



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Vigilancia inteligente y respuesta ágil mediante drones en la seguridad
minera superficial**

Tesis presentada por:

Llerena Caneo, Raul Caleb

ORCID: 0009-0004-7289-846X

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 06 de Mayo del 2026

Dictamen: 017541-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 017541, presentado por:

2016110161 - LLERENA CANEO RAUL CALEB

Titulado:

**VIGILANCIA INTELIGENTE Y RESPUESTA ÁGIL MEDIANTE DRONES EN LA SEGURIDAD MINERA
SUPERFICIAL**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**29688402 - BARREDA DE LA CRUZ MIGUEL ALBERTO
DICTAMINADOR**



**40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR**



**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



VIGILANCIA INTELIGENTE Y RESPUESTA ÁGIL MEDIANTE DRONES EN LA SEGURIDAD MINERA SUPERFICIAL

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	2%
	Trabajo del estudiante	
2	www.coursehero.com	2%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.ucsm.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	sigrid.cenepred.gob.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC	1%
	Trabajo del estudiante	
6	es.scribd.com	1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.uncp.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
8	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	www.researchgate.net	<1%
	Fuente de Internet	
10	hdl.handle.net	<1%
	Fuente de Internet	
11	pt.scribd.com	<1%
	Fuente de Internet	

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mi esposa y a mi familia, quienes con su amor, paciencia y apoyo incondicional me acompañaron en cada etapa de este camino académico. Gracias por creer en mí, por brindarme fortaleza en los momentos más difíciles y por ser mi mayor fuente de inspiración.

Este logro también es de ustedes.



Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a Dios, por brindarme la fortaleza, claridad y perseverancia necesarias para avanzar en cada etapa de mi formación profesional. Su guía ha sido fundamental para superar los desafíos que se presentaron durante este proceso académico.

A mi familia, mi mayor soporte, expreso mi más profundo agradecimiento.

A mi esposa, quien ha sido un pilar fundamental durante todo el desarrollo de esta tesis. Gracias por tu paciencia, comprensión y por tu apoyo inagotable en los momentos de mayor exigencia. Tus palabras de ánimo, tu compañía y tu confianza en mí me motivaron a continuar incluso en los días más difíciles. Este logro también te pertenece.

A mis padres, por su esfuerzo incansable, su amor incondicional y por enseñarme, con su ejemplo, el valor del trabajo, la responsabilidad y la constancia. Cada logro alcanzado es también fruto de su sacrificio y dedicación.

A mis hermanas, por su apoyo, aliento y por acompañarme en esta etapa tan importante.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mis docentes y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por la formación académica y profesional brindada. A mi asesor(a) de tesis, por su guía, dedicación y valiosos aportes, los cuales fueron esenciales para fortalecer la calidad y rigurosidad del presente trabajo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, contribuyeron a lo largo de este proyecto. Su apoyo, consejos y disposición hicieron posible que esta tesis se concrete exitosamente. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo proponer un sistema de vigilancia inteligente basado en el uso de drones para mejorar la seguridad en operaciones de minería superficial. La problemática abordada se centra en las limitaciones de los métodos tradicionales de supervisión, los cuales presentan restricciones en cobertura, tiempo de respuesta y exposición del personal a zonas de alto riesgo.

La metodología empleada corresponde a un enfoque aplicado, en el cual se diseñó un sistema estructurado en componentes de adquisición de datos, procesamiento de información y toma de decisiones, complementado con un protocolo de operación que permite estandarizar su uso en el entorno minero. Asimismo, se desarrolló un análisis de viabilidad técnica, económica y operativa, incluyendo la estimación de la inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos (OPEX), con el fin de evaluar la sostenibilidad del sistema.

Para validar la propuesta, se realizó una simulación en un entorno representativo de minería superficial, considerando zonas críticas como taludes, áreas de voladura y rutas de tránsito de maquinaria pesada. Los resultados evidenciaron una mejora en la cobertura de monitoreo, una reducción significativa en el tiempo de supervisión, un incremento en la frecuencia de inspección y una disminución en la exposición del personal a condiciones de riesgo.

Se concluye que la implementación del sistema de vigilancia con drones es técnica y económicamente viable, y contribuye de manera significativa a la optimización de la seguridad minera, constituyendo una alternativa eficiente frente a los métodos tradicionales de supervisión.

Palabras clave: Drones, minería superficial, seguridad minera

Abstract

This research aims to propose an intelligent surveillance system based on the use of drones to improve safety in surface mining operations. The problem addressed focuses on the limitations of traditional supervision methods, which present restrictions in coverage, response time, and personnel exposure to high-risk areas.

The methodology corresponds to an applied approach, in which a system was designed consisting of data acquisition, information processing, and decision-making components, complemented by an operational protocol to standardize its use in the mining environment. Additionally, a technical, economic, and operational feasibility analysis was conducted, including the estimation of capital expenditure (CAPEX) and operational expenditure (OPEX), in order to evaluate the sustainability of the system.

To validate the proposal, a simulation was carried out in a representative surface mining environment, considering critical areas such as slopes, blasting zones, and heavy machinery transit routes. The results showed improvements in monitoring coverage, a significant reduction in supervision time, an increase in inspection frequency, and a decrease in personnel exposure to risk conditions.

It is concluded that the implementation of the drone-based surveillance system is technically and economically viable, contributing significantly to the optimization of mining safety and representing an efficient alternative to traditional supervision methods.

Keywords: Drones, surface mining, mining safety

Índice General

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	3
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos específicos	4
1.2.1. General	4
1.2.2. Específicos	4
1.3. Preguntas de Investigación	4
1.4. Líneas de Investigación a la que corresponde el Problema	5
1.5. Palabras Clave	5
1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis	5
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1. Estado del arte	7
2.2. Antecedentes Investigación	10
2.2.1 Marco legal y normativo para el uso de drones en el Perú	16
2.3 Hipótesis	17
2.4. Variables	17
2.4.1. Variables Dependientes	17
2.4.2. Variables Independientes	18
CAPÍTULO III MARCO METODOLOGICO	19
3.1. Alcances y Limitaciones	19
3.1.1 Viabilidad del proyecto	19
3.1.1.1 Viabilidad técnica	20

3.1.1.2 Viabilidad normativa para el uso de drones en el Perú	20
3.1.1.3 Viabilidad económica	21
3.1.1.4 Viabilidad operativa	23
3.1.1.5 Evaluación general de viabilidad	24
3.2. Tipo y Diseño de la Investigación	24
3.2.1. Diseño del sistema de vigilancia inteligente con drones	25
3.2.2 Protocolo de operación del sistema de vigilancia con drones	28
3.2.3 Influencia de la rosa de viento en la operación del sistema de drones	32
3.2.3.1 Concepto de rosa de viento	32
3.2.3.2 Impacto del viento en la operación de drones	33
3.2.3.3 Aplicación de la rosa de viento en el sistema propuesto	34
3.2.3.4 Integración en el protocolo de operación	34
3.2.3.5 Decisiones operativas según condiciones de viento	34
3.3. Población y Muestra o Universo	36
3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	37
3.5. Plan de análisis estadístico de los datos	38
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
4.1 Análisis e interpretación de resultados	40
4.1.1 Simulación de la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones	40
4.1.2 Características del entorno simulado	40
4.1.3 Configuración del sistema en la simulación	40
4.1.4 Ejecución de la simulación	41
4.1.5 Resultados de la simulación	42
4.2 Análisis del impacto del sistema de vigilancia inteligente con drones en la seguridad minera	44
4.2.1 Impacto en la identificación de riesgos	44
4.2.2 Impacto en la reducción de la exposición del personal	45

4.2.3 Impacto en la mejora de la supervisión	45
4.2.4 Impacto en los tiempos de respuesta	45
4.2.5 Impacto en la toma de decisiones	46
4.2.6 Impacto en la eficiencia operativa	46
4.2.7 Evaluación global del impacto	46
4.3 Análisis de inversión de capital (CAPEX) para la implementación del sistema de vigilancia con drones	47
4.3.1 Enfoque de inversión y criterio de selección	47
4.3.2 Componentes del CAPEX	47
4.3.4 Análisis técnico-económico del CAPEX	49
4.3.5 Depreciación y amortización	50
4.3.6 Relación con la sostenibilidad del sistema	52
4.4 Análisis de costos operativos (OPEX) del sistema de vigilancia con drones	52
4.4.1 Enfoque del OPEX	52
4.4.2 Componentes del OPEX	52
4.4.3 Estimación referencial del OPEX anual	53
4.4.4 Análisis del OPEX	54
4.5 Discusión de resultados	54
4.5.1 Interpretación de la mejora en la cobertura de monitoreo	55
4.5.2 Análisis de la reducción del tiempo de supervisión	55
4.5.3 Evaluación de la detección de condiciones de riesgo	56
4.5.4 Discusión sobre la reducción de la exposición del personal	56
4.5.5 Análisis de la frecuencia de monitoreo	56
4.5.6 Relación entre el desempeño del sistema y los costos (CAPEX y OPEX)	57
4.5.7 Consistencia con el diseño del sistema y el protocolo de operación	57
4.5.8 Limitaciones y consideraciones del estudio	57
CONCLUSIONES	59

RECOMENDACIONES

61

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

63

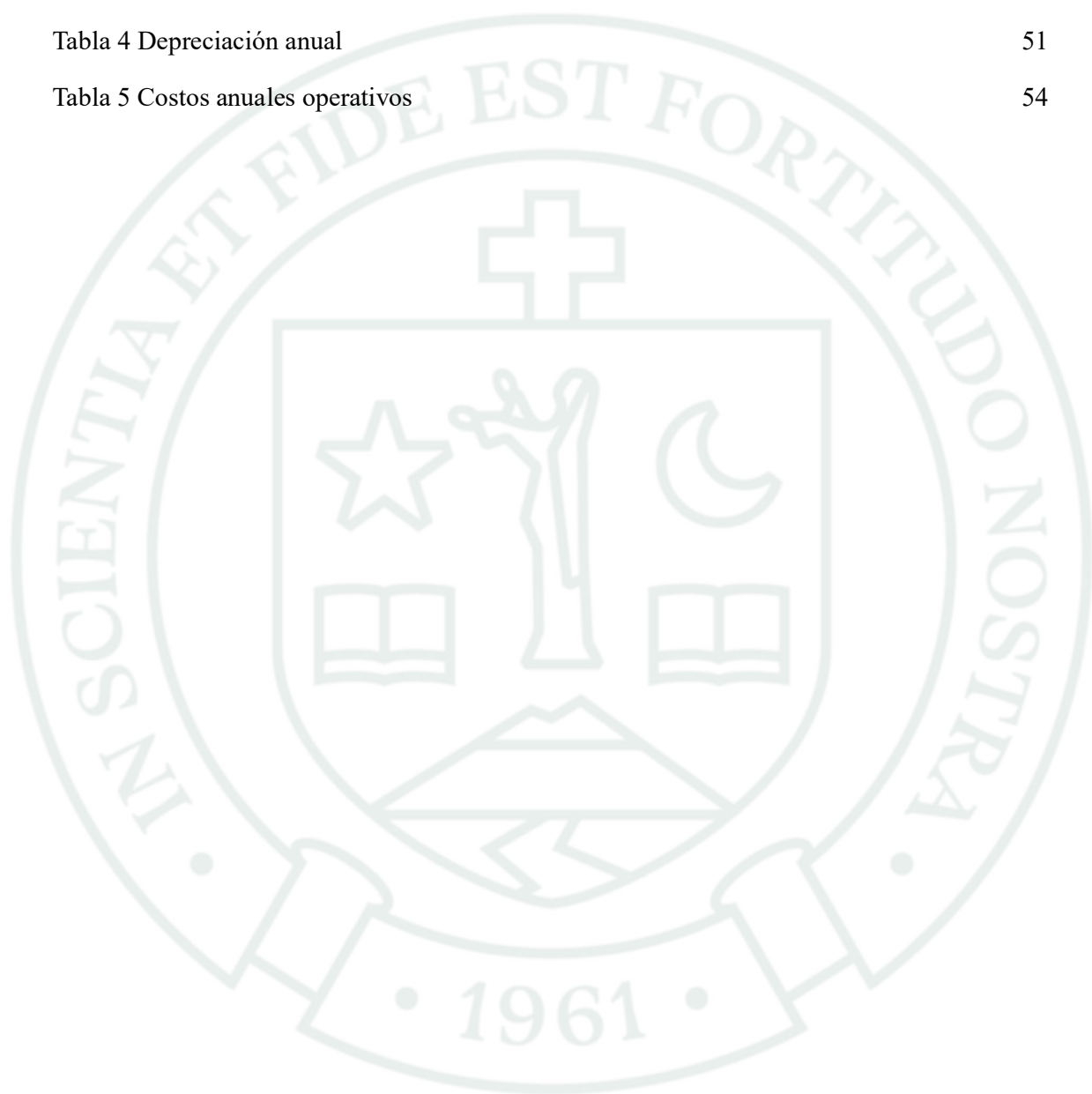


Índice de Figuras

Figura 1 Número de publicaciones y citas desde 2005 hasta junio de 2025	7
Figura 2 Mapa magnetométrico en un yacimiento metálico con presencia de Fe y Cu.	8
Figura 3 Las 10 principales áreas de publicación y el porcentaje de artículos publicados entre 2005 y junio de 2025	10
Figura 4Aplicaciones de UAV	11
Figura 5 Resultados representativos de drones en Massachusetts: vista 3D de la nube de puntos mediante cámara digital	11
Figura 6 Mapa radiológico con detector Kromek GR1 en una antigua mina de uranio	12
Figura 7 Extracción de fisuras basada en un modelo de reconocimiento	12
Figura 8 Ejemplos de sensores comúnmente utilizados en drones mineros	13
Figura 9 Plataformas UAV	14
Figura 10 Monitoreo constante de la operación de transporte y acarreo.	15
Figura 11 Protocolo de operación del sistema de vigilancia	29
Figura 12 Rosa de vientos	33

Índice de tablas

Tabla 1 Costos Unitarios dron para pruebas	22
Tabla 2 Decisiones operativas según velocidad del viento	35
Tabla 3 Costos de inversión	49
Tabla 4 Depreciación anual	51
Tabla 5 Costos anuales operativos	54



Introducción

La minería superficial constituye una de las principales actividades económicas en el Perú, caracterizada por operaciones a gran escala que implican el movimiento continuo de material, el uso de maquinaria pesada y la intervención de extensas áreas geográficas. Estas condiciones generan un entorno altamente dinámico, en el cual la identificación y control de riesgos se convierte en un aspecto fundamental para garantizar la seguridad del personal y la continuidad de las operaciones.

En este contexto, las actividades de supervisión y vigilancia en minería presentan diversas limitaciones cuando se realizan mediante métodos tradicionales, basados principalmente en inspecciones presenciales. Estas limitaciones incluyen dificultades de acceso a zonas críticas, tiempos prolongados de supervisión y exposición directa del personal a condiciones peligrosas, como taludes inestables, áreas posteriores a voladuras y zonas de tránsito de maquinaria pesada. Estas restricciones afectan la eficiencia del monitoreo y reducen la capacidad de respuesta ante situaciones de riesgo.

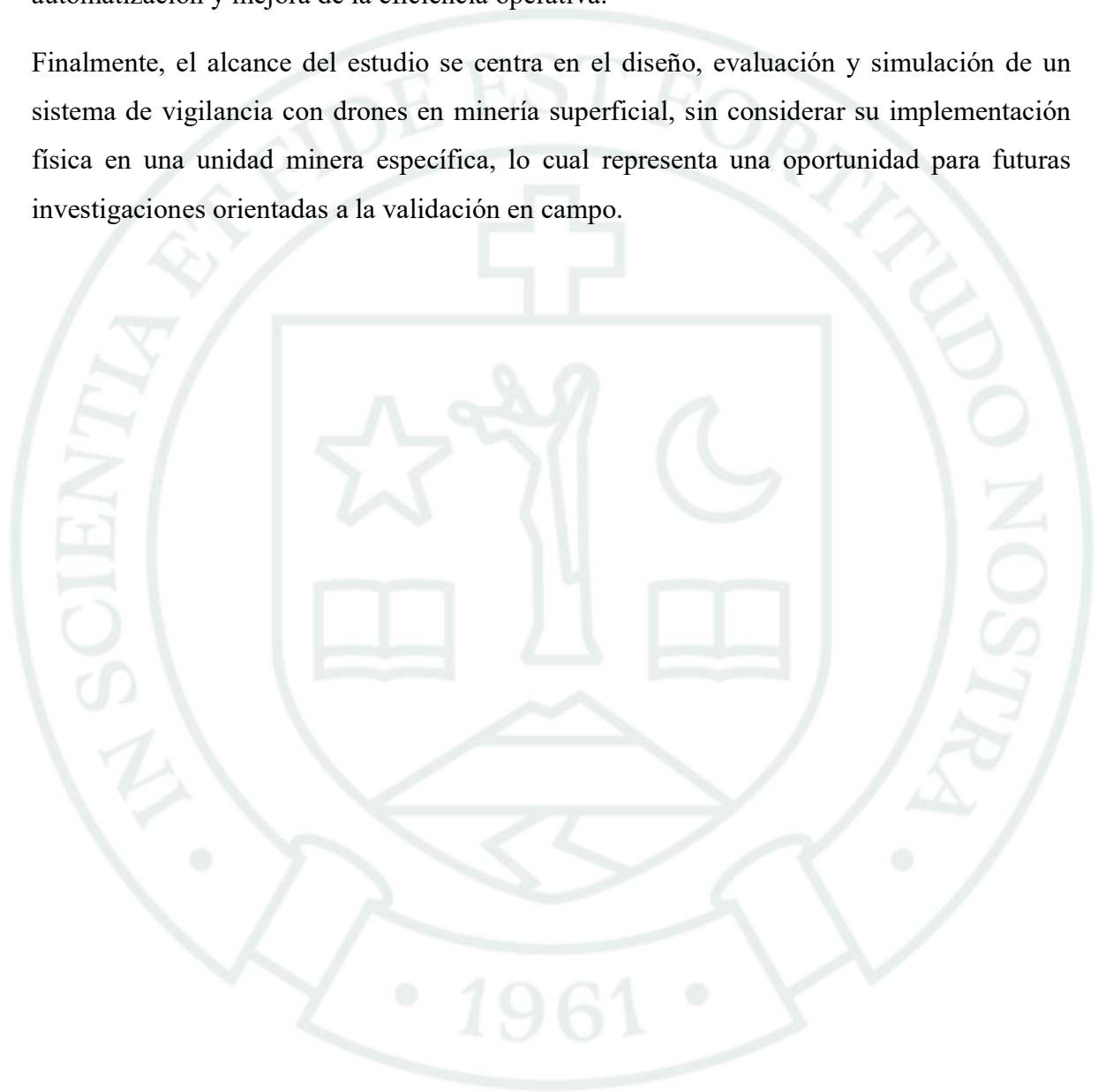
Ante esta problemática, surge la necesidad de incorporar tecnologías que permitan optimizar los procesos de vigilancia y mejorar la gestión de la seguridad minera. En este sentido, el uso de drones representa una alternativa tecnológica que permite realizar monitoreos aéreos de manera rápida, segura y con mayor cobertura, facilitando la obtención de información en tiempo real y reduciendo la exposición del personal a condiciones de riesgo.

En función de lo expuesto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema de vigilancia inteligente con drones aplicado a operaciones de minería superficial, orientado a mejorar los procesos de supervisión, incrementar la capacidad de detección de riesgos y optimizar la seguridad en el entorno operativo.

Para el desarrollo de la investigación, se adoptó un enfoque aplicado, que incluyó el diseño del sistema de vigilancia, la elaboración de un protocolo de operación para su implementación, y el análisis de viabilidad técnica y económica mediante la estimación de los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX). Asimismo, se realizó una simulación del funcionamiento del sistema en un entorno representativo de minería superficial, con el fin de evaluar su desempeño y analizar su impacto en la seguridad minera.

La presente investigación se justifica en la necesidad de mejorar los estándares de seguridad en la industria minera mediante la incorporación de tecnologías innovadoras, contribuyendo a la reducción de riesgos y a la optimización de los procesos de supervisión. Asimismo, se alinea con las tendencias actuales de digitalización en el sector minero, orientadas a la automatización y mejora de la eficiencia operativa.

Finalmente, el alcance del estudio se centra en el diseño, evaluación y simulación de un sistema de vigilancia con drones en minería superficial, sin considerar su implementación física en una unidad minera específica, lo cual representa una oportunidad para futuras investigaciones orientadas a la validación en campo.



CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del Problema

La minería superficial constituye una de las principales actividades económicas del país y de la región Arequipa; sin embargo, también representa un entorno operativo con elevados niveles de riesgo debido a la presencia de taludes inestables, tránsito de maquinaria pesada, voladuras, zonas de difícil acceso y condiciones geográficas complejas. Estas características hacen que la seguridad minera sea un aspecto crítico dentro de la gestión operativa de las unidades mineras.

En la actualidad, las labores de supervisión y vigilancia en operaciones de minería superficial se realizan mayoritariamente mediante inspecciones presenciales y recorridos en campo, lo que implica la exposición directa del personal a zonas potencialmente peligrosas. Si bien existen procedimientos y normativas orientadas a la prevención de accidentes, estos métodos tradicionales presentan limitaciones en cuanto a cobertura, frecuencia de monitoreo y capacidad de respuesta inmediata ante situaciones de riesgo.

El avance tecnológico ha permitido la incorporación de herramientas como los vehículos aéreos no tripulados (drones) en actividades de apoyo minero, principalmente en topografía, control volumétrico y monitoreo ambiental. No obstante, en el contexto local y nacional, el uso de drones aún no ha sido integrado de manera sistemática como parte de sistemas de vigilancia inteligente orientados específicamente a la seguridad minera, especialmente en operaciones de minería superficial.

En la región Arequipa, a pesar de la presencia de importantes operaciones mineras a cielo abierto, se evidencia la ausencia de estudios y propuestas tecnológicas que articulen el uso de drones con mecanismos de vigilancia continua, análisis de información y apoyo a la toma de decisiones en materia de seguridad. Esta situación limita la capacidad de las operaciones mineras para anticiparse a eventos críticos y reducir la exposición del personal a condiciones de riesgo.

Frente a este contexto, surge la necesidad de desarrollar un sistema de vigilancia inteligente con drones que permita fortalecer la supervisión de áreas críticas, optimizar el monitoreo de la operación y contribuir a la mejora de la seguridad minera en minería

superficial. La falta de soluciones tecnológicas integrales adaptadas a la realidad regional constituye el problema central que aborda la presente investigación.

1.2. Objetivos específicos

1.2.1. General

Desarrollar un sistema de vigilancia inteligente basado en drones que contribuya a mejorar la seguridad minera en operaciones de minería superficial, mediante el monitoreo eficiente de áreas críticas y la reducción de la exposición del personal a zonas de riesgo.

1.2.2. Específicos

- Analizar las condiciones de seguridad y los riesgos operativos presentes en una operación de minería superficial, identificando las áreas críticas que requieren un mayor nivel de vigilancia.
- Diseñar un sistema de vigilancia inteligente utilizando drones, considerando los requerimientos técnicos y operativos de la minería superficial.
- Implementar el sistema de vigilancia propuesto para el monitoreo de zonas de riesgo dentro de la operación minera.
- Evaluar el impacto del sistema de vigilancia con drones en la mejora de la supervisión y en la reducción de la exposición del personal a condiciones peligrosas.
- Proponer lineamientos técnicos para la aplicación del sistema de vigilancia inteligente con drones en operaciones de minería superficial en la región Arequipa.

1.3. Preguntas de Investigación

- ¿Cómo puede un sistema de vigilancia inteligente basado en drones contribuir a la mejora de la seguridad minera en operaciones de minería superficial?
- ¿Qué áreas críticas de una operación de minería superficial pueden ser monitoreadas de manera más eficiente mediante el uso de drones?
- ¿De qué manera la implementación de drones reduce la exposición del personal a zonas de riesgo en minería superficial?
- ¿Cuáles son los requerimientos técnicos y operativos necesarios para implementar un sistema de vigilancia inteligente con drones en una operación minera superficial?

- ¿Qué beneficios en términos de supervisión y control de seguridad se obtienen con la aplicación de un sistema de vigilancia con drones en el contexto de la región Arequipa?

1.4. Líneas de Investigación a la que corresponde el Problema

La presente investigación se enmarca dentro de las líneas de investigación vinculadas a la Ingeniería de Minas, específicamente en aquellas orientadas a la seguridad minera, la innovación tecnológica y la optimización de procesos en minería superficial.

De manera particular, el estudio se alinea con las siguientes líneas de investigación:

- Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, al proponer una solución tecnológica destinada a la prevención de riesgos y a la reducción de la exposición del personal a condiciones peligrosas en operaciones de minería superficial.
- Aplicación de Tecnologías Emergentes en Minería, mediante la incorporación de drones como herramienta de vigilancia y monitoreo inteligente en el entorno minero.
- Gestión y Control de Operaciones Mineras, al fortalecer los procesos de supervisión y control mediante el uso de sistemas de vigilancia aérea que apoyan la toma de decisiones operativas.

Estas líneas de investigación respaldan el enfoque aplicado del proyecto y justifican su pertinencia dentro del campo de la Ingeniería de Minas, así como su contribución al desarrollo tecnológico del sector minero.

1.5. Palabras Clave

Vigilancia inteligente, drones, seguridad minera, minería superficial, tecnología aplicada

1.6. Aporte del Desarrollo de la Tesis

El presente trabajo de tesis aporta una propuesta tecnológica aplicada orientada a fortalecer la seguridad minera en operaciones de minería superficial mediante la implementación de un sistema de vigilancia inteligente basado en drones. A diferencia de estudios previos que se enfocan principalmente en aplicaciones operativas o de monitoreo

básico, esta investigación propone un enfoque integrado que vincula la vigilancia aérea con la supervisión de áreas críticas y el apoyo a la toma de decisiones en materia de seguridad.

El aporte principal de la tesis radica en la adaptación de una solución tecnológica a la realidad operativa y geográfica de la región Arequipa, donde no se identifican antecedentes específicos sobre la aplicación de sistemas de vigilancia inteligente con drones en seguridad minera superficial. Asimismo, el proyecto contribuye al desarrollo de lineamientos técnicos que pueden servir como referencia para futuras implementaciones en otras operaciones mineras con características similares.

Desde el punto de vista académico, la investigación amplía el conocimiento existente sobre la aplicación de tecnologías emergentes en la Ingeniería de Minas, mientras que, desde el punto de vista práctico, ofrece una alternativa viable para mejorar los procesos de supervisión, reducir la exposición del personal a zonas de riesgo y fortalecer la gestión de la seguridad minera.

CAPÍTULO II FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

El desarrollo de la minería moderna ha estado acompañado por una creciente incorporación de tecnologías orientadas a mejorar la seguridad, la eficiencia operativa y la gestión de riesgos. En este contexto, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), comúnmente denominados drones, se ha consolidado como una herramienta de alto valor para actividades de monitoreo, vigilancia y supervisión en operaciones mineras, particularmente en minería superficial o a cielo abierto. Diversos estudios internacionales señalan que los drones permiten reducir la exposición del personal a zonas de riesgo y optimizar los procesos de inspección en campo (Ren et al., 2019; Vangu, 2022).

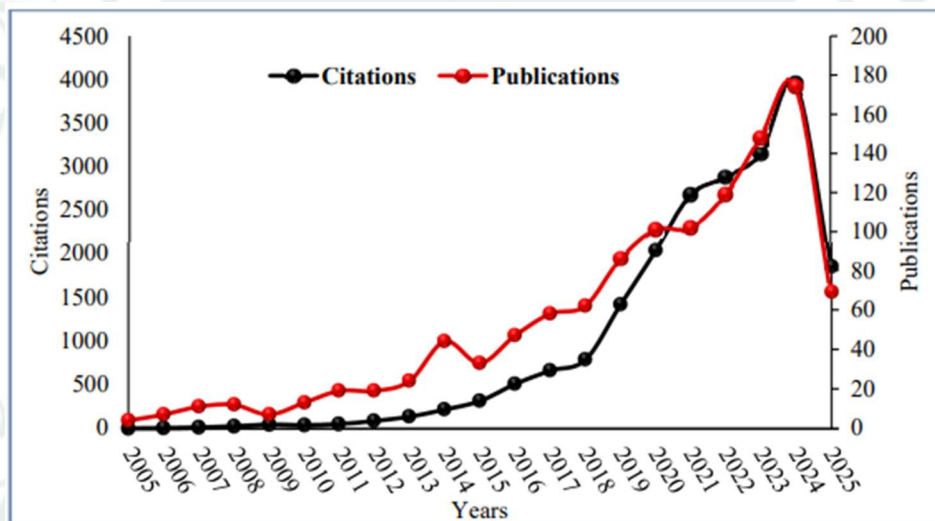


Fig. 1 Número de publicaciones y citas desde 2005 hasta junio de 2025 sobre el monitoreo de actividades mineras a cielo abierto mediante drones. (chand et al. 2025)

En la revisión de la literatura académica y técnica correspondiente a la región Arequipa, no se identifican investigaciones específicas que aborden de manera directa la implementación de sistemas de vigilancia inteligente con drones aplicados a la seguridad minera superficial. A pesar de que la región concentra importantes operaciones mineras a cielo abierto, la producción académica local se ha orientado principalmente a áreas tradicionales de la ingeniería de minas, sin integrar de forma sistemática tecnologías de vigilancia aérea.

A nivel regional, las aplicaciones de drones se han limitado principalmente a actividades como levantamientos topográficos y fotogrametría, tal como ocurre en diversas experiencias documentadas a nivel nacional, donde el enfoque está centrado en el apoyo operativo y no en la gestión integral de la seguridad (Ayma, 2020).

Esta situación evidencia una brecha tecnológica en el contexto local, relacionada con la falta de propuestas que integren vigilancia aérea, análisis de datos y protocolos de respuesta ante eventos críticos.

La ausencia de estudios específicos en Arequipa no constituye una debilidad metodológica, sino que refuerza la pertinencia del presente proyecto de tesis, al proponer una solución tecnológica que podría sentar un precedente para futuras investigaciones aplicadas a la realidad minera regional.

A nivel nacional, el uso de drones en minería ha experimentado un crecimiento progresivo, impulsado principalmente por su aplicación en actividades de topografía, control volumétrico y monitoreo ambiental. Diversas investigaciones desarrolladas en el país evidencian que los UAV contribuyen a la optimización del tiempo de trabajo y a la reducción de costos operativos, especialmente en operaciones mineras a cielo abierto (Ayma, 2020).

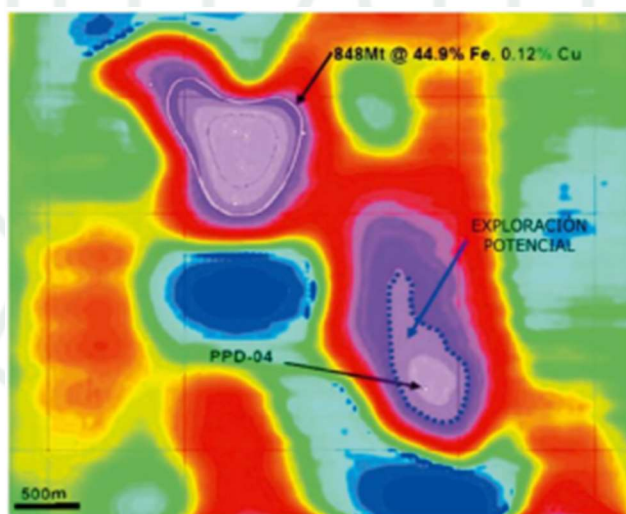


Fig. 2 Mapa magnetométrico en un yacimiento metálico con presencia de Fe y Cu. (Ayma 2020)

Asimismo, instituciones del Estado han incorporado drones como herramientas de apoyo para la supervisión de infraestructura minera y energética, demostrando su utilidad

para la vigilancia remota y la inspección de zonas de difícil acceso (Osinergmin, 2021). Sin embargo, estas aplicaciones se centran principalmente en la obtención de información visual, sin integrar sistemas automatizados de análisis ni esquemas formales de respuesta ante riesgos asociados a la seguridad del personal.

En el ámbito académico peruano, las investigaciones relacionadas con drones y seguridad minera abordan el tema de manera parcial, destacando beneficios generales como la reducción de la exposición al riesgo, pero sin desarrollar modelos de vigilancia inteligente que articulen monitoreo continuo, análisis de datos y toma de decisiones en tiempo real. Esta limitación evidencia la necesidad de propuestas más integrales, alineadas con los estándares modernos de gestión de seguridad y salud ocupacional en minería superficial.

A nivel internacional, el uso de drones en minería presenta un mayor grado de desarrollo y consolidación. Estudios realizados en países con alta actividad minera, como Canadá, Australia y Brasil, demuestran que los UAV han sido incorporados de manera sistemática en procesos de monitoreo de taludes, inspección post-voladura y vigilancia perimetral, reduciendo significativamente los riesgos operativos (Ren et al., 2019; Chand et al., 2025).

Investigaciones recientes destacan que los drones, equipados con sensores avanzados y sistemas de transmisión en tiempo real, permiten no solo la captura de información, sino también la detección temprana de anomalías y la generación de alertas para la toma de decisiones oportunas (Dang, 2023). Asimismo, se ha evidenciado una tendencia hacia la integración de los UAV en sistemas de vigilancia inteligente, donde el análisis automatizado de datos fortalece la gestión preventiva de riesgos (Vangu, 2022).

No obstante, algunos autores señalan que muchas aplicaciones aún se desarrollan de forma aislada, enfocadas en tareas específicas, lo que limita su impacto dentro de un sistema integral de seguridad minera (Chand et al., 2025).

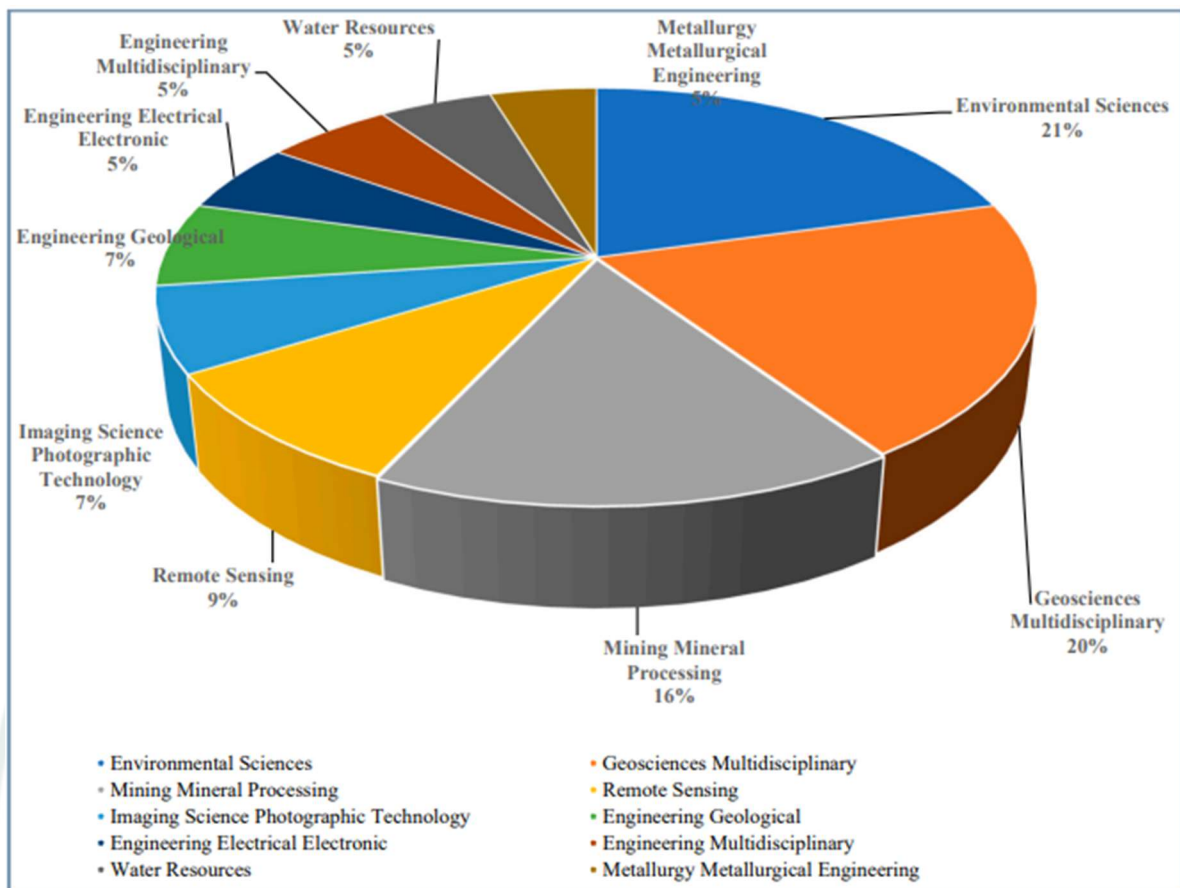


Fig. 3 Las 10 principales áreas de publicación y el porcentaje de artículos publicados entre 2005 y junio de 2025 (Chand et al., 2025)

Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar modelos tecnológicos que integren vigilancia aérea y respuesta operativa, adaptables a distintos contextos mineros.

2.2. Antecedentes Investigación

Los estudios previos relacionados con el uso de drones en el ámbito minero evidencian un interés creciente por incorporar tecnologías aéreas no tripuladas en actividades de monitoreo, vigilancia y apoyo a la seguridad operativa, especialmente en operaciones de minería superficial. La revisión de estas investigaciones permite identificar los principales enfoques desarrollados, así como las limitaciones técnicas y metodológicas que aún persisten en la integración de sistemas de vigilancia inteligente orientados a la prevención de riesgos.

A nivel internacional, Ren et al. (2019) desarrollaron una revisión exhaustiva sobre el uso de UAV en áreas mineras, destacando su aplicación en el monitoreo de taludes, control de áreas inestables y supervisión de zonas de difícil acceso.

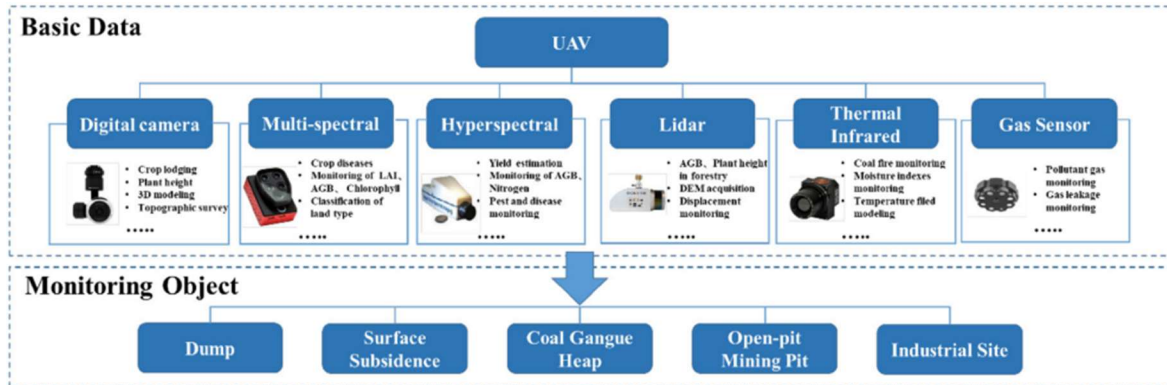


Fig. 4 Aplicaciones de UAV (Ren et al. 2019)

Los autores concluyen que el uso de drones reduce significativamente la exposición del personal a condiciones peligrosas; sin embargo, señalan que muchas aplicaciones se limitan a la recopilación de información visual, sin integrarse completamente a sistemas de gestión de seguridad ni a procesos de toma de decisiones automatizados.



Fig. 5 Resultados representativos de drones en Massachusetts: vista 3D de la nube de puntos mediante cámara digital (Chen et al. 2015)

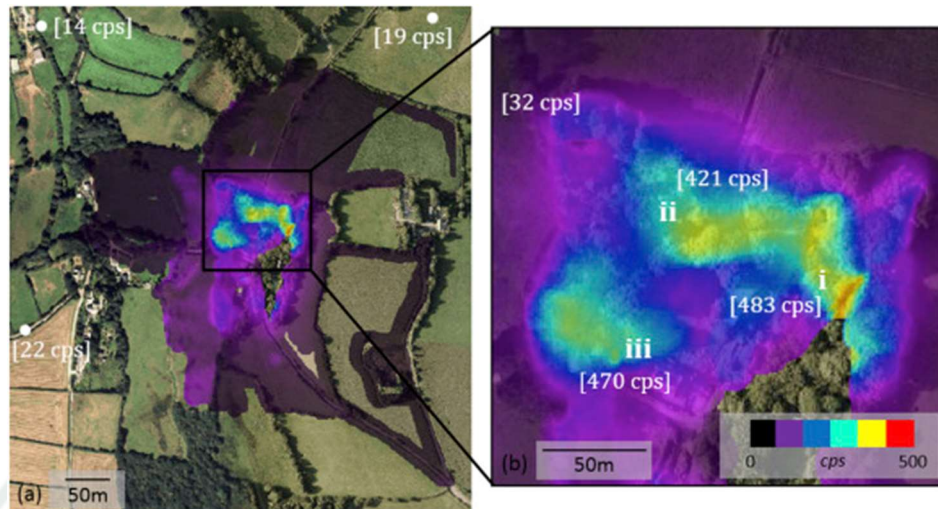


Fig. 6 Mapa radiológico con detector Kromek™ GR1 en una antigua mina de uranio (Martin et al. 2015)

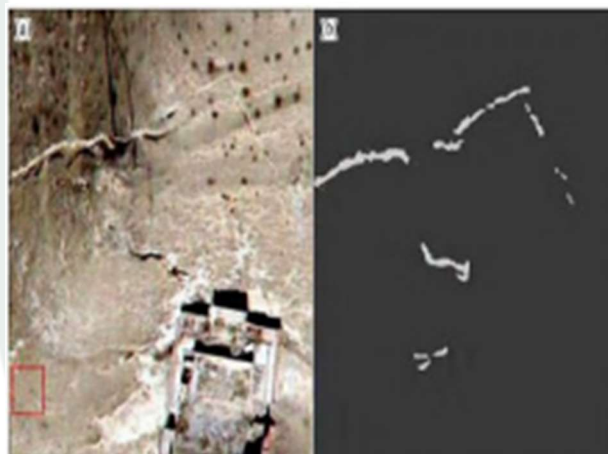


Fig. 7 Extracción de fisuras basada en un modelo de reconocimiento (Wang et al. 2015)

Por su parte, Vangu (2022) analizó diversas aplicaciones operativas de drones en minería, enfatizando su utilidad en inspecciones post-voladura, vigilancia perimetral y control de operaciones a cielo abierto. El estudio resalta que los UAV representan una herramienta eficaz para mejorar la seguridad operacional; no obstante, se identifica que su implementación suele depender de operadores especializados y carece de esquemas estandarizados de vigilancia inteligente, lo que limita su alcance como sistema preventivo integral.

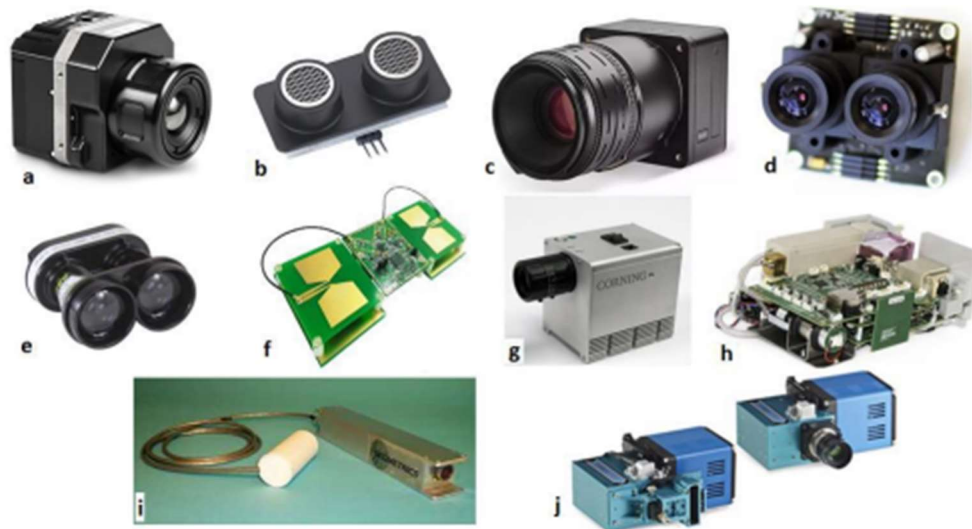


Fig. 8 Ejemplos de sensores comúnmente utilizados en drones mineros: (a) sensor infrarrojo, (b) sensor ultrasónico, (c) cámara RGB, (d) cámaras estéreo, (e) telémetros láser, (f) radar de banda ultraancho (UWB), (g) sensores hiperespectrales, (h) sensores magnéticos, (i) detector de gas, (j) rango espectral visible e infrarrojo cercano (VNIR) (chand et al. 2025)

En una línea similar, Dang (2023) realizó una revisión de alcance sobre las aplicaciones de UAV en la industria minera, evidenciando una tendencia creciente hacia la incorporación de sensores avanzados y tecnologías de transmisión de datos en tiempo real. El autor destaca el potencial de los drones para fortalecer la seguridad minera mediante el monitoreo continuo; sin embargo, señala que aún existe una brecha en la integración de estas tecnologías con modelos predictivos y protocolos de respuesta ante eventos críticos.

Asimismo, Chand et al. (2025) abordaron el uso de drones en la gestión y monitoreo de minas a cielo abierto, con énfasis en procesos de control y seguimiento post-operacional.



a) Sensefly eBee



b) Skywalker X5



c) AscTec Falcon 8



d) DJI Phantom 4

Fig. 9 Plataformas UAV (Chand et al.2025)

Si bien el estudio demuestra que los drones permiten una supervisión más eficiente y segura, los autores concluyen que muchas de las aplicaciones actuales se desarrollan de forma aislada, sin articularse a sistemas inteligentes que permitan una vigilancia integral y una respuesta oportuna ante riesgos asociados a la seguridad minera.

A nivel nacional, Ayma (2020) evaluó la aplicación de drones en una operación minera peruana, demostrando que su uso contribuye a mejorar los procesos productivos y a reducir tiempos de trabajo en actividades de supervisión. Si bien el estudio reconoce beneficios indirectos en términos de seguridad, el enfoque principal se centra en la eficiencia operativa, sin desarrollar un modelo específico de vigilancia orientado a la prevención de riesgos en minería superficial.

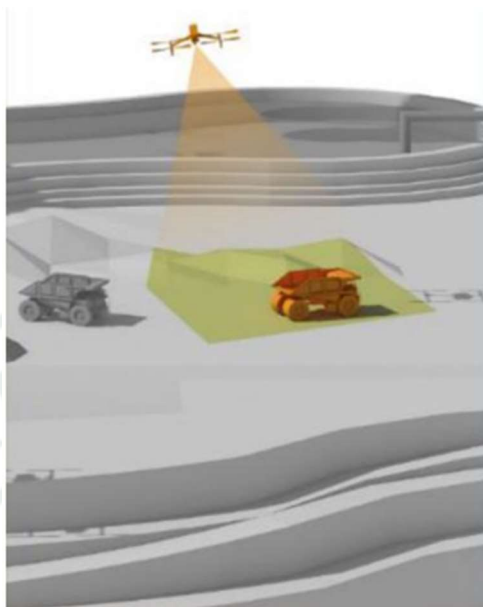


Fig. 10 *Monitoreo constante de la operación de transporte y acarreo. (Ayma 2020)*

Complementariamente, experiencias documentadas por Osinergmin (2021) evidencian la incorporación de drones como herramientas de apoyo para la supervisión de infraestructura minera y energética en el Perú. Estas iniciativas destacan el valor de los UAV para la inspección remota y la vigilancia visual; no obstante, su aplicación se limita a tareas de verificación y control, sin integrar sistemas de análisis inteligente ni protocolos estructurados de respuesta ante incidentes.

En el ámbito local, correspondiente a la región Arequipa, no se identifican antecedentes de investigación que aborden de manera directa la implementación de sistemas de vigilancia inteligente con drones aplicados a la seguridad minera superficial. Esta ausencia de estudios específicos pone de manifiesto una brecha de conocimiento y aplicación tecnológica a nivel regional, lo que refuerza la necesidad y pertinencia del presente proyecto de tesis.

En síntesis, los antecedentes revisados evidencian que, aunque existen avances significativos en el uso de drones en minería a nivel internacional y nacional, la mayoría de las investigaciones se enfocan en aplicaciones operativas o de monitoreo básico, dejando de lado el desarrollo de sistemas integrados de vigilancia inteligente orientados a la seguridad minera. Esta limitación sustenta el aporte del presente estudio, el cual busca proponer una

solución tecnológica adaptada a la realidad de la minería superficial y al contexto regional de Arequipa.

2.2.1 Marco legal y normativo para el uso de drones en el Perú

El uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), comúnmente denominados drones, en el Perú se encuentra regulado por disposiciones emitidas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), con el objetivo de garantizar la seguridad del espacio aéreo, la protección de las personas y la adecuada operación de estas tecnologías.

En el ámbito nacional, la normativa principal está establecida en la Regulación Aeronáutica del Perú (RAP 101), la cual regula la operación de aeronaves pilotadas a distancia. Esta normativa define los requisitos técnicos, operativos y administrativos que deben cumplir tanto los equipos como los operadores de drones.

De acuerdo con el MTC (2015), para la operación de drones en territorio peruano se deben considerar los siguientes aspectos:

- Registro obligatorio del dron ante la autoridad aeronáutica cuando supera ciertos límites de peso.
- Licencia o certificación del operador para vuelos con fines profesionales o comerciales.
- Restricción de vuelos en zonas urbanas densamente pobladas, instalaciones críticas o espacios aéreos controlados.
- Altura máxima de operación generalmente limitada a 120 metros sobre el nivel del suelo.
- Obligación de mantener línea de vista directa (VLOS) durante la operación del dron.
- Prohibición de vuelos nocturnos sin autorización expresa.

En el contexto de la actividad minera, el uso de drones debe además alinearse con las disposiciones de seguridad y salud ocupacional establecidas por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), particularmente en lo referente a la prevención de riesgos laborales y la supervisión de operaciones en campo.

Asimismo, entidades como el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin) han incorporado el uso de drones como herramientas de apoyo en labores de supervisión, evidenciando su validez dentro del marco regulatorio nacional.

Es importante señalar que la implementación de un sistema de vigilancia inteligente con drones en minería superficial debe considerar no solo los aspectos técnicos, sino también el cumplimiento estricto de la normativa vigente, a fin de evitar sanciones y garantizar una operación segura y eficiente.

En ese sentido, el presente proyecto se enmarca dentro de los lineamientos establecidos por la legislación peruana, asegurando que el uso de drones propuesto cumpla con los requisitos legales y contribuya al fortalecimiento de la seguridad minera.

2.3 Hipótesis

La implementación de un sistema de vigilancia inteligente basado en drones mejora significativamente la seguridad minera en operaciones de minería superficial, al permitir un monitoreo más eficiente de las áreas críticas, reducir la exposición del personal a zonas de riesgo y optimizar los tiempos de respuesta ante eventos potencialmente peligrosos.

2.4. Variables

De acuerdo con la hipótesis planteada, la investigación considera dos variables principales: una variable independiente, relacionada con la solución tecnológica propuesta, y una variable dependiente, asociada al efecto que dicha solución genera en la seguridad minera de operaciones superficiales.

2.4.1. Variables Dependientes

Sistema de vigilancia inteligente con drones

Esta variable hace referencia a la implementación de un sistema tecnológico basado en el uso de drones para la vigilancia y monitoreo de operaciones de minería superficial. El sistema considera el uso de vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras y sensores, así como procedimientos de operación orientados a la supervisión de áreas críticas, zonas de riesgo y actividades operativas relevantes.

El sistema de vigilancia inteligente con drones se caracteriza por:

- Monitoreo aéreo periódico o continuo de la operación minera.
- Acceso remoto a zonas de difícil o peligroso acceso.
- Obtención de información visual y/o digital en tiempo real o diferido.
- Apoyo a la toma de decisiones relacionadas con la seguridad minera.

Esta variable representa la intervención tecnológica que se propone implementar y evaluar en el presente estudio.

2.4.2. Variables Independientes

Seguridad minera en operaciones de minería superficial

La variable independiente corresponde al nivel de seguridad minera en operaciones de minería superficial, entendido como el conjunto de condiciones y prácticas orientadas a la prevención de accidentes, la reducción de riesgos y la protección del personal que labora en la operación.

La seguridad minera se refleja en aspectos tales como:

- Identificación oportuna de zonas de riesgo.
- Reducción de la exposición del personal a condiciones peligrosas.
- Mejora en los tiempos de respuesta ante eventos críticos.
- Fortalecimiento de las labores de supervisión y control de seguridad.

Esta variable permite evaluar el impacto de la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones sobre la gestión de la seguridad en minería superficial.

CAPÍTULO III MARCO METODOLOGICO

3.1. Alcances y Limitaciones

Alcances

La presente investigación tiene como alcance el diseño e implementación de un sistema de vigilancia inteligente basado en drones, orientado a mejorar la seguridad minera en operaciones de minería superficial. El estudio se centra en el monitoreo de áreas críticas y zonas de riesgo, empleando drones como herramienta de apoyo a la supervisión y al control de seguridad. El proyecto contempla la identificación de los requerimientos técnicos del sistema, la definición de procedimientos operativos para el uso de drones y la evaluación de los beneficios del sistema en términos de mejora de la vigilancia y reducción de la exposición del personal a condiciones peligrosas. Asimismo, los resultados obtenidos permitirán proponer lineamientos técnicos aplicables a operaciones de minería superficial con características similares.

Limitaciones

La investigación se limita a operaciones de minería superficial, por lo que los resultados no son directamente extrapolables a minería subterránea. Asimismo, el estudio se desarrolla bajo condiciones controladas y con recursos tecnológicos disponibles, por lo que factores externos como condiciones climáticas extremas, restricciones normativas específicas o disponibilidad de equipos pueden influir en la implementación del sistema.

Otra limitación está relacionada con el alcance del análisis de datos, el cual se enfoca en la evaluación del impacto del sistema de vigilancia en la supervisión y seguridad minera, sin profundizar en modelos predictivos avanzados o sistemas de inteligencia artificial complejos.

3.1.1 Viabilidad del proyecto

La viabilidad del presente proyecto de investigación se analiza desde tres enfoques fundamentales: viabilidad técnica, viabilidad normativa, viabilidad económica y viabilidad operativa. Este análisis permite determinar si la implementación de un sistema de vigilancia inteligente basado en drones es factible dentro del contexto de la minería superficial, particularmente en la región Arequipa.

3.1.1.1 Viabilidad técnica

Desde el punto de vista técnico, la implementación de un sistema de vigilancia con drones en minería superficial es viable debido a la disponibilidad actual de tecnologías avanzadas que permiten el monitoreo eficiente de áreas críticas.

En la actualidad, existen drones equipados con cámaras de alta resolución, sensores térmicos, sistemas de posicionamiento global (GPS) y transmisión de datos en tiempo real, lo que facilita la supervisión de zonas de difícil acceso y la detección temprana de situaciones de riesgo. Estas características hacen que los drones sean herramientas adecuadas para su aplicación en entornos mineros, donde las condiciones geográficas y operativas requieren soluciones tecnológicas innovadoras.

Asimismo, el uso de drones se adapta adecuadamente a las condiciones propias de la minería superficial, tales como grandes extensiones de terreno, presencia de taludes, áreas de voladura y zonas de tránsito de maquinaria pesada. La capacidad de realizar vuelos programados y obtener información aérea detallada permite mejorar significativamente las labores de supervisión.

Por otro lado, la disponibilidad de software especializado para el procesamiento de imágenes y datos obtenidos mediante drones permite realizar análisis más precisos, lo cual fortalece la toma de decisiones en materia de seguridad minera. En este sentido, la tecnología necesaria para la implementación del sistema propuesto se encuentra disponible en el mercado, lo que respalda la viabilidad técnica del proyecto.

3.1.1.2 Viabilidad normativa para el uso de drones en el Perú

El uso de drones en el territorio peruano se encuentra regulado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones, a través de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), entidad encargada de establecer las disposiciones para la operación de aeronaves no tripuladas.

La normativa vigente se sustenta en el Reglamento Aeronáutico Peruano (RAP 91) y en disposiciones complementarias que regulan el uso de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). Estas regulaciones establecen los requisitos necesarios para garantizar la seguridad de las operaciones aéreas y el uso adecuado de estas tecnologías.

En este contexto, para la operación de drones con fines profesionales, como es el caso del monitoreo de taludes, se deben cumplir los siguientes requisitos:

- Registro del equipo: Todo dron debe estar registrado ante la autoridad aeronáutica correspondiente.
- Certificación del operador: El piloto del dron debe contar con acreditación o capacitación como operador de sistemas RPAS, especialmente cuando el uso del equipo es de carácter técnico o profesional.
- Autorización de operación: Dependiendo de la zona de vuelo, puede ser necesario contar con permisos específicos, particularmente en áreas cercanas a aeropuertos o zonas restringidas.
- Cumplimiento de restricciones operativas: Existen limitaciones respecto a altura de vuelo, zonas prohibidas y condiciones de operación, las cuales deben ser respetadas para garantizar la seguridad aérea (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2015; DGAC, s.f.).

El cumplimiento de estas disposiciones garantiza que la implementación del sistema de monitoreo propuesto no solo sea técnicamente viable, sino también legalmente aplicable dentro del marco normativo peruano.

3.1.1.3 Viabilidad económica

Desde el punto de vista económico, la implementación de un sistema de vigilancia inteligente con drones representa una inversión inicial que puede ser compensada mediante la reducción de costos asociados a accidentes laborales, inspecciones tradicionales y tiempos de inactividad operativa.

La adquisición de drones, capacitación del personal y mantenimiento de los equipos constituyen los principales costos del proyecto. Sin embargo, estos costos se ven mitigados por los beneficios económicos que genera la reducción de riesgos, la optimización de procesos de supervisión y la disminución de la exposición del personal a condiciones peligrosas.

El uso de drones permite reducir la necesidad de inspecciones presenciales en zonas de alto riesgo, lo que se traduce en menores costos relacionados con equipos de protección, desplazamientos y tiempos operativos. Asimismo, la detección temprana de fallas o condiciones inseguras contribuye a prevenir accidentes que podrían generar pérdidas económicas significativas para la operación minera.

Adicionalmente, diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de tecnologías UAV en minería contribuye a mejorar la eficiencia operativa y reducir costos a mediano y largo plazo, lo que refuerza la viabilidad económica del proyecto.

En consecuencia, si bien el proyecto requiere una inversión inicial, los beneficios económicos derivados de su implementación justifican su desarrollo, considerándose económicamente viable.

En el Perú, el costo de utilización de drones para aplicaciones técnicas como inspección, monitoreo o levantamiento topográfico varía en función del tipo de equipo, la complejidad de la operación y la inclusión de personal especializado. De acuerdo con referencias de mercado y servicios técnicos disponibles, el alquiler de drones puede oscilar entre S/200 y S/700 por jornada de trabajo, dependiendo de si el servicio incluye operador certificado y procesamiento de datos (E2 Perú, s.f.; DJI Perú, s.f.).

Para efectos del presente estudio, se propone una estimación de costos por jornada de monitoreo, la cual se detalla a continuación:

Tabla 1: Costos Unitarios dron para pruebas

Concepto	Costo aproximado (S/.)
Alquiler de dron	300
Operador especializado	200
Procesamiento de información	100
Logística y transporte	100
Total estimado por jornada	700

Nota: Elaboración propia

Este costo referencial permite evidenciar que la implementación del sistema de monitoreo es económicamente viable, especialmente si se considera su aplicación en operaciones mineras donde la prevención de fallas puede evitar pérdidas económicas significativamente mayores.

Asimismo, el uso de drones representa una alternativa eficiente frente a métodos tradicionales de inspección, ya que reduce tiempos de operación, mejora la cobertura del monitoreo y disminuye la exposición del personal a zonas de riesgo.

3.1.1.4 Viabilidad operativa

Desde el punto de vista operativo, la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones es viable, ya que puede integrarse de manera efectiva a los procesos existentes de supervisión y control de seguridad en operaciones de minería superficial.

El uso de drones no reemplaza completamente las labores tradicionales de supervisión, sino que actúa como una herramienta complementaria que mejora la eficiencia y alcance de las inspecciones. Esto permite una transición progresiva hacia el uso de tecnologías más avanzadas sin afectar la continuidad de las operaciones.

Asimismo, la capacitación del personal para la operación de drones es factible, considerando la disponibilidad de programas de formación y certificación en el uso de estas tecnologías. El personal puede adquirir las competencias necesarias para operar los equipos de manera segura y eficiente, cumpliendo con la normativa vigente.

Por otro lado, la implementación de protocolos de operación, mantenimiento y gestión de la información permite asegurar el correcto funcionamiento del sistema y su integración dentro de la estructura organizacional de la operación minera.

Finalmente, el sistema propuesto puede adaptarse a distintas condiciones operativas, lo que permite su aplicación en diferentes unidades mineras con características similares, fortaleciendo así su viabilidad operativa.

3.1.1.5 Evaluación general de viabilidad

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que el proyecto de implementación de un sistema de vigilancia inteligente con drones en minería superficial es viable desde el punto de vista técnico, normativo, económico y operativo.

La disponibilidad de tecnología adecuada, la relación costo-beneficio favorable y la posibilidad de integración del sistema dentro de las operaciones mineras existentes respaldan la factibilidad del proyecto. En este sentido, la propuesta desarrollada en la presente investigación representa una alternativa viable para mejorar la seguridad minera y optimizar los procesos de supervisión en el contexto de la minería superficial.

3.2. Tipo y Diseño de la Investigación

Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que está orientada a la solución de un problema práctico identificado en el ámbito de la seguridad minera en operaciones de minería superficial. El estudio no se limita a la generación de conocimiento teórico, sino que busca aplicar principios de la ingeniería y el uso de tecnologías emergentes para desarrollar una propuesta que contribuya a la mejora de las condiciones de seguridad en el entorno minero.

Asimismo, la investigación se enmarca en el enfoque tecnológico, dado que se centra en el diseño e implementación de un sistema de vigilancia inteligente basado en drones, como herramienta de apoyo a la supervisión y al control de áreas críticas. Este enfoque permite integrar conocimientos técnicos relacionados con la operación de UAV, la gestión de información visual y la toma de decisiones en seguridad minera.

Desde el punto de vista del nivel de la investigación, el estudio se desarrolla con un alcance descriptivo y analítico, ya que busca describir las características del sistema de vigilancia propuesta y analizar su contribución a la mejora de la seguridad minera, sin pretender establecer relaciones causales complejas ni realizar experimentación controlada.

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es no experimental, puesto que las variables de estudio no son manipuladas de manera deliberada, sino que se analizan en función de la implementación del sistema de vigilancia con drones en el contexto operativo de la minería superficial. El investigador observa y evalúa los efectos del uso del sistema propuesto sobre la supervisión de áreas críticas y la gestión de la seguridad minera.

El estudio adopta un diseño transversal, ya que la información es recopilada en un periodo determinado, permitiendo analizar la situación de la seguridad minera antes y después de la implementación del sistema de vigilancia, sin extenderse a un seguimiento longitudinal prolongado.

Además, el diseño descriptivo-analítico permite evaluar el funcionamiento del sistema de vigilancia inteligente, identificar sus ventajas y limitaciones, y analizar su aplicabilidad dentro de operaciones mineras superficiales con características similares, especialmente en el contexto de la región Arequipa.

3.2.1. Diseño del sistema de vigilancia inteligente con drones

El diseño del sistema de vigilancia inteligente con drones se plantea como una solución tecnológica orientada a mejorar la supervisión y el control de la seguridad en operaciones de minería superficial. Este sistema integra componentes aéreos, herramientas de procesamiento de información y procedimientos operativos que permiten el monitoreo eficiente de áreas críticas dentro de la operación minera.

Arquitectura del sistema

El sistema propuesto se estructura en tres componentes principales: adquisición de datos, procesamiento de información y toma de decisiones.

- **Componente de adquisición de datos:** Está conformado por los drones equipados con cámaras y sensores, encargados de realizar el monitoreo aéreo de las zonas críticas. Estos dispositivos permiten la captura de imágenes y videos en tiempo real o diferido, facilitando la supervisión de áreas de difícil acceso.

- **Componente de procesamiento de información:** Incluye el uso de software especializado para el análisis de la información recopilada. Este componente permite identificar condiciones de riesgo, anomalías operativas y posibles fallas en la seguridad.
- **Componente de toma de decisiones:** Corresponde a la interpretación de los datos por parte del personal responsable, quienes utilizan la información generada para implementar acciones preventivas o correctivas dentro de la operación minera.

La integración de estos tres componentes permite establecer un sistema continuo de vigilancia, orientado a la detección temprana de riesgos.

Componentes del sistema

El sistema de vigilancia inteligente se compone de los siguientes elementos:

- **Drones de monitoreo:** Equipos principales encargados de la supervisión aérea, seleccionados en función de las condiciones del entorno minero.
- **Sensores y cámaras:** Dispositivos integrados en los drones para la captura de información visual y térmica, según los requerimientos de monitoreo.
- **Estación de control:** Plataforma desde la cual se supervisan los vuelos, se reciben los datos y se coordina la operación del sistema.
- **Software de planificación de vuelos:** Herramienta que permite establecer rutas de monitoreo automatizadas y optimizar la cobertura de las áreas críticas.
- **Sistema de almacenamiento y análisis:** Infraestructura digital destinada a la gestión de la información recopilada.

Estos componentes trabajan de manera integrada para garantizar la eficiencia del sistema.

Funcionamiento del sistema

El funcionamiento del sistema se basa en un flujo operativo estructurado que permite el monitoreo continuo de la operación minera:

1. Planificación del monitoreo: Se identifican las áreas críticas de la operación minera, tales como taludes, zonas de tránsito de maquinaria, áreas de voladura y accesos restringidos.
2. Programación de rutas de vuelo: Se establecen rutas específicas para los drones, considerando la cobertura necesaria y las condiciones del entorno.
3. Ejecución de vuelos: Los drones realizan el monitoreo de las zonas definidas, capturando información en tiempo real o diferido.
4. Transmisión y almacenamiento de datos: La información recopilada es enviada a la estación de control y almacenada para su posterior análisis.
5. Análisis de la información: Se evalúan los datos obtenidos para identificar posibles riesgos o condiciones inseguras.
6. Toma de decisiones: En función del análisis realizado, se implementan acciones correctivas o preventivas para mejorar la seguridad minera.

Este flujo permite establecer un sistema dinámico y eficiente de supervisión.

Áreas de aplicación del sistema

El sistema de vigilancia inteligente con drones se aplica principalmente en zonas de alto riesgo dentro de la minería superficial, tales como:

- Taludes y zonas inestables
- Áreas de voladura
- Zonas de tránsito de maquinaria pesada
- Botaderos y depósitos de material
- Accesos restringidos

El monitoreo de estas áreas permite mejorar la capacidad de respuesta ante situaciones críticas.

Integración del sistema en la operación minera

El sistema propuesto se integra como una herramienta complementaria dentro de los procesos de supervisión existentes en la operación minera. Su implementación no reemplaza los métodos tradicionales, sino que los optimiza mediante el uso de tecnología aérea.

La incorporación del sistema permite ampliar la cobertura de monitoreo, mejorar la frecuencia de supervisión y reducir la exposición del personal a zonas de riesgo, fortaleciendo así la gestión de la seguridad minera.

Consideraciones para la implementación

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Capacitación del personal en la operación de drones
- Cumplimiento de la normativa vigente
- Mantenimiento periódico de los equipos
- Evaluación de condiciones climáticas
- Definición de protocolos operativos

Estas consideraciones permiten garantizar una implementación segura y eficiente del sistema.

3.2.2 Protocolo de operación del sistema de vigilancia con drones

El protocolo de operación del sistema de vigilancia inteligente con drones establece los procedimientos necesarios para garantizar una ejecución segura, eficiente y estandarizada de las actividades de monitoreo en operaciones de minería superficial. Este protocolo comprende las etapas previas, durante y posteriores a la ejecución de los vuelos, asegurando la correcta utilización de los recursos tecnológicos y la adecuada gestión de la información obtenida.



Fig. 11 *Protocolo de operación del sistema de vigilancia*

Fase de planificación

La fase de planificación constituye la etapa inicial del protocolo y tiene como objetivo definir las condiciones bajo las cuales se realizará el monitoreo.

En esta fase se desarrollan las siguientes actividades:

- Identificación de las áreas críticas que serán objeto de vigilancia, tales como taludes, zonas de tránsito de maquinaria y áreas de voladura.
- Evaluación de las condiciones climáticas, considerando factores como velocidad del viento, visibilidad y posibles precipitaciones.
- Verificación del estado operativo del dron, incluyendo batería, sensores, sistema de navegación y comunicación.
- Definición de rutas de vuelo, altitud y duración de la operación.
- Coordinación con el personal en campo para evitar interferencias durante la ejecución del vuelo.

Una adecuada planificación permite minimizar riesgos y optimizar el uso del sistema.

Fase de preparación

En esta etapa se realizan las acciones necesarias para garantizar que todos los elementos del sistema se encuentren en condiciones óptimas antes del despegue.

Las actividades incluyen:

- Instalación y verificación de baterías completamente cargadas.
- Revisión de los sistemas de control y comunicación.
- Configuración del software de vuelo y validación de las rutas programadas.
- Verificación de la zona de despegue y aterrizaje, asegurando que esté libre de obstáculos.
- Confirmación del cumplimiento de las condiciones de seguridad establecidas.

Esta fase es fundamental para prevenir fallas técnicas durante la operación.

Fase de ejecución del vuelo

La fase de ejecución corresponde al desarrollo del monitoreo aéreo mediante el uso del dron.

Durante esta etapa se realizan las siguientes acciones:

- Despegue del dron desde una zona segura previamente establecida.
- Seguimiento de la ruta de vuelo programada o control manual según las condiciones operativas.
- Captura de imágenes y/o video de las áreas críticas.
- Supervisión en tiempo real de la estabilidad del dron y de la calidad de la información obtenida.
- Mantenimiento de comunicación constante entre el operador y el equipo de supervisión en campo.

El cumplimiento de los procedimientos durante esta fase garantiza la obtención de información confiable.

Fase de finalización del vuelo

Una vez concluido el monitoreo, se procede a la finalización de la operación.

Las actividades incluyen:

- Retorno del dron al punto de origen.
- Aterrizaje controlado en una zona segura.
- Apagado del equipo y desconexión de los sistemas.
- Inspección visual del dron para detectar posibles daños o fallas.

Esta etapa permite asegurar la integridad del equipo para futuras operaciones.

Fase de procesamiento y análisis de datos

Posterior al vuelo, se realiza el tratamiento de la información recopilada.

Las actividades comprenden:

- Descarga y almacenamiento de los datos obtenidos.
- Clasificación de la información según las áreas monitoreadas.
- Análisis de imágenes y videos para la identificación de condiciones de riesgo.
- Generación de reportes técnicos que incluyan hallazgos relevantes.

Esta fase es fundamental para transformar los datos en información útil para la toma de decisiones.

Fase de toma de decisiones y acciones correctivas

En base al análisis realizado, se procede a la implementación de medidas orientadas a mejorar la seguridad minera.

Entre las acciones se incluyen:

- Comunicación de hallazgos al área de seguridad.
- Implementación de medidas correctivas en zonas de riesgo.
- Reprogramación de monitoreos en áreas críticas.
- Actualización de protocolos de seguridad en función de los resultados obtenidos.

Esta fase permite cerrar el ciclo operativo del sistema.

Medidas de seguridad durante la operación

Para garantizar una operación segura del sistema, se deben considerar las siguientes medidas:

- No operar drones en condiciones climáticas adversas.
- Mantener siempre línea de vista directa con el dron.
- Evitar el sobrevuelo de personal o maquinaria en operación.
- Respetar las altitudes máximas permitidas.
- Contar con un plan de contingencia ante fallas técnicas.

Estas medidas permiten reducir riesgos asociados al uso de drones en minería.

Consideraciones operativas adicionales

- Establecer registros de cada operación realizada.
- Realizar mantenimiento periódico de los equipos.
- Capacitar continuamente al personal operador.
- Evaluar periódicamente la eficiencia del sistema.

Estas consideraciones aseguran la mejora continua del sistema de vigilancia.

3.2.3 Influencia de la rosa de viento en la operación del sistema de drones

La operación de drones en entornos de minería superficial se encuentra directamente influenciada por las condiciones climáticas, particularmente por la velocidad y dirección del viento. En este contexto, el análisis de la rosa de viento se convierte en una herramienta fundamental para la planificación y ejecución de vuelos dentro del sistema de vigilancia propuesto.

3.2.3.1 Concepto de rosa de viento

La rosa de viento es una representación gráfica que muestra la distribución de la dirección y velocidad del viento en un lugar determinado durante un periodo de tiempo. Este instrumento permite identificar patrones predominantes de flujo de aire, los cuales son esenciales para evaluar las condiciones de operación de sistemas aéreos no tripulados.

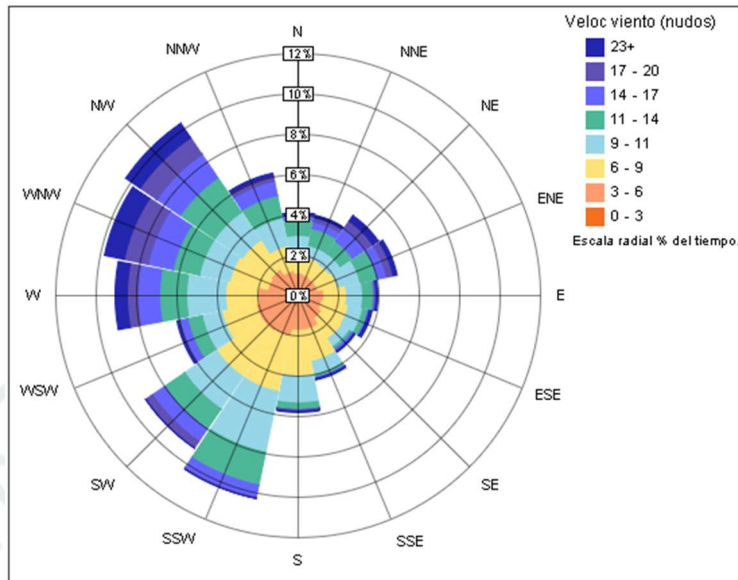


Fig. 12 Rosa de vientos (Autodesk revit ayuda 2015)

3.2.3.2 Impacto del viento en la operación de drones

El viento influye en diversos aspectos del desempeño de los drones, entre los cuales destacan:

- Estabilidad de vuelo: Vientos fuertes o racheados pueden afectar la estabilidad del dron, generando desviaciones en la trayectoria.
- Consumo de energía: La resistencia del viento incrementa el consumo de batería, reduciendo la autonomía de vuelo.
- Precisión en la captura de datos: La presencia de viento puede afectar la calidad de imágenes y videos.
- Seguridad operativa: Condiciones de viento extremo pueden representar un riesgo para la integridad del equipo.

En operaciones mineras, donde suelen presentarse corrientes de aire debido a la topografía y condiciones ambientales, estos efectos pueden intensificarse.

3.2.3.3 Aplicación de la rosa de viento en el sistema propuesto

El análisis de la rosa de viento permite optimizar la operación del sistema de drones mediante:

- Planificación de rutas de vuelo: Definiendo trayectorias que minimicen la resistencia al viento.
- Selección de horarios de operación: Identificando periodos del día con menor intensidad de viento.
- Determinación de zonas críticas: Reconociendo áreas donde el viento puede ser más intenso debido a la geografía del terreno.
- Ajuste de parámetros de vuelo: Como altitud, velocidad y dirección.

3.2.3.4 Integración en el protocolo de operación

En el sistema propuesto, la consideración de la rosa de viento se incorpora en la fase de planificación del protocolo de operación, donde se realiza la evaluación de condiciones climáticas antes de cada vuelo. Se recomienda:

- No operar drones en condiciones de viento superiores a los límites establecidos por el fabricante.
- Priorizar vuelos en direcciones favorables al flujo de viento.
- Reprogramar operaciones en caso de condiciones adversas.

3.2.3.5 Decisiones operativas según condiciones de viento

A partir del análisis de la influencia del viento en la operación de drones y considerando las condiciones típicas de la región de Arequipa, se establece la siguiente tabla de decisiones operativas, la cual permite estandarizar las acciones a tomar en función de la velocidad del viento durante la ejecución del sistema de vigilancia:

Tabla 2: Decisiones operativas según velocidad del viento

Velocidad del viento (km/h)	Condición operativa	Decisión	Acciones recomendadas
0 – 10	Óptima	Operar normalmente	Ejecución completa del plan de vuelo sin restricciones
10 – 20	Moderada	Operar con precaución	Ajustar velocidad del dron, mantener baja altitud, monitoreo constante
20 – 30	Limitante	Operación restringida	Reducir tiempo de vuelo, priorizar zonas críticas, evaluar estabilidad
> 30	Crítica	No operar	Suspender vuelos y reprogramar operación

Nota: Elaboración propia

Interpretación de la tabla

La tabla presentada permite establecer criterios claros para la toma de decisiones durante la operación del sistema, facilitando la adaptación del protocolo a condiciones ambientales variables.

En condiciones óptimas y moderadas, el sistema puede operar con normalidad o con ajustes menores, garantizando la continuidad del monitoreo. Sin embargo, a medida que la velocidad del viento aumenta, se incrementan los riesgos asociados a la estabilidad del dron, el consumo de batería y la calidad de los datos obtenidos, lo que requiere restricciones operativas.

En condiciones críticas, la suspensión de operaciones constituye una medida necesaria para garantizar la seguridad del equipo y la confiabilidad del sistema.

3.3. Población y Muestra o Universo

La población de estudio está constituida por los componentes operativos vinculados a la gestión de la seguridad minera en una operación de minería superficial, considerando tanto los espacios físicos donde se desarrollan las actividades mineras como el personal responsable de la supervisión y control de dichas actividades.

En este sentido, la población incluye, por un lado, las áreas críticas de la operación minera superficial, tales como frentes de explotación, taludes activos, zonas de tránsito de equipos pesados, áreas post-voladura y sectores de difícil acceso, los cuales representan un mayor nivel de riesgo para la seguridad del personal. Estas áreas constituyen los principales puntos de interés para la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones.

Por otro lado, la población considera al personal involucrado en la gestión de la seguridad minera, incluyendo supervisores de seguridad, ingenieros de minas, responsables de operaciones y personal encargado de las labores de supervisión en campo. Este grupo resulta relevante debido a su participación directa en la identificación de riesgos, la toma de decisiones operativas y la aplicación de medidas de control de seguridad.

Debido al enfoque aplicado y tecnológico de la investigación, no se emplea un muestreo estadístico probabilístico convencional. En su lugar, se define un universo de análisis de tipo intencional, conformado por aquellas áreas críticas y actores clave que presentan una relación directa con el problema de investigación. La selección de este universo se basa en criterios técnicos, tales como el nivel de riesgo, la frecuencia de ocurrencia de eventos críticos y la importancia operativa de cada área dentro de la operación minera.

Este enfoque metodológico permite evaluar de manera pertinente la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones, asegurando que los resultados obtenidos sean representativos del contexto operativo analizado y relevantes para el objetivo de mejorar la seguridad minera en operaciones de minería superficial.

3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Métodos de Investigación

El método principal utilizado es el método analítico, el cual permite descomponer el problema de investigación en sus distintos componentes, tales como las condiciones de seguridad existentes, las áreas críticas de la operación minera y el desempeño del sistema de vigilancia con drones. Este método facilita el análisis detallado de la información recolectada, permitiendo evaluar cómo la implementación del sistema contribuye a mejorar la supervisión y el control de la seguridad minera.

Complementariamente, se emplea el método descriptivo, cuyo propósito es caracterizar de manera sistemática el entorno operativo de la minería superficial, describir el funcionamiento del sistema de vigilancia inteligente y detallar los procedimientos asociados al uso de drones en labores de monitoreo. Este método permite presentar de forma clara las condiciones observadas antes y después de la implementación del sistema propuesto.

Asimismo, se utiliza el método comparativo, orientado a contrastar las condiciones de supervisión y vigilancia de la seguridad minera sin el uso de drones y con la implementación del sistema de vigilancia inteligente, con el fin de identificar mejoras, ventajas y limitaciones.

Técnicas de Recolección de Datos

Las principales técnicas empleadas para la recolección de datos en la investigación son las siguientes:

- Observación directa en campo, aplicada para identificar zonas de riesgo, evaluar las condiciones de seguridad existentes y analizar el comportamiento operativo del sistema de vigilancia con drones durante las labores de monitoreo. Esta técnica permite obtener información de primera mano sobre el entorno minero.
- Revisión documental, utilizada para analizar informes de seguridad minera, registros de inspecciones, procedimientos internos, normativas vigentes y documentación técnica relacionada con la operación minera y el uso de drones. Esta técnica contribuye a contextualizar la investigación y a sustentar el análisis con información institucional.

- Registro audiovisual, mediante la captura de imágenes y videos a través de drones, lo cual permite documentar visualmente las condiciones de las áreas críticas, apoyar el análisis de seguridad y servir como evidencia objetiva para la evaluación del sistema de vigilancia.

Instrumentos de Recolección de Datos

Para la aplicación de las técnicas descritas se emplean los siguientes instrumentos:

- Fichas de observación, diseñadas para registrar de manera sistemática información relacionada con las condiciones de seguridad, identificación de riesgos, características de las áreas críticas y eventos observados durante el monitoreo con drones.
- Listas de verificación (checklists), orientadas a evaluar el cumplimiento de criterios de seguridad minera y a verificar la correcta operación del sistema de vigilancia inteligente, considerando aspectos técnicos y operativos.
- Registros audiovisuales digitales, constituidos por fotografías y videos obtenidos mediante el uso de drones, los cuales permiten realizar análisis posteriores y respaldar los resultados del estudio.

El uso combinado de estos métodos, técnicas e instrumentos garantiza la recopilación de información confiable y pertinente, permitiendo evaluar de manera integral la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones y su contribución a la mejora de la seguridad minera en operaciones de minería superficial

3.5. Plan de análisis estadístico de los datos

El análisis de los datos recolectados en la presente investigación se realiza de acuerdo con el enfoque aplicado y no experimental del estudio. Dado que la investigación no busca establecer relaciones causales complejas ni realizar pruebas experimentales, el análisis estadístico se orienta principalmente a la descripción, organización e interpretación de la información obtenida a través de los instrumentos de recolección de datos.

En una primera etapa, los datos recopilados mediante fichas de observación, listas de verificación y registros audiovisuales son organizados y sistematizados, permitiendo su clasificación según áreas críticas, tipos de riesgos identificados y condiciones de seguridad

observadas. Esta organización facilita el análisis estructurado de la información y la identificación de patrones relevantes.

Posteriormente, se emplea estadística descriptiva, utilizando medidas simples como frecuencias y porcentajes, para analizar la ocurrencia de eventos, el nivel de cumplimiento de criterios de seguridad y la cobertura del monitoreo realizado con drones. Este análisis permite evaluar de manera objetiva las condiciones de seguridad antes y después de la implementación del sistema de vigilancia inteligente.

Asimismo, se realiza un análisis comparativo, orientado a contrastar los resultados obtenidos sin el uso del sistema de vigilancia con drones y aquellos observados tras su implementación, con el fin de identificar mejoras en la supervisión de áreas críticas y en la reducción de la exposición del personal a zonas de riesgo.

Finalmente, los resultados del análisis estadístico son interpretados en función de los objetivos de la investigación y de la hipótesis planteada, permitiendo extraer conclusiones sobre la efectividad del sistema de vigilancia inteligente con drones como herramienta de apoyo a la seguridad minera en operaciones de minería superficial.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Análisis e interpretación de resultados

4.1.1 Simulación de la implementación del sistema de vigilancia inteligente con drones

Con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de vigilancia inteligente con drones propuesto, se desarrolló una simulación aplicada a una operación de minería superficial bajo condiciones representativas del contexto peruano. La simulación considera la integración del sistema dentro de las actividades operativas de la mina, tomando en cuenta el diseño del sistema, los recursos disponibles, el protocolo de operación y los lineamientos establecidos previamente.

4.1.2 Características del entorno simulado

La simulación se plantea en una unidad minera a tajo abierto con las siguientes características operativas:

- Extensión aproximada de 2.5 km²
- Presencia de taludes activos con alturas variables
- Operaciones de carga y acarreo mediante camiones de gran tonelaje
- Ejecución periódica de voladuras
- Condiciones ambientales variables (viento, polvo, radiación solar)

Se establecen como zonas críticas de monitoreo:

- Taludes con riesgo de inestabilidad
- Áreas recientemente intervenidas por voladura
- Rutas de tránsito de maquinaria pesada
- Botaderos de material
- Zonas de acceso restringido

4.1.3 Configuración del sistema en la simulación

Para la simulación se considera la implementación del sistema con los siguientes parámetros:

- Uso de dos drones operativos, trabajando de manera alternada para garantizar continuidad
- Autonomía promedio de vuelo: 25 a 30 minutos por batería
- Cobertura por vuelo: aproximadamente 1 km²
- Frecuencia de monitoreo: 2 a 3 vuelos diarios en zonas críticas
- Estación de control ubicada dentro de la operación minera
- El sistema se integra con un operador de drones encargado tanto de la ejecución de vuelos como del análisis inicial de la información, optimizando así los recursos humanos definidos en el OPEX.

4.1.4 Ejecución de la simulación

La simulación se desarrolla considerando un periodo operativo de 7 días, durante los cuales se aplican todas las fases del protocolo de operación:

a) Planificación diaria

Cada jornada inicia con la identificación de áreas prioritarias de monitoreo, en función de actividades programadas (voladuras, movimiento de material, etc.).

b) Programación de vuelos

Se establecen rutas específicas para cubrir las zonas críticas, optimizando la autonomía de los drones.

c) Ejecución de vuelos

Se realizan vuelos en horarios estratégicos:

- Mañana: evaluación inicial de condiciones
- Mediodía: monitoreo de actividad operativa
- Tarde: verificación post-operacional

d) Procesamiento de datos

La información recopilada es descargada y analizada diariamente, generando reportes de condiciones observadas.

4.1.5 Resultados de la simulación

El Como resultado de la implementación simulada del sistema, se obtuvieron los siguientes resultados:

a) Cobertura de monitoreo

Durante el periodo de simulación, el sistema permitió cubrir de manera efectiva el 100% de las zonas críticas definidas, con una frecuencia promedio de 2 a 3 inspecciones por día.

En comparación con métodos tradicionales, donde la supervisión puede realizarse de manera puntual o limitada por accesibilidad, el sistema permitió una vigilancia continua y sistemática.

b) Tiempo de supervisión

Se observó una reducción significativa en el tiempo requerido para la inspección de áreas extensas:

- Inspección tradicional: 2 a 3 horas por zona
- Inspección con drones: 20 a 30 minutos por zona

Esto representa una reducción aproximada del 70% al 80% en el tiempo de supervisión, permitiendo optimizar los recursos operativos.

c) Detección de condiciones de riesgo

Durante la simulación se identificaron múltiples condiciones de riesgo, entre ellas:

- Zonas con acumulación inestable de material
- Cambios en la geometría de taludes
- Presencia de obstáculos en rutas de tránsito
- Áreas con material suelto posterior a voladuras

La detección de estas condiciones se realizó de manera más rápida en comparación con inspecciones convencionales, lo que permite una intervención oportuna.

d) Frecuencia de monitoreo

El sistema permitió incrementar la frecuencia de supervisión en comparación con métodos tradicionales:

- Método tradicional: 1 inspección cada 1–2 días
- Sistema con drones: hasta 3 inspecciones diarias

Esto mejora la capacidad de seguimiento de cambios en el entorno operativo.

e) Reducción de exposición del personal

Se evidenció que el uso del sistema permitió evitar el ingreso directo del personal a zonas de alto riesgo en al menos el 60% de las inspecciones realizadas, especialmente en:

- Taludes inestables
- Zonas post-voladura
- Áreas de difícil acceso

f) Continuidad operativa del sistema

El uso de dos drones permitió garantizar la continuidad del monitoreo, evitando interrupciones por:

- Descarga de baterías
- Mantenimiento básico
- Reprogramación de vuelos

Esto valida la decisión técnica considerada en el CAPEX.

g) Generación y gestión de información

Durante la simulación se generó un volumen constante de información visual (imágenes y videos), lo cual permitió:

- Registrar evidencia de condiciones operativas
- Realizar seguimiento de cambios en el tiempo
- Generar reportes diarios de supervisión

h) Relación con costos operativos (OPEX)

El sistema demostró que, a pesar de los costos operativos anuales, la optimización del tiempo y la mejora en la supervisión permiten un uso más eficiente de los recursos humanos.

La integración del operador como analista contribuye a reducir costos sin afectar la calidad del monitoreo.

i) Desempeño general del sistema

El sistema operó de manera estable durante el periodo simulado, cumpliendo con:

- Rutas de vuelo programadas
- Frecuencia de monitoreo
- Captura de información relevante

No se identificaron fallas críticas que impidan su implementación en condiciones reales, siempre que se mantengan los lineamientos y protocolos establecidos.

4.2 Análisis del impacto del sistema de vigilancia inteligente con drones en la seguridad minera

El análisis del impacto del sistema de vigilancia inteligente con drones se orienta a evaluar los efectos de su implementación en la mejora de la seguridad minera en operaciones de minería superficial. Este análisis se basa en la relación entre la variable independiente, correspondiente al sistema propuesto, y la variable dependiente, asociada al nivel de seguridad minera, considerando indicadores como la reducción de riesgos, la mejora en la supervisión y la optimización de los tiempos de respuesta.

4.2.1 Impacto en la identificación de riesgos

La implementación del sistema permite mejorar significativamente la capacidad de identificación de riesgos dentro de la operación minera. A través del monitoreo aéreo, es posible obtener una visión más amplia y detallada de las condiciones del entorno, lo que facilita la detección de zonas inestables, acumulaciones de material, fallas en taludes y otras condiciones potencialmente peligrosas.

A diferencia de los métodos tradicionales, el uso de drones permite realizar inspecciones más frecuentes y con mayor cobertura, lo que incrementa la probabilidad de detectar situaciones de riesgo antes de que se conviertan en incidentes. Este aspecto contribuye directamente al fortalecimiento de la gestión preventiva en seguridad minera.

4.2.2 Impacto en la reducción de la exposición del personal

Uno de los principales beneficios del sistema propuesto es la disminución de la exposición del personal a zonas de alto riesgo. Mediante el uso de drones, las actividades de inspección en áreas peligrosas pueden realizarse de manera remota, evitando que los trabajadores ingresen a zonas con condiciones inestables o de difícil acceso.

Esta reducción en la exposición contribuye a disminuir la probabilidad de accidentes laborales, mejorando las condiciones de seguridad y salud ocupacional dentro de la operación minera. Asimismo, permite optimizar la asignación de recursos humanos, enfocando al personal en actividades de mayor valor agregado.

4.2.3 Impacto en la mejora de la supervisión

El sistema de vigilancia inteligente con drones permite fortalecer las labores de supervisión mediante la incorporación de monitoreo continuo y sistemático. La posibilidad de programar vuelos periódicos y obtener información en tiempo real facilita el seguimiento constante de las condiciones operativas.

Esto permite a los responsables de seguridad contar con información actualizada, lo que mejora la toma de decisiones y la capacidad de respuesta ante situaciones críticas. Además, el registro de información visual contribuye a la trazabilidad de las condiciones de la operación, permitiendo realizar evaluaciones comparativas a lo largo del tiempo.

4.2.4 Impacto en los tiempos de respuesta

La disponibilidad de información en tiempo real o en intervalos cortos permite reducir los tiempos de respuesta ante la identificación de riesgos o eventos críticos. La detección temprana de condiciones inseguras facilita la implementación inmediata de medidas correctivas, evitando la escalada de situaciones que podrían derivar en accidentes.

Este aspecto es particularmente relevante en minería superficial, donde las condiciones operativas pueden cambiar rápidamente debido a factores como actividades de voladura, movimiento de material o condiciones climáticas.

4.2.5 Impacto en la toma de decisiones

El sistema propuesto contribuye a mejorar la calidad de la toma de decisiones en materia de seguridad minera, al proporcionar información objetiva y actualizada sobre las condiciones de la operación.

El análisis de datos obtenidos mediante drones permite identificar patrones, evaluar tendencias y priorizar acciones en función del nivel de riesgo detectado. Esto favorece una gestión más eficiente de la seguridad, basada en evidencia y no únicamente en observaciones puntuales en campo.

4.2.6 Impacto en la eficiencia operativa

La implementación del sistema también tiene un impacto positivo en la eficiencia operativa, al optimizar los procesos de supervisión y reducir los tiempos requeridos para la inspección de áreas críticas.

El uso de drones permite cubrir grandes extensiones de terreno en menor tiempo en comparación con los métodos tradicionales, lo que se traduce en una mejora en la productividad de las actividades de monitoreo. Asimismo, la automatización de ciertas tareas contribuye a reducir la carga operativa del personal.

4.2.7 Evaluación global del impacto

De manera integral, el sistema de vigilancia inteligente con drones genera un impacto positivo en la seguridad minera, al fortalecer la identificación de riesgos, reducir la exposición del personal, mejorar la supervisión y optimizar los tiempos de respuesta.

Estos efectos contribuyen a la prevención de accidentes y al fortalecimiento de la cultura de seguridad dentro de la operación minera. En este sentido, la implementación del sistema propuesto representa una mejora significativa en la gestión de la seguridad en minería superficial, alineándose con las tendencias actuales de incorporación de tecnologías en el sector minero.

4.3 Análisis de inversión de capital (CAPEX) para la implementación del sistema de vigilancia con drones

4.3.1 Enfoque de inversión y criterio de selección

El sistema propuesto se basa en la adquisición directa de equipos, priorizando la propiedad de los activos frente al alquiler de servicios. Este enfoque responde a la necesidad de contar con un sistema de monitoreo permanente, adaptable a las condiciones operativas de la mina y con disponibilidad inmediata ante situaciones críticas.

Para la determinación de los componentes del CAPEX, se consideraron los siguientes criterios:

- Cobertura de áreas extensas propias de la minería superficial
- Operación en condiciones ambientales exigentes (polvo, viento, altitud)
- Autonomía de vuelo suficiente para monitoreo continuo
- Capacidad de captura y transmisión de información en tiempo real
- Compatibilidad con software de análisis y procesamiento de datos

Asimismo, se plantea la adquisición de dos drones, con el fin de asegurar continuidad operativa ante posibles fallas, mantenimiento o necesidad de cobertura simultánea en distintas áreas críticas.

4.3.2 Componentes del CAPEX

El CAPEX del sistema de vigilancia con drones se compone de los siguientes elementos:

a) Adquisición de drones

Se consideran drones de uso profesional, diseñados para aplicaciones industriales, con características técnicas adecuadas para entornos mineros. Estos equipos deben contar con estabilidad de vuelo, resistencia a condiciones adversas y capacidad de integración con sensores especializados.

b) Sistemas de captura y sensores

Incluye cámaras de alta resolución y, de ser necesario, sensores térmicos que permitan detectar variaciones de temperatura en equipos, acumulaciones de material o posibles fallas operativas.

c) Estación de control y procesamiento

Comprende equipos informáticos de alto rendimiento necesarios para la recepción, almacenamiento y procesamiento de la información generada por los drones, incluyendo software especializado para planificación de vuelos y análisis de datos.

d) Accesorios operativos

Incluye elementos necesarios para garantizar la continuidad de la operación, tales como baterías adicionales, estaciones de carga, hélices de repuesto y dispositivos de control.

e) Capacitación y puesta en marcha

Considera la formación inicial del personal operador y la configuración del sistema para su correcta integración en la operación minera.

f) Costos indirectos

- Se incluyen costos asociados a la implementación, tales como:
- Transporte e importación de equipos
- Instalación y configuración inicial
- Pruebas operativas
- Contingencias (aproximadamente 5% del total del CAPEX)

4.3.3 Estimación referencial del CAPEX

A continuación, se presenta una estimación referencial de los costos de inversión:

Tabla 3: Costos de inversión

Concepto	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Drone profesional industrial	2	5,999	11,998
Sensores y cámaras	2	3,500	7,000
Estación de control (hardware)	1	2,500	2,500
Software especializado	1	1,200	1,200
Accesorios operativos	1 lote	1,500	1,500
Capacitación y puesta en marcha	1	1,800	1,800
Subtotal			25,998
Costos indirectos (5%)			1,299
Total CAPEX estimado			27,297 USD

Nota: Elaboración propia

4.3.4 Análisis técnico-económico del CAPEX

La inversión inicial estimada se considera adecuada en relación con los beneficios que aporta el sistema en términos de seguridad minera. La adquisición de equipos propios permite una mayor flexibilidad operativa, eliminando la dependencia de terceros y garantizando la disponibilidad del sistema para monitoreo continuo.

Desde una perspectiva económica, el CAPEX se justifica al considerar la reducción de costos asociados a accidentes laborales, interrupciones operativas y limitaciones de los métodos tradicionales de supervisión. La capacidad de detección temprana de riesgos contribuye a evitar pérdidas económicas significativas, lo que favorece la recuperación de la inversión en el mediano plazo.

Asimismo, el uso de tecnología propia permite optimizar la frecuencia de monitoreo sin incurrir en costos adicionales por servicios externos, lo que mejora la eficiencia del sistema en el tiempo.

4.3.5 Depreciación y amortización

Con el fin de complementar el análisis económico del sistema de vigilancia inteligente con drones, se realizó la estimación de la depreciación de la inversión inicial (CAPEX), considerando una vida útil de tres años para los equipos tecnológicos involucrados.

La depreciación se calculó mediante el método de línea recta, el cual distribuye el valor del activo de manera uniforme a lo largo de su vida útil. Este método es ampliamente utilizado en evaluaciones económicas y proyectos de ingeniería, debido a su simplicidad, claridad y facilidad de interpretación.

Justificación de la vida útil (3 años)

La selección de una vida útil de tres años para los equipos del sistema se fundamenta en los siguientes criterios técnicos y operativos:

- **Obsolescencia tecnológica:** Los drones y sistemas asociados evolucionan rápidamente, presentando mejoras continuas en sensores, autonomía y capacidades de procesamiento. Esto hace que, en un horizonte mayor a tres años, los equipos puedan quedar tecnológicamente desfasados.
- **Condiciones operativas exigentes:** En el entorno de la minería superficial, los equipos están expuestos a factores adversos como polvo, vibraciones, radiación solar intensa y variaciones de temperatura, lo que acelera el desgaste de los componentes.
- **Uso intensivo del sistema:** La frecuencia de operación planteada (múltiples vuelos diarios) implica un uso constante de los equipos, lo que reduce su vida útil efectiva en comparación con aplicaciones menos exigentes.
- **Criterio conservador de evaluación:** La adopción de un periodo de tres años permite realizar una estimación prudente de la vida útil, evitando sobrevalorar el tiempo de operación de los activos y proporcionando un análisis económico más realista.

En conjunto, estos factores justifican la selección de un horizonte de depreciación de tres años como una aproximación adecuada para el tipo de tecnología y condiciones analizadas en la presente investigación.

Cálculo de la depreciación

La depreciación se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Depreciación anual} = \text{Valor del CAPEX} / \text{Vida útil}$$

Considerando el CAPEX estimado de 27,297 USD y una vida útil de 3 años, se obtiene:

$$\text{Depreciación anual: } 27,297 / 3 = 9,099 \text{ USD}$$

$$\text{Depreciación mensual: } 9,099 / 12 = 758.25 \text{ USD}$$

Tabla 4: Depreciación anual

Año	Valor inicial (USD)	Depreciación anual (USD)	Valor residual (USD)
1	27,297	9,099	18,198
2	18,198	9,099	9,099
3	9,099	9,099	0

Nota: Elaboración propia

Análisis de la depreciación

La depreciación del CAPEX permite distribuir el costo de la inversión inicial a lo largo del tiempo, facilitando su incorporación dentro de los costos totales del sistema. En este caso, el costo anual equivalente de la inversión asciende a 9,099 USD, el cual puede ser considerado conjuntamente con el OPEX para obtener una visión integral del costo del sistema.

Asimismo, el uso de una vida útil de tres años permite reflejar de manera realista las condiciones de operación del sistema en el entorno minero, evitando subestimar el impacto del desgaste y la obsolescencia tecnológica.

Este análisis refuerza la viabilidad económica del sistema, al evidenciar que la inversión inicial puede ser amortizada de manera progresiva, manteniendo un equilibrio entre costos y beneficios a lo largo del tiempo.

4.3.6 Relación con la sostenibilidad del sistema

La inversión en activos propios contribuye a la sostenibilidad del sistema de vigilancia, ya que permite establecer un esquema de operación continuo y adaptable a las necesidades de la mina. Además, facilita la implementación de mejoras tecnológicas progresivas, como la incorporación de nuevos sensores o software, sin depender de terceros.

En este sentido, el CAPEX no solo representa una inversión inicial, sino una base para el desarrollo de un sistema de vigilancia inteligente escalable y alineado con las tendencias de digitalización en minería.

4.4 Análisis de costos operativos (OPEX) del sistema de vigilancia con drones

4.4.1 Enfoque del OPEX

En el contexto de la minería en el Perú, los costos operativos deben considerar factores como disponibilidad de mano de obra especializada, condiciones geográficas, logística en unidades mineras y costos asociados a mantenimiento de equipos tecnológicos.

El sistema propuesto está diseñado para operar de manera continua dentro de la operación minera, por lo que los costos operativos se orientan principalmente a garantizar la disponibilidad, funcionalidad y eficiencia del sistema en el tiempo.

4.4.2 Componentes del OPEX

Los costos operativos del sistema se agrupan en los siguientes componentes:

a) Costos de personal

- Incluyen las remuneraciones del personal involucrado en la operación del sistema:
- Operador de drones
- Supervisor de seguridad (proporcional al tiempo dedicado)
- Analista de datos (según frecuencia de uso)

Estos costos pueden variar dependiendo de la estructura organizacional de la empresa minera y si el personal ya forma parte de la operación.

b) Mantenimiento de equipos

Comprende los costos asociados al mantenimiento preventivo y correctivo de los drones y sus componentes:

- Reemplazo de hélices
- Mantenimiento de motores
- Actualización de firmware
- Reparaciones menores

Se recomienda considerar un porcentaje anual del valor del equipo para estos fines.

c) Energía y operación

Incluye los costos asociados a:

- Recarga de baterías
- Consumo eléctrico de la estación de control
- Operación de equipos informáticos

Estos costos suelen ser relativamente bajos en comparación con otros componentes operativos.

d) Costos logísticos

Incluyen transporte interno dentro de la unidad minera, movilización de equipos y soporte operativo en campo.

4.4.3 Estimación referencial del OPEX anual

A continuación, se presenta una estimación referencial de los costos operativos anuales del sistema:

Tabla 5: Costos anuales operativos

Concepto	Costo anual (USD)
Operador de drones	17,000
Mantenimiento	2,000
Energía	1,000
Logística	1,200
Total OPEX ajustado	21,200 USD

Nota: Elaboración propia

4.4.4 Análisis del OPEX

El costo operativo anual del sistema se considera razonable en relación con los beneficios que aporta en términos de mejora de la seguridad minera y optimización de procesos de supervisión.

En el contexto de la minería peruana, donde los costos asociados a accidentes laborales pueden ser significativamente elevados, la inversión en un sistema de monitoreo continuo permite reducir riesgos y evitar pérdidas económicas mayores. Asimismo, el uso de drones contribuye a optimizar el tiempo del personal y reducir la necesidad de inspecciones presenciales en zonas de alto riesgo.

Es importante destacar que parte del personal requerido puede ya formar parte de la operación minera, lo que permitiría reducir los costos adicionales asociados al sistema.

4.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la simulación del sistema de vigilancia inteligente con drones evidencian una mejora significativa en los procesos de supervisión y control de seguridad en operaciones de minería superficial. En este sentido, el análisis de los hallazgos

permite establecer una relación directa entre la implementación del sistema propuesto y la optimización de los indicadores asociados a la seguridad minera.

4.5.1 Interpretación de la mejora en la cobertura de monitoreo

Uno de los resultados más relevantes corresponde a la cobertura total de las zonas críticas durante el periodo de simulación. Este resultado pone en evidencia la capacidad del sistema para superar las limitaciones de accesibilidad y alcance propias de los métodos tradicionales de supervisión.

En el contexto de la minería superficial, donde las áreas de operación suelen ser extensas y de difícil acceso, la posibilidad de realizar monitoreos sistemáticos y frecuentes constituye una ventaja significativa. La cobertura del 100% de las zonas críticas no solo mejora la visibilidad de las condiciones operativas, sino que también fortalece la capacidad preventiva del sistema.

Este resultado es coherente con lo planteado en el marco teórico, donde se establece que el uso de drones permite ampliar el alcance de las actividades de supervisión, especialmente en entornos complejos.

4.5.2 Análisis de la reducción del tiempo de supervisión

La reducción del tiempo de inspección en un rango del 70% al 80% representa un impacto considerable en la eficiencia operativa. Este resultado evidencia que el sistema propuesto no solo mejora la seguridad, sino que también optimiza los procesos de supervisión.

Desde una perspectiva operativa, la disminución del tiempo requerido para inspeccionar áreas críticas permite redistribuir los recursos humanos hacia otras actividades, incrementando la productividad general de la operación minera. Asimismo, la rapidez en la obtención de información contribuye a una toma de decisiones más oportuna.

Este hallazgo refuerza la viabilidad económica del sistema, ya que la optimización del tiempo se traduce en una reducción indirecta de costos operativos.

4.5.3 Evaluación de la detección de condiciones de riesgo

La capacidad del sistema para identificar condiciones de riesgo de manera temprana constituye uno de los aspectos más relevantes de la propuesta. La detección de cambios en la estabilidad de taludes, acumulaciones de material y obstáculos en rutas de tránsito demuestra la eficacia del monitoreo aéreo frente a métodos convencionales.

A diferencia de las inspecciones presenciales, que pueden estar limitadas por factores como la visibilidad o el acceso, el uso de drones permite obtener información desde múltiples perspectivas, lo que mejora la precisión en la identificación de riesgos.

Este resultado valida el enfoque planteado en la investigación, en el cual se propone el uso de tecnología para fortalecer la gestión preventiva en seguridad minera.

4.5.4 Discusión sobre la reducción de la exposición del personal

La reducción de la exposición del personal en aproximadamente un 60% de las inspecciones realizadas constituye un resultado de alto impacto en términos de seguridad y salud ocupacional. Este hallazgo evidencia que el sistema propuesto no solo mejora la supervisión, sino que también contribuye directamente a la protección del personal.

En operaciones mineras, la exposición a zonas inestables o de alto riesgo representa una de las principales causas de accidentes laborales. En este sentido, la posibilidad de reemplazar inspecciones presenciales por monitoreo remoto mediante drones representa una mejora sustancial en la gestión de riesgos.

Este resultado se alinea con las tendencias actuales en la industria minera, orientadas a la automatización y reducción de la intervención humana en entornos peligrosos.

4.5.5 Análisis de la frecuencia de monitoreo

El incremento en la frecuencia de monitoreo, pasando de inspecciones cada uno o dos días a múltiples inspecciones diarias, permite un seguimiento más preciso de las condiciones operativas. Este aspecto es fundamental en minería superficial, donde los cambios en el entorno pueden ocurrir de manera rápida.

La alta frecuencia de monitoreo permite detectar variaciones en menor tiempo, lo que facilita la implementación de acciones correctivas antes de que se produzcan incidentes. Este

resultado refuerza la importancia de contar con un sistema de vigilancia continuo, tal como se plantea en el diseño del sistema propuesto.

4.5.6 Relación entre el desempeño del sistema y los costos (CAPEX y OPEX)

Los resultados obtenidos en la simulación permiten justificar la inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) asociados al sistema. La mejora en la eficiencia de la supervisión, la reducción de la exposición del personal y la detección temprana de riesgos generan beneficios que compensan la inversión requerida.

Desde una perspectiva económica, el sistema presenta una relación costo-beneficio favorable, ya que contribuye a prevenir incidentes que podrían generar pérdidas económicas significativas para la operación minera. Asimismo, la optimización del uso del personal permite reducir costos indirectos.

Este análisis refuerza la viabilidad del sistema y su aplicabilidad en el contexto de la minería peruana.

4.5.7 Consistencia con el diseño del sistema y el protocolo de operación

Los resultados obtenidos son consistentes con el diseño del sistema y el protocolo de operación planteados en capítulos anteriores. La correcta aplicación de las fases de planificación, ejecución y análisis permitió garantizar un funcionamiento eficiente del sistema durante la simulación.

La utilización de dos drones, tal como se definió en el CAPEX, permitió asegurar la continuidad operativa, mientras que la integración de funciones en el operador contribuyó a optimizar los recursos humanos, en concordancia con el OPEX planteado.

Esta coherencia entre el diseño teórico y los resultados obtenidos fortalece la validez de la propuesta.

4.5.8 Limitaciones y consideraciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos son favorables, es importante considerar que la simulación se basa en condiciones controladas y representativas, por lo que pueden existir variaciones en un entorno real.

Factores como condiciones climáticas extremas, interferencias en la señal, fallas técnicas o limitaciones operativas podrían afectar el desempeño del sistema. No obstante, estas limitaciones pueden ser mitigadas mediante la aplicación adecuada de los protocolos y el mantenimiento continuo de los equipos.



CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de la presente investigación, orientada a la implementación de un sistema de vigilancia inteligente con drones en operaciones de minería superficial, se establecen las siguientes conclusiones, las cuales se encuentran alineadas con los objetivos planteados:

Conclusión general

Se concluye que la implementación de un sistema de vigilancia inteligente basado en drones constituye una solución viable y eficiente para mejorar la seguridad en operaciones de minería superficial, ya que permite optimizar los procesos de supervisión, incrementar la capacidad de detección de riesgos y reducir la exposición del personal a condiciones peligrosas, cumpliendo con los lineamientos técnicos, operativos y económicos establecidos en la investigación.

Conclusiones específicas

a) En relación con el diseño del sistema

Se concluye que el diseño del sistema de vigilancia inteligente con drones, estructurado en componentes de adquisición de datos, procesamiento de información y toma de decisiones, permite establecer un modelo operativo funcional y adaptable a las condiciones de la minería superficial. La integración de drones, sensores, software y estaciones de control garantiza la obtención de información relevante para la supervisión de zonas críticas.

b) En relación con el protocolo de operación

Se concluye que la definición de un protocolo de operación estructurado en fases (planificación, preparación, ejecución, análisis y toma de decisiones) permite estandarizar el uso del sistema, asegurando su correcta aplicación en el entorno minero. Este protocolo contribuye a minimizar riesgos operativos y garantizar la continuidad del monitoreo.

c) En relación con la viabilidad técnica

Se concluye que el sistema es técnicamente viable, debido a la disponibilidad de tecnología adecuada para su implementación, así como a su capacidad para operar en

condiciones propias de la minería superficial. Los resultados de la simulación evidencian un desempeño estable del sistema y su capacidad para cumplir con los requerimientos de monitoreo establecidos.

d) En relación con la viabilidad económica (CAPEX y OPEX)

Se concluye que la implementación del sistema es económicamente viable, ya que la inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) se justifican mediante los beneficios obtenidos en la mejora de la seguridad y la optimización de los procesos de supervisión. La reducción de tiempos de inspección y la prevención de incidentes contribuyen a generar una relación costo-beneficio favorable.

e) En relación con el impacto en la seguridad minera

Se concluye que el sistema de vigilancia inteligente con drones tiene un impacto positivo en la seguridad minera, evidenciado en la mejora de la identificación de riesgos, el incremento de la frecuencia de monitoreo y la reducción de la exposición del personal a zonas peligrosas. Estos resultados fortalecen la gestión preventiva dentro de la operación minera.

f) En relación con la simulación del sistema

Se concluye que la simulación realizada permitió validar la funcionalidad del sistema en un entorno representativo, evidenciando mejoras en la cobertura de monitoreo, reducción de tiempos de supervisión y generación de información para la toma de decisiones. Esto demuestra la aplicabilidad del sistema en condiciones reales.

g) En relación con la integración en la operación minera

Se concluye que el sistema puede integrarse de manera efectiva a los procesos existentes de supervisión minera, actuando como una herramienta complementaria que mejora la eficiencia operativa sin reemplazar completamente los métodos tradicionales.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos y las conclusiones establecidas en la presente investigación, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a la implementación, mejora y futuras investigaciones relacionadas con sistemas de vigilancia inteligente con drones en minería superficial:

a) Recomendaciones para la implementación del sistema

Se recomienda a las empresas mineras considerar la implementación progresiva de sistemas de vigilancia con drones, iniciando con proyectos piloto en zonas críticas, con el fin de evaluar su desempeño en condiciones reales antes de su aplicación a gran escala.

Asimismo, se sugiere priorizar la adquisición de equipos adecuados a las condiciones específicas de la operación minera, considerando factores como altitud, condiciones climáticas y extensión del área de trabajo, a fin de garantizar la eficiencia del sistema.

b) Recomendaciones para la operación del sistema

Se recomienda aplicar de manera estricta el protocolo de operación establecido en la presente investigación, con el fin de asegurar la ejecución segura y eficiente de los vuelos. Esto incluye la planificación adecuada, la verificación de equipos y la evaluación de condiciones ambientales antes de cada operación.

Además, se sugiere establecer un programa de mantenimiento preventivo periódico para los drones y sus componentes, con el objetivo de reducir fallas técnicas y prolongar la vida útil de los equipos.

c) Recomendaciones para la gestión de la información

Se recomienda implementar sistemas de almacenamiento y gestión de datos que permitan organizar, analizar y utilizar la información recopilada de manera eficiente. La generación de reportes periódicos basados en evidencia visual contribuye a mejorar la toma de decisiones en materia de seguridad minera.

Asimismo, se sugiere integrar la información obtenida mediante drones con otros sistemas de gestión existentes en la operación minera, con el fin de fortalecer el control y seguimiento de condiciones de riesgo.

d) Recomendaciones en relación a los recursos humanos

Se recomienda capacitar de manera continua al personal encargado de la operación del sistema, no solo en el manejo de drones, sino también en el análisis de información y la identificación de riesgos. Esto permitirá maximizar el aprovechamiento de la tecnología implementada.

Además, se sugiere optimizar el uso de recursos humanos mediante la integración de funciones, como la combinación del rol de operador y analista, con el fin de reducir costos operativos sin afectar la calidad del monitoreo.

e) Recomendaciones para la sostenibilidad económica

Se recomienda evaluar de manera periódica los costos operativos (OPEX) y realizar ajustes en función de la eficiencia del sistema, buscando optimizar la relación costo beneficio.

Asimismo, se sugiere considerar la adquisición de equipos como activos propios (CAPEX), tal como se plantea en la presente investigación, debido a las ventajas en términos de disponibilidad, control operativo y reducción de costos a largo plazo en comparación con el alquiler de servicios.

f) Recomendaciones para futuras investigaciones

Se recomienda desarrollar estudios complementarios que incluyan la implementación real del sistema en una unidad minera, con el fin de validar los resultados obtenidos en la simulación.

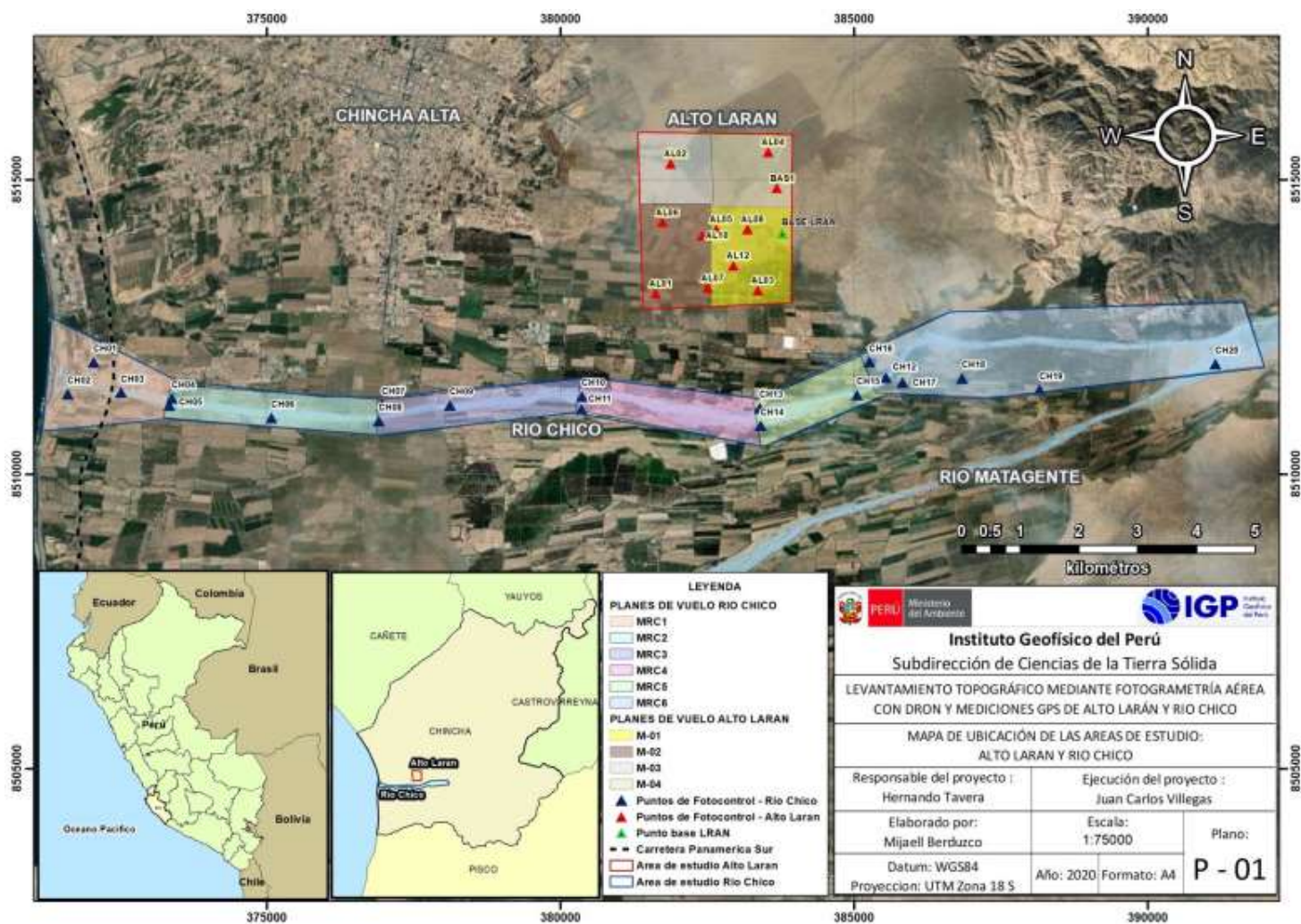
Asimismo, futuras investigaciones podrían incorporar el uso de tecnologías adicionales, tales como inteligencia artificial para el análisis automatizado de imágenes, sensores más avanzados o integración con sistemas de monitoreo en tiempo real.

También se sugiere evaluar el impacto del sistema en otros aspectos de la operación minera, como la productividad, el control ambiental o la optimización logística.

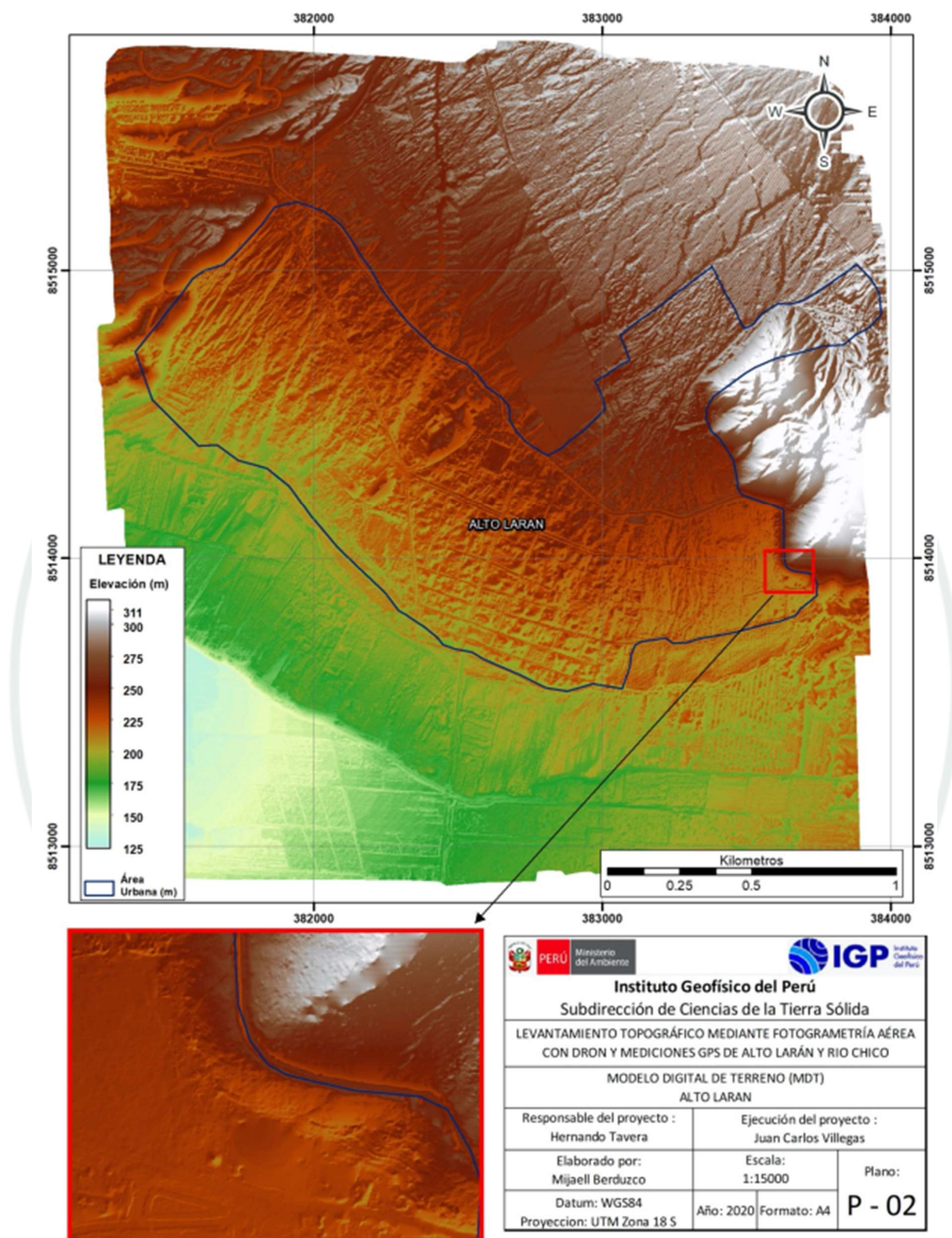
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ayma, M. (2020). Aplicación de un dron para mejorar los procesos productivos en Minera Chinalco Perú S.A.
- Chand, S., Kumar, A., & Singh, R. (2021). Application of drone technology in mining industry for safety and monitoring. *Journal of Mining Science*, 57(4), 601–610.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- Dang, T. M., Nguyen, H. T., & Bui, X. N. (2023). Applications of UAVs in mine industry: A scoping review. *Mining of Mineral Deposits*, 17(1), 80–92.
- Federal Aviation Administration. (2023). Unmanned Aircraft Systems (UAS) regulations and guidelines.
- International Labour Organization (ILO). (2021). Safety and health in mining.
- Osinermin. (2021). Uso de drones para supervisión de infraestructura minera y energética en el Perú. Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020).
- Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W., & Chen, C. (2019). A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(3), 320–333.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). Datos climatológicos del Perú.
- Vangu, G. M. (2022). The use of drones in mining operations. *Mining Revue*, 28(2), 45–52.

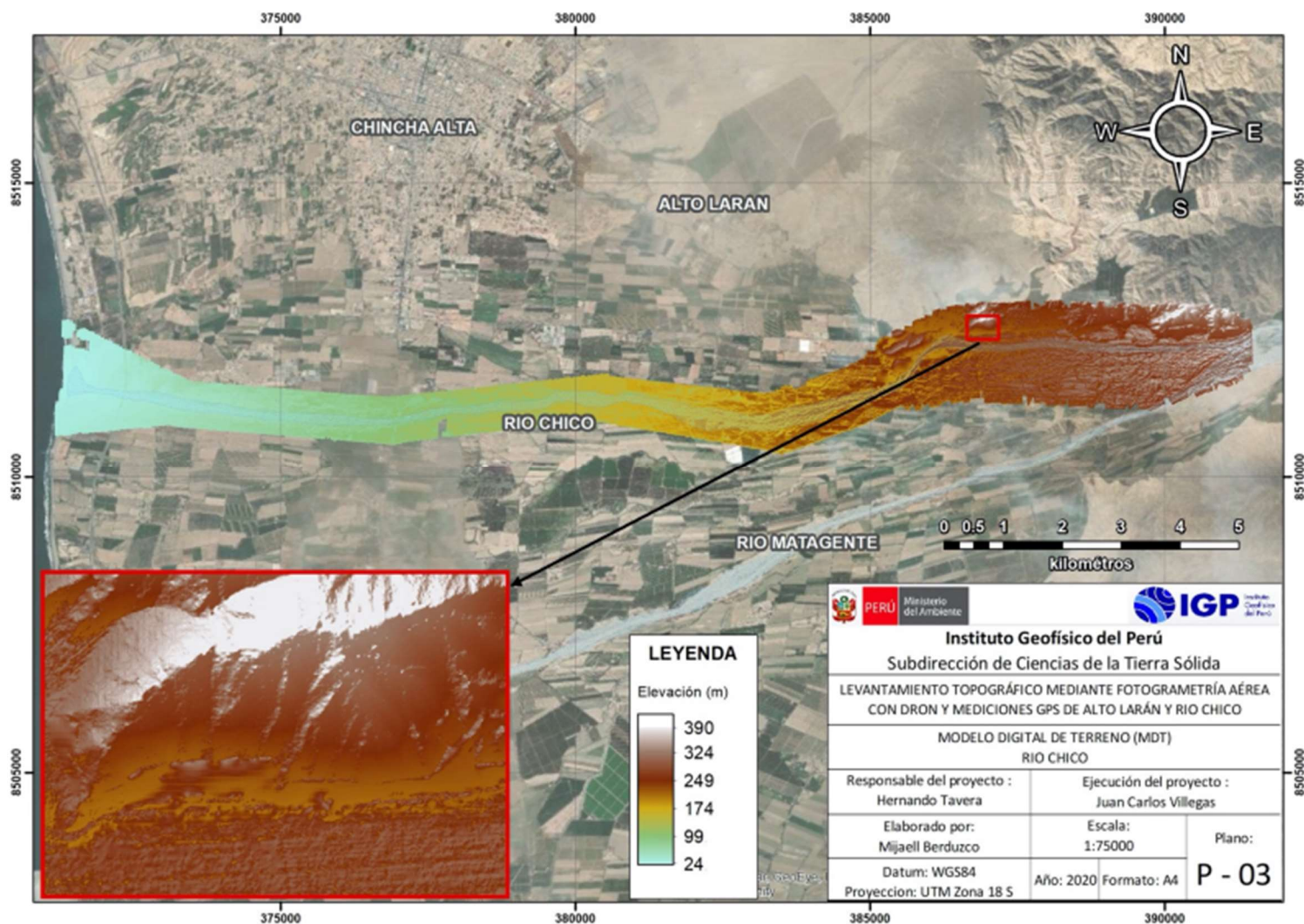
ANEXOS



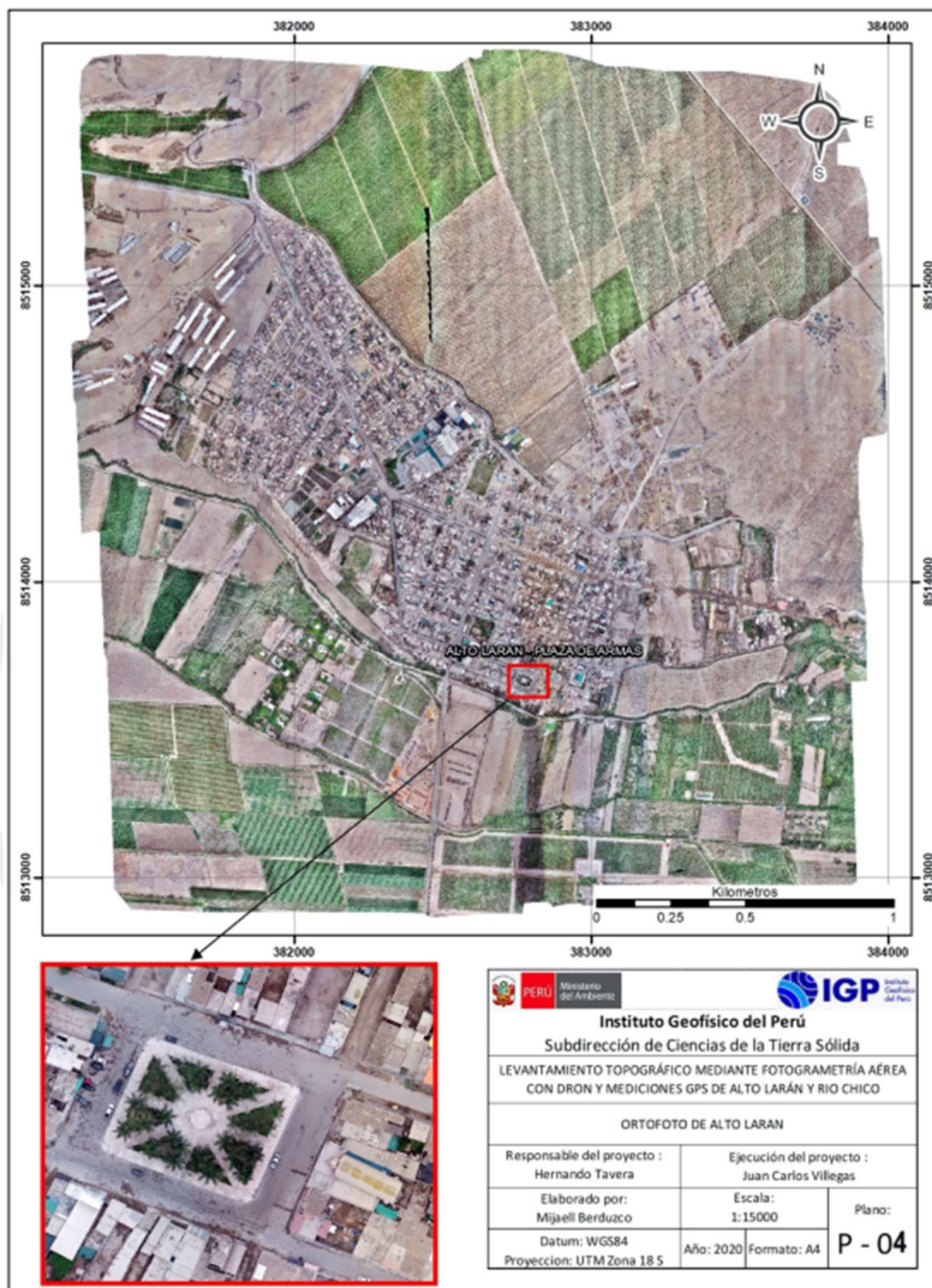
Anexo 1: Mapa de ubicación del área de estudio. La agrupación de los 4 planes de vuelo en la zona norte, corresponde a la zona de Alto Larán y la serie de 6 planes de vuelo en dirección W-E corresponden a Río Chico. Los triángulos rojos y verdes representan la ubicación de los puntos de fotocontrol de Alto Larán y Río Chico, asimismo, se muestra la estación base con código LRAN.



Anexo 2. Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio Alto Larán en la provincia de Chincha, departamento de Ica. Se aprecia la resolución gráfica alcanzada en el recuadro de color rojo.



Anexo 3 Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio Rio Chico en la provincia de Chinchay, departamento de Ica. Se aprecia también, la resolución grafica alcanzada en el recuadro de color rojo correspondiente al cauce del rio.



Mapa 4 Ortofoto de la zona de estudio de Alto Larán en la provincia de Chincha, departamento de Ica. En la parte inferior izquierda se incluye una captura de la ortofoto ampliada, que muestra la resolución alcanzada en la plaza del distrito de Alto Larán.