizando como referencia las tasas de bonos soberanos chilenos de largo plazo publicadas por el Banco Central de Chile, particularmente instrumentos de gobierno a 10 años, los cuales son comúnmente utilizados como aproximación de una tasa libre de riesgo en moneda local (Banco Central de Chile, 2026).

El **beta** utilizado fue de **1,02**, tomando como referencia las bases sectoriales publicadas por Damodaran, profesor de finanzas de la Stern School of Business de la Universidad de Nueva York. En particular, se consideró una referencia asociada al sector **Information Services**, dado que el proyecto se orienta a la captura, procesamiento y entrega de información topográfica mediante tecnología autónoma aplicada a minería (Damodaran, 2026a).

Por su parte, la **tasa de retorno de mercado** se definió en **15%** como supuesto financiero del modelo, considerando una rentabilidad esperada superior a la tasa libre de riesgo, coherente con el perfil innovador y tecnológico del proyecto. Este criterio se complementa con las referencias de primas de riesgo de mercado y país publicadas por Damodaran, utilizadas habitualmente en procesos de valorización financiera (Damodaran, 2026b).

Los parámetros utilizados fueron los siguientes:

Parámetro	Valor
Tasa libre de riesgo	5,46%
Beta	1,02
Tasa de retorno de mercado	15%

Tabla 38. Parámetros de la tasa de descuento

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando en la fórmula:

$$K_e = 5,46\% + 1,02 \times (15\% - 5,46\%)$$

$$K_e = 15,19\%$$

3.4.5.1.9 Indicadores financieros

A partir del flujo de caja privado y la tasa de descuento definida, se calcularon los principales indicadores financieros del escenario autónomo.

Indicador	Resultado
Tasa de descuento	15,19%
VAN	\$138.586.848
TIR	51,5%
Payback	2,08 años

Tabla 39. Resultados financieros

Fuente: Elaboración propia.

El Valor Actual Neto (VAN) obtenido asciende a **\$138.586.848**, lo que indica que el proyecto continúa generando valor económico positivo durante el horizonte de evaluación. Asimismo,

la Tasa Interna de Retorno (TIR) alcanza un **51,5%**, valor superior a la tasa de descuento utilizada, evidenciando una rentabilidad favorable del escenario autónomo.

Por su parte, el Payback corresponde a **2,08 años**, lo que significa que la inversión se recupera durante el tercer año de operación, aproximadamente a los **2 años y 1 mes**.

En consecuencia, bajo los supuestos actualizados de demanda, el escenario autónomo mantiene una evaluación financiera favorable, ya que genera flujos positivos desde el segundo año, recupera la inversión dentro del horizonte de análisis y presenta indicadores de rentabilidad superiores a la tasa mínima exigida.

3.4.5.2 Evaluación financiera del escenario base

La evaluación financiera del escenario base se realizó utilizando la misma metodología aplicada al escenario autónomo, con el objetivo de mantener una comparación consistente entre ambas alternativas. Para ello, se construyó un flujo de caja proyectado a cinco años, considerando ingresos por prestación del servicio, costos variables y fijos, depreciación de activos, intereses, impuestos, inversión inicial, capital de trabajo, financiamiento, amortización de deuda, valor residual de activos y recuperación parcial del capital de trabajo.

A diferencia del escenario autónomo, este flujo considera los costos e inversiones propios de una metodología de levantamiento topográfico más tradicional, caracterizada por una mayor dependencia de operación presencial en terreno, uso de camioneta, apoyo topográfico manual y participación directa de personal operativo en faena.

Para mantener la comparabilidad entre escenarios, se utilizaron los mismos supuestos generales definidos previamente: horizonte de evaluación de cinco años, primer ingreso a partir del cuarto mes de operación, reajuste anual de 3% en precios y costos, impuesto de 12,5%, financiamiento del 40% del monto inicial requerido, tasa de interés anual de 8%, recuperación del 80% del capital de trabajo y tasa de descuento de 15,2%.

Bajo estos criterios, el escenario base considera una inversión inicial de **\$50.234.206**, un capital de trabajo de **\$94.027.260** y un préstamo equivalente a **\$57.704.586**. El flujo de caja privado resultante permite evaluar la rentabilidad del escenario base y utilizarlo como

referencia comparativa frente a la alternativa autónoma. El detalle completo del flujo de caja proyectado del escenario base se presenta en el **Anexo D2: Flujo de caja proyectado del escenario base**.

Indicador	Resultado
Inversión inicial	\$50.234.206
Capital de trabajo	\$94.027.260
Préstamo considerado	\$57.704.586
Tasa de descuento	15%
VAN	\$141.781.706
TIR	54%
Payback	2,03 años

***Tabla 40.** Resultados financieros del escenario base*

Fuente: Elaboración propia.

El escenario base presenta un **VAN positivo de \$141.781.706**, una **TIR de 54%** y un **Payback de 2,03 años**, lo que indica que la alternativa tradicional también resulta financieramente viable bajo los supuestos considerados. La recuperación de la inversión ocurre durante el tercer año de operación, aproximadamente a los **2 años**.

No obstante, estos resultados deben analizarse en conjunto con los aspectos operacionales y estratégicos de cada alternativa. Si bien el escenario base presenta indicadores financieros levemente superiores en términos de recuperación de inversión, el escenario autónomo incorpora beneficios no financieros relevantes, tales como menor exposición del personal en terreno, mayor automatización de misiones, continuidad operacional, estandarización del levantamiento y reducción de dependencia de cuadrillas móviles.

3.4.5.3 Comparación de resultados financieros

Una vez evaluados ambos escenarios de forma individual, se realiza una comparación de los principales indicadores financieros obtenidos. Esta comparación permite identificar las diferencias económicas entre el escenario base y el escenario autónomo, considerando el

Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión o Payback.

La Tabla 30 resume los resultados obtenidos para ambos escenarios bajo los mismos criterios de evaluación financiera, tales como horizonte de cinco años, tasa de descuento, reajuste anual de precios y costos, tratamiento del capital de trabajo, financiamiento e impuestos.

Indicador	Escenario base	Escenario autónomo
VAN	\$141.781.706	\$138.586.848
TIR	54%	51,5%
Payback	2,03 años	2,08 años

***Tabla 41.** Comparación de resultados financieros entre escenario base y escenario autónomo.*

Fuente: Elaboración propia.

Ambos escenarios presentan resultados financieros favorables, con VAN positivo, TIR superior a la tasa de descuento y recuperación de la inversión dentro del horizonte de evaluación. Si bien el escenario base obtiene indicadores financieros levemente superiores, la diferencia no es significativa y debe ser contrastada con los beneficios operacionales del escenario autónomo, especialmente en términos de automatización, seguridad, continuidad operacional y menor exposición del personal en faena.

En términos generales, los resultados muestran que ambas alternativas son económicamente viables; sin embargo, el escenario autónomo logra acercarse considerablemente al desempeño financiero del escenario base, incorporando adicionalmente ventajas operacionales asociadas a la automatización y digitalización del proceso de levantamiento topográfico.

3.5 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene como objetivo evaluar la robustez financiera del escenario autónomo frente a variaciones en sus principales variables críticas. Este análisis se aplica únicamente a dicho escenario, con el propósito de determinar cómo se comportan sus indicadores financieros ante distintos supuestos comerciales, operacionales y financieros.

Para ello, se definieron tres escenarios de análisis: pesimista, base y optimista. Estos fueron contruidos mediante la herramienta Administrador de escenarios de Microsoft Excel, perteneciente al módulo de Análisis de hipótesis, la cual permite modificar simultáneamente variables clave del modelo financiero y observar su efecto sobre indicadores como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Payback.

Las variables consideradas fueron el precio por hectárea, el nivel de costos operacionales, la tasa de descuento, las hectáreas demandadas y los meses facturados durante el primer año de operación. De esta manera, el análisis permite identificar qué tan sensible es la viabilidad del escenario autónomo ante cambios en sus condiciones de implementación.

Finalmente, se incorpora un análisis de punto de equilibrio financiero, orientado a determinar los límites que pueden alcanzar algunas variables críticas antes de que el proyecto deje de generar valor económico. Este análisis permite identificar, por ejemplo, la disminución máxima admisible del precio, el aumento máximo tolerable del OPEX y la tasa de descuento límite para que el VAN sea igual a cero.

3.5.1 Variables consideradas en el análisis

Las variables seleccionadas corresponden a aquellas con mayor incidencia sobre la generación de caja del proyecto. En particular, se consideraron las siguientes:

Variable	Justificación
Precio por hectárea	Incide directamente en los ingresos del proyecto, ya que la facturación depende de la tarifa aplicada sobre la superficie levantada.
OPEX	Afecta los costos operacionales y, además, modifica el capital de trabajo requerido, debido a que este se calcula en función de los meses de operación cubiertos.
Meses facturados	Impactan especialmente el primer año del flujo, ya que determinan cuántos meses generan ingresos efectivos durante la etapa inicial del proyecto.
Tasa de descuento	Afecta el Valor Actual Neto, al modificar el valor presente de los flujos futuros del proyecto.
Hectáreas demandadas	Afectan directamente a la superficie levantada y, por tanto, los ingresos anuales proyectados del servicio.

Tabla 42. Variables consideradas en el análisis de sensibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Bajo este enfoque, el análisis permite identificar la sensibilidad del proyecto ante cambios en variables comerciales, operacionales y financieras.

3.5.2 Definición de escenarios

Los escenarios fueron contruidos mediante la herramienta Administrador de escenarios de Microsoft Excel, la cual permitió modificar de forma simultánea las principales variables críticas del flujo de caja. A partir de esta herramienta se definieron tres escenarios: pesimista, base y optimista, con el propósito de analizar la respuesta financiera del proyecto ante distintas condiciones comerciales, operacionales y financieras.

En el escenario pesimista se consideró una reducción del precio, un aumento de los costos operacionales, una mayor tasa de descuento y una menor cantidad de meses facturados. Por el contrario, el escenario optimista considera una mejora en las condiciones comerciales y operacionales del proyecto.

Escenario	Var. precio	Var. OPEX	Tasa descuento	Meses facturados	Ha año 1	Ha año 2	Ha año 3	Ha año 4	Ha año 5
Pesimista	-10%	+10%	18%	8	0,00%	0,90%	0,05%	- 6,82%	- 10,74%
Base	0%	0%	15%	9	0,00%	1,90%	1,05%	- 5,82%	-9,74%
Optimista	+10%	-10%	12%	11	0,00%	2,90%	2,05%	- 4,82%	-8,74%

Tabla 43. Supuestos del análisis de sensibilidad del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia mediante Administrador de escenarios de Microsoft Excel.

Es importante señalar que, al sensibilizar el OPEX, también se ajustó el capital de trabajo, ya que este fue estimado como una provisión operacional asociada a los costos mensuales del proyecto. Por lo tanto, un aumento o disminución del OPEX afecta no solo los egresos operacionales, sino también el monto inicial requerido, el préstamo asociado y la estructura de financiamiento.

3.5.3 Resultados del análisis de sensibilidad

A partir de los escenarios definidos, se recalcularon los principales indicadores financieros del proyecto: Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Payback.

Escenario	VAN	TIR	Payback
Pesimista	-\$113.620.714	-7,3%	No recupera
Base	\$138.586.848	51,5%	2,08 años
Optimista	\$460.411.392	205,8%	0,55 años

Tabla 44. Resultados del análisis de sensibilidad del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia mediante Administrador de escenarios de Microsoft Excel.

Los resultados muestran que, bajo el escenario base, el proyecto presenta un **VAN positivo de \$138.586.848**, una **TIR de 51,5%** y un **Payback de 2,08 años**, lo que confirma la viabilidad financiera del escenario autónomo bajo los supuestos definidos inicialmente.

En el escenario optimista, los indicadores mejoran de manera significativa, alcanzando un **VAN de \$460.411.392**, una **TIR de 205,8%** y un **Payback de 0,55 años**. Este resultado evidencia que una mejora en la tarifa, una reducción de los costos operacionales, una facturación más temprana y una evolución más favorable de hectáreas demandadas fortalecen considerablemente la rentabilidad del proyecto.

Por el contrario, en el escenario pesimista el proyecto presenta un **VAN negativo de -\$113.620.714**, una **TIR de -7,3%** y no logra recuperar la inversión dentro del horizonte de evaluación. Estos resultados indican que, bajo condiciones adversas, la rentabilidad generada no compensa el nivel de exigencia financiera, por lo que el proyecto no resulta atractivo en dicho escenario.

3.5.3 Punto de equilibrio financiero

De manera complementaria al análisis de sensibilidad por escenarios, se realizó un análisis de punto de equilibrio financiero mediante la herramienta **Buscar objetivo** de Microsoft Excel. Este procedimiento permite determinar el valor máximo o mínimo que puede adoptar una variable crítica para que el **Valor Actual Neto (VAN)** sea igual a cero.

El VAN igual a cero representa el punto en el cual el proyecto cubre exactamente la tasa de descuento exigida, sin generar ni destruir valor económico. Por lo tanto, este análisis permite identificar los límites financieros que puede tolerar el proyecto antes de perder viabilidad económica.

Variable analizada	Resultado a obtener	Resultado obtenido
Precio por hectárea	Precio mínimo para VAN = 0	-12%
OPEX	OPEX máximo para VAN = 0	+15%
Tasa de descuento	Tasa máxima para VAN = 0	52%

Tabla 33. Punto de equilibrio financiero del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia mediante herramienta Buscar objetivo de Microsoft Excel.

Los resultados muestran que el escenario autónomo posee cierto margen de seguridad frente a variaciones individuales de sus variables críticas. En particular, el precio por hectárea podría disminuir hasta un **12%** antes de que el proyecto alcance un VAN igual a cero. Esto indica que la tarifa definida posee un margen moderado de resistencia frente a posibles presiones comerciales o ajustes tarifarios.

Por su parte, el OPEX podría aumentar hasta un **15%** antes de que el proyecto pierda su capacidad de generar valor económico. Esto evidencia que, si bien los costos operacionales son una variable relevante, el flujo mantiene cierto margen para absorber incrementos en remuneraciones, combustible, mantención, alimentación, conectividad u otros costos recurrentes.

Finalmente, la tasa de descuento máxima que permite obtener un VAN igual a cero corresponde aproximadamente a **52%**, valor coherente con la TIR del proyecto. Esto se debe a que la TIR representa precisamente la tasa de descuento que iguala el VAN a cero.

3.5.4 Identificación de variables críticas

A partir del análisis realizado, se identifica que las variables más críticas son el **precio por hectárea**, las **hectáreas demandadas**, el **OPEX** y los **meses facturados durante el primer año**.

$$\text{Ingresos} = \text{Precio por hectárea} \times \text{Hectáreas demandadas}$$

Por esta razón, una disminución en la tarifa impacta de forma inmediata en la generación de ingresos, reduciendo el VAN, la TIR y retrasando la recuperación de la inversión.

Las hectáreas demandadas también representan una variable crítica, ya que modifican la superficie levantada. En este sentido, una menor proyección de hectáreas reduce directamente los ingresos esperados del servicio, especialmente en los años de menor actividad proyectada.

El OPEX constituye otro factor relevante, debido a que representa el principal componente de egresos recurrentes del proyecto. Además, al estar vinculado con el cálculo del capital de trabajo, cualquier variación en los costos operacionales modifica también el monto inicial requerido y el financiamiento asociado.

Finalmente, los meses facturados durante el primer año influyen directamente en la generación temprana de caja. Esta variable es especialmente importante debido al desfase inicial de pago considerado en el flujo, ya que una menor cantidad de meses facturados debilita el primer año de operación y retrasa la recuperación de la inversión.

Conclusiones y recomendaciones

A partir del desarrollo del presente estudio, se concluye que se cumplió el objetivo general, ya que fue posible evaluar la prefactibilidad técnica, económica, operacional y normativa para la creación de una empresa de servicios topográficos con drones autónomos en la industria minera chilena. Los resultados permiten sostener que la solución propuesta, basada en una estación DJI Dock 2 y drones DJI Matrice 3D, constituye una alternativa factible para modernizar los levantamientos topográficos en faenas mineras.

Respecto de los requerimientos técnicos, operativos y normativos, se identificó que el proyecto requiere precisión RTK, autonomía operacional, infraestructura de resguardo, conectividad y cumplimiento regulatorio ante la DGAC, además de considerar exigencias complementarias de seguridad minera, telecomunicaciones e instalaciones eléctricas. Estos antecedentes permiten afirmar que la implementación es técnicamente posible, siempre que se ejecute bajo una planificación adecuada y conforme al marco normativo vigente.

En cuanto al mercado potencial, el análisis permitió identificar una demanda asociada al monitoreo topográfico recurrente en faenas mineras a rajo abierto. La Región de Antofagasta destaca como una zona prioritaria por su concentración de operaciones mineras, mientras que Compañía Minera Lomas Bayas se presenta como un caso representativo para validar el servicio, debido a la presencia de pilas de lixiviación, botaderos, caminos mineros y sectores operativos que requieren actualización topográfica frecuente.

Desde el punto de vista económico-financiero, ambos escenarios evaluados resultaron viables dentro del horizonte de cinco años. Si bien el escenario base presenta indicadores levemente superiores, la diferencia no resulta significativa al considerar los beneficios operacionales del escenario autónomo, tales como menor exposición del personal en terreno, reducción de traslados internos, mayor continuidad operacional, estandarización de la captura de datos y mejor trazabilidad de la información.

El análisis de sensibilidad mostró que la viabilidad del escenario autónomo depende principalmente de mantener una tarifa adecuada, controlar el OPEX y asegurar continuidad en la demanda del servicio. Por ello, se recomienda implementar el proyecto de forma gradual, comenzando con una validación piloto en faena que permita verificar tiempos de vuelo, autonomía, conectividad, calidad de datos y restricciones operacionales.

Finalmente, la metodología utilizada puede extrapolarse a otros sectores productivos que requieran inspecciones recurrentes, monitoreo de infraestructura e información espacial actualizada. Entre ellos se encuentran la construcción, la infraestructura vial, el sector energético, portuario, agrícola, forestal, medioambiental y de gestión de riesgos. En particular, el sector aeronáutico y aeroportuario presenta un alto potencial de aplicación en actividades como inspección de pistas, calles de rodaje, plataformas, cercos perimetrales, zonas de seguridad operacional, ayudas visuales, drenajes e infraestructura crítica. En consecuencia, considerando la viabilidad técnica, los resultados financieros obtenidos y los beneficios operacionales esperados, se recomienda avanzar con la inversión en este proyecto, bajo una estrategia de implementación gradual, control de costos y validación previa en terreno.

Anexos

Anexo A: Superficie de ha estimada por tipo de infraestructura minera y faena.

Tabla de Superficie estimada por tipo de infraestructura minera y faena.

Faena	Tajos	Tranque Relaves	Embalse	Espejado	Filtrado	Botadero	Pilas	Deposito	Acopio	Total [Ha]
Quebrada Blanca	250.6	84.11	0	0	0	430.3	143.891	0	46.8005	955.7
Collahuasi	900.3	0	1789.55	0	0	1794.3	0	0	0	4.484.2
El Abra	401.5	0	0	0	0	273.2	0	0	0	674.8
Chuquicamata	1043.7	7045.97	0	0	0	1549.9	0	95.5404	0	9.735.2
Spence	405.5	703.41	0	0	0	1176.0	0	340.843	0	2.625.7
Proyecto Sierra Gorda	316.	0	0	1.717	0	0.0	0	0	0	2.033.4
Proyecto Esperanza	484.5	0	0	1.325	0	0.0	0	0	0	1.809.8
Mantos Blancos	222.	0	0	0	93.58	726.1	0	0	0	1.041.7
Zaldivar	771.8	0	161.57	0	0	1852.6	0	0	0	2.785.9
Escondida	992.8	0	6132.54	0	0	2075.9	0	1417.3403	0	10.618.6
Salvador	147.	0	1811.91	0	3.95	510.0	0	0	0	2.472.9
Mantoverde	273.3	0	0	0	0	626.5	0	0	0	899.8
La Coipa	104.8	0	0	0	64.02	83.2	0	0	0	252.0
Candelaria	395.8	0	0	311	0	0.0	0	286.3352	0	993.3
Caserones	70.6	84.96	264.74	0	0	0.0	0	318.0243	0	738.3
Faenas El Romeral	73.7	0	92.6	0	0	0.0	0	0	0	166.3
Teck-Cda	135.8	0	467.83	0	0	0.0	0	0	0	603.6
Faena Los Pelambres	700.7	1377.75	0	0	0	0.0	0	0	0	2.078.5
Planta Cerro Negro	42.5	0	0	0	0.36	0.0	0	0	0	42.9
El Soldado	136.5	289.01	0	0	0	249.4	0	0	0	675.0
Andina	183.1	1268.22	0	0	0	0.0	0	90.6658	0	1.542.0
Cerro Blanco	176.8	43.63	0	0	0	44.5	0	0	0	265.0
Los Bronces	389.6	1170.27	0	0	0	0.0	0	0	0	1.559.9

Faena	Tajos	Tranque Relaves	Embalse	Espe sado	Filtra do	Botade ro	Pilas	Deposito	Acopio	Total [Ha]
Cerro Colorado	417.	0	0	0	0	546.3	181.069	0	135.4262	1.279.8
Ministro Hales	336.3	0	0	0	0	659.3	0	0	0	995.6
Radomori Tomic	731.6	0	0	0	0	917.7	0	997.6738	0	2.647.0
Gabriela Mistral	331.2	0	0	0	0	408.8	769.409	0	0	1.509.4
Antucoya	121.1	0	0	0	0	1086.7	158.03	0	0	1.365.8
Lomas Bayas	259,3	0	0	0	0	487,7	633,087	0	0	1.380,1
Michilla	82.4	0	0	0	0	680.8	0	0	0	763.2
El Peñon	11.	0	0	0	29.45	25.0	0	0	0	65.5
Total										58.960

Tabla A.1. Superficie estimada por tipo de infraestructura minera y faena.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B: Estructura de costos del escenario autónomo

Tabla de gastos operacionales (OPEX) del escenario autónomo

Ítem	Detalle Técnico	Cantidad	Frecuencia	Inversión Total (CLP)
Recursos Humanos (RR.HH)				
Ing. Geomensor (Jefe)	Líder Técnico. Procesamiento de datos y validación de calidad	1	Mensual	\$4.000.000
Técnicos Electromecánicos	Turno 7x7 Rotativo. Mantenimiento de Dock y soporte en terreno	2	Mensual	\$3.000.000
Operador de Vuelo	Supervisor de Misión. Piloto certificado para monitoreo remoto y contingencia	1	Mensual	\$2.500.000
Prevencionista de Riesgos	Asesor Sernageomin B. Gestión normativa y visitas a faena	1	Mensual	\$1.000.000
Administrador Contrato	Gerencia de Proyecto. Relación comercial y estados de pago	1	Mensual	\$500.000
Soporte Informático (IT)	Mantenimiento de redes, Ciberseguridad y Servidores	1	Mensual	\$450.000
Seguro laboral obligatorio	Provisión por Seguro de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales (Ley 16.744)	1	Mensual	\$297.700
Provisión beneficios laborales	Vacaciones, años de servicio, gratificación legal y bonos estacionales	1	Mensual	\$2.687.626
Total RR.HH				\$14.435.326
Software y Conectividad				
Licencia Procesamiento	Suscripción Strayos AI	1	Mensual	\$800.000
Conectividad internet	Plan Movistar (600 MB)	1	Mensual	\$16.990
Conectividad Satelital	Plan Starlink (1TB Data)	1	Mensual	\$243.000
Total Software y Conectividad				\$1.059.990
Logística y Operación				
Mantenimiento (Provisión)	Fondo de reserva para hélices, limpieza de sensores y desgaste mecánico.	1	Mensual	\$879.754
Arriendo Camioneta 4x4	Camioneta Minera Diesel 4x4 con equipamiento de seguridad y seguro.	1	Mensual	\$2.033.000

Combustible	Petróleo Diesel para camioneta 4x4 (Traslados internos y ciudad-faena).	8	Mensual	\$299.400
Total Logística y Operación				\$3.212.154
Infraestructura y Servicios básicos				
Arriendo Oficina Base	Edificio Las Empresas (130m²). Inc. 3 Estac. + Bodega + GGCC.	1	Mensual	\$2.280.000
Energía Eléctrica Faena	Consumo Global: Dock 2 + Oficina + Carga Drones.	1	Mensual	\$155.000
Energía Eléctrica oficina	Tarifa CGE BT1. Consumo Climatización/equipos tecnologicos (800 kWh).	1	Mensual	\$160.000
Suministro Agua	Tarifa Aguas Antof. (Oficina)	1	Mensual	\$35.000
Insumos Faena	Hidratación personal (Agua Purificada) y Cafetería.	1	Mensual	\$85.000
Insumos de Oficina	Papelería para informes, tintas de reposición, archivadores de bitácoras y útiles de escritorio.	1	Mensual	\$115.900
Alojamiento en Faena	Tarifa Campamento (1 Habitación Doble)	1	Mensual	\$611.000
Alojamiento en Ciudad	Departamento 3 dormitorios	1	Mensual	\$670.000
Suite Microsoft 365 Empresa Premium	Licencia Microsoft 365 Business (Word, Excel, Teams, Outlook).	1	Mensual	\$20.254
Alimentación Faena	Asignación de colación	1	Mensual	\$788.000
Total Infraestructura y Servicios básicos				\$4.920.154
Total				\$23.627.624

Tabla B.1. Detalle de Gastos Operacionales (OPEX) del escenario autónomo.

Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones.

Tabla de Inversión Inicial (CAPEX) del escenario autónomo

Ítem	Detalle Técnico	Cantida d	Valor Unitario	Inversión Total (CLP)
Infraestructura Base				
Contenedores	Bodega y Oficina + Traslado	2	\$5.113.900	\$10.227.800
Obras Cíviles	Plataforma Dock 2, Fundación y Jaula	1	\$5.910.360	\$5.910.360
Instalación de contenedor	Costo de instalación base + electricidad	1	\$5.750.000	\$5.750.000
Total Infraestructura Base				\$21.888.160
Equipamiento de vuelo				
Estación de Carga	DJI Dock 2	1	\$6.840.944	\$6.840.944
Control	DJI RC Pro Enterprise	1	\$1.264.659	\$1.264.659
Kit de carga	DJI Matrice 3D Series Charging Kit	1	\$281.920	\$281.920
Aeronaves	Drones DJI Matrice 3D	2	\$4.343.482	\$8.686.964
Energía	Baterías de Vuelo Inteligente	12	\$344.529	\$4.134.348
Conectividad	Hardware Satelital	1	\$1.476.000	\$1.476.000
Total Equipamiento de vuelo				\$22.684.835
Equipamiento de Apoyo				
Equipos computacionales	Notebooks de alto rendimiento	2	\$999.990	\$1.999.980
Equipos computacionales	Notebooks estándar	3	\$379.990	\$1.139.970
Mobiliario	Estante + Escritorio+Sillas	2	\$588.000	\$1.176.000
Elemento de proteccion personal	Cumplimiento estándar minero (Casco, Zapatos, Lentes, Chaleco).	4	\$80.000	\$320.000
Exámenes de salud	Certificación aptitud para Gran Altura Geográfica	4	\$160.000	\$640.000
Material de oficina	Impresora , Plastificadora (Credenciales/Checklists), Guillotina y Pizarras de planificación.	1	\$700.600	\$700.600
Bienestar	Cafetera y dispensador de agua purificada	2	\$189.000	\$378.000

Herramientas de mantenimiento	Kit técnico para mantenimiento preventivo (Herramientas de precisión, Multímetro y Limpieza de sensores)	1	\$126.000	\$126.000
Total Equipamiento de Apoyo				\$6.480.550
Entrenamiento				
Capacitacion de drones	Certificación Técnica: Operación y Despliegue DJI Dock 2.	2	\$1.500.000	\$3.000.000
Capacitacion fotogrametria con drones	Curso Profesional de Fotogrametría con Drones	4	\$240.000	\$960.000
Total Entrenamiento				\$3.960.000
Certificaciones y licencia				
Certificado DGAC	Certificado de AOC + Registro del RPA	1	\$16.400	\$16.400
Licencia RPAS	Credencial de Operador de Drones (Examen Teórico/Práctico DGAC).	2	\$23.613	\$47.226
Constitución Legal	Certificados de Vigencia, Estatutos y Legalización de Poderes (Notaría/CBR).	1	\$27.000	\$27.000
Seguro R.A.C.	Póliza de Resp. Civil Aérea (Cobertura 2.500 UF).	1	\$384.560	\$384.560
Licencia Agisoft	Agisoft Metashape Professional Edition. Software de fotogrametría avanzado (Licencia Perpetua/Vitalicia).	1	\$3.500.000	\$3.500.000
Total Certificaciones y licencia				\$3.975.186
Total				\$58.988.731

Tabla B.2. Detalle de Inversión Inicial (CAPEX) del escenario autonomo.

Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones.

Anexo C: Estructura de costos del escenario base

Tabla de gastos operacionales (OPEX) del escenario base

Ítem	Detalle Técnico	Cantidad	Frecuencia	Inversión Total (CLP)
Recursos Humanos (RR.HH)				
Ing. Geomensor (Jefe)	Líder Técnico. Procesamiento de datos y validación de calidad	1	Mensual	\$4.000.000
Técnico de apoyo / conductor	Traslado, apoyo logístico, instalación RTK y cambio de baterías	1	Mensual	\$2.000.000
Operador de Vuelo	Supervisor de Misión. Piloto certificado para monitoreo remoto y contingencia	1	Mensual	\$2.500.000

Prevencionista de Riesgos	Asesor Sernageomin B. Gestión normativa y visitas a faena	1	Mensual	\$1.000.000
Administrador Contrato	Gerencia de Proyecto. Relación comercial y estados de pago	1	Mensual	\$500.000
Soporte Informático (IT)	Mantenimiento de redes, Ciberseguridad y Servidores	1	Mensual	\$450.000
Seguro laboral obligatorio	Provisión por Seguro de Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales (Ley 16.744)	1	Mensual	\$266.500
Provisión beneficios laborales	Vacaciones, años de servicio, gratificación legal y bonos estacionales	1	Mensual	\$2.837.626
Total RR.HH				\$13.554.126
Software y Conectividad				
Licencia Procesamiento	Suscripción Strayos AI	1	Mensual	\$800.000
Conectividad internet	Plan Movistar (600 MB)	1	Mensual	\$16.990
Conectividad Satelital	Plan Starlink (1TB Data)	1	Mensual	\$243.000
Total Software y Conectividad				\$1.059.990
Logística y Operación				
Mantenimiento (Provisión)	Fondo de reserva para hélices, limpieza de sensores y desgaste mecánico.	1	Mensual	\$660.780
Arriendo Camioneta 4x4	Camioneta Minera Diesel 4x4 con equipamiento de seguridad y seguro.	1	Mensual	\$2.033.000
Combustible	Petróleo Diesel para camioneta 4x4, combustible utilizado para traslado en faena + el viaje de ida y vuelta ciudad-faena	1	Mensual	\$496.665
Total Logística y Operación				\$3.190.445
Infraestructura y Servicios básicos				
Arriendo Oficina Base	Edificio Las Empresas (130m²). Inc. 3 Estac. + Bodega + GGCC.	1	Mensual	\$2.280.000
Energía Eléctrica Faena	Carga de baterías y equipos de apoyo en terreno	1	Mensual	\$70.000
Energía Eléctrica oficina	Tarifa CGE BT1. Consumo Climatización/equipos tecnologicos (800 kWh).	1	Mensual	\$160.000
Suministro Agua	Tarifa Aguas Antof. (Oficina)	1	Mensual	\$35.000
Insumos Faena	Hidratación personal (Agua Purificada) y Cafetería.	1	Mensual	\$85.000

Insumos de Oficina	Papelería para informes, tintas de reposición, archivadores de bitácoras y útiles de escritorio.	1	Mensual	\$115.900
Alojamiento en Faena	Tarifa Campamento (2 Habitación Doble)	2	Mensual	\$1.222.000
Alojamiento en Ciudad	Departamento 3 dormitorios	1	Mensual	\$670.000
Suite Microsoft 365 Empresa Premium	Licencia Microsoft 365 Business (Word, Excel, Teams, Outlook).	1	Mensual	\$20.254
Alimentación Faena	Asignación de colación	1	Mensual	\$1.044.100
Total Infraestructura y Servicios básicos				\$5.702.254
Total				\$23.506.815

Tabla C.1.. Detalle de gastos operacionales (OPEX) del escenario base

Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones

Tabla de inversión inicial (CAPEX) del escenario base

Ítem	Detalle Técnico	Cantidad	Valor Unitario	Inversión Total (CLP)
Infraestructura Base				
Contenedores	Bodega y Oficina + Traslado	2	\$5.113.900	\$10.227.800
Instalación de contenedor	Costo de instalación base + electricidad	1	\$5.750.000	\$5.750.000
Total Infraestructura Base				\$15.977.800
Equipamiento de vuelo				
Dron principal	DJI Matrice 4E con garantía extendida. Incluye case de transporte, control remoto con pantalla y 1 batería	2	\$4.003.277	\$8.006.554
Baterías adicionales	DJI Matrice 4 Series Battery	8	\$204.958	\$1.639.664
Sistema de posicionamiento	D-RTK 3 Multifunctional Station	3	\$1.725.126	\$5.175.378
Kit de carga	DJI Matrice 4E Series Charging Kit	1	\$281.920	\$281.920
Accesorio de posicionamiento	D-RTK 3 Kit Trípode	1	\$546.134	\$546.134

Conectividad	Hardware satelital	1	\$1.476.000	\$1.476.000
Total Equipamiento de vuelo				\$17.125.650
Equipamiento de Apoyo				
Taquímetro / estación total manual	Equipo topográfico terrestre de apoyo	1	\$4.462.500	\$4.462.500
Estación total	Equipo topográfico terrestre de apoyo para levantamientos y control en terreno	1	\$3.320.100	\$3.320.100
Estación de energía portátil DJI Power 1000 V2	Sistema portátil para carga de baterías en terreno y apoyo energético móvil en vehículo	1	\$1.149.990	\$1.149.990
Notebook alto rendimiento	Procesamiento fotogramétrico y respaldo técnico	1	\$999.990	\$999.990
Notebook estándar	Gestión administrativa y apoyo	1	\$379.990	\$379.990
Mobiliario	Escritorio, silla y estantería	1	\$588.000	\$588.000
Elementos de protección personal	Casco, zapatos, lentes y chaleco	3	\$80.000	\$240.000
Exámenes de salud	Aptitud para gran altura geográfica	3	\$160.000	\$480.000
Material de oficina	Impresora, plastificadora y apoyo documental	1	\$500.000	\$500.000
Bienestar	Cafetera / dispensador de agua	1	\$189.000	\$189.000
Herramientas de mantenimiento	Kit técnico para mantenimiento preventivo	1	\$126.000	\$126.000
Total Equipamiento de Apoyo				\$12.435.570
Entrenamiento				
Capacitación fotogrametría con drones	Curso Profesional de Fotogrametría con Drones	3	\$240.000	\$720.000
Total Entrenamiento				\$720.000
Certificaciones y licencia				
Certificado DGAC	Certificado de AOC + Registro del RPA	1	\$16.400	\$16.400
Licencia RPAS	Credencial de Operador de Drones (Examen Teórico/Práctico DGAC).	2	\$23.613	\$47.226
Constitución Legal	Certificados de Vigencia, Estatutos y Legalización de Poderes (Notaría/CBR).	1	\$27.000	\$27.000

Seguro R.A.C.	Póliza de Resp. Civil Aérea (Cobertura 2.500 UF).	1	\$384.560	\$384.560
Licencia Agisoft	Agisoft Metashape Professional Edition. Software de fotogrametría avanzado (Licencia Perpetua/Vitalicia).	1	\$3.500.000	\$3.500.000
Total Certificaciones y licencia				\$3.975.186
Total				\$50.234.206

Tabla C.2.. Detalle de inversión inicial (CAPEX) del escenario base

Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones.

Anexo D: Flujos de cajas

Tabla del de flujo de caja proyectado del escenario autónomo

Año	0	1	2	3	4	5
Precio por Ha		\$ 23.464	\$ 24.168	\$ 24.893	\$ 25.640	\$ 26.409
Ha mensual		1380,1	1406,3	1394,6	1299,8	1245,7
Meses facturados		9	12	12	12	12
Ha (demanda)		12420,9	16875,9	16735,1	15597,3	14948,1
Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos por venta (+)		\$ 291.443. 998	\$ 407.854. 502	\$ 416.585.951	\$ 399.911. 794	\$ 394.764.4 90
Costo variable total (-)		\$ - 25.553.5 94	\$ - 26.320.2 02	\$ -27.109.808	\$ - 27.923.1 02	\$ - 28.760.79 5
Costo fijo total (-)		\$ - 255.654. 840	\$ - 263.324. 485	\$ -271.224.220	\$ - 279.360. 946	\$ - 287.741.7 75
Depreciación lineal (-)		\$ - 8.982.48 8	\$ - 8.982.48 8	\$ -8.982.488	\$ - 5.881.01 1	\$ - 5.881.011
Intereses (-)		\$ - 4.911.97 5	\$ - 4.074.69 7	\$ -3.170.437	\$ - 2.193.83 6	\$ - 1.139.107
Perdida/ganancia de capital (-)(+)						\$ 413.687
Perdida por capital de trabajo (-)						\$ - 18.902.09 9,2
Utilidad antes de impuestos (UAI)		\$ - 3.658.89 9	\$ 105.152. 630	\$ 106.098.998	\$ 84.552.8 98	\$ 52.753.39 0
Impuesto (-) [12.5%]		\$0	\$- 13.144.0 79	\$-13.262.375	\$- 10.569.1 12	\$- 6.594.174
Utilidad después de impuestos (UDI)		\$- 3.658.89 9	\$92.008. 551	\$92.836.623	\$73.983. 786	\$46.159.2 16
Depreciación lineal (+)		\$ 8.982.48 8	\$ 8.982.48 8	\$ 8.982.488	\$ 5.881.01 1	\$ 5.881.011
Intereses (+)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -

Perdida por venta activo fijo (+)						\$ -
Perdida por capital de trabajo (+)						\$ 18.902.099,2
Flujo de caja operacional		\$ 5.323.588	\$ 100.991.039	\$ 101.819.111	\$ 79.864.797	\$ 70.942.326
Inversión (-)	\$ - 58.988.731					
Capital de trabajo (-)	\$ - 94.510.496					
Valor mercado activo fijo (+) [valor residual]						\$ 11.797.746
Valor mercado capital de trabajo (+)						\$ 75.608.397
Préstamo (+)	\$ 61.399.691					
Amortización préstamo (-)		\$ - 10.465.974	\$ - 11.303.251	\$ - 12.207.512	\$ - 13.184.113	\$ - 14.238.842
Flujo de caja de capitales	\$ - 92.099.536	\$ - 10.465.974	\$ - 11.303.251	\$ - 12.207.512	\$ - 13.184.113	\$ 73.167.301
Flujo Caja Privado	\$ - 92.099.536	\$ - 5.142.385	\$ 89.687.787	\$ 89.611.599	\$ 66.680.684	\$ 144.109.628
Flujo acumulado	\$ - 92.099.536	\$ - 97.241.921	\$ - 7.554.134	\$ 82.057.465	\$ 148.738.150	\$ 292.847.777

Tabla D.1. Flujo de caja proyectado del escenario autónomo a cinco años.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla del de flujo de caja proyectado del escenario base

Año	0	1	2	3	4	5
Precio		\$ 23.277	\$ 23.975	\$ 24.695	\$ 25.435	\$ 26.198
Ha (demanda)		12420,9	16875,9	16735,1	15597,3	14948,1
Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos por venta (+)		\$ 289.121.289	\$ 404.604.042	\$ 413.265.904	\$ 396.724.635	\$ 391.618.353
Costo variable total (-)		\$ - 27.196.895	\$ - 28.012.802	\$ - 28.853.186	\$ - 29.718.781	\$ - 30.610.345
Costo fijo total (-)		\$ - 252.412.440	\$ - 259.984.813	\$ - 267.784.358	\$ - 275.817.888	\$ - 284.092.425
Depreciación lineal (-)		\$ - 6.992.607	\$ - 6.992.607	\$ - 6.992.607	\$ - 4.902.960	\$ - 4.902.960
Intereses (-)		\$ - 4.616.367	\$ - 3.829.477	\$ - 2.979.637	\$ - 2.061.809	\$ - 1.070.555
Perdida/ganancia de capital (-)(+)						\$ - 3.988.439
Perdida por capital de trabajo (-)						\$ - 18.805.452,0
Utilidad antes de impuestos (UAI)		\$ - 2.097.019	\$ 105.784.343	\$ 106.656.117	\$ 84.223.196	\$ 48.148.178
Impuesto (-) [12.5%]		\$ -	\$ 13.223.043	\$ 13.332.015	\$ 10.527.900	\$ - 6.018.522
Utilidad después de impuestos (UDI)		\$ - 2.097.019	\$ 92.561.300	\$ 93.324.102	\$ 73.695.297	\$ 42.129.655
Depreciación lineal (+)		\$ 6.992.607	\$ 6.992.607	\$ 6.992.607	\$ 4.902.960	\$ 4.902.960
Intereses (+)		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Perdida por venta activo fijo (+)						\$ 3.988.438,8
Perdida por capital de trabajo (+)						\$ 18.805.452,0

Flujo de caja operacional		\$ 4.895.587	\$ 99.553.90 7	\$ 100.316.7 09	\$ 78.598.25 7	\$ 69.826.506
Inversión (-)	\$ - 50.234.20 6					
Capital de trabajo (-)	\$ - 94.027.26 0					
Valor mercado activo fijo (+) [valor residual]						\$ 10.046.841
Valor mercado capital de trabajo (+)						\$ 75.221.808
Préstamo (+)	\$ 57.704.58 6					
Amortización préstamo (-)		\$ - 9.836.119	\$ - 10.623.00 9	\$ - 11.472.84 9	\$ - 12.390.67 7	\$ - 13.381.932
Flujo de caja de capitales	\$ - 86.556.88 0	\$ - 9.836.119	\$ - 10.623.00 9	\$ - 11.472.84 9	\$ - 12.390.67 7	\$ 71.886.718
Flujo Caja Privado	\$ - 86.556.88 0	\$ - 4.940.532	\$ 88.930.89 8	\$ 88.843.86 0	\$ 66.207.57 9	\$ 141.713.22 4
Flujo acumulado	\$ - 86.556.88 0	\$ - 91.497.41 1	\$ - 2.566.513	\$ 86.277.34 6	\$ 152.484.9 26	\$ 294.198.14 9

Tabla D.2. Flujo de caja proyectado del escenario base a cinco años.

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- **Deloitte. (2024).** Technological advancements elevating health and safety in mining operations. Deloitte Development LLC. <https://www2.deloitte.com>
- **Sikakwe, G. U. (2023).** Mineral exploration employing drones, contemporary geological satellite remote sensing and geographical information system (GIS) procedures: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 31, Article 100988. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100988>
- **Shahmoradi, J., Talebi, E., Roghanchi, P., & Hassanalian, M. (2020).** A comprehensive review of applications of drone technology in the mining industry. *Drones*, 4(3), 34. <https://doi.org/10.3390/drones4030034>
- **Consejo Minero. (s. f.).** Cifras actualizadas de la minería. Recuperado el 22 de abril de 2025, de <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-lamineria/>
- **Minh, D. T., & Dung, N. B. (2023).** Applications of UAVs in the mining industry: A scoping review. *Journal of Sustainable Mining*, 22(2), 128–146. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1384>
- **Portal Minero. (2025).** La minería del futuro: Digitalización y el uso inteligente de datos. <https://www.portalminero.com/wp/la-mineria-del-futuro-digitalizacion-y-el-uso-inteligente-de-datos/>
- **Matsimbe, J., Mdolo, W., Kapachika, C., Musonda, I., & Dinka, M. (2022).** Comparative utilization of drone technology vs. traditional methods in open pit stockpile volumetric computation: A case of Njuli Quarry, Malawi. *Frontiers in Built Environment*, 8, Article 1037487. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1037487>
- **Beretta, F., Shibata, H., Cordova, R., Peroni, R. de L., Azambuja, J., & Leite Costa, J. F. C. (2018).** Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining. *REM - International Engineering Journal*, 71(3), 463–470. <https://doi.org/10.1590/0370-44672017710074>
- **Ministerio de Minería. (2021).** Evaluación Ambiental Estratégica de la Política Nacional Minera 2050: Informe ambiental (versión 27.08.2021). Gobierno de Chile.

-
- **Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. M. (2014).** Preparación y evaluación de proyectos (6.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
 - **Superintendencia de Electricidad y Combustibles. (s. f.).** TE1: Declaración de instalación eléctrica interior. <https://www.sec.cl>
 - **Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2006).** Decreto Supremo N° 127: Fija norma técnica de equipos de alcance reducido. <https://www.subtel.gob.cl>
 - **Banco Central de Chile. (2024).** Participación de los sectores económicos en el PIB a precios básicos, serie encadenada de volumen (índice 2018 = 100), trimestral. https://si3.bcentral.cl/Siete/Es/Siete/Cuadro/CAP_CCNN/MN_CCNN76/CCNN_EP13_05_ratio/637146750091562955
 - **Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023).** Impactos socioeconómicos de la minería en Chile (Informe N° 4/2023). Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones.
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf
 - **Muinelo Gallo, L. (2022).** Asignación, distribución y uso de los ingresos fiscales derivados de la explotación minera en Chile: Un análisis de sus efectos económicos y sociales (Documentos de Proyectos LC/TS.2022/36). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org>
 - **Shrestha, A. B., Oli, P. P., & Shrestha, S. (2022, September).** Application of UAV drone technology in mining industries of Nepal. FIG Congress 2022 – Volunteering for the Future: Geospatial Excellence for a Better Living, Warsaw, Poland. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2022/papers/ts03d/TS03D_shrestha_oli_et_al_11289.pdf
 - **Honarmand, M., & Shahriari, H. (2021).** Geological mapping using drone-based photogrammetry: An application for exploration of vein-type Cu mineralization. *Minerals*, 11(6), 585. <https://doi.org/10.3390/min11060585>
 - **DJI Enterprise. (2024b).** DJI Dock 2: User manual and technical specifications. <https://www.dji.com/cl/dock-2>

-
- **LitoralPress. (2025, 22 de enero).** Elecon Maquinarias aplicó exitosamente plataforma de drones DJI Dock 2 en Mantoverde. <https://www.litoralpress.cl/SimbiuPDF/2025/01/22/5655355.pdf>
 - **DJI Enterprise. (2025c).** DJI Dock mejora la gestión de tranques en la minería chilena. DJI Enterprise Insights. <https://enterprise-insights.dji.com/es/experiencias/dock-gestion-mineria-chile>
 - **Fernández López, J. (2024).** Diseño de un sistema de vigilancia con drones autónomos en naves industriales [Trabajo de fin de grado, Universitat Autònoma de Barcelona]. Dipòsit Digital de Documents de la UAB. <https://ddd.uab.cat/record/305244>
 - **Alzubade, M. K. H., & Alkan, O. (2022).** The role of drone photogrammetry, remote sensing and GIS methods in the detection of ore areas and their surroundings. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics, 21, 380–387. <https://doi.org/10.55549/epstem.1226662>
 - Ali, A. E. (1995). Accuracy of stadia tacheometry with optical theodolites and levels. Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 7(2), 175–183.
 - **Villner. (2021, 29 de junio).** Taquímetro topográfico: ¿Qué es? <https://villner.cl/taquimetro-topografico-para-que-sirve/>
 - **Tavasci, L., Nex, F., & Gandolfi, S. (2024).** Reliability of Real-Time Kinematic (RTK) positioning for low-cost drones' navigation across Global Navigation Satellite System (GNSS) critical environments. Sensors, 24(18), 6096. <https://doi.org/10.3390/s24186096>
 - **International Civil Aviation Organization. (2011).** Unmanned aircraft systems (UAS) (Circular 328-AN/190). https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf
 - **Tahir, A., Böling, J., Haghbayan, M. H., Toivonen, H. T., & Plosila, J. (2019).** Swarms of unmanned aerial vehicles—A survey. Journal of Industrial Information Integration, 16, Article 100106. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100106>
 - **Darling, P. (Ed.). (2011).** SME mining engineering handbook (3.^a ed.). Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
-

-
- **Ministerio de Minería. (2007, 11 de abril).** Decreto Supremo N° 248: Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile>
 - **Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023).** Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
 - **Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981).** Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer.
 - **Saaty, T. L. (1980).** The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill.
 - **Roy, B. (1991).** The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31, 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>
 - **Brans, J. P., & Vincke, P. (1985).** A preference ranking organisation method: The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
 - **Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011).** Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397–427. <https://doi.org/10.3846/20294913.2011.593291>
 - **Churchman, C. W., & Ackoff, R. L. (1954).** An approximate measure of value. *Operations Research*, 2(2), 172–187. <https://doi.org/10.1287/opre.2.2.172>
 - **Comisión Chilena del Cobre. (2025).** Informe de tendencias del mercado del cobre: Proyecciones 2025–2026. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. <https://www.cochilco.cl>
 - **Dirección General de Aeronáutica Civil. (2021).** Normas para obtención de certificado de operador aéreo (AOC) (DAN 119, Ed. 4). DGAC.
 - **Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023a).** Trabajos aéreos (DAN 137, Ed. 1, Enm. 8). DGAC.
 - **Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023c).** Reglas del aire (DAN 91, Ed. 4, Enm. 5). DGAC.
-

-
- **Ministerio de Minería. (2004).** Decreto Supremo N° 132: Aprueba Reglamento de Seguridad Minera. Diario Oficial de la República de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile>
 - **Calderón y Castillo Ingenieros Asociados Ltda. (2025).** Dronelidar. <https://dronelidar.cl>
 - **GFDas SpA. (2025).** GFDas – Drones & Mining. <https://gfdas.com>
 - **DERK Ingeniería y Geología Ltda. (2025).** Servicios de geología y geotecnia. <https://derk.cl>
 - **Datageo SpA. (2025).** Soluciones tecnológicas para minería. <https://datageo.cl>
 - **Airwork. (2025).** Servicios fotogramétricos. <https://airwork.cl>
 - **Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2019).** Close-range photogrammetry and 3D imaging (3.^a ed.). De Gruyter.
 - **International Organization for Standardization. (2018).** Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use (ISO Standard No. 45001:2018).
 - **Instituto Nacional de Normalización. (2009).** NCh-IEC 60529.Of2009: Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP).
 - **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2014).** ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data.
 - **DJI Enterprise. (2023).** Matrice 350 RTK. <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk>
 - **DJI Enterprise. (2021).** Zenmuse P1. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-p1>
 - **DJI Enterprise. (2025a).** DJI Dock 3: Heavy-duty deployment for harsh environments. <https://enterprise.dji.com/dock-3>
 - **Starlink Chile. (2025).** Starlink Business: Hardware de alto rendimiento. <https://www.starlink.com/cl/business>
 - **Portal Inmobiliario. (2025).** Arriendo de oficina en Edificio Las Empresas, Antofagasta [Aviso inmobiliario]. <https://www.portalinmobiliario.com>
 - **Flanders. (2025).** Cotización de contenedores usados para faena Lomas Bayas [Cotización].

-
- **TWH. (2025).** Ingeniería de detalle: Plataforma Dock 2, fundación y jaula [Plano técnico].
 - **Transportes Locales. (2025).** Cotización de camión pluma para traslado y montaje [Cotización].
 - **DroneDeploy. (s. f.).** Drone mapping software. <https://www.dronedeploy.com>
 - **Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024).** Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas (DAN 151, Ed. 3). DGAC. <https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/05/DAN-151-ED3-27MAY2024.pdf>
 - **Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (1998).** Decreto Supremo N° 327: Fija reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos. <https://www.bcn.cl/leychile>
 - **DJI Enterprise. (2025b).** Matrice 4 Series. <https://enterprise.dji.com/matrice-4-series>
 - **U.S. Environmental Protection Agency. (2024, 22 de marzo).** Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle. <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle>
 - **Damodaran, A. (2026a).** Betas by sector (US). Stern School of Business, New York University. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html
 - **Banco Central de Chile. (2026).** Tasas de interés: Base de datos estadísticos. https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_TASA_INTERES/MN_TASA_INTERES_09/TMS_15/T311
 - **Banco Central de Chile. (2026).** Tasas de interés. Recuperado el 28 de abril de 2026, de <https://www.bcentral.cl/contenido/-/detalle/tasas-de-interes>
 - **Damodaran, A. (2026b).** Country default spreads and risk premiums. Stern School of Business, New York University. https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html
-

-
- **Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. (2025, 22 de agosto).** Empresas con Certificado de Operador Aéreo (AOC) vigente – RPAS. <https://www.dgac.gob.cl/empresas-rpas/>
 - **DJI Enterprise. (2024a, 26 de marzo).** DJI Dock 2 eleva las operaciones autónomas con drones a nuevas cotas. <https://enterprise.dji.com/es/news/detail/dji-dock-2-release>
 - **Park, S., Choi, Y., & Lee, M. J. (2020).** Applications of unmanned aerial vehicles in mining from exploration to reclamation: A review. *Minerals*, 10(8), 663. <https://doi.org/10.3390/min10080663>