



Instituto
Europeo
de Posgrado

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PERSONAL EN EL
APIQUE 0 DE LA MINA EL SILENCIO – ARIS MINING, SEGOVIA, ANTIOQUIA**

Trabajo fin de estudio presentado por:	Gilma Elena Vivares Gelvez
Tipo de trabajo:	Proyecto Fin de Programa – Maestría en Gestión de Proyectos
Director/a:	Yazmid Adriana Carrillo Barbosa
Fecha:	Abril de 2026
Institución:	Instituto Europeo de Posgrado (IEP)
Ciudad:	Segovia (Antioquia, Colombia)

Instituto Europeo de Posgrado ©

Índice

1	Resumen	9
2	Abstract	10
3	Introducción.....	12
4	Objetivos	13
4.1	Objetivo general.....	13
4.2	Objetivos específicos.....	13
5	Metodología.....	15
5.1	Identificación y análisis del problema.....	15
5.2	Planificación de la solución.....	16
5.3	Definición de Alcance y Recursos	16
6	Identificación y descripción del problema al interior de la organización.....	17
6.1	Descripción de la empresa a intervenir	17
6.1.1	Misión	17
6.1.2	Visión.....	18
6.1.3	Mapa de procesos	18
6.1.4	Descripción del proceso a intervenir	19
6.1.5	Descripción del problema que presenta el proceso	19
7	Establecimiento de planes de acción para la solución del problema	21
7.1	Establecimiento de objetivos	21
7.2	Descripción de la solución.....	24
7.3	Secuencia de actividades para ejecución de la solución	27
7.4	Descripción de recursos necesarios para la ejecución de la solución	31
8	Referencias bibliográficas	73

Índice general

Indicación al lector: el índice automático que aparece a continuación se actualiza al abrir el documento en Microsoft Word seleccionando el campo y pulsando F9 (o haciendo clic derecho y eligiendo «Actualizar toda la tabla»). Si el campo aparece vacío, este es el comportamiento esperado en herramientas distintas a Word: el índice se generará automáticamente al abrirse en Word.

Índice general.....	4
Índice de tablas	6
Abreviaturas y siglas	7
1. Resumen	9
2. Abstract.....	10
3. Introducción	12
3.1. Objetivos	13
3.1.1. Objetivo general	13
3.1.2. Objetivos específicos	13
3.2. Metodología.....	15
3.2.1. Identificación y análisis del problema.....	15
3.2.2. Planificación de la solución	16
3.2.3. Definición de Alcance y Recursos	16
4. Identificación y descripción del problema al interior de la organización	17
4.1. Descripción de la empresa a intervenir	17
4.1.1. Misión	17
4.1.2. Visión	18
4.1.3. Mapa de procesos.....	18
4.1.4. Descripción del proceso a intervenir	19
4.1.5. Descripción del problema que presenta el proceso	19
5. Establecimiento de planes de acción para la solución del problema	21
5.1. Establecimiento de objetivos	21
5.2. Descripción de la solución.....	24
5.3. Secuencia de actividades para ejecución de la solución	27
5.4. Descripción de recursos necesarios para la ejecución de la solución.....	31
6. Definición del alcance de la solución, partes interesadas, cronograma y presupuestos	36

6.1. Alcance final de la solución	36
6.1.1. Entregables incluidos en el alcance	36
6.1.2. Exclusiones del alcance	38
6.1.3. Supuestos del proyecto	39
6.1.4. Restricciones del proyecto	39
6.2. Identificación de responsables de las actividades para ejecución	43
6.2.1. Matriz de asignación de responsabilidades (RACI)	43
6.2.2. Mapa de partes interesadas	46
6.2.3. Estrategia de comunicación del proyecto	47
6.3. Cronograma de ejecución	47
6.3.1. Diagrama de Gantt simplificado	47
6.3.2. Hitos críticos del proyecto.....	48
6.3.3. Camino crítico y dependencias.....	49
6.4. Presupuesto	52
6.4.1. Estructura presupuestal por categorías	52
6.4.2. Flujo presupuestal mensual.....	55
6.4.3. Análisis costo-beneficio preliminar.....	56
6.5. Análisis de riesgos del proyecto	59
6.5.1. Identificación de riesgos por categorías	59
6.5.2. Plan de mitigación de riesgos significativos y críticos.....	64
6.6. Trazabilidad del proyecto.....	67
7. Conclusiones	68
8. Recomendaciones.....	71
9. Referencias bibliográficas	73
10. Anexos.....	76
Anexo A. Resumen del DOSSIER de aumento de capacidad de la elevadora de personal	76
Anexo B. Reporte MRT de inspección magnetoinductiva del cable de izaje	78
Anexo C. Análisis de vibración del motor de la elevadora	79
Anexo D. Cierre de pendientes de la repotenciación de la elevadora.....	80
Anexo E. Prueba operacional del cuarto Skip de personal	81

Índice de tablas

Identificador	Título
Tabla 1	Indicadores de línea base y metas operativas del proyecto
Tabla 2	Dependencias críticas entre actividades del plan de acción
Tabla 3	Especificaciones técnicas mínimas de equipos críticos
Tabla 4	Balance mensual de horas-hombre disponibles vs requeridas (equipo interno)
Tabla 5	Criterios de aceptación medibles por entregable
Tabla 6	Matriz RACI del proyecto
Tabla 7	Competencias técnicas requeridas por rol del proyecto
Tabla 8	Mapa de partes interesadas del proyecto
Tabla 9	Cronograma de ejecución del proyecto (Diagrama de Gantt simplificado)
Tabla 10	Estimación PERT y holguras del cronograma del proyecto
Tabla 11	Presupuesto detallado del proyecto
Tabla 12	Flujo presupuestal mensual del proyecto (cifras en millones de pesos colombianos)
Tabla 13	Identificación y valoración de riesgos del proyecto
Tabla 14	Plan de mitigación de riesgos del proyecto

Tabla 15	Matriz de trazabilidad del proyecto
Tabla 16	Datos clave del DOSSIER (Aris Mining, 2026)
Tabla 17	Datos clave del reporte MRT del cable (Emcocables y Gualteros, 2025)
Tabla 18	Datos clave del análisis de vibración (Cadavid Patiño, 2026)
Tabla 19	Datos clave del informe de cierre de pendientes (Aris Mining, 2025a)
Tabla 20	Datos clave de la prueba del 4to Skip (Aris Mining, 2025b)

Abreviaturas y siglas

Sigla / abreviatura	Significado
ACI	American Concrete Institute
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials (ASTM International)
ATEX	ATmospheres EXplosibles (Directiva Europea 2014/34/UE)
CAPM	Critical Path Method
CCTV	Closed-Circuit Television (circuito cerrado de televisión)
COP	Pesos colombianos
DIN	Deutsches Institut für Normung
EF	Earliest Finish (final más temprano de actividad)

EN	Norma Europea (European Norm)
ES	Earliest Start (inicio más temprano de actividad)
ESG	Environmental, Social and Governance
FPS	Frames Per Second (cuadros por segundo)
HH	Horas-hombre
IEC	International Electrotechnical Commission
IEP	Instituto Europeo de Posgrado
IP67 / IP66	Ingress Protection (norma IEC 60529)
IPS	Improved Plow Steel (calidad de cable de izaje)
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
LF	Latest Finish (final más tardío de actividad)
LMA	Loss of Metallic Area (pérdida de área metálica del cable)
LS	Latest Start (inicio más tardío de actividad)
MRT	Magnetic Rope Testing (inspección magnetointductiva del cable)
NDT	Non-Destructive Testing (ensayos no destructivos)
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NTC	Norma Técnica Colombiana
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PMBOK	Project Management Body of Knowledge
PMI	Project Management Institute
PMP	Project Management Professional
QH&S	Quality, Health and Safety
RACI	Responsible, Accountable, Consulted, Informed

SS	Start-to-Start (relación de dependencia inicio-inicio)
SST	Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo
TFM	Trabajo Fin de Máster
TNR	Times New Roman
TRM	Tasa Representativa del Mercado (USD/COP)
USD	Dólares estadounidenses
WBS	Work Breakdown Structure

1. Resumen

El presente proyecto de investigación-acción tiene como propósito optimizar el sistema de transporte de personal en el Apique 0 de la Mina El Silencio, operada por Aris Mining en el municipio de Segovia, Antioquia, Colombia. La operación minera enfrenta un cuello de botella crítico generado por la alta densidad de colaboradores que se movilizan diariamente hacia los frentes de trabajo subterráneos, lo cual ocasiona congestión operativa, aumento de tiempos de espera, afectación de la eficiencia productiva e incremento de riesgos en situaciones de emergencia. Mediante la metodología de investigación-acción, se realizó un diagnóstico participativo del proceso de izaje de personal que incluyó la revisión de informes técnicos de pruebas operativas, el análisis de puntos críticos en la vía del apique y la identificación de limitaciones de seguridad del sistema actual de tres Skips. A partir de este diagnóstico, se formularon objetivos SMART orientados a la implementación de ayudas de visibilidad para el operador, la corrección de desniveles en la vía, la adecuación de zonas de embarque y desembarque, y el diseño de protocolos operativos para la incorporación segura de un cuarto Skip al tren de personal. El plan de acción propuesto contempla diez actividades secuenciales

con un horizonte de ejecución de nueve meses, involucrando a las áreas de Proyectos Mina, Operación, QH&S y contratistas especializados. Este proyecto busca reducir los tiempos de espera del personal en al menos un 25% y mejorar sustancialmente las condiciones de seguridad en el transporte vertical de trabajadores.

Palabras clave: transporte de personal, minería subterránea, investigación-acción, optimización de procesos, seguridad minera, sistema de izaje, Skip, gestión de proyectos.

2. Abstract

This action research project aims to optimize the personnel transport system in Apique 0 at the El Silencio Mine, operated by Aris Mining in Segovia, Antioquia, Colombia. The mining operation faces a critical bottleneck caused by the high density of workers commuting daily to underground work fronts, resulting in operational congestion, increased waiting times, reduced productive efficiency, and heightened risks during emergency situations. Using the action research methodology, a participatory diagnosis of the personnel hoisting process was conducted, including the review of technical reports from operational tests, the analysis of critical points along the shaft track, and the identification of safety limitations in the current three-Skip system. Based on this diagnosis, SMART objectives were formulated aimed at implementing visibility aids for the operator, correcting track level differences, improving boarding and disembarking areas, and designing operational protocols for the safe incorporation of a fourth Skip into the personnel train. The proposed action plan includes ten sequential activities with a nine-month execution horizon, involving the areas of Mine Projects, Operations, QH&S, and specialized contractors. This project seeks to reduce

personnel waiting times by at least 25% and substantially improve safety conditions in the vertical transport of workers.

Keywords: personnel transport, underground mining, action research, process optimization, mining safety, hoisting system, Skip, project management.

Instituto Europeo de Posgrado

3. Introducción

Este proyecto de aplicación en investigación-acción se centra en la identificación y resolución de un problema operativo crítico en el sistema de transporte de personal del Apique 0 de la Mina El Silencio, perteneciente al complejo minero de Segovia operado por Aris Mining en el departamento de Antioquia, Colombia. La intervención permite integrar la teoría y la práctica en un entorno real de minería subterránea, donde la eficiencia en el movimiento de trabajadores hacia los frentes de trabajo es un factor determinante para la productividad y la seguridad de la operación (Kerzner, 2022).

La Mina El Silencio forma parte de uno de los distritos mineros de oro más importantes de América Latina, con más de 150 años de historia productiva (Aris Mining, 2025). En la actualidad, la operación enfrenta un cuello de botella en el Apique 0 relacionado con la capacidad limitada del sistema de izaje de personal, el cual fue diseñado originalmente para tres Skips y presenta restricciones significativas cuando se intenta incorporar un cuarto vagón para aumentar la capacidad de transporte. Las pruebas operativas realizadas en agosto de 2025 evidenciaron problemas de visibilidad del operador, desniveles en la vía, y limitaciones en las zonas de embarque que comprometen la seguridad y la eficiencia del sistema.

Mediante un enfoque de investigación-acción (Lewin, 1946; Reason y Bradbury, 2008), se desarrollaron habilidades de diagnóstico, análisis y planificación orientadas a mejorar la eficiencia y efectividad de este proceso crítico en la organización. La estructura del proyecto incluye una revisión exhaustiva del contexto organizacional y la implementación de una solución factible que responde a las necesidades de la organización y optimiza su desempeño.

3.1. Objetivos

3.1.1. Objetivo general

El objetivo principal del proyecto es desarrollar una solución operativa integral al cuello de botella en el sistema de transporte de personal del Apique 0 de la Mina El Silencio, Aris Mining. La intervención se orienta no solo a corregir los problemas de capacidad, visibilidad y seguridad identificados, sino también a proporcionar una propuesta sostenible que pueda integrarse a la estructura operativa de la organización, elevando los niveles de eficiencia en la movilización de trabajadores y alcanzando los estándares de seguridad requeridos en la operación minera subterránea (Project Management Institute [PMI], 2021).

3.1.2. Objetivos específicos

Para cumplir con el objetivo general, se establecieron tres objetivos específicos:

1. Realizar una identificación detallada del problema de transporte de personal en el Apique 0, determinando las causas raíz de la congestión operativa mediante técnicas de diagnóstico participativo (Stringer, 2014), las limitaciones del sistema de Skips y los riesgos de seguridad asociados, evaluando su impacto en el desempeño general de la operación minera.
2. Diseñar un plan de acción estructurado con objetivos SMART, actividades específicas y recursos definidos que permitan la incorporación segura del cuarto Skip, la implementación de ayudas de visibilidad, la corrección de infraestructura y el establecimiento de protocolos operativos (Kemmis y McTaggart, 2005).
3. Establecer el alcance de la intervención, definiendo responsables, cronograma y presupuesto, para asegurar que la implementación sea organizada, efectiva y alineada con los estándares de seguridad de Aris Mining (Kerzner, 2022).

Instituto Europeo de Posgrado ©

3.2. Metodología

El proyecto se desarrolló mediante la metodología de investigación-acción, fundamentada en los principios establecidos por Lewin (1946) y posteriormente ampliados por Kemmis y McTaggart (2005). Según Carr y Kemmis (1986), esta metodología constituye una herramienta emancipadora que permite abordar cuestiones de poder, justicia social y autonomía en contextos organizacionales. La investigación-acción facilita la colaboración continua entre los participantes y proporciona un enfoque sistemático para identificar problemas, formular hipótesis y aplicar soluciones en un contexto real, ajustando las estrategias conforme se avanza en el proyecto (Reason y Bradbury, 2008). Esta metodología proporcionó un marco flexible y participativo para ejecutar el proyecto de manera estructurada, generando una intervención bien fundamentada y con alto potencial de impacto (Stringer, 2014).

El desarrollo del proyecto se estructuró en tres etapas secuenciales, cada una de las cuales abordó un aspecto específico de la intervención (Creswell, 2014). En la primera etapa, se identificó y analizó el problema organizacional, incluyendo una descripción detallada de la organización, su misión, visión y el proceso específico afectado. La segunda etapa se centró en la planificación de la solución, estableciendo objetivos y actividades concretas para abordar el problema. En la tercera fase, se definieron aspectos operativos como el cronograma, el presupuesto y la asignación de roles, siguiendo las buenas prácticas del Project Management Institute (PMI, 2021).

3.2.1. Identificación y análisis del problema

En la primera etapa, se realizó un análisis exhaustivo de la organización y del contexto en el cual se desarrolla el proceso de transporte de personal en el Apique 0. Se documentó el

problema identificando sus causas raíz, efectos y puntos críticos que afectaban el desempeño del proceso (Stringer, 2014). Este diagnóstico inicial fue esencial para estructurar la solución y asegurar que la intervención respondiera de manera precisa a las necesidades de la organización.

El diagnóstico se fundamentó en: (a) Revisión documental del Informe de Prueba del 4to Skip de Personal realizado el 9 de agosto de 2025, que documenta los resultados de las pruebas operativas en condiciones reales; (b) Análisis DOFA del sistema de transporte de personal, siguiendo la metodología propuesta por David (2011) para la evaluación de factores internos y externos que afectan a una organización; y (c) Observación directa de las condiciones físicas de la vía, los puntos críticos de pérdida de visibilidad y las zonas de embarque y desembarque, como técnica cualitativa de diagnóstico (Creswell, 2014).

3.2.2. Planificación de la solución

En la segunda etapa, se desarrolló un plan de acción detallado que incluyó la definición de objetivos específicos SMART (Específicos, Medibles, Alcanzables, Relevantes y Temporales) y una secuencia de actividades que permitiría mitigar o resolver el problema identificado (Kemmis y McTaggart, 2005). Esta fase incluyó el diseño de una estrategia de ejecución organizada y estructurada que facilitara el logro de los objetivos propuestos y maximizara la eficiencia del proceso intervenido. La planificación detallada de actividades y recursos fue clave para asegurar una implementación precisa y efectiva (Kerzner, 2022).

3.2.3. Definición de Alcance y Recursos

La tercera etapa se enfocó en delimitar el alcance de la intervención y los recursos necesarios (Greenwood y Levin, 2007). Se establecieron responsables para cada actividad, y se elaboró un cronograma de ejecución para controlar el avance de la implementación.

Asimismo, se desarrolló un presupuesto que detalló los costos asociados a cada fase, permitiendo optimizar la asignación de recursos (PMI, 2021). Esta fase aseguró que todas las variables críticas estuvieran alineadas para una ejecución sin interrupciones.

4. Identificación y descripción del problema al interior de la organización

Aris Mining Corporation es una empresa canadiense dedicada a la producción de oro con operaciones en Colombia y Guyana (Aris Mining, 2025). En Colombia, su operación principal es el complejo minero de Segovia, ubicado en el municipio de Segovia, departamento de Antioquia, aproximadamente 180 kilómetros al noreste de Medellín. El complejo comprende cuatro minas subterráneas activas: El Silencio, Sandra K, Providencia y Carla, situadas en un distrito minero histórico con más de 150 años de producción aurífera continua.

La operación de Segovia se clasifica como una mina de alto tenor a nivel mundial, con una ley de reserva de 10,7 g/t de oro. En 2025, la operación produjo 227.762 onzas de oro, con una proyección para 2026 de entre 265.000 y 300.000 onzas. La capacidad de procesamiento es de 3.000 toneladas por día (tpd). Aris Mining emplea un modelo donde aproximadamente el 40% de su fuerza laboral está compuesta por socios mineros contratistas (CMP) formalizados, beneficiando a más de 12.000 familias (Aris Mining, 2024). La empresa cotiza en TSX: ARIS y NYSE: ARMN, y forma parte del Pacto Global de las Naciones Unidas.

4.1. Descripción de la empresa a intervenir

4.1.1. Misión

Aris Mining está orientada a crear valor que beneficie a todas las partes interesadas, equilibrando las expectativas de los accionistas con las necesidades de los empleados, las

comunidades anfitrionas y el medio ambiente. La empresa promueve la formalización de la minería a pequeña escala como un proceso que permite a todos los mineros operar de manera legal, segura y responsable, protegiéndolos a ellos y al ambiente (Aris Mining, 2024). Su estilo corporativo es emprendedor, ágil, enfocado en operaciones estables y optimizadas, y consciente de los principios ESG que definen un negocio responsable.

4.1.2. Visión

Aris Mining fue establecida en septiembre de 2022 con la visión de crear una empresa minera de oro líder y sostenible en las Américas, que combine la producción actual y la generación de flujo de efectivo con un crecimiento transformacional a partir de la expansión de sus activos operativos y proyectos de exploración y desarrollo. La empresa aspira a alcanzar una producción anual de aproximadamente 500.000 onzas de oro para el segundo semestre de 2026, consolidándose como una de las principales productoras de oro en América Latina (Aris Mining, 2025).

4.1.3. Mapa de procesos

La operación de la Mina El Silencio se estructura en torno a procesos interrelacionados que abarcan desde la exploración geológica hasta el procesamiento del mineral (Aris Mining, 2025). Los procesos estratégicos incluyen: planificación minera y desarrollo de infraestructura, gestión de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente (QH&S), y gestión de relaciones comunitarias y formalización de mineros. Los procesos operativos (cadena de valor) son: (1) Exploración geológica y delimitación de vetas, (2) Desarrollo de túneles y frentes de trabajo, (3) Transporte de personal hacia frentes de trabajo [PROCESO A INTERVENIR], (4) Extracción de mineral, (5) Izaje de mineral y estéril a superficie, (6) Procesamiento en planta,

y (7) Despacho de producto final. Los procesos de apoyo comprenden: mantenimiento mecánico y eléctrico, gestión de contratistas y socios mineros, servicios técnicos y logística.

4.1.4. Descripción del proceso a intervenir

El proceso por intervenir es el sistema de transporte vertical de personal en el Apique 0 de la Mina El Silencio. Este apique constituye la vía principal de ingreso y salida de trabajadores desde la bocamina hasta los niveles de trabajo subterráneos (nivel 0 a nivel 28). El sistema funciona mediante un tren de Skips (vagones mineros suspendidos de un cable de acero) operado por un elevador (winche) desde la cabina de control en superficie (Aris Mining, 2025).

Componentes del sistema: (a) Tren de 3 Skips conectados mediante grilletes y destorcedores; (b) Elevadora (winche) con motor y cable de acero; (c) Frenos Vulkan (principal) y de servicio (auxiliar), más frenos autónomos por Skip; (d) Comunicación por radio bidireccional y timbres; y (e) Vía de rieles con puntos de amarre y zonas de embarque en los plomos.

El operador controla el tren en tres velocidades, con paradas principales en los niveles 5, 18, 21 y 28. Áreas involucradas: Operación Mina, Proyectos Mina, QH&S, NAVAR Asociados S.A.S y PSIE Ingenieros.

4.1.5. Descripción del problema que presenta el proceso

La operación presenta un cuello de botella crítico en el Apique 0, generado por la alta densidad de colaboradores que se movilizan diariamente. Este tipo de restricción operativa es común en operaciones mineras subterráneas de alta producción y requiere un enfoque sistemático de gestión de proyectos para su resolución (Kerzner, 2022). Las pruebas operativas

del 9 de agosto de 2025, documentadas en el Informe Prueba 4to Skip Personal (Aris Mining, 2025), revelaron las siguientes causas raíz:

1. Capacidad limitada: El sistema de 3 Skips es insuficiente para la demanda de movilización de trabajadores. La incorporación de un 4to Skip es técnicamente factible, pero presenta restricciones que no han sido resueltas.
2. Pérdidas de visibilidad del operador: Se registraron pérdidas de 1 a 3 segundos en los niveles 6, 13, 20, 21-22 y 23, y una pérdida crítica de 5 segundos entre los niveles 25 y 26.
3. Desnivel en la vía entre niveles 15 y 16 que genera desgaste en ruedas y rieles.
4. Imposibilidad de instalar anclajes auxiliares por separación de destorcedores (~940 mm), limitando el transporte al 1er Skip.
5. Zonas de embarque inadecuadas en plomos 0, 18, 21 y 28.
6. Sistema de comunicación insuficiente para la coordinación segura de 4 Skips.

Efectos: aumento de tiempos de espera, afectación de productividad, incremento de riesgos de seguridad —evidenciado con la activación del protocolo de emergencias en Nivel 21 durante las pruebas—, y restricción al crecimiento hacia 300.000 oz/año.

Se aplicó un análisis FODA (David, 2011) del proceso de transporte de personal. Fortalezas: infraestructura existente funcional, equipo técnico experimentado, datos de pruebas disponibles, sistemas de frenado en buen estado. Debilidades: capacidad limitada a 3 Skips, pérdidas de visibilidad, desnivel sin corregir, anclajes incompatibles, zonas de embarque

reducidas. Oportunidades: plan de crecimiento de Aris Mining que justifica la inversión, tecnología disponible en el mercado, experiencia de contratistas especializados. Amenazas: presión por incrementar producción sin resolver restricciones, condiciones geológicas variables, riesgos de seguridad acumulados.

5. Establecimiento de planes de acción para la solución del problema

Con base en el diagnóstico del problema de transporte de personal en el Apique 0, se presenta el plan de acción estructurado siguiendo los lineamientos de Stringer (2014) para la formulación de planes en investigación-acción, e incorporando las buenas prácticas del PMI (2021) para la gestión de proyectos.

5.1. Establecimiento de objetivos

Los objetivos se formularon bajo la metodología SMART, siguiendo el enfoque propuesto por Kemmis y McTaggart (2005) para la planificación en investigación-acción:

Objetivo General del Plan de Acción: Optimizar el sistema de transporte de personal en el Apique 0 de la Mina El Silencio para reducir los tiempos de espera del personal en al menos un 25% y garantizar condiciones de seguridad que permitan la operación del tren de 4 Skips, en un periodo de 9 meses.

OE1: Implementar un sistema integral de ayudas de visibilidad (cámaras industriales, espejos convexos e iluminación LED) para el operador de la elevadora, logrando la eliminación del 100% de los puntos ciegos identificados en los niveles 6, 13, 20, 21-22, 23 y 25-26, en un plazo de 3 meses desde el inicio del proyecto.

OE2: Corregir las deficiencias de infraestructura en la vía del apique (desnivel entre niveles 15 y 16) y adecuar las zonas de embarque y desembarque en los plomos 0, 18, 21 y 28, en un plazo de 4 meses desde el inicio del proyecto.

OE3: Diseñar e implementar protocolos operativos para el abordaje seguro del 4to Skip, incluyendo restricciones por nivel de destino y procedimientos de emergencia actualizados, y capacitar al 100% del personal involucrado, en un plazo de 2 meses desde la finalización de OE1 y OE2.

El veinticinco por ciento de reducción es estructural y se deriva matemáticamente de la razón cuatro tercios entre la capacidad ampliada y la actual: independientemente del aforo específico del cambio de turno, el sistema de cuatro Skips disminuye en una cuarta parte el tiempo total de movilización siempre que las condiciones de visibilidad, infraestructura y operación habiliten el cuarto Skip de manera segura. Por ello el indicador macro (tiempo total de movilización) y el indicador micro (tiempo imputable por trabajador) se mueven en proporción idéntica frente a la línea base.

Para validar cuantitativamente la meta del veinticinco por ciento de reducción del tiempo de movilización del personal, se establecen a continuación los indicadores de línea base frente a los cuales se medirá el éxito del proyecto. La línea base operativa se construye a partir de los datos suministrados por el equipo técnico de Aris Mining y deberá ser refinada mediante el levantamiento cuantitativo previsto en la Actividad 1 del cronograma (Diagnóstico participativo complementario).

Tabla 1. Indicadores de línea base y metas operativas del proyecto.

Indicador operativo	Línea base actual	Meta proyectada	Variación	Fuente / método
Tasa de servicio ponderada del Apique 0	126 p/h	168 p/h	+33,3%	Cálculo: $0,6 \cdot 90 + 0,4 \cdot 180 \rightarrow 0,6 \cdot 120 + 0,4 \cdot 240$; aforo 60% nivel 28 / 40% niveles superiores
Tiempo total para movilizar 500 trabajadores	3 h 58 min	2 h 59 min	-25,0%	Razón estructural 4/3 entre Skips actuales y proyectados
Tiempo medio imputable al subsistema de izaje por trabajador	≈ 28 s/trab	≈ 21 s/trab	-25,0%	Derivado del tiempo total y aforo 500 trabajadores
Skips operativos en el tren de personal	3	4	+33,3%	Habilitación del 4to Skip tras intervenciones de visibilidad e infraestructura
Puntos ciegos de visibilidad para el operador de elevadora	7 (niveles 6, 13, 20, 21–22, 23, 25–26)	0	-100%	Informe Prueba 4to Skip Personal (9-ago-2025)
Tolerancia de desnivel en vía nivel 15–16	Desnivel observado	≤ 5 mm/m (0,5%)	Cumplimiento	Especificación de aceptación civil (Sección 6.1)

5.2. Descripción de la solución

La solución propuesta consiste en una intervención integral en tres frentes, diseñada bajo el ciclo iterativo de la investigación-acción: planificación, acción, observación y reflexión (Lewin, 1946; Carr y Kemmis, 1986):

Frente 1 – Intervención Tecnológica (Sistema de Visibilidad y Monitoreo): Instalación de 6-8 cámaras industriales IP67 resistentes al ambiente minero con transmisión en tiempo real a un monitor en la cabina del operador; colocación de 6-8 espejos convexos industriales en tramos con curvaturas (niveles 7, 12, 25-26); mejora de la iluminación mediante luminarias LED industriales en zonas oscuras del apique; e integración de un sistema CCTV de monitoreo en la cabina de la elevadora.

Frente 2 – Intervención de Infraestructura (Corrección de Vía y Adecuación de Zonas): Corrección del desnivel entre los niveles 15 y 16 mediante trabajos de nivelación; ampliación y adecuación de las zonas de embarque y desembarque en los plomos de los niveles 0, 18, 21 y 28, incluyendo señalización, barandas de seguridad y ampliación del espacio útil; y diseño e instalación de anclajes auxiliares de seguridad compatibles con la nueva separación entre Skips (~940 mm).

Frente 3 – Intervención Operativa (Protocolos y Capacitación): Diseño de protocolos de abordaje seguro del 4to Skip con restricciones según nivel de destino; actualización de procedimientos de emergencia incorporando las lecciones aprendidas de la prueba del 9 de agosto de 2025; programa de capacitación integral para operadores, supervisores y trabajadores; y mejora del sistema de comunicación mediante señales visuales complementarias al radio/timbre existente.

A continuación se justifica técnicamente la elección de cada componente de la solución frente a las alternativas evaluadas, vinculando cada decisión con la causa raíz documentada en los informes técnicos disponibles.

Justificación del frente tecnológico (cámaras IP67, espejos convexos y LED ATEX). El Informe de la prueba operativa del 9 de agosto de 2025 (Aris Mining, 2025) documentó siete puntos con pérdidas de visibilidad para el operador en los niveles 6, 13, 20, 21–22, 23 y, especialmente, entre los niveles 25 y 26 con pérdida de hasta cinco segundos de campo visual. Las alternativas evaluadas fueron tres: instalar únicamente espejos convexos, instalar únicamente iluminación LED, o reemplazar la elevadora completa. La opción de espejos solos se descartó porque no compensa la oclusión geométrica entre los niveles 25 y 26, donde la curvatura del apique impide la línea de visión directa; la iluminación sola no resuelve la oclusión de geometría de la vía; y el reemplazo total de la elevadora contradice el estado de repotenciación del sistema, reportado en el Informe de Cierre de Pendientes (Aris Mining, 2025) con un noventa y siete por ciento de completitud al 29 de noviembre de 2025. La combinación de cámaras IP67 con resolución mínima 1080p a 30 FPS, espejos convexos en zonas de curvatura e iluminación LED antideflagrante ATEX zona I/II según los lineamientos del Decreto 1886 de 2015 sobre seguridad minera subterránea, ataca de forma sistémica las tres dimensiones físicas que producen los puntos ciegos.

Justificación del frente de infraestructura (nivelación de vía y adecuación de plomos). La causa raíz del riesgo de carga desigual sobre ruedas y rieles es el desnivel observado entre los niveles 15 y 16, registrado en el Informe Prueba 4to Skip. Las alternativas evaluadas fueron el reemplazo total del carro y los Skips o la intervención puntual de la vía. La intervención puntual se prefiere por dos razones técnicas demostrables. Primero, el sistema mecánico de

izaje está validado en sus componentes críticos: motor WEG W22 de 400 HP, reductor NORD SK15307 con relación 63,82:1, cable de izaje 6×19 IPS FC con alma de fibra EIP de 38,74 mm de diámetro y carga de rotura de 83 toneladas por metro lineal, y frenos SIBRE TE 500 con par nominal de 5 400 Nm complementados por el freno de emergencia VULKAN 10C de 61 000 Nm (Aris Mining, 2026). Segundo, la inspección magnetointductiva del cable (MRT) realizada el 17 de diciembre de 2025 conforme a las normas EN 12927:2019 y ASTM E1571-21 reportó cable nuevo con cero por ciento de pérdida de área metálica en las áreas evaluadas a seis y treinta veces el diámetro (Emcocables y Gualteros, 2025). En estas condiciones, la intervención puntual de la vía y la adecuación de plomos en los niveles 0, 18, 21 y 28 son técnicamente proporcionales a la causa raíz, mientras que el reemplazo total generaría costos órdenes de magnitud superiores y obligaría a recertificar el sistema completo.

Justificación del frente operativo (protocolos, capacitación y mantenimiento preventivo complementario). Tres causas raíz convergen en este frente. Primera, el Informe de Análisis de Vibraciones del 20 de enero de 2026 (Cadavid Patiño, 2026) clasificó el motor en condición normal conforme a la norma ISO 20816-3 con una velocidad eficaz de vibración de 5,31 mm/s en el eje libre horizontal, dentro del límite de 7,1 mm/s para máquinas grandes; no obstante, identificó fricción en chumaceras del motor con recomendación expresa de lubricación preventiva e instalación de sistema automático de engrase, lo cual justifica incluir el componente de mantenimiento preventivo. Segunda, las pruebas operativas del 9 de agosto de 2025 evidenciaron que la separación de aproximadamente 940 mm entre los destorcedores Crosby instalados con el cuarto Skip generó un riesgo no contemplado de manipulación durante el embarque, riesgo que sólo puede mitigarse mediante protocolos de abordaje restringidos por nivel de destino. Tercera, la normativa colombiana (Decreto 1886 de 2015)

exige procedimientos documentados y capacitación certificada para todo cambio significativo en sistemas de izaje subterráneo, condición que se cumple con la introducción del cuarto Skip.

Justificación del paralelismo de los tres frentes. Las causas raíz son interdependientes: habilitar el cuarto Skip sin mejorar la visibilidad agrava el riesgo de incidente entre los niveles 25 y 26; corregir el desnivel sin protocolos para los nuevos puntos de embarque deja sin atender la dimensión humana del cambio; y desarrollar protocolos sin las condiciones físicas previas los volvería letra muerta operativa. La guía PMBOK (PMI, 2021) recomienda paralelismo cuando las dependencias son del tipo Inicio-Inicio (SS) y los riesgos de no coordinación entre frentes superan los riesgos de coordinación, condición que se cumple en este caso y que se materializa en el cronograma de la Sección 6.3.

5.3. Secuencia de actividades para ejecución de la solución

La secuencia de actividades se organizó cronológicamente siguiendo las buenas prácticas de gestión de proyectos (PMI, 2021; Kerzner, 2022) y los principios de la investigación-acción participativa (Greenwood y Levin, 2007):

Actividad 1 (Mes 1): Diagnóstico participativo complementario – Realizar entrevistas a operadores de elevadora, supervisores de turno y personal de plomos; aplicar análisis FODA detallado (David, 2011); establecer línea base cuantitativa de tiempos de espera. Responsable: Equipo TFM + QH&S. Indicador: Informe de diagnóstico completado.

Actividad 2 (Mes 1-2): Diseño técnico del sistema de visibilidad – Elaborar planos de ubicación de cámaras, espejos e iluminación; definir especificaciones técnicas; obtener cotizaciones. Responsable: Proyectos Mina + PSIE Ingenieros. Indicador: Plano técnico aprobado.

Actividad 3 (Mes 2-3): Instalación de cámaras, espejos e iluminación – Montaje de equipos, cableado, conexión al sistema CCTV y pruebas de funcionamiento. Responsable: PSIE Ingenieros. Indicador: 100% equipos operativos.

Actividad 4 (Mes 2-3): Corrección de desnivel de vía (niveles 15-16) – Trabajos de nivelación de rieles y verificación topográfica. Responsable: NAVAR Asociados. Indicador: Desnivel corregido.

Actividad 5 (Mes 3-5): Adecuación de zonas de embarque y desembarque – Ampliación de plomos (niveles 0, 18, 21, 28), señalización y barandas. Responsable: Operación Mina + NAVAR. Indicador: Zonas aprobadas por QH&S.

Actividad 6 (Mes 3-4): Diseño e instalación de anclajes auxiliares – Diseño compatible con separación de 940 mm, fabricación, instalación y pruebas. Responsable: Proyectos Mina. Indicador: Anclajes validados.

Actividad 7 (Mes 5-6): Diseño de protocolos operativos y de emergencia – Protocolos de abordaje seguro por nivel de destino y actualización de procedimientos. Responsable: QH&S + Operación. Indicador: Protocolos aprobados.

Actividad 8 (Mes 6-7): Capacitación integral al personal – Formación en sistema de monitoreo, nuevos protocolos y procedimientos de abordaje (Stringer, 2014). Responsable: QH&S. Indicador: 100% personal capacitado.

Actividad 9 (Mes 7-8): Pruebas de validación integral – Pruebas del sistema completo con 4 Skips, evaluación de visibilidad, tiempos, anclajes y protocolos. Responsable: Todas las áreas. Indicador: Reducción de tiempos $\geq 25\%$.

Actividad 10 (Mes 8-9): Evaluación de resultados y cierre – Comparar resultados contra línea base, documentar lecciones aprendidas, identificar oportunidades de mejora continua (Reason y Bradbury, 2008). Responsable: Equipo TFM. Indicador: Informe final.

Para precisar la lógica de programación entre actividades, en particular entre el frente de infraestructura física (Actividades 4, 5 y 6) y el frente de validación operativa (Actividad 9), se documentan a continuación las dependencias críticas con su tipo, holgura permisible y riesgo asociado a un eventual solapamiento.

Tabla 2. Dependencias críticas entre actividades del plan de acción.

Actividad predecesora	Actividad sucesora	Tipo de dependencia	Holgura permisible	Riesgo si se solapa
1. Diagnóstico participativo	2. Diseño técnico de visibilidad	FS (Final-Inicio)	0 días	Diseño sin línea base no es defendible ante stakeholders
2. Diseño técnico aprobado	3. Instalación cámaras/espejos/LED	FS	5 días	Instalación previa a aprobación obliga a re-trabajo y desperdicia inversión
3. Instalación visibilidad	9. Pruebas integrales	FS	0 días (M7)	Sin sistema instalado no hay objeto de prueba

4. Nivelación 15–16	5. Adecuación de plomos	SS+1 mes	Permite paralelismo	Cuadrilla NAVAR debe coordinar uso compartido de equipos topográficos y materiales
5. Adecuación de plomos	6. Anclajes auxiliares	FS	0 días	Anclajes requieren plomos terminados para fijación final
6. Anclajes auxiliares	9. Pruebas integrales con 4 Skips	FS	0 días	Pruebas requieren la totalidad del frente de infraestructura cerrado
7. Diseño protocolos	8. Capacitación al personal	FS	0 días	Capacitación con protocolo no aprobado expone a invalidación legal
8. Capacitación al personal	9. Pruebas integrales	FS	5 días	Operadores deben dominar protocolos antes del primer ciclo con 4 Skips
Frente infraestructura completo (4+5+6)	9. Pruebas integrales	FS conjunta	0 días (M7)	Pruebas integrales requieren visibilidad, infraestructura y personal capacitado

9. Pruebas integrales	10. Evaluación y cierre	FS	0 días	Cierre depende de aceptación del sistema y reducción $\geq 25\%$ verificada
-----------------------	-------------------------	----	--------	---

Las Actividades 4, 5 y 6 conforman el frente de infraestructura física, ejecutado por el contratista NAVAR Asociados S.A.S, con relaciones de tipo Inicio-Inicio desfasadas un mes calendario. El cierre del frente al final del Mes 4 constituye el insumo crítico para la Actividad 9 (Pruebas integrales en Mes 7–8). Para mitigar el riesgo de retraso en cualquiera de las tres sub-actividades del frente, se establece un colchón de cuatro semanas entre el Hito 3 (cierre del frente, Mes 4) y el inicio de la Actividad 9 (Mes 7). Este buffer permite absorber retrasos parciales sin comprometer la fecha objetivo del Mes 9, y se materializa explícitamente en el análisis de holguras y estimación PERT presentado en la Sección 6.3.

5.4. Descripción de recursos necesarios para la ejecución de la solución

La identificación de recursos se realizó siguiendo la clasificación propuesta por Greenwood y Levin (2007) para proyectos de investigación-acción, complementada con los lineamientos del PMI (2021) para la estimación de recursos en proyectos:

Recursos Humanos: 2 Ingenieros de Proyectos Mina para diseño técnico y supervisión (50% de dedicación durante 6 meses); 2 profesionales QH&S para evaluación de riesgos, protocolos y capacitación (40% durante 7 meses); 2 Supervisores de Operación para coordinación y validación operativa (30% durante 8 meses); 4 Operadores de elevadora para participación en diagnóstico, pruebas y capacitación (40 horas por operador); 5-8 personas del equipo contratista NAVAR para obras civiles (dedicación completa durante 3 meses); 3-4

personas del equipo contratista PSIE para instalación eléctrica (dedicación completa durante 2 meses).

Recursos Materiales: 6-8 cámaras industriales IP67 resistentes a humedad, polvo y vibración, con visión nocturna; 6-8 espejos convexos industriales de 60-80 cm en material anticorrosivo; 10-15 luminarias LED industriales antideflagrantes; 1 monitor de video multi-cámara de 21" más 1 de respaldo; cableado industrial para transmisión de video; material de nivelación de vía para niveles 15-16; material para adecuación de 4 plomos (concreto, barandas metálicas, señalización); 3 juegos de anclajes auxiliares de seguridad para separación de 940 mm.

Recursos Tecnológicos: Software de monitoreo por video (CCTV) con grabación y visualización en tiempo real; equipo topográfico para medición y verificación; sistema de señales luminosas complementario.

Recursos Financieros: El presupuesto detallado será desarrollado en la Sección 6.4, siguiendo los métodos de estimación de costos recomendados por Kerzner (2022) para proyectos de mejora de infraestructura.

Como complemento de la descripción genérica de recursos materiales presentada en las tablas anteriores, a continuación se especifican las características técnicas mínimas que cada equipo crítico deberá cumplir para que la solución resulte robusta frente a las condiciones del ambiente minero subterráneo. Estas especificaciones constituyen también la base para los criterios de aceptación medibles que se detallan en la Sección 6.1.

Tabla 3. Especificaciones técnicas mínimas de equipos críticos.

Equipo / componente	Especificación mínima	Norma o referencia	Justificación técnica
Cámara industrial CCTV	IP67, sensor 1080p, ≥ 30 FPS, IR ≥ 30 m, lente gran angular $\geq 120^\circ$, alimentación PoE	IEC 60529 (IP), IEC 62676 (CCTV)	Resistencia a humedad relativa $>90\%$ y polvo respirable; cobertura geométrica completa de los siete puntos ciegos identificados
Espejo industrial convexo	Diámetro 60–80 cm, material acrílico/policarbonato anticorrosivo, soporte ajustable galvanizado	NTC 4901 (señalización vial industrial)	Complemento óptico para curvaturas de la vía donde la cámara no aporta valor adicional
Luminaria LED antideflagrante	Iluminancia ≥ 1000 lux a 1,5 m del piso, ATEX zona I/II Ex-d, IP66, potencia 60–150 W	IEC 60079-0/1, ATEX 2014/34/UE, Decreto 1886/2015	Iluminación segura en atmósfera potencialmente explosiva propia de minería subterránea
Monitor de cabina del operador	Pantalla 21" mínimo, resolución FHD, multi-	IEC 60721-3-3 (clase 3K7)	Visualización integrada del tren completo bajo

	cámara 4–9 simultáneas, anti-impacto		vibración y polvo de cabina
Anclajes auxiliares de seguridad	Acero ASTM A572, prueba de carga ≥ 150 kgf, factor de seguridad ≥ 5 , ensayo NDT por partículas magnéticas	ASTM A572, ASME B30.26	Soporte de carga dinámica del personal con la separación de 940 mm entre destorcedores Crosby
Concreto de plomos y nivelación	Resistencia $f_c \geq 28$ MPa, acero de refuerzo $f_y = 420$ MPa	NTC 2017, ACI 318	Anclaje civil de plomos según especificación del DOSSIER (Aris Mining, 2026)
Tolerancia de desnivel de la vía	≤ 5 mm/m (0,5%) en el tramo niveles 15–16	DIN 869, NTC 4900	Eliminación de la distribución desigual de carga sobre ruedas y rieles
Cable de izaje (verificación)	Inspección MRT semestral, condición $\geq 99,5\%$ del área metálica nominal	EN 12927:2019, ASTM E1571-21	Mantenimiento del estado nuevo certificado en MRT del 17-dic-2025
Vibración del motor (verificación)	Velocidad eficaz $\leq 7,1$ mm/s en condición operativa con tendencia controlada	ISO 20816-3:2022	Línea base 5,31 mm/s registrada el 20-ene-2026; control trimestral

Para validar la suficiencia del personal frente a la carga del proyecto, se construyó el siguiente balance mensual entre horas-hombre disponibles del equipo interno asignado y horas-hombre requeridas por el cronograma. El cálculo asume jornadas de ocho horas efectivas y veinte días operativos por mes.

Tabla 4. Balance mensual de horas-hombre disponibles vs requeridas (equipo interno).

Mes	HH disponibles equipo interno	HH requeridos por proyecto	Balance	Cobertura faltante
Mes 1	1 280	1 100	+180	—
Mes 2	1 280	1 450	-170	Cubierto por contratista PSIE
Mes 3	1 280	1 600	-320	Cubierto por contratistas NAVAR + PSIE
Mes 4	1 280	1 200	+80	—
Mes 5	1 280	960	+320	—
Mes 6	1 280	880	+400	—
Mes 7	1 280	640	+640	—
Mes 8	1 280	480	+800	—
Mes 9	1 280	160	+1 120	—
Total	11 520	8 470	+3 050	Déficit Mes 2-3 absorbido por contratistas externos

Disponibilidad estimada con base en ocho personas internas asignadas al proyecto en dedicaciones combinadas (ingeniero de Proyectos Mina al 50%, profesional QH&S al 40%, supervisores de Operación al 30%, equipo TFM tiempo parcial). El déficit transitorio de los meses 2 y 3 corresponde al pico de obras civiles e instalación eléctrica y se cubre con los contratistas NAVAR Asociados S.A.S y PSIE Ingenieros, conforme al presupuesto de la Sección 6.4.

6. Definición del alcance de la solución, partes interesadas, cronograma y presupuestos

La presente sección consolida el cierre de la fase de planificación del proyecto de optimización del sistema de transporte de personal del Apique 0 de la Mina El Silencio, articulando los componentes definidos en las secciones previas con los elementos formales de gestión exigidos por las buenas prácticas en dirección de proyectos (Project Management Institute [PMI], 2021). En coherencia con el ciclo iterativo de la investigación-acción —planificación, acción, observación y reflexión (Lewin, 1946; Kemmis y McTaggart, 2005)—, esta sección desarrolla los entregables que permiten transitar de la fase de planificación a una eventual ejecución estructurada: la delimitación del alcance, la identificación y gestión de partes interesadas, el cronograma de ejecución, el presupuesto detallado, el análisis de riesgos del proyecto y la trazabilidad entre los objetivos, las actividades y los recursos.

6.1. Alcance final de la solución

El alcance del proyecto se define a partir de los hallazgos del diagnóstico documentado en el Informe Prueba 4to Skip Personal del 9 de agosto de 2025 (Aris Mining, 2025) y de los objetivos específicos formulados en la Sección 5.1. La delimitación del alcance es un componente crítico de la planificación, ya que establece de manera explícita los límites del proyecto y previene la inclusión de actividades no planificadas durante la ejecución (Kerzner, 2022; PMI, 2021).

6.1.1. Entregables incluidos en el alcance

El proyecto contempla los siguientes entregables como parte de su alcance formal:

- Diseño técnico, suministro e instalación de un sistema integral de visibilidad para el operador de la elevadora del Apique 0, compuesto por seis a ocho cámaras industriales con grado de protección IP67, seis a ocho espejos convexos industriales y diez a quince luminarias LED industriales, con prioridad de instalación en los niveles

donde se identificaron pérdidas visuales: 6, 13, 20, 21-22, 23 y, de manera crítica, 25-26.

- Corrección topográfica del desnivel identificado en la vía del apique entre los niveles 15 y 16, con verificación de alineación uniforme de los rieles y validación documentada por parte del área de Proyectos Mina.
- Adecuación física de las zonas de embarque y desembarque (plomos) en los niveles 0, 18, 21 y 28, incluyendo ampliación del espacio útil, instalación de barandas metálicas, señalización retroreflectiva y la conformación de bahías de abordaje del tipo escalera.
- Diseño, fabricación e instalación de tres juegos de anclajes auxiliares de seguridad compatibles con la nueva separación entre Skips de aproximadamente 940 milímetros generada por los nuevos destorcedores Crosby.
- Diseño, validación con el área de Calidad, Seguridad, Salud y Medio Ambiente (QH&S) e implementación de protocolos operativos para el abordaje seguro del cuarto Skip, con restricciones específicas según el nivel de destino del personal (plomos 5, 18 y 21) y procedimientos de emergencia actualizados.
- Programa de capacitación dirigido al cien por ciento del personal expuesto al sistema de izaje, incluyendo operadores de elevadora, supervisores de turno, trabajadores que ingresan a frentes de trabajo y representantes de los socios mineros cooperativistas.
- Pruebas de validación integral del sistema completo con los cuatro Skips operativos, incluyendo medición cuantitativa de tiempos de espera para verificar el cumplimiento de la meta de reducción de al menos un veinticinco por ciento.

- Documentación final del proyecto con lecciones aprendidas, indicadores de cumplimiento y recomendaciones para la mejora continua, conforme a los principios reflexivos de la investigación-acción (Reason y Bradbury, 2008).

6.1.2. Exclusiones del alcance

Para evitar la dilución del proyecto y su transformación en una intervención de mayor envergadura, se definen las siguientes exclusiones explícitas:

- El proyecto no contempla la sustitución del winche principal de la elevadora ni la modificación de los sistemas de frenado Vulkan o de servicio, los cuales fueron verificados como funcionales durante las pruebas operativas del 9 de agosto de 2025.
- No se incluye la expansión de la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio de Segovia, actualmente en tres mil toneladas por día (Aris Mining, 2025), por encontrarse fuera del proceso a intervenir.
- El alcance no abarca intervenciones similares en las otras tres minas subterráneas del complejo de Segovia (Sandra K, Providencia y Carla), las cuales podrían beneficiarse de una replicación del modelo en una fase posterior pero no forman parte del proyecto actual.
- No se incluye la construcción de nuevos accesos, rampas o desarrollos mineros adicionales por fuera del Apique 0.
- Quedan excluidas las actividades de mantenimiento rutinario del sistema de izaje, las cuales corresponden al alcance contractual permanente del operador NAVAR Asociados S.A.S.

- No se contempla la adquisición o reemplazo de Equipos de Protección Personal (EPP) del personal, los cuales son provistos a través del programa permanente de seguridad de Aris Mining.

6.1.3. Supuestos del proyecto

La planificación del proyecto se sustenta en los siguientes supuestos explícitos, los cuales deberán ser verificados antes del inicio de la fase de ejecución:

- La disponibilidad operativa del Apique 0 permitirá programar ventanas de intervención sin afectar significativamente la producción diaria del complejo, mediante el aprovechamiento de paradas planeadas y turnos de baja actividad.
- Los contratistas NAVAR Asociados S.A.S. y PSIE Ingenieros, ya vinculados a la operación, mantendrán disponibilidad y capacidad técnica durante el horizonte temporal del proyecto.
- Los hallazgos del Informe Prueba 4to Skip Personal del 9 de agosto de 2025 conservan vigencia en cuanto a las condiciones físicas del apique, los puntos críticos identificados y la separación de los destorcedores.
- El plan de crecimiento de Aris Mining hacia una producción anual de aproximadamente quinientas mil onzas de oro para el segundo semestre de 2026 (Aris Mining, 2025) justifica la inversión y mantiene la prioridad estratégica del proyecto.
- No se presentarán cambios regulatorios significativos en materia de seguridad minera subterránea durante la ejecución del proyecto.

6.1.4. Restricciones del proyecto

El proyecto está sujeto a las siguientes restricciones identificadas:

- Restricción técnica: la separación entre Skips de aproximadamente 940 milímetros generada por los nuevos destorcedores limita el diseño de los anclajes auxiliares y exige una solución de fabricación a medida.
- Restricción normativa: cumplimiento obligatorio de la normatividad colombiana en seguridad minera subterránea, incluyendo los lineamientos de la Agencia Nacional de Minería y los protocolos internos QH&S de Aris Mining.
- Restricción operativa: las intervenciones físicas en el apique deben realizarse en ventanas programadas que no comprometan la producción ni la seguridad del personal en operación.
- Restricción temporal: el horizonte de nueve meses establecido para la ejecución del proyecto se considera realista pero exigente, dada la coordinación requerida entre múltiples áreas y contratistas.
- Restricción presupuestaria: las cifras presentadas en la Sección 6.4 corresponden a estimaciones que deben ser refinadas y aprobadas por el área de Compras y Finanzas de Aris Mining antes de comprometer recursos.

Para cada entregable y frente del proyecto se definen criterios de aceptación medibles, con un valor objetivo, una tolerancia admisible, un método de verificación y la norma técnica que respalda el criterio. Estos criterios son la base de la validación contractual frente al contratista y del Hito 5 de cierre del proyecto.

Tabla 5. Criterios de aceptación medibles por entregable.

Entregable / componente	KPI de aceptación	Valor objetivo y tolerancia	Método de verificación	Norma o referencia
----------------------------	-------------------	--------------------------------	---------------------------	-----------------------

Sistema de cámaras del operador	Cobertura de puntos ciegos	100% de los 7 puntos identificados (niveles 6, 13, 20, 21–22, 23, 25–26) con visión sin oclusión	Recorrido instrumentado del Skip a velocidad nominal con grabación	IEC 62676 (CCTV)
Cámaras (calidad de imagen)	Resolución y latencia	$\geq 1080p$, ≥ 30 FPS, latencia ≤ 200 ms al monitor de cabina	Medición con software de prueba CCTV homologado (ej. AVTest)	IEC 62676-1, IP67 IEC 60529
Iluminación LED del trayecto	Iluminancia promedio en plomos críticos	$\geq 1\,000$ lux a 1,5 m del piso, ± 100 lux entre puntos	Luxómetro calibrado, mediciones triplicadas	IEC 60079-0/1, ATEX zona I/II
Espejos convexos en curvaturas	Cobertura óptica complementaria	100% de las curvaturas críticas (niveles 7, 12, 25–26) con campo visual $\geq 90^\circ$	Inspección visual con plantilla geométrica	NTC 4901
Nivelación de vía 15–16	Tolerancia de desnivel	≤ 5 mm/m (0,5%) medido cada 0,5 m del tramo intervenido	Topografía de precisión, nivel láser y reporte conforme	DIN 869, NTC 4900
Adecuación de plomos 0, 18, 21, 28	Capacidad de embarque simultáneo de 4 Skips	Espacio útil ≥ 4 m por plomo, barandas $\geq 1,1$ m,	Verificación dimensional + check QH&S	Decreto 1886/2015 anexo 5

		señalización completa		
Anclajes auxiliares de seguridad	Carga de prueba y factor de seguridad	Carga de prueba $\geq$ 150 kgf con factor de seguridad $\geq$ 5; cero discontinuidades NDT	Ensayo destructivo + partículas magnéticas (NDT)	ASTM A572, ASME B30.26
Cable de izaje (verificación al cierre)	Pérdida de área metálica	$\leq$ 0,5% LMA en zonas 6×d y 30×d	Inspección magnetointductiva (MRT)	EN 12927:2019, ASTM E1571-21
Vibración del motor (operativa)	Velocidad eficaz y tendencia	$\leq$ 7,1 mm/s velocidad eficaz y sin tendencia creciente $>10\%$ trimestre	Análisis de vibración trimestral	ISO 20816-3:2022
Protocolos operativos del 4to Skip	Documentación y aprobación formal	100% de los procedimientos firmados por QH&S y aprobados por Operación; cero brechas regulatorias	Auditoría documental + revisión legal	Decreto 1886/2015
Capacitación al personal	Cobertura y aprovechamiento	100% del personal involucrado capacitado; calificación	Registro de asistencia + evaluación escrita	ISO 45001 (SST)

		promedio $\geq 80/100$ en evaluación		
Reducción tiempo de movilización	Indicador de impacto del proyecto	Reducción $\geq 25\%$ del tiempo total para 500 trabajadores; tasa $\geq$ 168 p/h ponderada	Cronometraje de cinco eventos de cambio de turno post-puesta en marcha	Línea base 126 p/h Aris Mining (2025)

6.2. Identificación de responsables de las actividades para ejecución

La identificación clara de responsables y partes interesadas constituye un factor crítico de éxito en la gestión de proyectos, particularmente en intervenciones que involucran múltiples áreas funcionales y contratistas externos (PMI, 2021; Kerzner, 2022). En el marco de la investigación-acción, la participación activa y diferenciada de los actores fortalece la apropiación de la solución y mejora la sostenibilidad de los cambios introducidos (Greenwood y Levin, 2007; Stringer, 2014).

6.2.1. Matriz de asignación de responsabilidades (RACI)

Para asegurar una asignación clara de roles y responsabilidades en cada una de las diez actividades del plan de acción definido en la Sección 5.3, se construyó una matriz RACI (Responsible, Accountable, Consulted, Informed), conforme al estándar del PMI (2021). Esta matriz identifica para cada actividad quién es responsable de ejecutarla (R), quién rinde cuentas finales por su cumplimiento (A), quién debe ser consultado durante su desarrollo (C) y quién debe ser informado sobre su avance o resultado (I).

Tabla 6. Matriz RACI del proyecto.

Actividad	Líder Proyecto	Proyectos Mina	Operación Mina	QH&S	NAVAR	PSIE	Operadores	Gerencia
1. Diagnóstico participativo	C	R	C	A	I	I	C	I

complementario								
2. Diseño técnico sistema de visibilidad	C	A	C	C	I	C	I	I
3. Instalación cámaras, espejos e iluminación	A	C	I	C	I	R	I	I
4. Corrección de desnivel niveles 15-16	I	A	C	C	R	I	I	I
5. Adecuación zonas de embarque (plomos)	A	C	R	C	R	I	C	I
6. Diseño e instalación anclajes auxiliares	A	R	C	C	C	I	I	I
7. Diseño protocolos operativos y emergencia	C	C	C	A	I	I	C	I
8. Capacitación integral al personal	I	I	C	A	I	I	C	I
9. Pruebas de validación integral	A	R	R	R	C	C	R	I
10. Evaluación de resultados y cierre	R	C	C	C	I	I	I	A

Nota. R = Responsable de la ejecución; A = Aprobador y rinde cuentas; C = Consultado; I = Informado.

Elaboración propia con base en PMI (2021).

Nota sobre la redistribución de Accountable. Frente a la observación recibida de concentración del rol Accountable en la figura del Líder del Proyecto, se reasignaron cinco de las diez actividades a las áreas con mayor competencia técnica y autoridad de decisión natural sobre cada entregable: Proyectos Mina asume la rendición de cuentas de las Actividades 2 y 4 (diseño técnico y obras civiles de nivelación) por ser el área dueña del activo electromecánico y de las especificaciones; QH&S asume las Actividades 1, 7 y 8 (línea base de seguridad, protocolos y capacitación) por su autoridad regulatoria y metodológica; el Líder de Proyecto

se mantiene como Accountable únicamente en las Actividades 3, 5, 6 y 9 que requieren coordinación transversal entre áreas y contratistas; y la Gerencia de la Mina conserva la rendición de cuentas final de la Actividad 10 (evaluación y cierre). Esta distribución es consistente con la guía PMBOK (PMI, 2021) que recomienda asignar Accountable al rol con la autoridad técnica más alta sobre el entregable. Los ajustes finales serán validados con el equipo directivo de Aris Mining previa al inicio del proyecto.

Tabla 7. Competencias técnicas requeridas por rol del proyecto.

Rol	Competencias técnicas requeridas	Certificación / experiencia mínima
Líder de Proyecto (Equipo TFM)	Gestión de proyectos PMI, investigación-acción, análisis cuantitativo, comunicación con stakeholders mineros	PMP o equivalente; formación en metodologías ágiles e investigación-acción
Proyectos Mina	Diseño electromecánico, sistemas de izaje, cálculo estructural, especificación de equipos ATEX	Ingeniería mecánica/eléctrica + 5 años en minería subterránea
Operación Mina	Operación de elevadoras de personal, gestión de turnos, mando táctico de cuadrillas	Supervisor minero certificado + 8 años en minería subterránea
QH&S	Gestión de riesgos ISO 31000, normativa minera colombiana, diseño de protocolos, capacitación	Profesional SST + experiencia en sistemas integrados QH&S
NAVAR Asociados S.A.S	Obra civil minera, soldadura estructural, topografía de precisión	Empresa con experiencia comprobada en obras civiles subterráneas (ISO 9001)

PSIE Ingenieros	Instalación CCTV, sistemas eléctricos antideflagrantes ATEX, cableado industrial	Personal técnico certificado ATEX zona I/II
Operadores de elevadora	Operación segura del Skip, lectura de tableros, comunicación radial, respuesta a emergencias	Certificación interna Aris Mining + entrenamiento del nuevo protocolo de 4 Skips
Gerencia de la Mina	Toma de decisiones estratégicas, gestión de recursos, alineación ESG (Pacto Global)	Profesional con responsabilidad gerencial y conocimiento del plan corporativo Aris Mining

6.2.2. Mapa de partes interesadas

La identificación de partes interesadas se realizó utilizando la matriz de Mendelow, la cual clasifica a los actores en función de su nivel de poder y de interés sobre el proyecto, permitiendo definir estrategias diferenciadas de gestión y comunicación (Mendelow, 1981; PMI, 2021). Esta clasificación es particularmente relevante en contextos mineros donde convergen actores corporativos, técnicos, comunitarios y regulatorios (Greenwood y Levin, 2007).

Tabla 8. Mapa de partes interesadas del proyecto.

Cuadrante (Poder × Interés)	Partes interesadas	Estrategia de gestión
Alto poder / Alto interés (Gestionar de cerca)	Gerencia de la Mina El Silencio, Líder de Proyecto, Coordinación QH&S, Proyectos Mina	Reuniones semanales de seguimiento, reportes detallados de avance, participación directa en decisiones críticas
Alto poder / Bajo interés (Mantener satisfechos)	Junta Directiva Aris Mining (TSX:ARIS, NYSE:ARMN), Vicepresidencia de Operaciones Colombia, Agencia Nacional de Minería	Reportes ejecutivos mensuales, escalamiento de hitos críticos, alineación con plan estratégico hacia 500.000 oz/año
Bajo poder / Alto interés (Mantener informados)	Operadores de elevadora, Supervisores de turno, Socios Mineros Cooperativistas, Familias del personal expuesto, Sindicato	Boletines informativos, reuniones de socialización, participación en jornadas de capacitación, canales de retroalimentación
Bajo poder / Bajo interés (Monitorear)	Comunidad de Segovia, Autoridad ambiental regional, Medios de comunicación locales, Otros contratistas no involucrados	Comunicación reactiva, monitoreo de inquietudes, transparencia mediante el Pacto Global de las Naciones Unidas

Nota. Elaboración propia con base en Mendelow (1981) y PMI (2021).

6.2.3. Estrategia de comunicación del proyecto

Con fundamento en el mapa de partes interesadas, se diseñó una estrategia de comunicación diferenciada que considera la frecuencia, el canal y el responsable de cada interacción. Las reuniones semanales del comité técnico del proyecto, integradas por el Líder de Proyecto, los referentes de Proyectos Mina, Operación, QH&S y los enlaces de NAVAR y PSIE, constituyen el principal mecanismo de coordinación operativa. Los reportes mensuales ejecutivos, dirigidos a la Gerencia de la mina y a la Vicepresidencia de Operaciones, sintetizan el avance contra cronograma, la ejecución presupuestal y los riesgos materializados o emergentes. Las jornadas de socialización con operadores y trabajadores, programadas en hitos clave del cronograma, garantizan la apropiación del cambio y permiten incorporar retroalimentación ascendente conforme a los principios participativos de la investigación-acción (Stringer, 2014).

6.3. Cronograma de ejecución

El cronograma del proyecto organiza las diez actividades definidas en la Sección 5.3 a lo largo de un horizonte de nueve meses calendario, contados a partir de la aprobación formal del presupuesto y del acta de inicio del proyecto. La estructuración temporal se realizó conforme a las buenas prácticas del PMI (2021) para la elaboración de cronogramas, identificando dependencias entre actividades, estableciendo hitos críticos y definiendo el camino crítico del proyecto (Kerzner, 2022).

6.3.1. Diagrama de Gantt simplificado

Tabla 9. Cronograma de ejecución del proyecto (Diagrama de Gantt simplificado).

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9
1. Diagnóstico participativo complementario	■								
2. Diseño técnico sistema de visibilidad	■	■							

3. Instalación cámaras, espejos e iluminación		■	■						
4. Corrección de desnivel niveles 15-16		■	■						
5. Adecuación zonas de embarque (plomos)			■	■	■				
6. Diseño e instalación anclajes auxiliares			■	■					
7. Diseño protocolos operativos y emergencia					■	■			
8. Capacitación integral al personal						■	■		
9. Pruebas de validación integral							■	■	
10. Evaluación de resultados y cierre								■	■

Nota. La marca ■ indica los meses durante los cuales la actividad está programada para ejecutarse.

Elaboración propia con base en PMI (2021) y la secuencia definida en la Sección 5.3.

6.3.2. Hitos críticos del proyecto

A lo largo del cronograma se identifican cinco hitos críticos que permiten verificar el avance del proyecto y tomar decisiones de continuidad, ajuste o intervención correctiva:

- Hito 1 (final del Mes 1): entrega del Informe de Diagnóstico Participativo Complementario, con la línea base cuantitativa de tiempos de espera del personal y la validación de los hallazgos del informe del 9 de agosto de 2025.
- Hito 2 (final del Mes 3): cierre del frente tecnológico de visibilidad (Objetivo Específico 1), con el sistema de cámaras, espejos e iluminación operativo en los seis niveles críticos identificados.

- Hito 3 (final del Mes 4): cierre del frente de infraestructura física (Objetivo Específico 2), con el desnivel corregido entre los niveles 15 y 16 y los plomos 0, 18, 21 y 28 adecuados según especificaciones de QH&S.
- Hito 4 (final del Mes 7): cierre del frente operativo (Objetivo Específico 3), con los protocolos aprobados, los anclajes auxiliares instalados y el cien por ciento del personal capacitado.
- Hito 5 (final del Mes 9): validación final del proyecto mediante pruebas integrales, con verificación de la reducción de tiempos de espera de al menos veinticinco por ciento y entrega del informe de cierre con lecciones aprendidas.

6.3.3. Camino crítico y dependencias

El análisis del cronograma identifica el camino crítico del proyecto como la secuencia de actividades cuyo retraso afectaría directamente la fecha de finalización del proyecto. Dicho camino está conformado por las Actividades 1, 2, 3, 7, 8, 9 y 10, las cuales presentan dependencias del tipo Final-Inicio (FS) según la nomenclatura del PMI (2021): el diseño técnico (Actividad 2) requiere los hallazgos del diagnóstico complementario (Actividad 1); la instalación física (Actividad 3) requiere el diseño aprobado; el diseño de protocolos (Actividad 7) requiere que los componentes físicos estén operativos; la capacitación (Actividad 8) requiere los protocolos validados por QH&S; las pruebas integrales (Actividad 9) requieren el sistema completo y el personal formado; y el cierre (Actividad 10) depende de los resultados de las pruebas. Las Actividades 4, 5 y 6 presentan relaciones del tipo Inicio-Inicio (SS) con la Actividad 3, lo cual permite ejecutarlas en paralelo y optimizar el cronograma. La gestión del camino crítico exige especial atención a los hitos 2, 4 y 5, donde cualquier retraso debe activar acciones correctivas inmediatas.

Para fortalecer la robustez del cronograma frente a la incertidumbre, se realizó la estimación de la duración esperada de cada actividad mediante la técnica de los tres puntos (PERT), siguiendo la guía del PMBOK (PMI, 2021). Para cada actividad se estimaron tres duraciones en semanas: optimista (a), más probable (m) y pesimista (b), con base en la consulta a referentes técnicos de Aris Mining y a contratos similares en obras de minería subterránea. La duración esperada se calculó como $t_e = (a + 4m + b) / 6$ y la varianza como $\sigma^2 = ((b - a) / 6)^2$. Adicionalmente, mediante el método del camino crítico (CPM), se calcularon los inicios y finales tempranos y tardíos (ES, EF, LS, LF), la holgura libre, la holgura total y la pertenencia o no al camino crítico de cada actividad. La unidad temporal es la semana calendario (1 mes $\approx$ 4 semanas).

Tabla 10. Estimación PERT y holguras del cronograma del proyecto.

#	Actividad	a	m	b	t_e	σ^2	ES	EF	LS	LF	Holg libre	Holg total	Crític a
1	Diagnóstico participativo	3	4	5	4.00	0.111	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	0.00	Sí
2	Diseño técnico visibilidad	4	6	8	6.00	0.444	4.00	10.00	4.00	10.00	0.00	0.00	Sí
3	Instalación cámaras/espejos/LED	4	6	8	6.00	0.444	10.00	16.00	10.00	16.00	0.00	0.00	Sí
4	Nivelación niveles 15-16	3	4	6	4.17	0.250	4.00	8.17	6.83	11.00	0.00	2.83	No
5	Adecuación plomos 0/18/21/28	10	12	14	12.00	0.444	8.17	20.17	11.00	23.00	0.00	2.83	No

6	Anclajes auxiliares	3	4	6	4.17	0.25 0	20.1 7	24.3 4	23.0 0	27.1 7	2.83	2.83	No
7	Protocolos operativos	4	6	8	6.00	0.44 4	16.0 0	22.0 0	16.0 0	22.0 0	0.00	0.00	Sí
8	Capacitación integral	4	5	7	5.17	0.25 0	22.0 0	27.1 7	22.0 0	27.1 7	0.00	0.00	Sí
9	Pruebas de validación integral	3	4	6	4.17	0.25 0	27.1 7	31.3 4	27.1 7	31.3 4	0.00	0.00	Sí
10	Evaluación y cierre	3	4	5	4.00	0.11 1	31.3 4	35.3 4	31.3 4	35.3 4	0.00	0.00	Sí

Resultados de la planificación PERT. Las actividades del camino crítico son aquellas con holgura total igual a cero y son las que comprometen directamente la fecha de cierre. Las actividades del frente de infraestructura (Actividades 4, 5 y 6) presentan holgura total positiva, lo cual permite un colchón natural frente a retrasos en obra civil. No obstante, dada la criticidad estratégica del Hito 3 (cierre del frente de infraestructura en Mes 4), se establecen dos buffers explícitos en el cronograma. Primero, un buffer de cuatro semanas entre el final del Hito 3 y el inicio efectivo de la Actividad 9 (Pruebas), que absorbe retrasos típicos de obra civil sin desplazar la fecha de pruebas. Segundo, una reserva de contingencia de gestión equivalente al cinco por ciento del cronograma (aproximadamente dos semanas) que permanece bajo control del Líder de Proyecto y se libera por aprobación del Comité Técnico ante eventos no previstos. Adicionalmente, las actividades con varianza σ^2 superior a 1,0 (cinco actividades) se identifican como de mayor incertidumbre y se monitorean con frecuencia semanal en el comité técnico.

6.4. Presupuesto

El presupuesto del proyecto se estructuró conforme a las técnicas de estimación de costos recomendadas por Kerzner (2022) y por el PMI (2021), combinando estimación análoga (con base en proyectos similares) y estimación paramétrica (con base en precios unitarios de mercado). Las cifras se presentan en pesos colombianos (COP) y, cuando corresponde, se incluye la conversión a dólares estadounidenses (USD) utilizando una Tasa Representativa del Mercado (TRM) referencial de tres mil seiscientos cincuenta pesos colombianos por dólar, vigente a abril de 2026. Todas las cifras corresponden a estimaciones razonadas con rangos mínimo y máximo, basadas en cotizaciones públicas y catálogos de proveedores especializados; las cifras finales deberán ser refinadas mediante cotizaciones formales gestionadas por el área de Compras de Aris Mining antes del inicio de la fase de ejecución.

6.4.1. Estructura presupuestal por categorías

Tabla 11. Presupuesto detallado del proyecto.

Categoría / Rubro	Cantidad	Valor mínimo (COP)	Valor máximo (COP)	Supuesto / Fuente
1. EQUIPOS DE VISIBILIDAD Y MONITOREO				
Cámaras industriales IP67 con visión nocturna y carcasa minera	8 und	4.000.000	12.000.000	Hikvision/Dahua 4-6MP IR PoE en caja protegida resistente; SYSCOM Colombia
Espejos convexos industriales 60-80 cm anticorrosivos	8 und	800.000	2.400.000	Acero inoxidable o policarbonato endurecido; Fabri Espejos GF
Luminarias LED industriales IP66 antichoque IK10 (NO ATEX)	12 und	3.600.000	12.000.000	LED 80-150W IP66 + IK10. Mina de oro Segovia no requiere ATEX por ausencia de metano
Monitor 21" multi-cámara industrial + monitor de respaldo	2 und	2.000.000	5.000.000	FHD industrial; principal y backup

Cableado armado / multipar blindado para apique minero	250 m	2.000.000	4.500.000	Cable armado resistente a aplastamiento y humedad; no FTP estándar
NVR 16 canales + software CCTV + HDD vigilancia	1 und	1.500.000	5.000.000	Hikvision/Dahua gama media; HDD 4TB vigilancia
Subtotal Categoría 1		13.900.000	40.900.000	
2. MATERIALES DE OBRA CIVIL E INFRAESTRUCTURA SUBTERRÁNEA				
Nivelación de vía niveles 15-16 (concreto bombeado, durmientes, alineación, soldadura riel)	30 m	18.000.000	36.000.000	Trabajos en mina subterránea con bombeo de concreto y encofrado especial
Adecuación de plomos 0, 18, 21, 28 (refuerzos de bóveda, plataformas, barandas, señalización)	4 plomos	32.000.000	80.000.000	\$8-20M por plomo; estructura completa con refuerzos de bóveda
Anclajes auxiliares de seguridad personalizados (separación 940 mm)	3 juegos	12.000.000	28.000.000	Acero ASTM A572, fabricación a medida con ensayo NDT e instalación
Subtotal Categoría 2		62.000.000	144.000.000	
3. MANO DE OBRA CONTRATISTA EXTERNA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA				
NAVAR Asociados — obras civiles (nivelación + plomos)	60 días-cuadrilla	90.000.000	150.000.000	Cuadrilla 4 personas; tarifa \$1,5-2,5M/día con riesgo ARL nivel V
PSIE Ingenieros — instalación eléctrica y CCTV	35 días-cuadrilla	42.000.000	87.500.000	Cuadrilla 3 personas técnico-eléctrica con licencia CONTE
Subtotal Categoría 3		132.000.000	237.500.000	
4. MANO DE OBRA INTERNA ASIGNADA AL PROYECTO				
Ingeniero Proyectos Mina (50% dedicación, 6 meses)	1 persona	27.900.000	48.450.000	Salario mensual \$7,5-13M con factor prestacional 1,55
Profesional QH&S (40% dedicación, 7 meses)	1 persona	12.180.000	22.620.000	Salario mensual \$3,5-6,5M con factor prestacional 1,55

Supervisor Operación Mina (30% dedicación, 8 meses)	1 persona	9.530.000	19.350.000	Salario mensual \$3,2-6,5M con factor prestacional 1,55
Operadores de elevadora (40 horas por operador, 4 personas)	160 horas	1.440.000	2.880.000	Tarifa \$9-18 mil COP/hora
Subtotal Categoría 4		51.050.000	93.300.000	
5. CAPACITACIÓN				
Sesiones de capacitación in situ (8 sesiones, hasta 40 participantes)	8 sesiones	24.000.000	40.000.000	\$3-5M por sesión; instructor minero certificado, material; CCS, ARL Sura
Viáticos y traslados de instructor a Segovia	8 traslados	4.000.000	8.000.000	Hospedaje, alimentación y transporte
Material didáctico, manuales operativos, EPP de práctica	global	5.000.000	10.000.000	Estimación
Subtotal Categoría 5		33.000.000	58.000.000	
6. PRUEBAS Y VALIDACIÓN				
Instrumentación de medición (cronómetros precisión, software, contadores)	global	2.500.000	6.000.000	Equipo topográfico interno disponible
Costo de oportunidad operativa (ventana de pruebas integrales)	80 h	24.000.000	60.000.000	Hora-mina parcialmente detenida \$300-750 mil/h
Subtotal Categoría 6		26.500.000	66.000.000	
SUBTOTAL DIRECTO (Categorías 1 a 6)		318.450.000	639.700.000	
7. Imprevistos y contingencia (12%)		38.214.000	76.764.000	Reserva PMI estándar 10-15% para incertidumbre técnica moderada
TOTAL ESTIMADO DEL PROYECTO (COP)		356.664.000	716.464.000	
TOTAL ESTIMADO DEL PROYECTO (USD, TRM 3.650)		97.716	196.291	

Nota. Las cifras corresponden a estimaciones basadas en supuestos de mercado a abril de 2026 y deberán ser validadas por el área de Compras de Aris Mining mediante cotizaciones formales antes de comprometer recursos. La amplitud del rango refleja la variabilidad propia de equipos con certificación ATEX (categoría 1) y de fabricaciones a medida (categoría 2). Elaboración propia con base en PMI (2021) y Kerzner (2022).

6.4.2. Flujo presupuestal mensual

Para complementar la estructura presupuestal por categorías y facilitar la planificación financiera del proyecto, se elaboró una proyección de flujo presupuestal mes a mes que distribuye los recursos a lo largo de los nueve meses del cronograma definido en la Sección 6.3. La distribución se realizó tomando como referencia el momento de ejecución de cada una de las diez actividades del plan de acción y aplicando los puntos medios entre los valores mínimos y máximos del presupuesto por categoría, conforme a las técnicas de elaboración de cronogramas de costos del Project Management Institute (PMI, 2021).

La concentración del gasto en los meses 2 a 5 corresponde a la ejecución de los frentes tecnológico (Categoría 1) y de infraestructura (Categorías 2 y 3), que constituyen las inversiones de capital más relevantes del proyecto. Los meses 6 y 7 concentran los costos asociados al frente operativo (capacitación, Categoría 5), mientras que los meses 7 a 9 reflejan los costos de las pruebas integrales y el cierre del proyecto (Categoría 6). Los costos de mano de obra interna (Categoría 4) se distribuyen de manera continua a lo largo del horizonte temporal, conforme al porcentaje de dedicación de cada profesional asignado al proyecto.

Tabla 12. Flujo presupuestal mensual del proyecto (cifras en millones de pesos colombianos).

Mes	Equipos	Obras civiles	Contratistas	MO interna	Capacitación	Pruebas	Conting. (12%)	Total mes	Acumulado
Mes 1	—	—	—	11,2	—	—	1,3	12,5	12,5
Mes 2	13,7	15,5	50,4	10,7	—	—	10,8	101,1	113,6
Mes 3	13,7	30,9	68,4	10,7	—	—	14,8	138,5	252,1
Mes 4	—	36,1	42,0	10,7	—	—	10,7	99,5	351,6
Mes 5	—	20,6	24,0	10,7	—	—	6,6	61,9	413,5
Mes 6	—	—	—	10,7	22,8	—	4,0	37,5	451,0
Mes 7	—	—	—	5,0	22,8	13,9	5,0	46,7	497,7
Mes 8	—	—	—	2,5	—	27,8	3,6	33,9	531,6
Mes 9	—	—	—	—	—	4,6	0,6	5,2	536,8
TOTAL	27,4	103,1	184,8	72,2	45,6	46,3	57,4	536,8	—

Nota. Cifras expresadas en millones de pesos colombianos (COP) calculadas sobre los puntos medios de los rangos del presupuesto detallado de la Tabla 11. Las pequeñas diferencias entre la suma de las columnas y los totales de cada categoría obedecen al redondeo de los valores a un decimal. Los valores marcados con guion (—) corresponden a meses sin gasto programado para la categoría. Equivalente en dólares estadounidenses al valor total: USD 147.068 a TRM referencial de 3.650 COP/USD vigente a abril de 2026. Elaboración propia con base en el cronograma de ejecución de la Sección 6.3 y el presupuesto detallado de la Tabla 11.

La proyección de flujo permite identificar el mes 3 como el de mayor exigencia presupuestal del proyecto, con un desembolso estimado de 138,5 millones de pesos colombianos, asociado al pico simultáneo de obras civiles, instalación eléctrica y suministro de equipos. La acumulación del 65,5 por ciento del presupuesto total al cierre del mes 4 implica que el área de Compras y Tesorería de Aris Mining deberá garantizar la disponibilidad de los recursos durante el primer cuatrimestre de la ejecución, lo cual constituye un requisito crítico para evitar retrasos en el camino crítico identificado en la Sección 6.3.3.

6.4.3. Análisis costo-beneficio preliminar

Para fundamentar la viabilidad económica del proyecto, se realizó un análisis costo-beneficio preliminar a partir de los datos operativos reales del Apique 0 reportados por el equipo técnico de Aris Mining. La movilización diaria de personal se sitúa en un rango entre cuatrocientos y seiscientos trabajadores, distribuidos hacia los frentes de trabajo en dos ciclos de transporte diferenciados según la profundidad del nivel de destino.

El primer ciclo, correspondiente a los desplazamientos hacia los plomos de los niveles superiores y hasta el nivel 18, presenta una duración total de diez minutos por viaje (cinco minutos de descenso y cinco minutos de ascenso). El segundo ciclo, asociado a los desplazamientos hacia

el nivel 28 —el más frecuentado del apique—, presenta una duración total de veinte minutos por viaje (diez minutos de descenso y diez de ascenso). Considerando una capacidad nominal de diez trabajadores por Skip, el sistema actual de tres Skips moviliza treinta personas por ciclo, mientras que el sistema proyectado con cuatro Skips elevaría la capacidad a cuarenta personas por ciclo, lo que representa un incremento del treinta y tres punto tres por ciento en la capacidad de transporte por unidad de tiempo.

Aplicando los tiempos de ciclo a la capacidad por viaje, la tasa de servicio del sistema actual asciende a ciento ochenta personas por hora hacia el primer ciclo (seis ciclos por hora multiplicados por treinta personas) y a noventa personas por hora hacia el segundo ciclo (tres ciclos por hora multiplicados por treinta personas). Bajo el supuesto de una distribución del flujo del sesenta por ciento hacia el nivel 28 y del cuarenta por ciento hacia los niveles superiores, la tasa de servicio ponderada del sistema actual es de ciento veintiséis personas por hora. La tasa equivalente del sistema mejorado con cuatro Skips se eleva a ciento sesenta y ocho personas por hora bajo la misma distribución de flujo. La reducción del tiempo total de movilización del personal entre ambos sistemas equivale al veinticinco por ciento, valor que coincide exactamente con la meta SMART establecida en el objetivo general del plan de acción (Sección 5.1) y que se obtiene de manera matemática como uno menos la razón entre las tasas ponderadas ($1 - 126/168 = 0,25$). Es relevante destacar que esta razón depende de la proporción entre el número de Skips operativos ($4/3$) y no de la capacidad nominal por Skip, por lo cual la mejora del veinticinco por ciento es estructural y robusta frente a variaciones en el aforo individual del equipo.

Para una movilización de quinientos trabajadores en un cambio de turno, el sistema actual requiere aproximadamente tres horas con cincuenta y ocho minutos de operación continua, mientras que el sistema mejorado lo realiza en dos horas con cincuenta y nueve minutos, lo que

representa un ahorro neto de cincuenta y nueve minutos por evento de movilización. Bajo un supuesto conservador de una espera promedio ahorrada de quince minutos por trabajador en cada cambio de turno, dos cambios de turno principales por día y doscientos cincuenta días operativos al año, el ahorro anual asciende a sesenta y dos mil quinientas horas-hombre. Considerando un costo-hora ponderado de veinte mil pesos colombianos para la mezcla de operadores, técnicos y supervisores del personal expuesto, el beneficio anual directo se estima en aproximadamente mil doscientos cincuenta millones de pesos colombianos. Bajo un escenario base de veinte minutos ahorrados, el beneficio se eleva a aproximadamente mil seiscientos sesenta y siete millones, y bajo un escenario optimista de veinticinco minutos ahorrados alcanza los dos mil ochenta y tres millones de pesos colombianos anuales.

El periodo de recuperación de la inversión, calculado como la razón entre el costo total estimado del proyecto y el beneficio anual recuperado, se ubica en un rango aproximado de cinco a ocho meses bajo el escenario conservador, y desciende a tres a cinco meses bajo los escenarios base y optimista. Estos plazos resultan altamente favorables para criterios de inversión típicos en proyectos de mejora operativa en minería subterránea (Kerzner, 2022) y se explican por el hecho de que la mejora estructural del veinticinco por ciento en la capacidad de movilización libera un recurso estratégico crítico para la operación. A los beneficios directos cuantificados se suman beneficios indirectos no monetizados de gran relevancia: la habilitación efectiva del crecimiento productivo hacia trescientas mil onzas anuales en el complejo de Segovia, la reducción del riesgo de incidentes durante los embarques en plomos, la mejora del clima laboral del personal expuesto y la alineación con los compromisos de Aris Mining frente al Pacto Global de las Naciones Unidas y a sus principios de responsabilidad social y ambiental (Aris Mining, 2024).

Es importante señalar que el análisis presentado se sustenta en supuestos operativos que deberán ser validados con la línea base cuantitativa de tiempos de espera que se levante durante la Actividad 1 del cronograma (Diagnóstico participativo complementario), así como con la confirmación del aforo real del Apique 0 y la distribución horaria del flujo de personal por parte del área de Operación Mina. La capacidad nominal de diez trabajadores por Skip y la distribución del sesenta por ciento del flujo hacia el nivel 28 corresponden a los datos operativos suministrados por el equipo técnico, los cuales serán refinados en la fase de ejecución para precisar tanto el cálculo de beneficios como el seguimiento del cumplimiento del objetivo de reducción del veinticinco por ciento.

6.5. Análisis de riesgos del proyecto

La gestión de riesgos constituye una dimensión transversal de la planificación de proyectos y resulta especialmente relevante en intervenciones que involucran operaciones mineras subterráneas, donde la convergencia de variables técnicas, operativas y de seguridad incrementa la probabilidad de eventos adversos (PMI, 2021; International Organization for Standardization [ISO], 2018). Para el presente proyecto se realizó la identificación y valoración de riesgos siguiendo la metodología propuesta en el Módulo 3 del Seminario de Trabajo Fin de Máster del Instituto Europeo de Posgrado, complementada con la norma ISO 31000 (ISO, 2018) sobre gestión de riesgos.

6.5.1. Identificación de riesgos por categorías

Se identificaron diecisiete riesgos potenciales agrupados en seis categorías, a partir de la revisión documental del Informe Prueba 4to Skip Personal del 9 de agosto de 2025 (Aris Mining, 2025), del análisis FODA realizado en la Sección 4 y de la consulta a expertos del equipo técnico:

Tabla 13. Identificación y valoración de riesgos del proyecto.

ID	Categoría	Descripción del riesgo	Probabilidad	Impacto	Nivel
R1	Técnico	Los anclajes auxiliares fabricados a medida no son compatibles con la separación de 940 mm en condiciones reales	Media	Alto	Significativo
R2	Técnico	El cableado de las cámaras IP67 sufre deterioro acelerado por humedad y vibración propias del apique	Media	Medio	Significativo
R3	Técnico	Las luminarias LED ATEX presentan retrasos de importación o defectos de origen	Alta	Medio	Significativo
R4	Operativo	Las paradas no planeadas de la operación reducen la ventana disponible para las intervenciones físicas	Alta	Alto	Crítico
R5	Operativo	Los conflictos con los turnos productivos afectan la disponibilidad del personal para capacitación	Media	Medio	Significativo
R6	Operativo	La curva de aprendizaje del nuevo protocolo de cuatro Skips genera resistencia al cambio	Media	Medio	Significativo
R7	Seguridad	Ocurrencia de un incidente durante las pruebas	Baja	Crítico	Significativo

		operativas integrales (Actividad 9)			
R8	Seguridad	Exposición de personal en plomos durante las obras civiles de adecuación	Media	Alto	Significativo
R9	Cronograma	Retraso de NAVAR Asociados S.A.S. en obras civiles afecta el camino crítico	Media	Alto	Significativo
R10	Cronograma	Demora en aprobaciones formales de QH&S sobre los protocolos diseñados	Media	Medio	Significativo
R11	Presupuestario	Variación cambiaria USD/COP incrementa el costo de equipos importados (Categoría 1)	Alta	Medio	Significativo
R12	Presupuestario	Sobrecostos en obras civiles por hallazgos no previstos en el apique	Media	Alto	Significativo
R13	Externo	Paro minero o conflictividad social en el municipio de Segovia	Baja	Alto	Significativo
R14	Externo	Cambios en la normatividad colombiana de seguridad minera durante la ejecución	Baja	Medio	Tolerable
R15	Externo	Conflictos con los socios mineros cooperativistas que comparten el sistema de izaje	Baja	Medio	Tolerable
R16	Técnico	La potencia del motor del winche del Apique 0 resulta insuficiente	Media	Alto	Significativo

		para operar el tren con cuatro Skips, exigiendo repotenciación o reemplazo del sistema motriz para soportar la carga adicional			
R17	Técnico / Cronograma	El cable de izaje requerido para soportar la carga del cuarto Skip exige un mayor calibre, lo que dificulta la búsqueda de proveedores especializados con cable acerado de las especificaciones requeridas para minería subterránea	Alta	Alto	Crítico
R18	Operativo / Recursos humanos	Fatiga acumulada del operador de elevadora durante turnos extendidos degrada respuesta a alarmas y maniobras críticas, agravada por la mayor carga operativa del cuarto Skip	Media	Alto	Alto

R19	Tecnológico	Cobertura del sistema CCTV insuficiente en alguno de los siete puntos ciegos identificados, dejando ángulos muertos residuales que comprometen la habilitación segura del cuarto Skip	Baja	Alto	Medio
R20	Operativo / Infraestructura	Reaparición de filtración de agua en el apique (problema histórico solucionado al 29-nov-2025) que podría causar corrosión de polines, desalineación de vía y cortocircuitos	Media	Medio	Medio

		en cajas eléctricas			
--	--	------------------------	--	--	--

Nota. Probabilidad: Baja, Media, Alta. Impacto: Bajo, Medio, Alto, Crítico. Nivel: Tolerable, Significativo, Crítico, Extremo. Elaboración propia con base en norma ISO 31000 (ISO, 2018) y PMI (2021).

6.5.2. Plan de mitigación de riesgos significativos y críticos

Para los riesgos clasificados como significativos o críticos se definieron acciones específicas de mitigación, prevención o transferencia, conforme a la jerarquía propuesta por la norma ISO 31000 (ISO, 2018):

Tabla 14. Plan de mitigación de riesgos del proyecto.

ID	Acción de mitigación	Responsable
R1	Realizar prueba de ajuste de prototipo de anclaje en taller antes de la fabricación final; verificar tolerancias con el equipo NAVAR	Proyectos Mina
R2	Especificar cableado con doble apantallamiento y certificación para ambientes mineros; programar inspecciones trimestrales	PSIE Ingenieros
R3	Solicitar cotizaciones a múltiples proveedores con certificación ATEX; iniciar la importación con cuatro meses de anticipación	Compras Aris Mining
R4	Coordinar las intervenciones con el plan de paradas programadas; establecer ventanas mínimas garantizadas mediante acuerdo formal con Operación	Líder de Proyecto
R5	Realizar capacitaciones en horarios de baja demanda operativa; ofrecer múltiples sesiones para flexibilidad de asistencia	QH&S
R6	Diseñar el programa de capacitación con metodología participativa que involucre a los operadores en la formulación de los protocolos	QH&S
R7	Realizar análisis de trabajo seguro (ATS) específico para las pruebas integrales; activar los protocolos de emergencia preventivamente	QH&S + Operación

R8	Aislar las zonas de obra civil con señalización y barreras físicas; programar las obras en plomos no operativos cuando sea posible	Operación + NAVAR
R9	Establecer cláusulas contractuales con NAVAR que incluyan penalidades por retraso y reportes semanales de avance	Líder de Proyecto
R10	Involucrar a QH&S desde la fase de diseño de los protocolos para reducir el ciclo de revisión y aprobación	QH&S
R11	Establecer cobertura cambiaria parcial para los rubros importados; congelar precios mediante órdenes de compra anticipadas	Compras Aris Mining
R12	Reservar la contingencia del doce por ciento del presupuesto para hallazgos no previstos; realizar inspección previa detallada del apique	Proyectos Mina
R13	Mantener comunicación permanente con líderes comunitarios y autoridades locales; activar el plan de continuidad de Aris Mining	Gerencia Mina
R16	Realizar análisis de carga estática y dinámica del sistema de izaje con el cuarto Skip operativo para determinar la potencia requerida; coordinar con NAVAR Asociados S.A.S. la repotenciación o reemplazo del motor del winche si el análisis lo determina; incluir las pruebas de torque y verificación del sistema de frenado en la fase de validación integral (Actividad 9)	Proyectos Mina + NAVAR
R17	Iniciar la búsqueda y homologación de proveedores de cable de izaje de mayor calibre con al menos seis meses de anticipación al cronograma de instalación; mantener una reserva de seguridad del cable en almacén de la mina; evaluar fuentes internacionales (Bridon-Bekaert, WireCo, Usha Martin) cuando los proveedores nacionales no cumplan las especificaciones técnicas requeridas para minería subterránea de izaje de personal	Compras Aris Mining + Proyectos Mina
R18	Política de turnos máximo 8 h con 2 h de descanso entre turnos;	QH&S + Operación Mina

	alarmas de microsleap en cabina del operador; rotación de operadores cada 4 h en operación de alta intensidad; programa de bienestar laboral con seguimiento médico semestral	
R19	Auditoría de cobertura post-instalación con recorrido instrumentado del Skip a velocidad nominal; instalación de cámaras adicionales si la auditoría revela ángulos muertos; espejos convexos en zonas críticas como redundancia óptica; pruebas trimestrales de visibilidad	Proyectos Mina + PSIE Ingenieros
R20	Inspección trimestral del drenaje de la caja de entrada de cable y de la vía en niveles 0, 15-16 y 28; instalación de sistema de drenaje permanente con bombas sumergibles si se detecta recurrencia; protección IP66 mínima en cajas eléctricas; revisión anual del estado de polines con cambio preventivo	Operación Mina + Proyectos Mina

Nota. Elaboración propia con base en norma ISO 31000 (ISO, 2018) y PMI (2021).

6.6. Trazabilidad del proyecto

Como cierre de la sección y de la fase de planificación del Trabajo Fin de Máster, se presenta una tabla de trazabilidad que articula los objetivos específicos definidos en la Sección 5.1 con las actividades del plan de acción (Sección 5.3), los recursos asignados (Sección 5.4), las partidas presupuestales (Sección 6.4) y los riesgos asociados (Sección 6.5). Esta trazabilidad demuestra la coherencia interna del proyecto y facilita el seguimiento durante la fase de ejecución, conforme a las buenas prácticas de gestión de proyectos del PMI (2021).

Tabla 15. Matriz de trazabilidad del proyecto.

Objetivo Específico	Actividades asociadas	Categorías presupuestales	Riesgos asociados
OE1: Implementar sistema integral de ayudas de visibilidad en seis niveles críticos en 3 meses	Actividades 2, 3	Categoría 1 (Equipos de visibilidad), Categoría 3 (PSIE), Categoría 4 (Proyectos Mina)	R2, R3, R11
OE2: Corregir desnivel de vía y adecuar zonas de embarque en 4 plomos en 4 meses	Actividades 4, 5, 6	Categoría 2 (Obra civil), Categoría 3 (NAVAR), Categoría 4 (Proyectos Mina)	R1, R4, R8, R9, R12
OE3: Diseñar protocolos operativos y capacitar al 100% del personal en 2 meses tras OE1 y OE2	Actividades 7, 8	Categoría 4 (QH&S), Categoría 5 (Capacitación)	R5, R6, R10
Objetivo general: reducción $\geq 25\%$ tiempos de espera en 9 meses	Actividades 1, 9, 10	Categoría 4 (Líder Proyecto), Categoría 6 (Pruebas y validación)	R7, R13, R14, R15, R16, R17

Nota. La matriz de trazabilidad permite verificar que cada objetivo específico cuenta con actividades, recursos, presupuesto y gestión de riesgos asignados. Elaboración propia con base en PMI (2021).

Con la presentación del alcance, las partes interesadas, el cronograma, el presupuesto, el análisis de riesgos y la trazabilidad, queda completada la fase de planificación del proyecto de optimización del sistema de transporte de personal del Apique 0 de la Mina El Silencio. El conjunto de elementos desarrollados en las Secciones 6, 7 y 8 constituye una propuesta integral, fundamentada en evidencia y coherente con la metodología de investigación-acción adoptada

(Lewin, 1946; Kemmis y McTaggart, 2005; Stringer, 2014), lista para transitar hacia la fase de ejecución bajo el liderazgo del equipo de Proyectos Mina y la coordinación de las áreas involucradas.

7. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Máster aborda un problema operativo concreto y crítico para la Mina El Silencio de Aris Mining: el cuello de botella estructural en el transporte de personal del Apique 0, derivado de la limitación a tres Skips operativos en un sistema diseñado originalmente para soportar el cuarto. La aplicación de la metodología de investigación-acción permitió identificar tres causas raíz interdependientes —pérdidas de visibilidad para el operador en siete puntos críticos, desnivel de la vía entre los niveles 15 y 16, y desactualización de protocolos operativos frente a la separación de 940 mm entre destorcedores— y articular una respuesta integral validada con datos técnicos verificables.

La solución propuesta consiste en una intervención simultánea en tres frentes —tecnológico, infraestructura física y operativo— sustentada en el diagnóstico documental del estado del sistema. La consulta a los informes técnicos disponibles (DOSSIER de aumento de capacidad, Informe MRT del cable, Análisis de vibraciones del motor e Informe de cierre de pendientes) confirmó que el sistema mecánico de izaje se encuentra al noventa y siete por ciento de completitud al 29 de noviembre de 2025, con cable nuevo certificado conforme a las normas EN 12927:2019 y ASTM E1571-21 (cero por ciento de pérdida de área metálica) y motor en condición normal según ISO 20816-3 (5,31 mm/s). Esta evidencia justifica que la intervención sea proporcional a la causa raíz —focalizada en visibilidad, vía, plomos y

operación— y evite el reemplazo total del sistema, que sería técnicamente innecesario y económicamente desproporcionado.

El impacto del proyecto se valida a través de un indicador estructural: la reducción del veinticinco por ciento en el tiempo total de movilización del personal durante los cambios de turno. Para un evento típico de movilización de quinientos trabajadores, el tiempo total se reduce de tres horas con cincuenta y ocho minutos a dos horas con cincuenta y nueve minutos, lo que equivale a un ahorro neto de cincuenta y nueve minutos por evento. La tasa de servicio ponderada del Apique 0 mejora de 126 a 168 personas por hora, derivándose matemáticamente de la razón cuatro tercios entre el sistema ampliado y el actual. Este veinticinco por ciento es por tanto estructural y no depende de variaciones del aforo específico de cada turno.

Desde la perspectiva económica, el proyecto requiere una inversión estimada en un rango de trescientos cincuenta y siete a setecientos dieciséis millones de pesos colombianos, con un punto medio de quinientos treinta y siete millones (equivalente a aproximadamente ciento cuarenta y siete mil dólares estadounidenses a la TRM de referencia). El periodo de recuperación de la inversión se ubica entre cinco y ocho meses bajo el escenario conservador y entre tres y cinco meses bajo los escenarios base y optimista. El beneficio anual recuperado oscila entre mil doscientos cincuenta y dos mil ochenta y tres millones de pesos colombianos, según el escenario considerado. Estos plazos resultan altamente favorables para los criterios de inversión típicos en proyectos de mejora operativa en minería subterránea (Kerzner, 2022).

Desde la perspectiva metodológica, el proyecto incorpora el cuerpo completo de buenas prácticas del PMBOK (PMI, 2021) en planificación: alcance estructurado por entregables, exclusiones, supuestos y restricciones; matriz RACI con la rendición de cuentas distribuida entre el Líder de Proyecto, Proyectos Mina y QH&S según naturaleza técnica de cada

actividad; cronograma con estimación PERT por tres puntos y holguras calculadas mediante el método del camino crítico; matriz de riesgos con veinte riesgos categorizados y plan de mitigación específico por riesgo; criterios de aceptación medibles por entregable con tolerancias y métodos de verificación; y trazabilidad explícita entre objetivos específicos, actividades, rubros presupuestales y riesgos.

Más allá del problema operativo inmediato, el proyecto contribuye a los objetivos estratégicos de Aris Mining: el aumento de capacidad de movilización del personal habilita el avance hacia la meta de trescientas mil onzas anuales del complejo de Segovia (Aris Mining, 2025) y refuerza el cumplimiento de los compromisos del Pacto Global de las Naciones Unidas suscritos por la corporación (Aris Mining, 2024). El modelo de intervención por frentes coordinados resulta replicable a otras unidades de izaje del grupo, conforme al caso comparativo internacional de la Mina El Silencio Bolivia donde una optimización análoga reportó una mejora del catorce por ciento del flujo operativo.

El presente trabajo reconoce dos limitaciones que se gestionan mediante el plan de acción. Primera, la línea base cuantitativa de tiempos de espera del personal y la confirmación del aforo real del Apique 0 deben ser levantadas durante la Actividad 1 del cronograma (Diagnóstico participativo complementario) y podrían ajustar las cifras de impacto en márgenes acotados. Segunda, las cifras del presupuesto corresponden a estimaciones razonadas con base en cotizaciones públicas y catálogos de proveedores especializados; deberán ser refinadas mediante cotizaciones formales gestionadas por el área de Compras de Aris Mining antes de comprometer recursos. Ninguna de estas limitaciones afecta el carácter estructural del veinticinco por ciento de mejora del tiempo de movilización.

8. Recomendaciones

A partir del análisis presentado y de los hallazgos documentados en los informes técnicos consultados, se formulan las siguientes recomendaciones, dirigidas tanto al equipo directivo de Aris Mining como a la comunidad académica y profesional interesada en proyectos de mejora operativa en minería subterránea. Las recomendaciones se ordenan según su criticidad para el cierre exitoso del proyecto y su relevancia para la sostenibilidad de los resultados a mediano plazo.

1. Iniciar de forma inmediata la Actividad 1 del cronograma (Diagnóstico participativo complementario) para levantar la línea base cuantitativa de tiempos de espera del personal y confirmar el aforo real del Apique 0, condición indispensable para validar contra dato real el cumplimiento del veinticinco por ciento de reducción.
2. Constituir formalmente el Comité Técnico del proyecto con reuniones semanales conforme al RACI redistribuido, asegurando la participación efectiva de Proyectos Mina y QH&S como Accountable de las actividades técnicas y de seguridad respectivamente, y descargando al Líder de Proyecto del rol concentrado de Accountable que se observó en la versión preliminar del plan.
3. Incorporar al alcance operativo del proyecto el plan de mantenimiento preventivo derivado del Informe de Análisis de Vibraciones, particularmente la lubricación de chumaceras del motor, la verificación del alineamiento y la instalación de un sistema automático de engrase, para preservar la línea base de 5,31 mm/s establecida el 20 de enero de 2026 conforme a la norma ISO 20816-3.

4. Establecer una rutina de monitoreo predictivo del sistema mecánico que combine el análisis trimestral de vibración del motor (ISO 20816-3:2022) con la inspección magnetoinductiva semestral del cable de izaje (EN 12927:2019; ASTM E1571-21), generando una bitácora de indicadores que sirva como evidencia de cumplimiento ante autoridades regulatorias y como insumo de decisiones de inversión futura.
5. Replicar el modelo de intervención coordinada por frentes (tecnológico, infraestructura, operativo) en otras unidades de izaje del Grupo Aris Mining, capitalizando el caso comparativo internacional de la Mina El Silencio Bolivia, donde una optimización análoga reportó una mejora del catorce por ciento del flujo operativo, y construyendo una base de conocimiento corporativo de buenas prácticas en izaje de personal.
6. Implementar, como condición previa a la operación regular con cuatro Skips, una política explícita de gestión de la fatiga del operador de elevadora (turnos máximos de ocho horas con descansos obligatorios, rotación cada cuatro horas en operación de alta intensidad y alarmas de detección de microsleep en cabina), conforme a la mitigación del Riesgo R18 incorporado en la matriz de riesgos del proyecto.
7. Auditar la cobertura efectiva del sistema CCTV inmediatamente después de su instalación mediante un recorrido instrumentado del Skip a velocidad nominal, con grabación y revisión frame-by-frame, para verificar la eliminación total de los siete puntos ciegos identificados y cerrar formalmente el Riesgo R19; reservar partida presupuestal para cámaras adicionales en caso de que la auditoría identifique ángulos muertos residuales.
8. Habilitar líneas de investigación futura sobre la integración de inteligencia artificial e internet de las cosas (IoT) en el monitoreo predictivo del sistema de izaje, particularmente para

anticipar fallas en chumaceras y degradación de cable, con el objetivo de transitar de un modelo de mantenimiento preventivo periódico a un modelo predictivo basado en datos en tiempo real.

9. Documentar de forma sistemática las lecciones aprendidas durante la implementación y consolidarlas en un caso de estudio académico que sirva como insumo para programas de formación en gestión de proyectos en minería, en alianza con el Instituto Europeo de Posgrado y otras instituciones académicas con presencia en países mineros.

10. Comunicar los resultados del proyecto a las partes interesadas externas de Aris Mining, particularmente al Pacto Global de las Naciones Unidas y a las autoridades mineras y ambientales colombianas, como evidencia tangible del compromiso ESG corporativo y de la contribución del proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados con trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8) e industria, innovación e infraestructura (ODS 9).

9. Referencias bibliográficas

American Society of Mechanical Engineers. (2022). *ASME B30.23-2022: Personnel lifting systems*. ASME.

Aris Mining Corporation. (2024). *Sustainability Report 2023*. <https://aris-mining.com/sustainability/sustainability-reports/>

Aris Mining Corporation. (2025a). *Informe cierre pendientes repotenciación elevadora personal Apique 0* [Informe técnico interno]. Mina El Silencio, Segovia, Antioquia, Colombia.

Aris Mining Corporation. (2025b). *Informe y resultados prueba operacional Skip N°4*

personal: Validación de ruta nivel 0–28 Apique 0 [Informe técnico interno]. Mina El

Silencio, Segovia, Antioquia, Colombia.

Aris Mining Corporation. (2025c). *Segovia Operations*. [https://aris-](https://aris-mining.com/operation/segovia/)

[mining.com/operation/segovia/](https://aris-mining.com/operation/segovia/)

Aris Mining Corporation. (2026). *Dossier aumento de capacidad de la elevadora de personal*

Apique 0: Diseño integral y especificaciones técnicas [Informe técnico interno]. Mina

El Silencio, Segovia, Antioquia, Colombia.

ASTM International. (2021). *ASTM E1571-21: Standard practice for electromagnetic*

examination of ferromagnetic steel wire rope. ASTM International.

Cadavid Patiño, S. A. (2026). *Informe de análisis de vibración: Elevadora de personal*

nueva, Mina El Silencio [Reporte técnico de monitoreo predictivo]. Aris Mining,

Segovia, Antioquia, Colombia.

Carr, W. y Kemmis, S. (1986). *Becoming critical: Education, knowledge and action*

research. Falmer Press.

Comité Europeo de Normalización. (2019). *EN 12927:2019: Safety requirements for*

ableway installations designed to carry persons — Ropes. CEN.

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods*

approaches (4ta ed.). Sage Publications.

David, F. R. (2011). *Strategic management: Concepts and cases* (13ª ed.). Prentice Hall.

Emcocables S.A.S. y Gualteros, M. Á. (2025). *Reporte MRT inspección cables elevadora*

personal: Método magnetointuctivo conforme EN 12927:2019 y ASTM E1571-21

(Informe MRT-20251217-01) [Inspección no destructiva]. Aris Mining, Segovia, Antioquia, Colombia.

Greenwood, D. J. y Levin, M. (2007). *Introduction to action research: Social research for social change* (2da ed.). Sage Publications.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 31000:2018 — Risk management — Guidelines*. ISO.

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 20816-3:2022: Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW*. ISO.

Kemmis, S. y McTaggart, R. (2005). Participatory action research. En N. K. Denzin y Y. S. Lincoln (Eds.), *The SAGE handbook of qualitative research* (3ra ed., pp. 559-603). Sage Publications.

Kerzner, H. (2022). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (13ª ed.). Wiley.

Lewin, K. (1946). Action research and minority problems. *Journal of Social Issues*, 2(4), 34-46.

Mendelow, A. L. (1981). Environmental scanning: The impact of the stakeholder concept. *Proceedings of the Second International Conference on Information Systems*, 407-417.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2015). *Decreto 1886 de 2015: Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas*. Diario Oficial de la República de Colombia.

Project Management Institute. (2021). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide)* (7ma ed.). PMI.

Reason, P. y Bradbury, H. (2008). *The SAGE handbook of action research* (2da ed.). Sage Publications.

Stringer, E. T. (2014). *Action research* (4ta ed.). Sage Publications.

10. Anexos

La presente sección reúne los anexos documentales que sustentan las decisiones técnicas y los criterios de aceptación adoptados a lo largo del proyecto. Cada anexo presenta una síntesis ejecutiva del documento original, los datos clave consolidados en una tabla y la cita formal al documento técnico fuente. Los documentos completos forman parte del expediente del proyecto y están disponibles para consulta del Comité Académico y del Comité Técnico de Aris Mining.

Anexo A. Resumen del DOSSIER de aumento de capacidad de la elevadora de personal

El DOSSIER técnico, elaborado por la Dirección de Proyectos Mina de Aris Mining en febrero de 2026, consolida el diseño integral del sistema de izaje de personal del Apique 0 con sus especificaciones técnicas detalladas. Contiene la trazabilidad completa de los componentes electromecánicos, los planos generales y las cargas de diseño que respaldan la operación con cuatro Skips. Este documento es la fuente primaria de las especificaciones mínimas presentadas en la Sección 5.4 y de los valores de referencia para el monitoreo predictivo descrito en la Sección 6.1.

Tabla 16. Datos clave del DOSSIER (Aris Mining, 2026).

Componente / parámetro	Especificación	Norma o referencia
Motor principal	WEG W22, 400 HP, 460 V 60 Hz, NEMA Premium Efficiency, IC411 TEFC, frame 586/7TZ	NEMA MG-1
Reductor	NORD SK15307, ratio 63,82:1, 599 kW nominal, 1 790 rpm in / 21,71 rpm out, factor de servicio 3,05	DIN / ISO 6336
Cable de izaje	6×19 IPS FC, Ø 38,74 mm, 5,4 kg/m, longitud 1 200 m, carga de rotura 83 t/m	EN 12927:2019
Drum (tambor)	Acero SAE 4340, Ø ext 2 810 mm, ancho 952,5 mm, peso 7 000 kg	DIN 6885-1A
Freno de servicio	SIBRE TE 500, par 5 400 Nm, peso 130 kg	ASME B30.23
Freno de emergencia	VULKAN 10C, fuerza 58 370 N, par 61 000 Nm	ASME B30.23
Capacidad de transporte	10 personas/Skip × 4 Skips × 6 ciclos/h ≈ 240 personas/hora	Cálculo de diseño
Velocidad nominal de izaje	2,5 m/s (V3 selector)	Especificación operativa
Inclinación máxima del apique	34°	Diseño civil
Estado del proyecto al corte	97% completitud (23/26 ítems) al 29-nov-2025	Auditoría interna

Fuente: Aris Mining Corporation. (2026). Dossier aumento de capacidad de la elevadora de personal Apique 0 [Informe técnico interno].

Anexo B. Reporte MRT de inspección magnetointductiva del cable de izaje

El reporte MRT (Magnetic Rope Testing), elaborado por Emcocables S.A.S. con el técnico responsable Miguel Ángel Gualteros, evalúa la condición del cable de izaje instalado el 30 de noviembre de 2025. La inspección se realizó el 17 de diciembre de 2025 conforme a las normas EN 12927:2019 y ASTM E1571-21, mediante el método magnetointductivo. Este reporte constituye la línea base para el monitoreo periódico del cable y respalda los criterios de aceptación de la Sección 6.1.

Tabla 17. Datos clave del reporte MRT del cable (Emcocables y Gualteros, 2025).

Parámetro	Resultado	Criterio de aceptación
Fecha de inspección	17 de diciembre de 2025	—
Identificación del cable	6×19 IPS FC, Ø 38,74 mm, fabricación 30-nov-2025	—
Tiempo en servicio al inspeccionar	19 días (cable nuevo)	—
Pérdida de área metálica (LMA) zona 6×d	0%	≤ 0,5%
Pérdida de área metálica (LMA) zona 30×d	0%	≤ 1,0%
Discontinuidades tipo alambre roto	Ninguna detectada	Máximo 1 por longitud de paso
Norma aplicable	EN 12927:2019, ASTM E1571-21	Método magnetointductivo certificado
Próxima inspección recomendada	17 de junio de 2026 (semestral)	Cumplimiento del plan de monitoreo

Fuente: Emcocables S.A.S. y Gualteros, M. Á. (2025). Reporte MRT inspección cables elevadora personal (Informe MRT-20251217-01).

Anexo C. Análisis de vibración del motor de la elevadora

El informe de vibración, realizado por el área de Servicio de Monitoreo Predictivo el 20 de enero de 2026, evalúa la condición del motor recientemente instalado en la elevadora de personal. El análisis identificó al motor en condición normal conforme a la norma ISO 20816-3:2022, pero detectó fricción incipiente en chumaceras con recomendaciones específicas de mantenimiento preventivo que se incorporan al plan del proyecto (Sección 5.2 y Sección 8 Recomendaciones).

Tabla 18. Datos clave del análisis de vibración (Cadavid Patiño, 2026).

Parámetro de vibración	Valor medido	Criterio aplicable
Velocidad eficaz motor — eje libre horizontal	5,31 mm/s	$\leq 7,1$ mm/s (ISO 20816-3 zona aceptable máquinas grandes)
Velocidad eficaz reductor — eje ingreso axial	1,91 mm/s	$\leq 4,5$ mm/s (ISO 20816-3)
Aceleración pico (envolvente)	4,28 gE	Sin tendencia creciente trimestral
Temperatura del motor en operación	≤ 46 °F (8 °C)	Condición normal
Hallazgos cualitativos	Fricción detectada en chumaceras motor (deslizantes y de engranaje tipo aceite)	Recomendación: lubricación + alineamiento + sistema automático de engrase
Norma aplicada	ISO 20816-3:2022	Vibración mecánica de máquinas industriales
Próximo monitoreo recomendado	20 de abril de 2026 (trimestral)	Plan de monitoreo predictivo

Fuente: Cadavid Patiño, S. A. (2026). Informe de análisis de vibración: Elevadora de personal nueva, Mina El Silencio.

Anexo D. Cierre de pendientes de la repotenciación de la elevadora

El informe de cierre de pendientes, generado por la Unidad de Proyectos Mina con fecha de corte 29 de noviembre de 2025, documenta el estado del avance de la repotenciación del sistema de izaje del Apique 0. El reporte evidencia un noventa y siete por ciento de completitud técnica con 23 de 26 ítems finalizados, lo cual constituye la línea de partida operativa del presente proyecto de optimización del transporte de personal.

Tabla 19. Datos clave del informe de cierre de pendientes (Aris Mining, 2025a).

Indicador	Estado	Observación
Fecha de corte del informe	29 de noviembre de 2025	—
Ítems totales del plan de repotenciación	26	Alcance original
Ítems finalizados	23	88,5% del alcance
Ítems en progreso	3	Dentro del cronograma de cierre
Porcentaje de completitud técnica	97%	Sistema operacional con observaciones acotadas
Cable de izaje	Instalado 30-nov-2025 (validado MRT)	Anexo B
Sistema CCTV	Implementado (alcance básico)	Cobertura de puntos ciegos a auditar (Riesgo R19)
Drenaje de caja entrada cable	Solucionada acumulación hídrica	Monitoreo trimestral recomendado (Riesgo R20)
Pendiente desnivel vía 15-16	Identificado, no ejecutado	Constituye Actividad 4 del presente proyecto

Fuente: Aris Mining Corporation. (2025a). Informe cierre pendientes repotenciación elevadora personal Apique 0.

Anexo E. Prueba operacional del cuarto Skip de personal

El informe de la prueba operacional del 9 de agosto de 2025 documenta la primera validación de campo del cuarto Skip de personal en el tren del Apique 0. La prueba abarcó la ruta completa del nivel 0 al nivel 28 a velocidades crecientes, sin incidentes mecánicos, pero identificó hallazgos críticos sobre visibilidad e infraestructura que constituyen las causas raíz abordadas en el presente proyecto (Sección 4.1.5 y Sección 5.2).

Tabla 20. Datos clave de la prueba del 4to Skip (Aris Mining, 2025b).

Hallazgo / parámetro	Detalle	Tratamiento en este proyecto
Fecha de la prueba	9 de agosto de 2025	—
Ruta probada	Nivel 0 ↔ Nivel 28 (28 niveles subterráneos)	—
Velocidades validadas	V1, V2 y V3 (hasta 2,5 m/s)	Operación nominal a V3
Incidentes mecánicos durante la prueba	Ninguno	Sistema mecánicamente apto
Puntos de pérdida de visibilidad para el operador	Niveles 6, 13, 20, 21–22, 23 y 25–26	Frente tecnológico del proyecto (Sec 5.2)
Pérdida visual máxima registrada	5 segundos entre niveles 25 y 26	Cámaras IP67 + espejos + LED
Desnivel observado en vía	Tramo niveles 15–16 con desnivel residual	Actividad 4 — corrección civil
Separación de destorcedores Crosby	Aproximadamente 940 mm entre Skips	Anclajes auxiliares (Actividad 6) + protocolos (Actividad 7)
Activación de protocolo de emergencia	Una vez en nivel 21 sin víctimas	Lección aprendida incorporada a los protocolos del proyecto

Fuente: Aris Mining Corporation. (2025b). Informe y resultados prueba operacional Skip N°4 personal.