

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y
METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO
UTILIZANDO LOS EQUIPOS MUCKING LOADER Y MINIDUMPER
EN EL CRUCERO 06 - MINA ORIÓN - AREQUIPA**

PRESENTADO POR:

Br. ELSON CONDO SOTO

PARA OPTAR AL TITULO

**PROFESIONAL DE INGENIERO DE
MINAS**

ASESOR:

Mg. RAIMUNDO MOLINA DELGADO.

CUSCO – PERU

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor MET. RAYMUNDO MOLINA DELGADO
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGUEO Y
ACARIZO UTILIZANDO LOS EQUIPOS MUCKING LOADER Y MINIDUMPER
EN EL CRUCERO 06 - MINA ORION-A REQUIPA"

Presentado por: ELSON CONDO SOTO DNI N° 74437200;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<u>X</u>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 10 de JUNIO de 2026

[Firma]

Firma

Post firma MET. RAYMUNDO MOLINA DELGADO

Nro. de DNI 23912083

ORCID del Asesor 0000-0003-0291-2700

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 272596598788591

ELSON CONDO SOTO

“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO UTILIZANDO LOS EQUIPOS MUCKING LOADER Y MINIDUMP...”

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:598788591

Fecha de entrega

9 jun 2026, 3:13 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 jun 2026, 3:25 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

Optimizacion de proceso de carguio y acarreo utilizando los equipos mucking loader y minidump....pdf

Tamaño del archivo

1.9 MB

145 páginas

29.048 palabras

170.279 caracteres

6% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
4334 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mi madre, Juana, por su amor y por acompañarme en cada paso de mi formación académica, dándome siempre la fortaleza para seguir adelante.

A mi padre, Fortunato, por ser mi mayor ejemplo y el motor que me impulsa, brindándome apoyo y motivación en cada etapa de mi desarrollo profesional.

A mis hermanos y a toda mi familia, por su cariño, confianza y por ser una fuente constante de fortaleza y motivación para continuar.

Elson Condo Soto.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por haberme brindado la oportunidad de formarme profesionalmente y desarrollar los conocimientos necesarios para mi crecimiento académico. Asimismo, agradezco a mi asesor de tesis, Mgt. Raimundo Molina Delgado, por su orientación, paciencia y apoyo técnico durante el desarrollo de la presente investigación. Del mismo modo, extendiendo mi gratitud a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes, mediante su exigencia y enseñanza, contribuyeron significativamente a mi formación profesional.

De igual manera, expreso mi especial agradecimiento a la empresa Analytica Mineral Services S.A.C., por permitirme desarrollar esta investigación en sus instalaciones y facilitar el acceso a la información necesaria para su ejecución. En particular, agradezco al Ing. Daniel Arcos Valverde, por su confianza, disposición y apoyo durante la etapa de recolección de datos, aspectos que fueron fundamentales para concretar el presente trabajo de investigación.

Elson Condo Soto.

INTRODUCCIÓN

La minería subterránea en la región Arequipa constituye uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico regional, al concentrar unidades mineras de pequeña, mediana y gran escala que operan bajo condiciones geomecánicas y operativas cada vez más exigentes. En este contexto, las operaciones de desarrollo y preparación de labores adquieren especial relevancia, ya que de su eficiencia depende la continuidad del ciclo productivo, el control de costos y la seguridad del personal involucrado.

Dentro del ciclo de minado subterráneo, las etapas de carguío y acarreo representan componentes críticos, debido a su impacto directo en la productividad horaria, la utilización de equipos y el costo unitario por tonelada extraída. En diversas operaciones subterráneas de Arequipa aún se emplean sistemas convencionales basados en palas neumáticas y vagones mineros, los cuales, si bien presentan bajos costos iniciales, suelen mostrar limitaciones significativas en términos de capacidad, maniobrabilidad y tiempos de ciclo, afectando el desempeño global de las labores de desarrollo.

Frente a esta realidad, la incorporación de equipos semimecanizados como el Mucking Loader y el Minidumper se presenta como una alternativa técnica viable para optimizar el proceso de carguío y acarreo en labores de sección reducida. Estos equipos destacan por su versatilidad, menor inversión inicial en comparación con sistemas totalmente mecanizados y su adaptabilidad a geometrías variables de cruceros; sin embargo, su desempeño operativo está condicionado por factores como la geometría de la labor, la capacidad de carga, la distancia de acarreo, la fragmentación del material y la adecuada organización del ciclo operativo.

En ese sentido, la presente investigación se orienta a analizar y optimizar el uso del Mucking Loader y el Minidumper en el Crucero 06 de la Mina Orión, evaluando su impacto sobre los principales indicadores técnicos y económicos del proceso de carguío y acarreo. El estudio busca generar evidencia cuantitativa que permita sustentar la toma de decisiones operativas y aportar criterios técnicos aplicables a otras operaciones subterráneas de características similares en la región Arequipa y el país.

La investigación se encuentra estructurada en cinco capítulos. En el Capítulo I, se desarrolla el planteamiento del problema, la formulación de los problemas de investigación, los objetivos, las hipótesis, la justificación, importancia y delimitación del estudio. En el Capítulo II, se presenta el marco teórico, compuesto por los antecedentes de investigación, conceptos fundamentales y bases teóricas relacionadas con el ciclo de minado, el carguío, el acarreo y el uso de equipos semimecanizados en minería subterránea. En el Capítulo III, se describe la metodología empleada, precisando el tipo y nivel de investigación, la población, muestra, técnicas, instrumentos y procedimientos de análisis de datos. En el Capítulo IV, se desarrolla la investigación mediante el diagnóstico del sistema convencional, la implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper, así como la evaluación técnica y económica de los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo V, se presentan los resultados y la discusión, contrastando los hallazgos con los antecedentes revisados, para luego establecer las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar el proceso de carguío y acarreo mediante la implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper en el Crucero 06 – Nivel 1350 de la Mina Orión, ubicada en la región Arequipa. El problema identificado estuvo relacionado con las limitaciones del sistema convencional de limpieza y transporte de material, el cual empleaba pala neumática y carros mineros U-35, generando elevados tiempos de ciclo, baja productividad y altos costos operativos. La metodología utilizada fue de enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y nivel explicativo, basada en la comparación de indicadores operativos antes y después de la implementación de los equipos semimecanizados. Para ello, se analizaron tiempos de carguío, productividad horaria, utilización de equipos y costos unitarios mediante registros operativos y observaciones de campo. Los resultados evidenciaron una reducción significativa de los tiempos de limpieza y acarreo, así como un incremento de la productividad, alcanzando valores promedio de 23,6 t/h y máximos de 29 t/h. Asimismo, se observó una mejora en la utilización de los equipos y una disminución del costo unitario de transporte de 29,95 USD/t a 22,50 USD/t. Desde el punto de vista económico, la implementación generó ahorros operativos y un período estimado de recuperación de la inversión de 2,5 años. Se concluye que la incorporación del Mucking Loader y el Minidumper constituye una alternativa técnica y económicamente viable para mejorar la eficiencia de las labores de desarrollo en minería subterránea.

Palabras clave: Carguío y acarreo, Mucking Loader, Minidumper, Productividad minera, Optimización operativa.

ABSTRACT

This research aimed to optimize the loading and hauling process by implementing a Mucking Loader and Minidumper at Crosscut 06 – Level 1350 of the Orión Mine, located in the Arequipa region. The identified problem was related to the limitations of the conventional material cleaning and transport system, which used a pneumatic shovel and U-35 mine cars, resulting in long cycle times, low productivity, and high operating costs. The methodology employed was quantitative, applied, and explanatory, based on comparing operational indicators before and after the implementation of the semi-mechanized equipment. Loading times, hourly productivity, equipment utilization, and unit costs were analyzed using operational records and field observations. The results showed a significant reduction in cleaning and hauling times, as well as an increase in productivity, reaching average values of 23.6 t/h and maximums of 29 t/h. Furthermore, an improvement in equipment utilization was observed, along with a decrease in the unit transport cost from USD 29.95/t to USD 22.50/t. From an economic standpoint, the implementation generated operational savings and an estimated investment recovery period of 2.5 years. It is concluded that the incorporation of the Mucking Loader and the Minidumper constitutes a technically and economically viable alternative for improving the efficiency of development operations in underground mining.

Keywords: Loading and Hauling, Mucking Loader, Minidumper, Mining Productivity, Operational Optimization.

Índice

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INTRODUCCIÓN	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1. PROBLEMA GENERAL	2
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	2
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.4.1. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4.2. IMPORTANCIA	5
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.5.1. DELIMITACIÓN TEMPORAL	5
1.5.2. DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	5

2.	CAPITULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	7
2.1.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	7
2.1.1.	ANTECEDENTES INTERNACIONALES	7
2.1.2.	ANTECEDENTES NACIONALES	8
2.2.	BASES TEORICAS O CIENTIFICAS	9
2.2.1.	CICLO DE MINADO	9
2.2.2.	LABORES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA	11
2.2.3.	CORTE Y RELLENO	12
2.2.4.	ANÁLISIS TÉCNICO-OPERATIVO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS	28
2.2.5.	MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO	31
2.2.6.	Mucking Loader en minería subterránea.....	32
2.2.7.	Minidumper en el acarreo subterráneo	32
2.3.	DEFINICIÓN DE TERMINOIS	33
2.3.1.	Ciclo de minado	33
2.3.2.	Avance lineal.....	33
2.3.3.	Sistemas mecanizados	34
2.3.4.	Productividad minera	34
2.3.5.	Secuencia operativa.....	34
2.3.6.	Carga útil	35

2.3.7.	Costo operativo	35
2.4.	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	36
2.4.1.	HIPÓTESIS GENERAL	36
2.4.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	36
2.5.	VARIABLES DE ESTUDIO	36
2.5.1.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	36
2.5.2.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	36
3.	CAPITULO III METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	38
3.1.	TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	38
3.1.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	38
3.1.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	38
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
3.2.1.	POBLACION.....	39
3.2.2.	MUESTRA.....	39
3.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	39
3.3.1.	TÉCNICAS	39
3.3.2.	INSTRUMENTOS	40
3.3.3.	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	40
3.4.	OPTIMIZACION DEL CARGUIO Y ACARREO.....	40

3.4.1.	EVALUACIÓN DEL TIEMPO PROMEDIO DE CARGUÍO POR CICLO	45
3.4.2.	ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD HORARIA ACTUAL (TM/H)...	49
3.4.3.	PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO CONVENCIONAL...	53
3.4.4.	IDENTIFICACIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA OPERATIVOS.....	55
3.4.5.	ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS ACTUALES POR TONELADA CARGADA	57
3.5.	IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA MUCKING LOADER.....	60
3.5.1.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS A IMPLEMENTAR	60
3.5.2.	ADECUACIONES NECESARIAS EN LA INFRAESTRUCTURA MINERA	62
3.5.3.	CAPACITACIÓN DEL PERSONAL OPERATIVO	64
3.5.4.	ESTRATEGIA OPERATIVA DE SINCRONIZACIÓN CON EL ACARREO	66
3.6.	RESULTADOS TÉCNICOS Y OPERATIVOS OBTENIDOS	70
3.6.1.	COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE CICLO ANTES Y DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN.....	71
3.6.2.	INCREMENTO EN LA PRODUCTIVIDAD	74
3.6.3.	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LIMPIEZA POR AVANCE	76

3.6.4. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO MUCKING LOADER	78
3.7. RESULTADOS ECONÓMICOS Y DE COSTO-BENEFICIO	81
3.7.1. CÁLCULO DEL COSTO OPERATIVO UNITARIO POST-IMPLEMENTACIÓN.....	81
3.7.2. EVALUACIÓN DEL RETORNO DE INVERSIÓN DEL EQUIPO.....	83
3.7.3. IMPACTO FINANCIERO PROYECTADO EN EL CORTO Y MEDIANO PLAZO	85
4. CAPITULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS	88
4.1. RESULTADOS	88
4.1.1. Optimización del proceso de carguío y acarreo mediante la metodología DMAIC	91
4.2. COMPROBACIÓN DE HIPOTESIS.....	94
4.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL (I.A.)	96
4.4. DISCUSIÓN.....	101
4.4.1. Comparación con Escobar (2017) – Estudio de tiempos y movimientos en el acarreo subterráneo	101
4.4.2. Comparación con el antecedente nacional – Mina El Tingo (Universidad Nacional de Trujillo).....	101

4.4.3. Comparación con Quispe y Arisnabarreta (2022) – Uso de Minidumper eléctrico en acarreo subterráneo.....	102
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105
1 ANEXOS	107
Fuente: Chara (2017)	107
2 ANEXO 2 CÓDIGO DE VALIDACIÓN DE OPTIMIZACIÓN CON IA	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros Operativos Relevantes	28
Tabla 2	Operacionalización de variables	37
Tabla 3	Equipos empleados en el carguío en U.E.A. Orion	41
Tabla 4	Pala neumática características	42
Tabla 5	Equipos empleados en el carguío en U.E.A. Orion	44
Tabla 6	Tiempos de ciclo 28 de mayo	46
Tabla 7	Tiempos de Carro Minero U-35	47
Tabla 8	Tabla resumen productividad	49
Tabla 9	Resumen de tiempos y producción	51
Tabla 10	Rendimiento horario	51
	Fuente: Elaboración propia	52
Tabla 11	Tiempos de pala neumática y carro minero	53
Tabla 12	Distribución de tiempos	55
Tabla 13	Costos antes de la implementación	58
Tabla 14	Características del Mucking Loader	61
Tabla 15	Características del Minidumper	62
Tabla 16	Modificaciones para la implementación	64
Tabla 17	Personal requerido	65
Tabla 18	Resumen de la distribución de equipos.....	70
Tabla 19	Tiempos nuevos con la implementación del Mucking loader	72
Tabla 20	Tiempos resumen después de la implementación	73
Tabla 21	Producción después de la implementación	74

Tabla 22	Resumen de tiempos	75
Tabla 23	Resumen de rendimiento operativo	75
Tabla 24	Tiempos después de la implementación	77
Tabla 25	Resumen de tiempos	78
Tabla 26	Tiempos de Mucking Loader y minidumper	79
Tabla 27	Costos después de la implementación.....	82
Tabla 28	Inversión inicial	83
Tabla 29	Comparación entre método convencional y semimecanizado	83
Tabla 30	Análisis de flujo de caja.....	84
Tabla 31	DMAIC - 1	92
Tabla 32	DMAIC - 2.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Pala neumática.....	43
Figura 2	Carguío y acarreo con pala neumática y carro minero U-35.....	43
Figura 3	Mucking loader.....	61
Figura 4	Diagrama para 100 metros.....	67
Figura 5	Diagrama para 150 m	67
Figura 6	Diagrama para 200 metros.....	68
Figura 7	Diagrama de 250 m.....	69

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Tiempo promedio por viaje.....	48
Gráfica 2	Productividad del acarreo convencional	50
Gráfica 3	Rendimiento horario por día	52
Gráfica 4	Disponibilidad vs utilización	54
Gráfica 5	Distribución de tiempos antes.....	56
Gráfica 6	Costo por TM antes de la implementación	59
Gráfica 7	Rendimiento operativo.....	75
Gráfica 8	Comparación de tiempos.....	80
Gráfica 9	Ahorros a través del tiempo	84
Gráfica 10	Tiempo de ciclo del minidumper según distancia.....	97
Gráfica 11	Utilización del Mucking Loader por distancia y número de dumpers.....	98
Gráfica 12	Ociosidad del Mucking Loader por escenario	98
Gráfica 13	Espera promedio de minidumpers por congestión y sincronización	99
Gráfica 14	Productividad estimada según distancia y número de dumpers.....	100

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, el proceso de carguío y acarreo en la construcción del Crucero 06 de la Mina. Orión, en Arequipa, ha presentado serias limitaciones operativas que afectan directamente la eficiencia del desarrollo subterráneo. Durante las etapas previas, las labores se realizaban utilizando una pala neumática para el carguío y vagones mineros U35 para el acarreo, un sistema que ha demostrado ser poco eficiente frente a las exigencias actuales de productividad y control de costos.

A pesar del esfuerzo del personal técnico y operativo, se ha constatado que estos métodos convencionales no logran cumplir con los objetivos de producción. El tiempo promedio de carguío por ciclo supera los 6.5 minutos, lo que reduce la capacidad de producción a tan solo 30 a 35 toneladas por hora, muy por debajo del estándar de operaciones similares, donde se alcanzan más de 50 toneladas por hora. Además, el acarreo con vagones U35 implica tiempos prolongados de descarga y una baja maniobrabilidad, afectando el flujo continuo del ciclo operativo.

El bajo rendimiento también se manifiesta en el escaso porcentaje de utilización de los equipos, que no supera el 75 %, reflejando una considerable pérdida de tiempo en actividades improductivas o paradas operativas. Asimismo, el tiempo requerido para la limpieza y preparación del frente luego de cada voladura puede superar los 90 minutos por avance, generando cuellos de botella en el proceso general de avance.

Todo esto repercute negativamente en los costos operativos, los cuales han superado los 10 dólares por tonelada, lo que pone en riesgo la rentabilidad del proyecto, especialmente en un contexto de precios volátiles del mineral. Frente a esta situación, se ha propuesto e implementado una mejora tecnológica en los procesos de carguío y acarreo mediante la incorporación del equipo Mucking Loader y el Minidumper, los cuales han demostrado en otras operaciones subterráneas ser más eficientes, maniobrables y rentables.

1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL

- ¿Cómo influye la implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper en la optimización del proceso de carguío y acarreo en el crucero 06 en la Mina. Orión, Arequipa?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la situación actual del proceso de carguío y acarreo en el crucero 06 en la Mina . Orión, Arequipa?
- ¿Cuáles son los factores productivos relacionados a la implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper en el proceso de carguío y acarreo en el crucero 06 en la Mina . Orión, Arequipa?

- ¿Cuáles son los costos operacionales relacionados por la optimización del proceso de carguío y acarreo con los equipos Mucking Loader y Minidumper en el crucero 06 en la Mina . Orión, Arequipa?

1.3.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Optimizar el proceso de carguío y acarreo mediante la implementar de los equipos Mucking Loader y Minidumper en el crucero 06 en la Mina . Orión, Arequipa.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual del proceso de carguío y acarreo en el crucero 06 en la Mina . Orión, Arequipa.
- Determinar los factores productivos relacionados a la implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper en el proceso de carguío y acarreo en el crucero 06 en la Mina . Orión, Arequipa.
- Determinar los costos operacionales relacionados por la optimización de carguío y acarreo con los equipos mucking loader y minidumper en el crucero 06 en la mina. Orión Arequipa.

1.4.JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica desde un enfoque técnico–operativo, económico, de seguridad y competitivo, debido a que el proceso de carguío y acarreo constituye una de las etapas más críticas del ciclo de desarrollo en minería subterránea, influyendo directamente en la continuidad operativa, la productividad horaria, los costos unitarios y las condiciones de trabajo del personal.

En la actualidad, el proceso de carguío y acarreo en la construcción del Crucero 06 – Nivel 1350 de la Mina Orión, en la región Arequipa, presenta limitaciones operativas significativas que afectan la eficiencia del desarrollo subterráneo. El sistema convencional empleado, basado en pala neumática para el carguío y vagones mineros U-35 para el acarreo, ha evidenciado elevados tiempos muertos, ciclos de carguío prolongados, baja maniobrabilidad y reducida capacidad de transporte, lo que se traduce en una productividad insuficiente frente a las exigencias actuales de la operación minera.

Desde el punto de vista técnico, estas limitaciones generan ciclos improductivos recurrentes, incrementan el tiempo de limpieza posterior a cada voladura y reducen el número de ciclos efectivos por turno. En ese contexto, la implementación de equipos como el Mucking Loader y el Minidumper se justifica como una alternativa tecnológica orientada a reducir tiempos muertos, mejorar la continuidad del ciclo operativo y optimizar el desempeño del carguío y acarreo, especialmente en labores de desarrollo de sección reducida.

Desde el enfoque económico, el bajo rendimiento del sistema convencional se refleja en costos operativos elevados por tonelada extraída, producto del mayor consumo de horas-hombre, menor producción efectiva por turno y menor utilización de los equipos disponibles. La presente investigación se justifica porque permite evaluar cuantitativamente el impacto de la mecanización en la reducción del costo unitario, aportando información técnica confiable para la toma de decisiones orientadas a mejorar la rentabilidad de la operación.

Asimismo, desde la perspectiva de seguridad y ergonomía, el uso de equipos convencionales implica una mayor exposición del personal al frente de trabajo, mayor esfuerzo físico durante las labores de carguío y mayores riesgos asociados a condiciones inseguras. La incorporación del Mucking Loader y el Minidumper contribuye a mejorar las condiciones de

trabajo, reducir la intervención directa del operario en zonas críticas y fortalecer los estándares de seguridad operativa en minería subterránea.

Finalmente, la investigación se justifica por su contribución al incremento de la competitividad de la mina, al proponer un sistema de carguío y acarreo más eficiente, moderno y alineado con prácticas operativas utilizadas en otras operaciones subterráneas. Los resultados obtenidos permiten sustentar técnicamente la replicabilidad de esta mejora en labores similares, fortaleciendo la gestión operativa y el posicionamiento de la unidad minera en un mercado cada vez más exigente en términos de eficiencia, seguridad y control de costos.

1.4.2. *IMPORTANCIA*

La relevancia de la presente investigación radica en su contribución a la mejora de la productividad durante el ciclo de limpieza y acarreo, optimizando los indicadores clave de desempeño, tales como productividad, utilización de equipos y costos operativos. La implementación de estos equipos permite una toma de decisiones estratégicas fundamentada en evidencia, alineándose con un modelo estandarizado de operación subterránea más competitivo, moderno y seguro.

1.5.DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. *DELIMITACIÓN TEMPORAL*

La investigación abarca el análisis de datos operativos y pruebas en campo realizadas durante el periodo comprendido entre enero y junio del año 2025.

1.5.2. *DELIMITACIÓN ESPACIAL*

El estudio se desarrolla en la U.E.A. Mina Orión-Chala, perteneciente a la empresa Analytica Mineral Services S.A.C., ubicada en el departamento de Arequipa, provincia de Caravelí, entre los distritos de Atiquipa y Yauca, en el sector denominado Cerro Francia. El área

de estudio se encuentra a una altitud aproximada de 2000 m.s.n.m., dentro de la Carta Nacional 32-ñ Chala. Sus coordenadas centrales corresponden a Este: 578500 y Norte: 8276000, en el sistema UTM PSAD 56, zona 18S.

De manera específica, la investigación se delimita a la labor subterránea denominada Crucero 06 – Nivel 1350, donde se evalúa el proceso de carguío y acarreo mediante el uso de los equipos Mucking Loader y Minidumpe.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1.ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

(Escobar, 2017) *“Estudio de tiempos y movimientos del proceso de acarreo en una mina y propuesta para mejorar su eficiencia”- Universidad Nacional Autónoma de México - México*

Objetivo: Analizar los tiempos y movimientos del sistema de acarreo con la finalidad de identificar actividades improductivas y proponer mejoras operativas que incrementen la eficiencia del proceso.

Resultados: Se determinó que aproximadamente el 30 % del tiempo total del proceso correspondía a actividades no productivas, asociadas principalmente a deficiencias en la planificación, baja disponibilidad mecánica y coordinación inadecuada entre carguío y transporte.

Conclusiones: El estudio concluye que la optimización del acarreo requiere una gestión integrada de tiempos, flota y mantenimiento. La mejora del sistema de coordinación entre equipos

y la adecuada planificación operativa permiten incrementar la eficiencia y reducir costos, resultados directamente relacionados con investigaciones orientadas a la optimización del carguío y acarreo subterráneo.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

(Araujo, 2019) “Implementación del equipo Mucking Loader para aumentar la productividad en la cortada 5000 Mina El Tingo de Compañía Minera Poderosa” - Universidad Nacional de Trujillo - Perú.

Objetivo: Incrementar la productividad del proceso de limpieza y carguío mediante la implementación del equipo Mucking Loader en labores de desarrollo horizontal.

Resultados: La investigación evidenció un incremento significativo de la productividad, alcanzando valores cercanos a 115 t/h. Asimismo, se logró reducir considerablemente el tiempo de limpieza por avance y disminuir el costo por tonelada transportada, a pesar del mayor costo horario del equipo implementado.

Conclusiones: El estudio concluye que el uso del Mucking Loader constituye una alternativa técnica y económicamente viable para labores de desarrollo subterráneo, debido a que permite mejorar la productividad, reducir tiempos operativos y optimizar los costos unitarios del proceso de carguío. Este antecedente guarda relación directa con la presente investigación, ya que analiza la mejora del carguío mediante equipos semimecanizados.

(Quispe y Arisnabarreta, 2022) “Uso de Mini Dumper Eléctrico para la mejora de la productividad en el sistema de acarreo en el Proyecto Avispa Nivel 740, por ECOMINAS A.C. - U.M. San Juan de Chorunga” - Universidad César Vallejo - Perú.

Objetivo: Evaluar el impacto del uso del Mini Dumper eléctrico en la mejora de la productividad y reducción de costos del sistema de acarreo subterráneo.

Resultados: Los resultados mostraron un cumplimiento del 102.77 % de la meta de producción mensual. Además, se evidenció una reducción de los costos de acarreo frente al sistema convencional con carros mineros, generando ahorros económicos y un mejor aprovechamiento de la mano de obra.

Conclusiones: La investigación concluye que el uso del Mini Dumper eléctrico representa una solución eficiente y rentable para el acarreo subterráneo en labores de desarrollo. Su implementación permite mejorar la productividad, reducir costos operativos y disminuir la exposición física del personal, aspectos que se relacionan con la presente investigación al evaluar el uso del Minidumper como parte del sistema semimecanizado de carguío y acarreo.

2.2.BASES TEORICAS O CIENTIFICAS

2.2.1. CICLO DE MINADO

El ciclo de minado en minería subterránea es la secuencia técnica de operaciones repetitivas que permite extraer el mineral desde el macizo rocoso, asegurar las labores y transportar el material hasta su punto de destino. Su ejecución ordenada y eficiente es clave para mantener la continuidad de la producción, controlar los costos y garantizar la seguridad operativa.

Las etapas principales del ciclo convencional son las siguientes:

2.2.1.1. PERFORACIÓN Y VOLADURA

La perforación y voladura constituyen el punto de partida del ciclo de minado subterráneo. Esta etapa consiste en la ejecución de una malla de taladros en el frente de avance, diseñada según las condiciones geológicas, el tipo de roca y la geometría de la labor. La perforación se realiza con equipos mecanizados, los cuales permiten mayor precisión y velocidad en la preparación del disparo. Una vez finalizado este proceso, los barrenos son cargados con explosivos y se lleva a cabo la voladura, con el objetivo de fragmentar la roca y facilitar las operaciones posteriores. La

eficiencia de esta etapa influye directamente en la calidad de la fragmentación, el tiempo requerido para la limpieza, el desempeño del carguío y la estabilidad del entorno.

2.2.1.2. VENTILACIÓN Y LIMPIEZA DEL FRENTE

Finalizada la voladura, se activa el sistema de ventilación forzada mediante ventiladores primarios y secundarios conectados a ductos, con el fin de evacuar los gases nocivos generados por la detonación, principalmente óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO) y material particulado en suspensión.

Esta operación se monitorea constantemente hasta que las concentraciones se encuentren dentro de los límites permisibles. Restablecidas las condiciones atmosféricas, se habilita el ingreso del personal para ejecutar la limpieza del frente, que consiste en la remoción de restos de carga explosiva, fragmentos parcialmente detonados y otros materiales sueltos que puedan interferir con las siguientes fases del ciclo de minado.

2.2.1.3. DESATADO

El desatado es una actividad esencial que forma parte del ciclo operativo en minería subterránea y tiene como objetivo garantizar la estabilidad del frente de trabajo. Consiste en la detección y remoción de bloques de roca sueltos o potencialmente inestables en el techo (bóveda) y las paredes laterales de la labor, los cuales podrían desprenderse y poner en riesgo la integridad del personal y los equipos. Esta tarea se realiza de forma manual o mecanizada, dependiendo de las condiciones del terreno, y se ejecuta sistemáticamente tras cada voladura, como parte de las medidas preventivas de seguridad y control geomecánico.

2.2.1.4. CARGUÍO

Es una etapa clave dentro del ciclo de minado, ya que permite retirar el mineral o desmonte desde el frente de trabajo hacia los equipos de transporte. Para esta operación se emplean equipos

como LHDs (Load-Haul-Dump), mucking loaders o palas neumáticas, cuya selección depende del método de explotación, la geometría de la labor y el nivel de mecanización de la operación. La eficiencia del carguío está directamente relacionada con la calidad de la fragmentación obtenida en la voladura, la accesibilidad del frente y la sincronización con el sistema de acarreo.

2.2.1.5. ACARREO

Una vez completado el carguío, el material es trasladado desde el frente de trabajo hasta los puntos de descarga, que pueden incluir tolvas, piques, chutes o rampas, dependiendo del diseño del sistema de transporte subterráneo. Para esta operación se emplean equipos como minidumpers, camiones de bajo perfil, locomotoras con vagones o sistemas de faja transportadora, cuya selección se determina en función de la longitud del recorrido, el volumen a transportar y la geometría del yacimiento.

2.2.2. LABORES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

En la minería subterránea, las labores constituyen el conjunto de excavaciones proyectadas y ejecutadas para posibilitar el acceso, desarrollo, explotación, ventilación, drenaje y soporte logístico dentro del sistema minero. Estas excavaciones no son aleatorias: responden a una planificación rigurosa basada en la geometría del yacimiento, las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y el método de explotación seleccionado.

2.2.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS LABORES

La clasificación de estas labores depende principalmente de su orientación (horizontal, inclinada o vertical) y su función (acceso, desarrollo, explotación o auxiliar). Cada tipo de labor debe ser diseñado con criterios de estabilidad estructural, productividad, seguridad ocupacional y costo-beneficio, lo que exige un análisis integral de parámetros como la resistencia del macizo

rocoso, los esfuerzos inducidos por excavaciones previas, las necesidades de ventilación y drenaje, y la compatibilidad con los equipos móviles que operarán dentro del sistema.

2.2.3. CORTE Y RELLENO

Este método consiste en la excavación sucesiva del mineral en cortes horizontales, que son rellenados inmediatamente tras la extracción con materiales inertes, ya sea sueltos, hidráulicos o cementados. Esta secuencia asegura la estabilidad del macizo rocoso y permite el avance controlado hacia niveles superiores, manteniendo condiciones seguras tanto para los trabajadores como para la integridad de la labor.

A diferencia de los métodos masivos, el corte y relleno se integra estrechamente con el sostenimiento del entorno, ya que el relleno actúa no solo como soporte estructural, sino también como plataforma de trabajo para las siguientes fases del ciclo. En operaciones modernas, el relleno hidráulico cementado es el más empleado por su buena compresibilidad, facilidad de distribución y resistencia inicial, permitiendo una rápida reanudación de actividades una vez que se consolida. El uso de relleno requiere, sin embargo, un diseño cuidadoso de sistemas de drenaje, control de filtraciones y monitoreo continuo, especialmente cuando se emplean mezclas con alto contenido de agua.

El método de corte y relleno (*cut and fill stoping*) es una técnica de explotación subterránea altamente selectiva, aplicada con eficacia en yacimientos de geometría irregular, buzamiento pronunciado o condiciones geomecánicas desfavorables. Este método consiste en la excavación sucesiva del mineral en cortes horizontales, que son rellenados inmediatamente tras la extracción con materiales inertes, ya sea sueltos, hidráulicos o cementados. Esta secuencia asegura la estabilidad del macizo rocoso y permite el avance controlado hacia niveles superiores, manteniendo condiciones seguras tanto para los trabajadores como para la integridad de la labor.

A diferencia de los métodos masivos, el corte y relleno se integra estrechamente con el sostenimiento del entorno, ya que el relleno actúa no solo como soporte estructural, sino también como plataforma de trabajo para las siguientes fases del ciclo. En operaciones modernas, el relleno hidráulico cementado es el más empleado por su buena compresibilidad, facilidad de distribución y resistencia inicial, permitiendo una rápida reanudación de actividades una vez que se consolida. El uso de relleno requiere, sin embargo, un diseño cuidadoso de sistemas de drenaje, control de filtraciones y monitoreo continuo, especialmente cuando se emplean mezclas con alto contenido de agua.

2.2.3.1. LABORES DE ACCESO

Las labores de acceso permiten la conexión entre la superficie y los niveles productivos subterráneos. Su diseño es determinante para la logística de transporte, ventilación y evacuación. Las dos principales tipologías son:

a. Pozos Verticales

Los pozos son excavaciones verticales de sección circular o rectangular, empleadas en minas profundas para el descenso de personal, equipos y extracción de material. Se dividen en:

- Pozo principal: Acceso primario con sistemas de izaje.
- Pozo auxiliar: Transporte de suministros, aire comprimido y servicios.

Los pozos requieren técnicas especializadas como raise boring, blind shaft sinking y convencional drill and blast. El dimensionamiento considera: caudal de izaje, ventilación, y condiciones geomecánicas.

b. Rampas Inclınadas (Declines)

Son túneles inclinados entre 8% y 15%, que permiten el acceso vehicular desde la superficie a los distintos niveles. Su diseño debe optimizar la pendiente máxima admisible, radio de curvatura, gálibo y sostenimiento. Se excavan usualmente mediante perforación y voladura (drill and blast) o mediante jumbos mecanizados.

Las rampas facilitan el uso de equipos LHD y camiones mineros, eliminando la necesidad de sistemas de izaje costosos.

2.2.3.2. LABORES DE DESARROLLO

Las labores de desarrollo son excavaciones permanentes que se realizan dentro del macizo rocoso con el fin de preparar el terreno para la futura explotación. A diferencia de las labores de producción, no generan directamente ingreso económico, pero son imprescindibles para la operación.

a. Galerías

Son labores horizontales paralelas al rumbo del cuerpo mineralizado. Cumplen las siguientes funciones en el desarrollo minero, como:

- Acceso operativo al yacimiento: Permiten llegar al mineral desde distintos puntos, lo cual mejora la eficiencia en el desarrollo, facilita la fragmentación controlada y permite la ejecución de múltiples frentes de trabajo.
- Instalación de sistemas de transporte: Sirven como corredores para equipos de acarreo, cintas transportadoras o vías férreas. Su diseño debe considerar el perfil del equipo que circulará por ellas, garantizando la transitabilidad y la seguridad operativa.

- Ventilación y drenaje: Pueden actuar como canales de ventilación, asegurando la renovación de aire fresco en los frentes de trabajo, así como vías de evacuación de aguas de infiltración o proceso mediante canales o tuberías de drenaje.

Su sección se diseña considerando el perfil del equipo que transitará, el flujo de aire necesario y la calidad del macizo rocoso.

b. Cruceros

Túneles horizontales que atraviesan perpendicularmente el rumbo del yacimiento, conectando galerías paralelas. Son claves para el trazado del layout general de la mina y para lograr un mapeo geológico transversal.

c. Subniveles

Excavaciones horizontales o ligeramente inclinadas que se desarrollan a diferentes alturas dentro del cuerpo mineralizado, entre los niveles principales de una mina subterránea. Su función principal es dividir verticalmente el yacimiento para facilitar su explotación ordenada y progresiva.

El espaciamiento entre subniveles debe optimizar la fragmentación, control de dilución y recuperación.

2.2.3.3. LABORES DE EXPLOTACIÓN

Las labores de explotación son aquellas donde se realiza directamente la extracción del mineral. Se diseñan en función del método de minado adoptado, y su geometría varía para optimizar la recuperación y minimizar la dilución.

a. Cámaras

Las cámaras son espacios excavados dentro del macizo rocoso, producto del vaciado sistemático del mineral útil. Su geometría, dimensiones y disposición dependen del método

de explotación empleado, así como de las condiciones geomecánicas del yacimiento. Algunos de los esquemas más comunes incluyen:

- a) Room and Pillar: Se desarrollan cámaras de planta rectangular separadas por pilares de mineral que actúan como elementos de sostenimiento estructural.
- b) Sublevel Stopping: Consiste en la creación de cámaras de gran altura, excavadas entre subniveles previamente desarrollados.
- c) Cut and Fill: En este esquema, las cámaras se excavan en etapas sucesivas y se rellenan progresivamente con material de relleno (generalmente desmonte o pasta cementada), lo cual proporciona estabilidad temporal y permite trabajar en condiciones más complejas o en zonas con geometría irregular.

El diseño debe contemplar el control de estabilidad, ventilación cruzada y recuperación de mineral.

b. Chimeneas

Las chimeneas son excavaciones verticales o inclinadas que se desarrollan dentro del macizo rocoso y cumplen diversas funciones operativas dentro de la mina. Su diseño, ubicación y método constructivo dependen de la función que vayan a desempeñar y de las condiciones geotécnicas del entorno. Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- a) Ventilación: Funcionan como conductos para el ingreso de aire fresco o la evacuación de aire viciado, formando parte del sistema de ventilación principal o auxiliar, según la necesidad del circuito.
- b) Extracción de mineral: En algunos métodos de explotación, como el sublevel stopping, se utilizan como chimeneas de producción por donde el mineral cae hacia niveles inferiores, facilitando su recuperación y posterior acarreo.

- c) Comunicación entre niveles: Actúan como conectores verticales para el tránsito de personal, materiales o servicios, especialmente cuando se requiere una conexión directa entre galerías o subniveles.

Para su construcción se emplean principalmente dos métodos: el raise boring, que consiste en la perforación ascendente mecanizada sin uso de explosivos y con alta precisión, y el método convencional, basado en la perforación y voladura hacia arriba (conocida como "al golpe"), más versátil, pero de mayor riesgo operativo.

2.2.3.4. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN DE LABORES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

La excavación de labores subterráneas es una etapa clave en la explotación minera, ya que permite acceder al yacimiento y preparar el camino para la extracción del mineral. Existen distintos métodos de excavación, elegidos según las condiciones geológicas, la geometría requerida y las metas productivas. Estos métodos se pueden clasificar en:

1. Excavación con Perforación y Voladura

El método más tradicional y utilizado es la perforación y voladura. Consiste en perforar una serie de taladros en la roca, cargar estos con explosivos y detonar para fragmentar el material. Este método ofrece gran flexibilidad para adaptarse a diferentes tamaños y formas de labores, siendo especialmente efectivo en rocas duras. Sin embargo, su proceso es cíclico y discontinuo, lo que puede afectar el ritmo de avance. Además, la voladura genera vibraciones y gases que requieren medidas de seguridad específicas.

2. Excavación Mecánica Continua

La excavación mecánica continua emplea equipos como jumbos de corte y tuneladoras (TBM) para remover la roca sin el uso de explosivos. Estas máquinas ofrecen una producción más

constante y reducen el impacto ambiental al minimizar las vibraciones y la sobreexcavación. No obstante, su aplicación en minería subterránea está limitada por el alto costo de inversión y su baja adaptabilidad a geometrías variables o pequeños frentes de trabajo. Generalmente, se emplean para túneles de gran longitud y sección regular, como túneles de transporte o infraestructura minera.

3. Métodos Especiales para Chimeneas

Para labores verticales, como chimeneas o chimeneas de mineral, se utilizan métodos específicos de excavación. El raise boring es una técnica mecanizada en la que una máquina perfora un taladro guía hacia abajo y luego se monta una cabeza de corte que excava hacia arriba, agrandando el diámetro del taladro. Este método es reconocido por su seguridad y precisión, aunque requiere condiciones geológicas estables. Alternativamente, el alzado convencional mediante perforación y voladura se emplea en zonas donde el raise boring no es viable, a pesar de ser más riesgoso y demandar mayor esfuerzo físico

2.2.3.5. CARGUÍO Y ACARREO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

En minería subterránea, el sistema de carguío y acarreo constituye uno de los componentes fundamentales del ciclo de explotación, ya que conecta directamente la zona de extracción con los sistemas de transporte o beneficio posteriores. Su desempeño impacta directamente en la productividad global, el consumo energético, la disponibilidad de equipos y los costos operativos unitarios.

Por tanto, el diseño del sistema de carguío y acarreo debe considerar criterios como:

- Dimensiones mínimas de las labores (sección útil y radio de giro) según el equipo seleccionado.
- Capacidad de carga útil y relación peso-potencia, determinante para pendientes superiores al 12%.

- Tipo de rodado y sistema de tracción, que condicionan la eficiencia en terrenos irregulares o con presencia de agua.
- Compatibilidad con los sistemas de ventilación, ya que el uso de equipos diésel en labores profundas o poco ventiladas incrementa los requerimientos de caudal y filtración.
- Secuencia y ritmo de extracción, que define el ciclo operativo ideal y el número óptimo de unidades por equipo.

2.2.3.6. CARGUÍO

El proceso de carguío en minería subterránea consiste en la recolección del material fragmentado tras la voladura y su transferencia a los sistemas de transporte. La elección del equipo de carguío depende de diversos factores, incluyendo las dimensiones de las labores, el tipo de mineral, la producción requerida y las condiciones geomecánicas del macizo rocoso.

Existen diferentes tecnologías de carguío adaptadas al entorno subterráneo, cada una con ventajas operativas particulares. Los principales equipos utilizados son:

1. Load-Haul-Dump (LHD)

En minería subterránea, uno de los equipos más utilizados para el carguío y acarreo de material es el Load-Haul-Dump, conocido por sus siglas en inglés LHD. Este equipo ha sido diseñado específicamente para operar en condiciones de espacio restringido, gracias a su estructura compacta y perfil bajo, que le permiten desplazarse con facilidad en galerías angostas o de poca altura.

Una de las principales ventajas del LHD es su alta maniobrabilidad, resultado de la combinación entre tracción en las cuatro ruedas y un sistema de dirección articulada. Esta

configuración lo hace especialmente eficiente en terrenos irregulares o en zonas donde las condiciones geomecánicas dificultan la operación de equipos de mayor tamaño.

En cuanto a su motorización, existen versiones con motores diésel y eléctricos. La elección entre uno u otro depende del diseño de ventilación de la mina y de los objetivos en materia de sostenibilidad. En ambientes con limitaciones para la renovación de aire, los LHD eléctricos reducen significativamente las emisiones y el consumo de oxígeno, mientras que los modelos diésel son más versátiles en operaciones de mayor extensión o infraestructura limitada.

Finalmente, la capacidad de carga de estos equipos puede variar entre 0.6 y 6 metros cúbicos, lo que permite su adaptación a distintas condiciones de operación, desde labores de desarrollo hasta tareas de producción en zonas de difícil acceso.

2. Mucking Loaders

El mucking loader, también conocido como cargador continuo o mucker, es un equipo diseñado específicamente para automatizar el proceso de recolección y carga del material fragmentado tras la voladura. Su diseño incorpora un cucharón frontal conectado a un sistema transportador que permite cargar el material de forma continua y directa sobre vagonetes, tolvas o minidumpers.

Ventajas

- Diseñado para operar en túneles de pequeña sección donde otros equipos no pueden ingresar.
- Trabaja de manera continua, acelerando la limpieza del frente tras la voladura.
- Fácil de operar, con mantenimiento relativamente sencillo en comparación con otros sistemas mecanizados.

- Existen modelos eléctricos, neumáticos e hidráulicos permiten adaptarse a minas con restricciones de ventilación.
- Generalmente basta un operador para controlar toda la operación.

Limitaciones

- Capacidad limitada de carga por ciclo, su capacidad individual por cucharada es menor que la de un LHD.
- Si no hay una logística fluida de acarreo, se genera acumulación de material y pérdida de eficiencia.
- Su operación se complica en tramos con inclinación pronunciada o suelos muy irregulares.
- No está diseñado para tramos largos ni para movimientos horizontales extensos de material.

Mucking Loader



3. Cargadores Neumáticos

Los cargadores neumáticos son equipos diseñados para operar en entornos subterráneos donde las condiciones de ventilación son críticas o donde existe riesgo de acumulación de gases explosivos, como el metano. Funcionan a través de un sistema de accionamiento por aire comprimido, lo que elimina la necesidad de motores diésel o eléctricos y los convierte en una opción segura para minas con restricciones severas en materia ambiental o energética.

Su capacidad de carga es limitada, generalmente entre 0.3 y 0.8 metros cúbicos, lo que los hace más adecuados para labores de desarrollo en galerías angostas o en operaciones de pequeña escala. Aunque presentan una baja eficiencia energética en comparación con otros equipos motorizados, su principal ventaja radica en que no generan emisiones contaminantes ni calor durante la operación, lo cual resulta fundamental en zonas con ventilación reducida o en minas donde se requiere minimizar el riesgo de ignición.

No obstante, el uso de estos equipos implica una dependencia constante de una red de aire comprimido robusta y bien mantenida, lo que puede representar una limitación operativa en términos de infraestructura y continuidad de trabajo. A pesar de ello, los cargadores neumáticos siguen siendo una solución técnica viable en escenarios donde la seguridad atmosférica es prioritaria.

4. Palas neumáticas

Dentro del ciclo de minado subterráneo, el carguío con pala representa una operación crítica que permite retirar el material volado desde el frente hacia los sistemas de transporte o almacenamiento intermedio. En contextos de baja mecanización o en labores con geometrías

restringidas, se emplean comúnmente palas neumáticas, también conocidas como mucking loaders. Estas máquinas, accionadas por aire comprimido, operan con un sistema de cucharón oscilante que recoge el material fragmentado y lo descarga directamente en carros mineros, vagonetas o tolvas, permitiendo un flujo continuo en espacios reducidos. Su diseño compacto y su capacidad de trabajo en ambientes con ventilación limitada las hace especialmente útiles en frentes de desarrollo, galerías angostas o zonas de difícil acceso.

Desde el punto de vista operativo, el rendimiento del carguío con pala está condicionado por variables como la fragmentación del macizo, la longitud del frente, la accesibilidad de los puntos de carga y la sincronización con el sistema de acarreo. Aunque la capacidad de carga por ciclo es reducida en comparación con equipos mecanizados, su eficiencia puede optimizarse mediante una correcta secuencia de ventilación, limpieza y preparación del frente.

2.2.3.7. ACARREO

El acarreo constituye una de las etapas más críticas del ciclo productivo en minería subterránea, ya que influye directamente en la eficiencia operativa, el costo por tonelada transportada y la continuidad del flujo de material hacia el exterior o hacia plantas de procesamiento.

Los sistemas de acarreo pueden ser discontinuos cuando el equipo de carguío y el de transporte trabajan de forma separada o continuos cuando el flujo de material se mantiene sin interrupciones. Entre los factores clave para el diseño del sistema de acarreo destacan:

- La capacidad volumétrica de los equipos
- La maniobrabilidad en espacios reducidos
- La eficiencia energética
- El nivel de emisiones

- La facilidad de mantenimiento

Algunos equipos utilizados en el acarreo subterráneo son:

1. Minidumper

El minidumper es un equipo de acarreo compacto, diseñado específicamente para transportar material dentro de labores subterráneas de pequeña y mediana sección. Su función principal es recibir el material cargado por equipos como el mucking loader y trasladarlo de forma eficiente hasta un punto de descarga, ya sea una tolva, un pique, un chute o un sistema de evacuación de desmonte.

Ventajas

- Opera en radios de giro reducidos gracias a su tamaño y dirección articulada.
- Se adapta fácilmente a rutas con curvas o tramos cortos y estrechos, típicos en labores de desarrollo o exploración.
- Mejora los tiempos de ciclo respecto a sistemas convencionales, especialmente en distancias cortas a medias.
- Requiere un solo operador, lo que disminuye los costos laborales y mejora la seguridad.
- Opera eficientemente en conjunto con mucking loaders u otros sistemas de carguío.

Limitaciones

- No adecuado para distancias largas o producción masiva, donde se requerirían volquetes subterráneos más grandes o sistemas continuos.
- Los modelos diésel generan emisiones y requieren ventilación adecuada; los eléctricos, por su parte, dependen de una logística de recarga.
- En pendientes superiores al 12% puede requerir medidas adicionales de control.

- Su eficiencia está estrechamente ligada a la rapidez con la que se le carga y descarga material.

Minidumper



2. Vagones Mineros

Los trenes de acarreo, también conocidos como sistemas ferroviarios subterráneos, son uno de los métodos más tradicionales para el transporte de material en minería subterránea. Su funcionamiento se basa en una locomotora (que puede ser eléctrica, a batería o diésel) acoplada a una serie de vagones o tolvas destinadas al traslado de mineral o desmonte a lo largo de una red de rieles fijos.

La capacidad de carga de estos trenes puede alcanzar hasta 40 toneladas por unidad, dependiendo de la configuración y del número de vagones empleados. Aunque su velocidad de desplazamiento es relativamente baja, usualmente entre 6 y 15 kilómetros por hora, ofrecen un flujo continuo y estable de transporte, lo que resulta útil en operaciones de mediana a gran escala.

Su implementación, sin embargo, requiere una infraestructura considerable: instalación de rieles, sistemas de cambio de vía, y un mantenimiento constante de las vías férreas para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema. A pesar del avance de equipos más flexibles, los trenes de acarreo siguen siendo una opción válida en minas donde las condiciones operativas permiten su instalación y aprovechamiento.

3. Cintas Transportadoras

Las cintas transportadoras constituyen un sistema mecanizado de acarreo continuo, ampliamente utilizado en minería subterránea para el transporte de mineral o desmonte a lo largo de rutas fijas. Su aplicación es particularmente eficiente en operaciones de gran escala con flujos constantes de producción, donde se busca reducir los costos unitarios de transporte y optimizar la continuidad operativa.

El sistema se basa en una banda móvil accionada por motores eléctricos, generalmente equipados con variadores de frecuencia, que permiten el ajuste dinámico de la velocidad de operación. La capacidad de transporte puede superar las 5,000 toneladas por hora, dependiendo de parámetros como el ancho de banda, la velocidad lineal y las características del material. Las velocidades típicas oscilan entre 2 y 6 m/s, mientras que las longitudes operativas pueden extenderse desde decenas de metros hasta varios kilómetros, según la configuración del circuito.

En cuanto a su desempeño en pendiente, las cintas pueden operar eficientemente en inclinaciones de hasta 10° a 20° , siempre que el material no esté compactado ni presente condiciones de rodadura adversas. A pesar de requerir una inversión inicial considerable y una infraestructura fija, ofrecen alta confiabilidad, bajo requerimiento de mantenimiento

por tonelada transportada y excelente desempeño en escenarios con geometría definida y producción sostenida.

2.2.3.8. SECUENCIA TÉCNICA DE OPERACIÓN

La secuencia operativa inicia con el disparo del frente, tras lo cual se realiza la ventilación primaria y aseguramiento del sostenimiento provisional si es necesario. Acto seguido, el mucking loader es posicionado en el frente, donde inicia el proceso de excavación del escombros utilizando un sistema de cuchara articulada (bucket), alimentado por un circuito hidráulico o neumático de doble acción. El material es transferido mediante una cinta o brazo de eyección directamente hacia la tolva del minidumper, ubicado en posición de espera.

El minidumper, una vez cargado con su capacidad nominal (usualmente entre 1.5 y 3 m³, dependiendo del modelo), se retira de la zona de frente y se desplaza mediante tracción integral o sistema hidráulico autónomo hacia el punto de vaciado, donde descarga el material a través de su mecanismo de volteo trasero o lateral.

Este procedimiento puede ser sincronizado con uno o más equipos de acarreo en rotación, lo que permite mantener la continuidad del ciclo de carguío y maximizar el factor de utilización del mucking loader.

Tabla 1*Parámetros Operativos Relevantes*

Parámetro	Mucking Loader	Minidumper
Capacidad operativa	20 – 40 m ³ /h	1.5 – 3.0 m ³ por ciclo
Velocidad de operación	Estacionaria	5 – 10 km/h en carga, 8 – 12 km/h vacío
Radio de maniobra	< 4 m	4 – 6 m
Tiempo estimado por ciclo	1.5 – 2.5 min (carguío)	3 – 5 min (ida y vuelta en < 300 m)
Requerimientos de sección	≥ 2.5 m (ancho) x ≥ 2.3 m (alto)	≥ 2.3 m (ancho) x ≥ 2.2 m (alto)
Fuente de energía	Eléctrica o neumática	Eléctrica, batería o diésel
Número óptimo de minidumpers	2 – 3 por mucking loader	—

2.2.4. ANÁLISIS TÉCNICO-OPERATIVO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPOS**2.2.4.1. PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA: INDICADORES CLAVE**

La eficiencia operativa de los equipos de carguío y acarreo se evalúa mediante indicadores clave de rendimiento (KPI), que permiten monitorear y optimizar su desempeño:

- A. **Disponibilidad Mecánica (%):** Proporción del tiempo en que el equipo está operativo respecto al tiempo total programado.
- B. **Utilización (%):** Relación entre el tiempo efectivo de operación y el tiempo disponible.
- C. **Productividad (TM/h):** Cantidad de toneladas métricas movidas por hora de operación.
- D. **Eficiencia del Consumo de Combustible (gal/h):** Cantidad de galones consumidos por hora de operación.
- E. **Costo de Mantenimiento (\$/h):** Gasto en mantenimiento por hora de operación.

Estos indicadores permiten identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para optimizar la operación de los equipos.

2.2.4.2. COSTOS OPERATIVOS VS. INVERSIÓN INICIAL

La selección e implementación de equipos mecanizados en minería subterránea, requiere un análisis financiero riguroso que considere tanto el costo de adquisición inicial como los costos de operación a lo largo de su vida útil. Esta evaluación es vital para determinar la rentabilidad del proyecto y optimizar la asignación de recursos.

2.2.4.2.1. INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial corresponde al capital requerido para poner en operación el sistema mecanizado, e incluye los siguientes componentes:

- **Adquisición de equipos:** Compra de los equipos, accesorios y componentes adicionales necesarios.
- **Transporte e instalación:** Costos de traslado hacia el interior de la mina y montaje en el área de trabajo.
- **Adecuación de infraestructura:** Ensanchamiento de labores, acondicionamiento del terreno y provisión de sistemas eléctricos o de ventilación si son requeridos.
- **Capacitación:** Entrenamiento técnico del personal operador y de mantenimiento, con base en las especificaciones del fabricante.

Este desembolso inicial suele ser significativo, pero debe analizarse frente a los beneficios acumulados en términos de productividad y reducción de tiempos muertos.

2.2.4.2.2. COSTOS OPERATIVOS

Una vez implementado el sistema, se generan costos periódicos que afectan directamente la eficiencia económica de la operación. Entre los más relevantes destacan:

- **Consumo energético o combustible:** Dependiendo del tipo de motor (eléctrico o diésel), los costos variarán según la tarifa energética y la eficiencia del equipo.
- **Mantenimiento y repuestos:** Costos por inspecciones preventivas, reparaciones correctivas, lubricantes y repuestos de desgaste.
- **Mano de obra:** Salarios de operadores, técnicos de mantenimiento y supervisores vinculados a la operación del sistema.

Otros costos indirectos: Seguros, depreciación, gestión de residuos y controles ambientales asociados.

2.2.4.2.3. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

Para evaluar la viabilidad financiera, es indispensable aplicar metodologías como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (PRI), considerando:

- **Vida útil del equipo:** Generalmente entre 5 y 10 años para equipos de acarreo subterráneo, dependiendo del régimen de mantenimiento.
- **Productividad proyectada:** Toneladas por turno o jornada, en función del ciclo operativo y eficiencia del operador.
- **Costos acumulados:** Comparación entre escenarios mecanizados y convencionales para evidenciar ahorro en tiempo, seguridad y disponibilidad operativa.

La toma de decisiones debe orientarse a maximizar la rentabilidad sin comprometer la sostenibilidad del proceso minero, considerando también aspectos técnicos, logísticos y de seguridad.

2.2.5. MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

2.2.5.1. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo consiste en un conjunto de acciones programadas destinadas a prevenir la ocurrencia de fallos, asegurar el funcionamiento eficiente de los equipos y reducir la probabilidad de paradas no planificadas. Las tareas típicas incluyen:

- ✓ Lubricación periódica de partes móviles, sistemas hidráulicos y ejes.
- ✓ Ajuste de componentes sometidos a vibraciones o carga cíclica.
- ✓ Inspección visual y funcional de sistemas eléctricos, frenos, dirección, y mecanismos de tracción.
- ✓ Reemplazo programado de componentes sujetos a desgaste (filtros, sellos, mangueras, neumáticos o zapatas).
- ✓ Verificación de sensores, indicadores de presión, temperatura y alertas electrónicas.

La periodicidad de estas tareas está definida en los manuales del fabricante y suele expresarse en horas de trabajo (por ejemplo, cada 250, 500 o 1000 horas).

Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo es aquel que se realiza en respuesta a fallas no planificadas. Aunque inevitable en ciertos escenarios, su recurrencia debe minimizarse a través de una prevención eficaz. Este tipo de intervención puede implicar:

- Reemplazo de componentes críticos como motores eléctricos, cilindros hidráulicos, ejes o sistemas de tracción.
- Reparaciones estructurales de brazos de carga, chasis o cangilones afectados por deformaciones o fracturas.

- Solución de fallos eléctricos o electrónicos, especialmente en entornos con humedad elevada o presencia de polvo fino.

El mantenimiento correctivo, además de costoso, suele generar tiempos de inactividad elevados y riesgos operacionales, sobre todo si ocurre en zonas de difícil acceso del yacimiento.

2.2.6. MUCKING LOADER EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

El Mucking Loader es un equipo de carguío utilizado principalmente en labores subterráneas de desarrollo, como cruceros, galerías y cortadas de sección reducida. Su función principal es recoger el material fragmentado después de la voladura y cargarlo de manera continua hacia un equipo de transporte, como vagonetas, tolvas o minidumpers. A diferencia de una pala neumática convencional, el Mucking Loader permite mejorar la continuidad del carguío porque reduce el esfuerzo manual, disminuye el tiempo de limpieza del frente y facilita una operación más ordenada del ciclo de minado. Según Mining Equipment Ltd. (2022), este tipo de equipo está diseñado para trabajar en espacios reducidos y en frentes donde no siempre es posible utilizar equipos de mayor dimensión como LHD o scooptram. En la presente investigación, este concepto es importante porque el Mucking Loader constituye el equipo principal para optimizar el carguío del material roto en el Crucero 06 de la Mina Orión.

2.2.7. MINIDUMPER EN EL ACARREO SUBTERRÁNEO

El Minidumper es un equipo compacto de transporte empleado en minería subterránea para acarrear mineral o desmonte desde el punto de carguío hasta el punto de descarga. Su aplicación es adecuada en labores de desarrollo donde existen restricciones de sección, radios de giro reducidos y distancias de acarreo cortas o intermedias. Este equipo permite mejorar la maniobrabilidad frente a sistemas convencionales con carros mineros, ya que no depende necesariamente de rieles y puede adaptarse mejor a las condiciones variables de la labor. De

acuerdo con Hustrulid y Bullock (2013), la selección de equipos de acarreo subterráneo debe considerar la geometría de la labor, la capacidad de transporte, la distancia de acarreo, la pendiente y la compatibilidad con el equipo de carguío. En ese sentido, el Minidumper cumple un rol clave en la sincronización del sistema semimecanizado, ya que recibe el material cargado por el Mucking Loader y permite mantener la continuidad del ciclo de limpieza y transporte en el Crucero 06.

2.3.DEFINICIÓN DE TERMINOIS

2.3.1. CICLO DE MINADO

Secuencia sistemática de operaciones necesarias para avanzar una labor subterránea, comprendiendo: perforación, carga de explosivos, voladura, ventilación, remoción del material volado (carguío y acarreo), limpieza y sostenimiento del frente. Su diseño busca optimizar el tiempo de ciclo, reducir interferencias operativas y maximizar el rendimiento de los equipos, siendo fundamental para la eficiencia productiva en minería subterránea.

2.3.2. AVANCE LINEAL

El avance lineal es el indicador que expresa el progreso físico de una labor subterránea, como galerías, cruceros, rampas o chimeneas, medido generalmente en metros por disparo, metros por ciclo o metros por turno. Este indicador permite evaluar la eficiencia del ciclo de minado, ya que depende de la longitud efectiva perforada, la calidad de la voladura, la limpieza del material, el sostenimiento, la ventilación y la disponibilidad de los equipos. Según Zare y Bruland (2006), el avance en excavaciones subterráneas está directamente relacionado con el tiempo consumido en cada etapa del ciclo, incluyendo perforación, carguío de explosivos, voladura, ventilación, limpieza, acarreo y sostenimiento.

2.3.3. SISTEMAS MECANIZADOS

Los sistemas mecanizados en minería subterránea corresponden al uso de equipos especializados para ejecutar actividades del ciclo de minado con mayor eficiencia, continuidad y seguridad. Estos sistemas pueden incluir jumbos de perforación, equipos LHD, mucking loaders, minidumpers, camiones de bajo perfil y otros equipos semimecanizados o mecanizados. Su finalidad es reducir la dependencia del trabajo manual, mejorar los tiempos de ciclo, incrementar la productividad y disminuir la exposición del personal a zonas de riesgo. Ross (2014) señala que la minería subterránea ha reemplazado progresivamente equipos convencionales, como jacklegs, palas pequeñas y carros sobre rieles, por equipos electrohidráulicos, LHD y sistemas de mayor capacidad operativa.

2.3.4. PRODUCTIVIDAD MINERA

La productividad minera es un indicador que relaciona la cantidad de material producido, extraído o transportado con el tiempo y los recursos utilizados. En minería subterránea puede expresarse en toneladas por hora, toneladas por guardia, metros lineales por turno o toneladas por hora-hombre, según el proceso evaluado. En el caso del carguío y acarreo, la productividad permite medir el rendimiento real de los equipos y detectar pérdidas asociadas a tiempos muertos, baja disponibilidad o deficiente sincronización operativa. Wiebmer (1997) indica que, en equipos subterráneos, el costo por tonelada está fuertemente influenciado por la productividad en toneladas por hora y por la disponibilidad-utilización del equipo.

2.3.5. SECUENCIA OPERATIVA

La secuencia operativa es el orden técnico en el que se desarrollan las actividades del ciclo de minado, desde la perforación hasta el sostenimiento y la limpieza del frente. En una labor subterránea, esta secuencia permite organizar los recursos, reducir interferencias entre procesos y

asegurar la continuidad del avance. Una secuencia bien estructurada considera la perforación, carguío de explosivos, voladura, ventilación, desatado, limpieza, carguío, acarreo y sostenimiento, según las condiciones de la labor. Zare y Bruland (2006) consideran que el ciclo de excavación subterránea debe analizarse a partir del consumo de tiempo de cada actividad, debido a que este determina el avance y la eficiencia del proceso.

2.3.6. CARGA ÚTIL

La carga útil es la cantidad neta de material que un equipo de carguío o acarreo puede transportar de manera segura y eficiente durante un ciclo de trabajo. Este parámetro depende de la capacidad volumétrica del cucharón o tolva, la densidad del material fragmentado, el factor de llenado, las condiciones de la vía, la pendiente y las restricciones propias del equipo. En minería subterránea, una adecuada relación entre carga útil y distancia de acarreo permite mejorar la productividad, reducir el número de viajes y optimizar el consumo de recursos operativos. La evaluación de estos factores es importante porque la productividad de los equipos subterráneos se relaciona directamente con las toneladas transportadas por hora y con su nivel de utilización efectiva.

2.3.7. COSTO OPERATIVO

El costo operativo comprende los gastos asociados al funcionamiento diario de los equipos y procesos mineros. En el carguío y acarreo subterráneo, incluye principalmente mano de obra, energía o combustible, lubricantes, mantenimiento preventivo y correctivo, repuestos, neumáticos o elementos de desgaste, y otros costos vinculados a la operación. Su análisis permite determinar el costo unitario por tonelada transportada y evaluar la rentabilidad de una mejora tecnológica. Los estudios sobre costos de equipos mineros consideran como componentes principales el combustible o energía, mantenimiento y reparación, neumáticos, leasing y costos de personal.

2.4.HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

- La implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper optimizará el proceso de carguío y acarreo, mejorando la productividad y reduciendo los costos operacionales en el crucero 06 en la Mina. Orión, Arequipa.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- La evaluación del proceso de carguío y acarreo permitirá identificar oportunidades de mejora en las operaciones desarrolladas en el crucero 06 en la Mina. Orión, Arequipa.
- La implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper incrementará la productividad del carguío y acarreo en el crucero 06 en la Mina. Orión, Arequipa.
- La optimización del carguío y acarreo mediante los equipos Mucking Loader y Minidumper reducirá costos operacionales en el crucero 06 en la Mina. Orión, Arequipa.

2.5.VARIABLES DE ESTUDIO

Para la presente investigación se plantean las siguientes variables e indicadores.

2.5.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Variable independiente: Implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper.

Variable dependiente: Productividad y costos operativos del proceso de carguío y acarreo.

2.5.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Para la presente investigación se plantean las siguientes variables e indicadores

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente: Implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper	Condición operativa de los equipos	Disponibilidad mecánica (%)
	Ciclo operativo	Tiempo de ciclo de carguío y acarreo (min/ciclo)
	Capacidad de trabajo	Número de viajes por turno
	Sincronización operativa	Tiempo de espera entre carguío y acarreo (min)
	Productividad	Productividad horaria promedio (tm/h)
	Utilización de equipos	Porcentaje de utilización del equipo (%)
	Tiempo de limpieza	Tiempo de limpieza por avance (min/avance)
Variable dependiente: Productividad y costos operativos del proceso de carguío y acarreo	Costos operativos	Costo unitario de carguío y acarreo (USD/tm)
	Beneficio económico	Ahorro económico generado y retorno de inversión

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo aplicada y cuantitativa, ya que busca aplicar conocimientos técnicos para resolver un problema operativo específico, como es la mejora del proceso de carguío con la máquina Mucking Loader. Es cuantitativa porque utiliza datos numéricos reales del proceso, como tiempos de ciclo, toneladas por hora, y costos por tonelada, para analizar el impacto de la intervención propuesta. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

3.1.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con los alcances planteados, la presente investigación es de nivel descriptivo-explicativo, ya que inicialmente describe el estado actual del proceso de carguío y posteriormente explica los efectos de la implementación de una tecnología específica sobre los indicadores de eficiencia y costo operativo. Este nivel permite no solo identificar las variables en juego, sino también establecer relaciones causales entre ellas. (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. POBLACION

La población de la presente investigación está conformada por todas las operaciones de carguío y acarreo realizadas en la Mina Orión, las cuales comprenden los procesos ejecutados en las diferentes labores subterráneas, utilizando tanto sistemas convencionales como equipos semimecanizados, bajo condiciones normales de operación. Estas operaciones incluyen la totalidad de ciclos de carguío, transporte y descarga del material, que constituyen la base operativa sobre la cual se evalúan los indicadores de productividad y costos del sistema de carguío y acarreo.

3.2.2. MUESTRA

La muestra está constituida por las operaciones de carguío y acarreo realizadas específicamente en el Crucero 06 – Nivel 1350 de la Mina Orión, durante un periodo continuo de tres meses, seleccionadas por su representatividad y accesibilidad para el análisis detallado del desempeño operativo. El muestreo aplicado es de tipo no probabilístico por conveniencia, considerando que el Crucero 06 presenta condiciones operativas típicas de labores de desarrollo subterráneo y dispone de información técnica confiable para la medición de tiempos de ciclo, productividad y costos operativos asociados a la implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper. El tipo de muestreo utilizado será no probabilístico (Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista, 2014)

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. TÉCNICAS

Las principales técnicas utilizadas serán:

- Observación directa en campo
- Revisión documental de partes operativas y reportes técnicos

3.3.2. INSTRUMENTOS

- Cronometraje de ciclos de carguío y acarreo.
- Fichas de control de producción.
- Entrevistas a operadores y supervisores.
- Observación directa en campo.

3.3.3. PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos recolectados serán organizados, tabulados y analizados utilizando herramientas informáticas con el objetivo de identificar variaciones en los principales indicadores antes y después de la implementación. Se hará uso de:

- Microsoft Excel
- AutoCAD
- Microsoft Word.

3.4.OPTIMIZACION DEL CARGUIO Y ACARREO

El diagnóstico inicial del proceso de carguío en la construcción del crucero 06 de la Mina Orión representa un insumo clave para dimensionar las limitaciones y características que determinan el desempeño actual. Este apartado se enfoca en establecer con precisión el estado real de los indicadores operativos y económicos antes de la implementación de tecnologías mecanizadas, considerando aspectos como tiempos de ciclo, productividad por hora, niveles de utilización y costos unitarios. El objetivo es construir una línea base cuantitativa y objetiva que permita evidenciar la magnitud de las restricciones existentes, así como las pérdidas de eficiencia generadas por la dependencia de equipos convencionales.

Dentro de la Unidad Económica Administrativa (U.E.A.) Orión, el sistema de carguío y acarreo presenta una dualidad, por un lado, se cuenta con equipos convencionales compuestos

principalmente por carros mineros y Pala neumatica, cuya operación se realiza a través de rieles instalados, por otro lado, se ha iniciado la incorporación de equipos semimecanizados, entre los que destacan los mucking loaders diseñados para labores de desarrollo en secciones reducidas. Haciendo una retrospectiva, se tiene un aproximado de 4 locomotoras mineras en funcionamiento, 2 de extracción en superficie y 2 en los niveles de trabajo. Sin embargo, la implementación progresiva de mucking loaders, actualmente con 2 unidades en operación marca un punto de inflexión en el modelo productivo, ya que estos equipos permiten sincronizar el carguío de manera continua con el acarreo mediante minidumpers eléctricos, reduciendo tiempos de limpieza y aumentando el número de ciclos por turno.

Tabla 3

Equipos empleados en el carguío en U.E.A. Orion

ITEM	EQUIPOS	MODELO	CANTIDAD
1	CARROS MINEROS	U-35	25
2	PALA NEUMATICA	EIMCO 12B	5
3	LOCOMOTORAS	-	6
4	MINIDUMPERS	-	2
5	MUCKING LOADER	-	1

Fuente: U.E.A. Orion

En el caso de los equipos convencionales empleados en la U.E.A. Orión, se evidencia una clara limitación en su capacidad de acarreo, ya que cuentan con una capacidad nominal de apenas 1 m³ por unidad de transporte, lo que obliga a un mayor número de viajes para movilizar volúmenes relativamente reducidos de material. Este sistema está compuesto principalmente por el uso de

pala neumática para el carguío y por el empleo del carro minero tipo U-35, el cual desplaza el material a lo largo de los rieles instalados en los cruceros.

Tabla 4

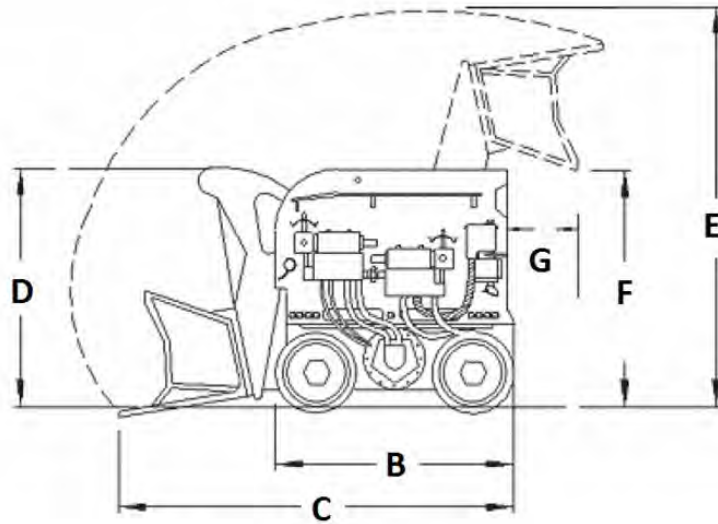
Pala neumática características

Especificación	Unidades	EIMCO 12B
Ancho total bastidor	mm	710
Ancho total de manejo con plataforma de pie	mm	1.060
Longitud total Bastidor	mm	1.060
Longitud Total Cuchara Bajada	mm	1.850 - 1.980
Altura total, cuchara bajada	mm	1.250 - 1.295
Altura máxima cuchara (depende vagonetas a cargar)	mm	2.000 - 2.110
Presión de trabajo	Kg/cm ²	4 - 7
Diámetro manguera aire alimentación	mm	25 - 30
Ciclo completo de carga	sg	6
Capacidad de la cuchara	m ³	0,13 - 0,17
Capacidad carga, Volumen medio por minuto	m ³ /min	0,5 - 1,0
Capacidad de la vagoneta cargada	m ³	0,3 - 1,5
Peso total de la pala	Kg	1.905
Peso de la pieza más pesada	Kg	355
Consumo de aire	m ³ /min	6 - 7
Ancho de vía	mm	600 - 915

Fuente: Mackina Westfalia

Figura 1

Pala neumática



Fuente: Mackina Westfalia

Figura 2

Carguío y acarreo con pala neumática y carro minero U-35



Fuente: Elaboración propia

Esta configuración genera un uso intensivo del tiempo operativo en actividades de baja productividad, pues la cantidad de material extraído en cada ciclo es mínima frente a los requerimientos de avance. A ello se suma que, debido a la poca capacidad de estos equipos, los frentes en los que operan están diseñados para perforaciones de aproximadamente 6 pies de longitud, en secciones de 2,10 m de ancho por 2,40 m de alto, obteniéndose un volumen promedio de 9,2 m³ de material por disparo. Bajo estas condiciones, la interacción entre la limitada capacidad de acarreo y el reducido volumen de producción por frente conduce a un ciclo productivo discontinuo, caracterizado por tiempos prolongados de carguío y limpieza, lo que impacta directamente en la productividad horaria y en los costos unitarios del avance.

Tabla 5

Equipos empleados en el carguío en U.E.A. Orion

Item	Equipos	Modelo	Cantidad
1	Carros Mineros	U-35	25
2	Pala Neumatica	-	1

Fuente: U.E.A. Orion

En el caso de los equipos convencionales empleados en la U.E.A. Orión, se evidencia una clara limitación en su capacidad de acarreo, ya que cuentan con una capacidad nominal de apenas 1 m³ por unidad de transporte, lo que obliga a un mayor número de viajes para movilizar volúmenes relativamente reducidos de material. Este sistema está compuesto principalmente por el uso de pala neumática para el carguío y por el empleo del carro minero tipo U-35, el cual desplaza el material a lo largo de los rieles instalados en los cruceros.

Esta configuración genera un uso intensivo del tiempo operativo en actividades de baja productividad, pues la cantidad de material extraído en cada ciclo es mínima frente a los requerimientos de avance. A ello se suma que, debido a la poca capacidad de estos equipos, los frentes en los que operan están diseñados para perforaciones de aproximadamente 6 pies de longitud, en secciones de 2,10 m de ancho por 2,40 m de alto, obteniéndose un volumen promedio de 9,2 m³ de material por disparo. Bajo estas condiciones, la interacción entre la limitada capacidad de acarreo y el reducido volumen de producción por frente conduce a un ciclo productivo discontinuo, caracterizado por tiempos prolongados de carguío y limpieza, lo que impacta directamente en la productividad horaria y en los costos unitarios del avance.

3.4.1. EVALUACIÓN DEL TIEMPO PROMEDIO DE CARGUÍO POR CICLO

El tiempo promedio de carguío por ciclo constituye el indicador que refleja la eficiencia del proceso en términos de minutos requeridos para completar una secuencia operativa desde la aproximación al frente hasta la descarga en el sistema de acarreo. Su análisis permite identificar los factores que más inciden en la demora de la operación, como la fragmentación del material, la maniobrabilidad de los equipos y la experiencia de los operadores. En la situación actual, los registros muestran valores de la limpieza de los carros mineros.

El análisis de los registros operativos permitió determinar el tiempo promedio requerido para completar el proceso de carguío en la U.E.A. Orión, considerando las fases de aproximación, carga, transporte y descarga del material en cada ciclo.

Tabla 6*Tiempos de ciclo 28 de mayo*

N° viaje	Tiempo de carguío (seg)	Tiempo de ida (seg)	Tiempo de vuelta (seg)	Tiempo total (seg)	Tiempo total (min)
1	370.8	67.2	64.2	502.2	8.37
2	328.2	64.8	67.2	460.2	7.67
3	264.6	61.8	68.4	394.8	6.58
4	274.2	60	69.6	403.8	6.73
5	303.6	62.4	63.6	429.6	7.16
6	261.6	63	66.6	391.2	6.52
7	270.6	61.2	67.8	399.6	6.66
8	273.6	62.4	66	402	6.7
9	265.2	61.8	65.4	392.4	6.54
10	271.8	63.6	69	404.4	6.74
11	268.2	63.6	64.8	396.6	6.61
12	266.4	62.4	68.4	397.2	6.62
13	313.8	60.6	66.6	441	7.35
14	308.4	63.6	66	438	7.3
15	320.4	63	65.4	448.8	7.48
16	373.8	61.8	67.2	502.8	8.38
17	386.4	63	0	449.4	7.49

Fuente: Elaboración propia

El registro de los 17 viajes evaluados refleja que los tiempos totales de ciclo se encuentran en un rango de 6,52 a 8,38 minutos por viaje, alcanzando un promedio general de 7,1 minutos. Este valor es considerablemente mayor al de estudios previos realizados en condiciones similares, donde los ciclos oscilaron entre 3,5 y 4,2 minutos, lo que evidencia que en la presente operación existen factores que están afectando directamente la eficiencia.

El análisis detallado de las fases permite concluir que la etapa de carguío constituye el principal cuello de botella. Los tiempos de carguío se ubican entre 4,3 a 6,4 minutos, representando más del

65% del ciclo total. Este comportamiento sugiere que la maniobra de la pala y la fragmetación del material no son del todo adecuadas, prolongando innecesariamente la duración del ciclo. Además, en viajes como el 1 y 16 se superaron los 370 segundos de carguío, lo que elevó el tiempo total a más de 8,3 minutos.

Por otro lado, las fases de ida y retorno mostraron un rango mucho más estable 60 – 69,6 segundos, lo que indica que el acarreo en sí mismo no presenta dificultades significativas. Esto confirma que el problema de eficiencia está concentrado en el proceso de llenado del carro y no en la circulación por la vía. Un caso particular se observó en el viaje 17, donde el tiempo de retorno fue nulo, reduciendo el ciclo a 7,11 minutos. Este evento puntual puede interpretarse como una interrupción operativa o un traslado unidireccional.

En términos de dispersión, si bien la mayoría de los viajes se ubicaron entre 6,5 y 7,11 minutos, los valores atípicos generados por carguíos extendidos alteran la regularidad de los ciclos. Este patrón demuestra que, aunque la operación es relativamente constante, existen desviaciones que limitan la continuidad y reducen la productividad global del acarreo.

Tabla 7

Tiempos de Carro Minero U-35

Equipo	N° Viajes	Tiempo promedio total (min)	Distancia (m)
Carro Minero U-35	17	7.11	50

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1

Tiempo promedio por viaje



Fuente: Elaboración propia

Se observó la presencia de valores atípicos en los viajes 1 y 17, donde los ciclos superaron los 8,3 minutos debido a un carguío prolongado. Estos registros incrementan de manera notable el promedio general, afectando la regularidad de la operación. Si dichos valores se excluyeran, el promedio de ciclo descendería a aproximadamente 6,8 minutos, lo que evidencia la incidencia que tienen los carguíos extendidos sobre el rendimiento global.

La comparación de los resultados permite concluir que, con tiempos actuales de 7,1 minutos por viaje, el rendimiento del carro minero se limita a 8–9 ciclos por hora. En contraste, si se lograra optimizar la fase de carguío reduciendo entre 40 y 60 segundos por ciclo, sería posible alcanzar un promedio cercano a los 6 minutos, incrementando el número de viajes a 10–11 ciclos por hora. Esto representaría una mejora de hasta un 20% en la productividad, con impactos directos en la eficiencia de la operación minera.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que, aunque la operación es estable en las fases de acarreo, la etapa de carguío constituye un cuello de botella crítico. Esta situación sugiere la

necesidad de implementar acciones de mejora específicas, tales como optimizar la fragmentación del material, reforzar la capacitación del personal en maniobras de carguío y evaluar la capacidad de los equipos respecto al volumen de material manipulado. Con estas medidas se espera reducir la dispersión de los tiempos de ciclo, mejorar la regularidad del proceso y aumentar de manera significativa la productividad de los equipos convencionales.

3.4.2. ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD HORARIA ACTUAL (TM/H)

La productividad horaria, expresada en toneladas métricas por hora (TM/h), representa el volumen de material cargado efectivamente en una hora de trabajo operativo. Su análisis es esencial para dimensionar el nivel real de aprovechamiento de la capacidad instalada frente al rendimiento esperado en condiciones ideales. En este caso haremos análisis del tonelaje que se extrae según los rangos y parámetros que se consideran dentro de U.A.E. Orión, donde tenemos labores de 2.4 x 2.1 y se realizan perforaciones con taladros de 6 pies, lo cual al ser fragmentado será acarreado y transportado por nuestro sistema convencional.

Tabla 8

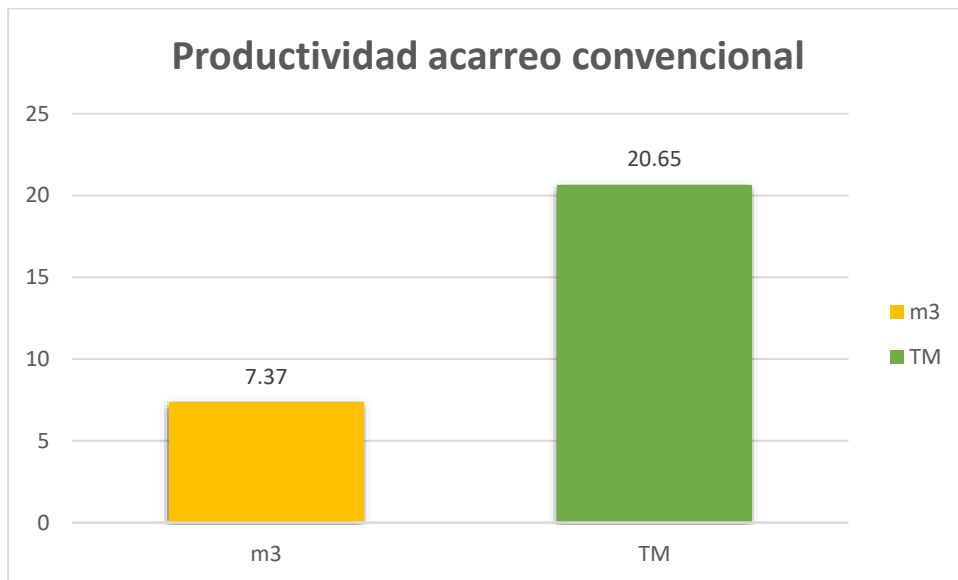
Tabla resumen productividad

Ancho (m)	Altura (m)	Avance efectivo (m)	Capacidad (m3)	Peso específico	m3	TM
2.4	2.1	1.46	1	2.8	7.37	20.65

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 2

Productividad del acarreo convencional



Fuente: Elaboración propia

Los registros obtenidos muestran una consistencia en las dimensiones del frente de avance, donde se trabajó con un ancho promedio de 2,4 m y una altura de 2,1 m. Sin embargo, las variaciones en el avance efectivo, que en este caso fue de 1,46 m, generan diferencias en el volumen removido y, en consecuencia, en el tonelaje diario alcanzado. Para esta jornada, se obtuvo un volumen de 7,37 m³, lo que equivale a un tonelaje aproximado de 20,65 TM, considerando un peso específico del material de 2,8 t/m³. Estos valores reflejan un comportamiento estable.

En lo que respecta a los tiempos operativos, se consideraron los que empleó la pala neumática convencional en el acarreo del material, integrando tanto los periodos de limpieza del frente como los tiempos de espera registrados durante el ciclo. Esta metodología de evaluación permite contar con datos más representativos de las condiciones reales de operación, ya que los retrasos propios de la limpieza y la espera impactan de manera directa en la productividad efectiva del equipo.

Tabla 9*Resumen de tiempos y producción*

Tiempo total del ciclo (min)	Tiempo total del ciclo (Hr)	M3	TM
120.9	2.01	7.37	20.65

Fuente: Elaboración propia

El tiempo total del ciclo registrado fue de 120,9 minutos, equivalente a 2,01 horas, en el cual se logró movilizar un volumen de 7,37 m³, correspondiente a un tonelaje de 20,65 TM. Estos valores reflejan una productividad relativamente baja en función del tiempo invertido, ya que la prolongación del ciclo limita la cantidad de material que puede ser trasladado por jornada.

Con la información que contamos podemos hallar cual es la productividad horaria actual con el que este sistema convencional labora

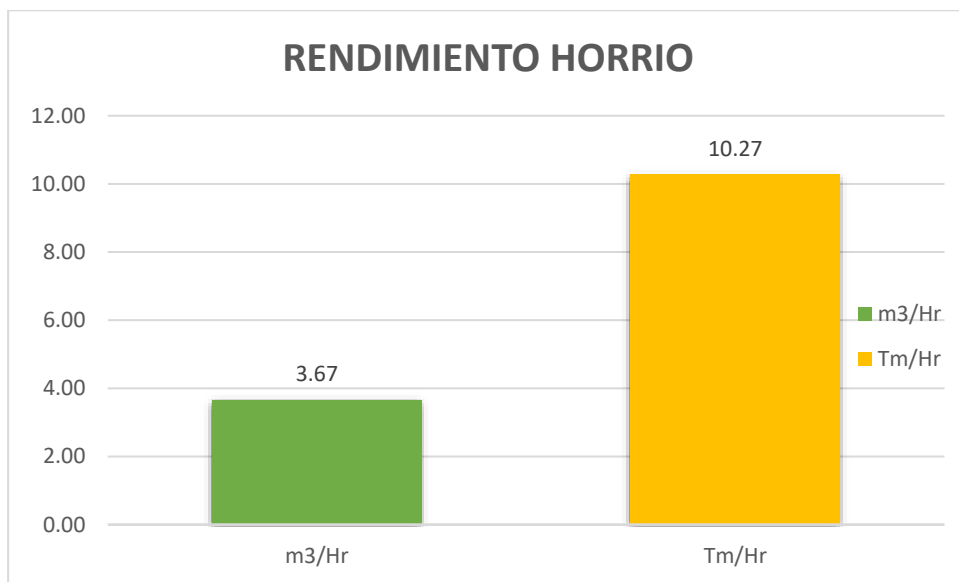
Tabla 10*Rendimiento horario*

m3	TM	Tiempo total del ciclo (Hr)	m3/Hr	Tm/Hr
7.37	20.65	2.01	3.66	10.27

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3

Rendimiento horario por día



Fuente: Elaboración propia

La evaluación de la producción horaria muestra que, con un tiempo de ciclo de **2,01 horas**, se alcanzó una capacidad de 3,67 m³/h equivalente a 10,27 TM/h. Estos indicadores reflejan que el equipo logra mantener una operación continua, pero con una tasa de extracción baja en relación con el tiempo empleado. En términos prácticos, la pala neumática convencional requiere de un esfuerzo operativo prolongado para movilizar un volumen limitado de material, lo que impacta directamente en la eficiencia global del acarreo.

Este rendimiento evidencia que la operación resulta poco competitiva en su estado actual, pues la relación entre tiempo invertido y material extraído no se ajusta a los estándares de productividad esperados. La prolongación de los ciclos, sumada a la baja tasa de producción por hora, confirma que el sistema se encuentra condicionado por las limitaciones estructurales del equipo convencional y por la duración excesiva del carguío y la limpieza.

3.4.3. PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO CONVENCIONAL

El porcentaje de utilización refleja el tiempo en que los equipos convencionales permanecen en operación efectiva frente al tiempo total disponible. Este indicador integra aspectos vinculados a la disponibilidad mecánica, la coordinación con el acarreo y la existencia de tiempos muertos no planificados. La evidencia obtenida muestra que el nivel de utilización se encuentra por debajo de los valores recomendables para asegurar la eficiencia del sistema, lo que implica que una parte considerable de la jornada se destina a labores improductivas.

En este caso tendremos como están distribuidas las horas en una jornada laboral de 7 horas, donde se concibe las diversas etapas del ciclo, aquí podremos hacer un análisis de las disponibilidad y utilización de nuestro equipo en el carguío y acarreo.

Tabla 11

Tiempos de pala neumática y carro minero

Equipo	Programado	Hrs Efectivas	Tiempo Improductivo
Pala Neumática	7 H/Guardias	1.54	0.8
Carro Minero	8 H/Guardias	1.54	0.8

Fuente: Elaboración propia

En un turno estándar de 7 h equivalente a 420 min, el tiempo efectivo de operación fue de 92.4 min, mientras que el tiempo total del ciclo registrado ascendió a 383.4 min. Bajo este escenario, la utilización se calcula como:

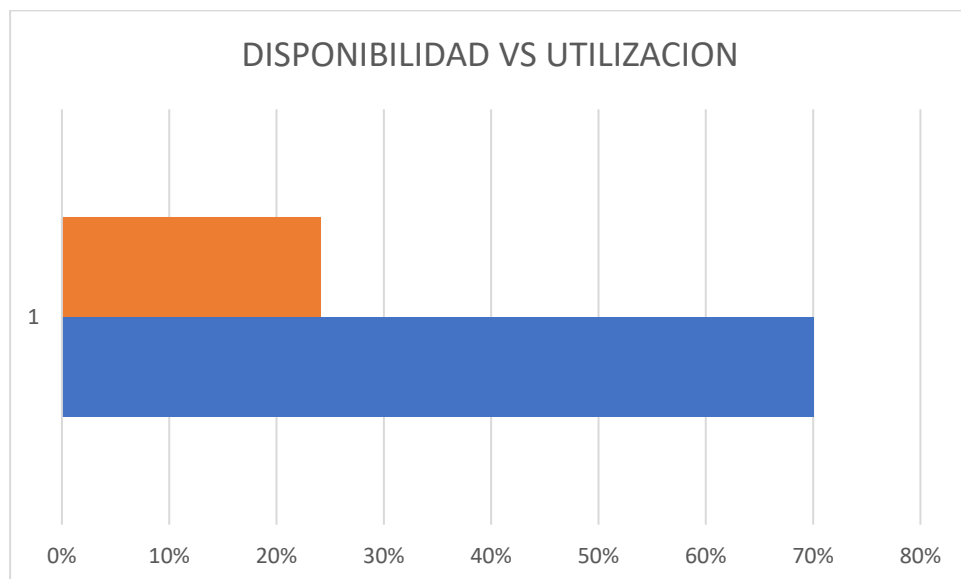
$$\text{Utilización} = \frac{92.4}{383.4} \times 100 = 24.10 \%$$

En la evaluación operativa de la Pala Neumática y el Carro Minero, mantenimiento reporto la disponibilidad de estos equipos entre 60% y 70%, además se consideró el tiempo programado frente a las horas efectivas y los tiempos improductivos registrados. Para la pala neumática,

programada 7 horas por guardia (420 minutos), se contabilizaron 1.54 horas efectivas y 0.8 horas improductivas, lo que representa un total de 2.34 horas de operación parcial frente al tiempo programado. De manera similar, el carro minero, con 8 horas programadas por guardia, registró las mismas 1.54 horas efectivas y 0.8 horas improductivas, alcanzando un comportamiento operativo equivalente.

Gráfica 4

Disponibilidad vs utilización



El resultado de utilización del 24.1 % muestra un bajo nivel de aprovechamiento operativo de los equipos, ya que apenas una cuarta parte del ciclo corresponde a tiempo de trabajo efectivo. Esto significa que la mayor parte del tiempo registrado se concentra en actividades no productivas, como esperas, limpieza u otros retrasos, lo que limita la eficiencia global del proceso. Un valor de utilización en este rango refleja la necesidad de implementar medidas de mejora en la organización de las tareas y en la reducción de tiempos improductivos, de modo que se logre incrementar el rendimiento real de los equipos frente a la capacidad disponible.

3.4.4. IDENTIFICACIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA OPERATIVOS

Los cuellos de botella representan las restricciones más críticas dentro de la secuencia operativa, aquellas que condicionan el rendimiento global del sistema productivo. En el caso del análisis de los registros de tiempo en los ciclos de operación evidencia la presencia de cuellos de botella que condicionan la eficiencia del sistema de carguío y acarreo en la U.E.A. Orión. El primer factor crítico se ubica en la etapa de limpieza–acarreo, que demandó más del 30% del turno y concentró tiempos prolongados en comparación con otras actividades. Esta fase, realizada con pala neumática y carros mineros de 1 m³, se convierte en el punto de mayor retraso operativo debido a la baja capacidad de transporte y la necesidad de efectuar múltiples viajes para movilizar volúmenes reducidos de material, lo que extiende la duración del ciclo.

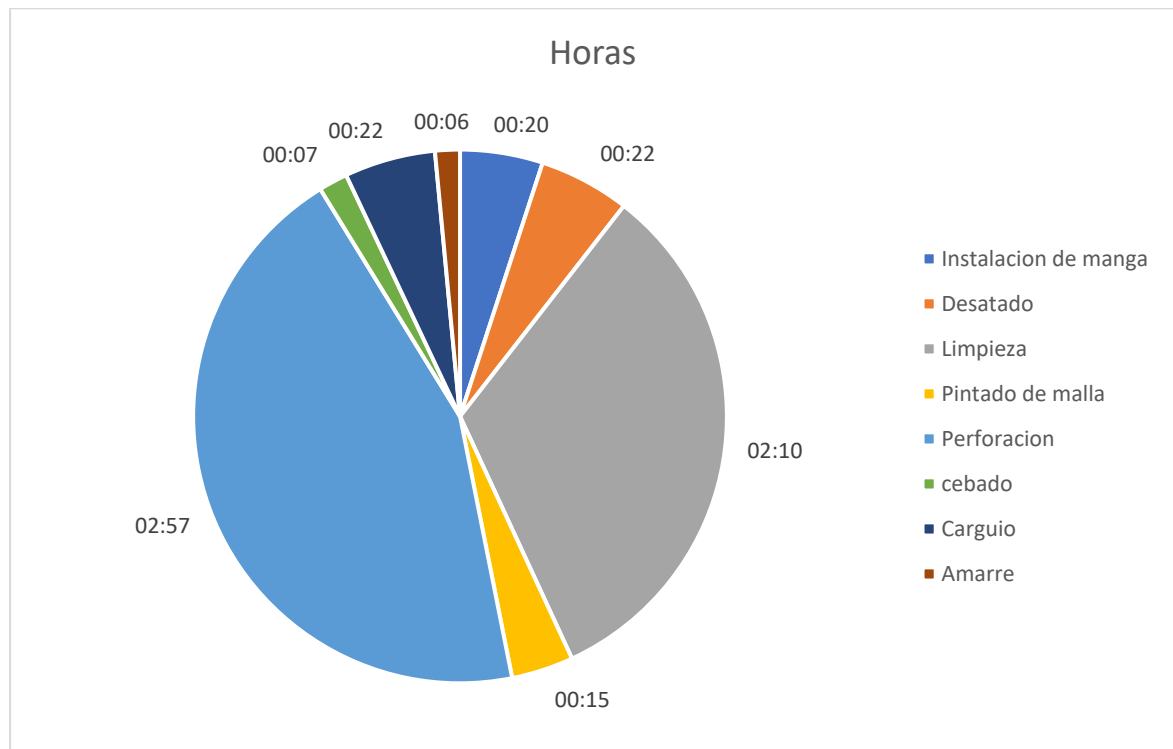
Tabla 12

Distribución de tiempos

Distribución de tiempos			
Ciclo	Inicio	Final	Horas
Instalación de manga	8:15	8:35	0:20
Desatado	8:48	9:10	0:22
Limpieza	10:00	12:10	2:10
Pintado de malla	12:10	12:25	0:15
Perforación	13:48	16:45	2:57
Cebado	16:45	16:52	0:07
Carguío	16:52	17:14	0:22
Amarre	17:14	17:20	0:06
Total			6:39

Gráfica 5

Distribución de tiempos antes



Fuente: Elaboración propia

Otro cuello de botella se relaciona con la variabilidad en los tiempos de ciclo de los viajes, que oscilaron entre 3,5 y 4,8 minutos. Aunque estas diferencias parecen mínimas, al acumularse en una jornada completa se traducen en la pérdida de al menos dos a tres viajes, reduciendo la productividad horaria a niveles inferiores a los esperados. Esta dispersión se explica por la irregularidad en los tiempos de carguío y descarga, así como por la interferencia en la circulación de los equipos en los rieles.

Asimismo, se identificó que la utilización de los equipos convencionales es apenas del 32,8%, lo cual indica que gran parte del tiempo disponible se consume en actividades auxiliares que no generan valor directo en términos de toneladas cargadas. Este bajo nivel de

aprovechamiento no solo limita la continuidad del ciclo productivo, sino que también incrementa los costos unitarios, dado que los recursos permanecen ociosos durante buena parte del turno.

3.4.5. ANÁLISIS DE COSTOS UNITARIOS ACTUALES POR TONELADA CARGADA

El costo unitario por tonelada cargada refleja la relación directa entre los gastos operativos y el volumen efectivamente cargado en un periodo determinado. Este indicador permite dimensionar la eficiencia económica del proceso y establecer parámetros de comparación con otras operaciones mineras. En la situación actual, los costos resultan elevados debido a la baja productividad horaria, el consumo de elementos y la necesidad de mayor tiempo de limpieza por avance. El análisis muestra que, pese al esfuerzo operativo, el modelo convencional de carguío no logra consolidar una relación costo–beneficio favorable, lo que limita la sostenibilidad del proceso y presiona la rentabilidad general del proyecto.

Para ello analizaremos los costos para labores que son limpiadas por este sistema convencional, específicamente aquellas que son perforadas por 6 pies, con un avance efectivo de 1.6 metros que se da en promedio, generando un volumen de 8.05 m³ plasmado en 22.54 toneladas por disparo, haremos un análisis de todos aspectos involucrados durante este ciclo de minado.

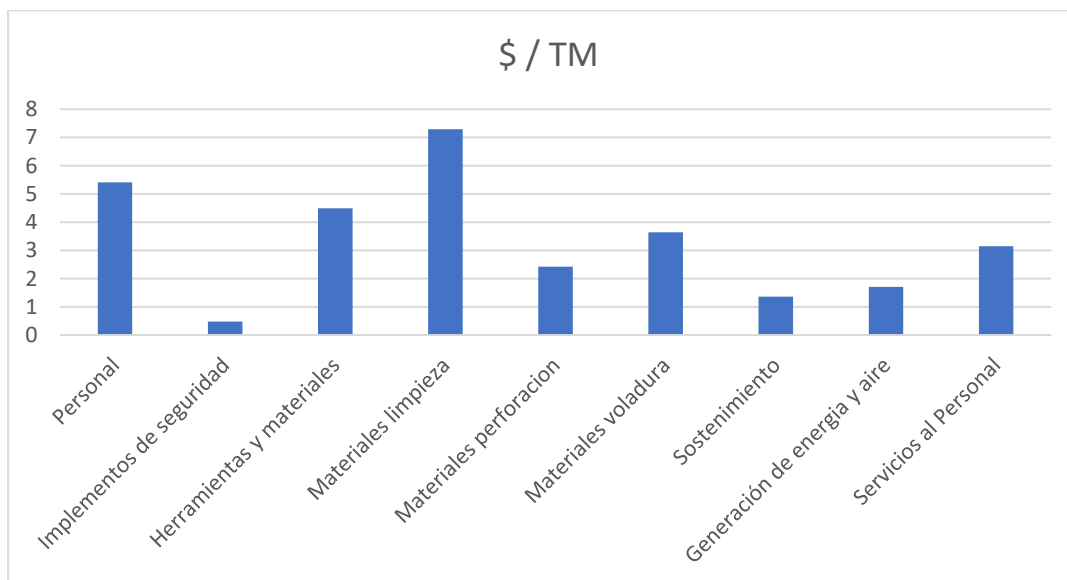
Tabla 13*Costos antes de la implementación*

Ítem	Costos		
	\$ x Disparo	\$ / metro	\$ / TM
Personal	122	76.42	5.41
Implementos de seguridad	10.89	6.82	0.48
Herramientas y materiales	101.16	63.36	4.49
Materiales limpieza	164.26	102.66	7.29
Materiales perforación	54.51	34.14	2.42
Materiales voladura	82.01	51.37	3.64
Sostenimiento	30.68	19.22	1.36
Generación de energía y aire	38.51	24.12	1.71
Servicios al Personal	71.06	44.41	3.15
Total	675.08	422.52	29.95

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6

Costo por TM antes de la implementación



Fuente: Elaboración propia

El análisis de costos evidencia que el gasto total por metro avanzado alcanza los 422.52 \$/m disparado, equivalentes a 29.95 \$/TM, siendo los rubros de limpieza y acarreo, personal y equipos los de mayor incidencia en la estructura de costos. En contraste, partidas como implementos de seguridad, sostenimiento y servicios al personal representan montos reducidos que no generan variación significativa entre sistemas.

Este comportamiento confirma que el mayor peso económico se encuentra en las actividades directamente vinculadas al proceso de carguío, precisamente el aspecto donde la implementación del mucking loader puede generar una reducción sustancial de costos. Al optimizar los tiempos de ciclo y disminuir la dependencia de mano de obra y equipos auxiliares, la mecanización permite proyectar una disminución en el costo unitario por tonelada y por metro, incrementando la productividad y mejorando la eficiencia global del avance.

3.5.IMPLEMENTACIÓN DE LA MÁQUINA MUCKING LOADER

La implementación de la máquina mucking loader constituye la fase de incorporación tecnológica dentro del proceso de carguío, orientada a sustituir las limitaciones de los equipos convencionales mediante un sistema continuo y especializado. Este apartado aborda tanto las características técnicas del equipo como las condiciones de aplicación en el crucero 06, considerando aspectos de infraestructura, capacitación del personal y sincronización operativa con el acarreo. El objetivo es describir de forma integral cómo se estructura la incorporación de un nuevo equipo, identificando los factores que deben adecuarse para garantizar su funcionamiento bajo condiciones reales de mina.

3.5.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS A IMPLEMENTAR

La descripción de las características técnicas del mucking loader permite contextualizar su capacidad operativa en función de los requerimientos de la labor subterránea. Este análisis abarca aspectos como capacidad volumétrica, velocidad de operación y dimensiones mínimas de la sección de trabajo. Asimismo, se examinan las características del minidumper que acompaña a este equipo en el minado del crucero 06, evaluando factores como la sección transversal, la pendiente y la geometría de los frentes. Con ello se busca establecer la compatibilidad técnica del equipo con las exigencias del entorno, garantizando que su desempeño pueda adaptarse de manera óptima a la realidad operativa de la mina.

El Minidumper Eléctrico de 3.5 toneladas es un vehículo compacto y robusto diseñado especialmente para labores de transporte en minería subterránea y en la implementación del mucking loader este sirve para el transporte de material, este equipo tiene las siguientes características:

Tabla 14

Características del Mucking Loader

Características	Especificación
Modelo	YZW-80
Capacidad de carga nominal	60 m ³ /hr
Ancho de excavación mm	2600
Altura de excavación mm	2000
Distancia de excavación mm	1500
Altura de descarga	> 1500
Velocidad Km/hr	3
Motor kW	11+4
Sección de trabajo	2.3*2.3

Fuente: Mackina Westfalia

Figura 3

Mucking loader



Fuente: Mackina Westfalia

Tabla 15*Características del Minidumper*

Características	Especificación
Modelo	EMT3.5
Tipo de energía	Eléctrico – Baterías de plomo ácido
Motor	Motor asíncrono CA de 10 kW
Capacidad de carga nominal	3.5 toneladas (3500 kg)
Volumen de transporte	1.2 m ³
Dimensiones generales	3.8 m (Largo) × 1.4 m (Ancho) × 1.25 m (Alto)
Caja de carga (tolva)	2.2 m × 1.38 m × 0.45 m – espesor: fondo 5 mm, lados 3 mm
Ángulo máximo de volteo	45° ± 2°
Sistema de elevación	Cilindro hidráulico reforzado de 10 toneladas (3 secciones)
Distancia al suelo	≥ 240 mm
Velocidad máxima	25 km/h
Neumáticos	Delantero 600-14 / Trasero 700-16 (acero o minería)
Sistema de suspensión	Delantera: 3 amortiguadores / Trasera: 13 ballestas reforzadas

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. ADECUACIONES NECESARIAS EN LA INFRAESTRUCTURA MINERA

La implementación de un nuevo equipo no se limita únicamente a su incorporación física, sino que exige una serie de adecuaciones en la infraestructura minera para garantizar su correcto

desempeño y maximizar sus beneficios operativos. En este caso, la transición de un sistema convencional a uno semimecanizado supone un cambio significativo en la configuración de las labores, ya que los equipos que anteriormente operaban sobre rieles (carros mineros y locomotoras) son reemplazados por unidades móviles que trabajan sobre neumáticos, como el mucking loader y los minidumpers eléctricos.

Este cambio implica la necesidad de acondicionar las secciones de las labores, garantizando un ancho y altura mínimos que permitan la maniobrabilidad de los equipos semimecanizados, así como la habilitación de vías de tránsito más estables y niveladas para soportar el rodado continuo, de modo que no sean perjudiciales para las mangas de ventilación o el mantenimiento del mismo equipo. En este aspecto, se establece que la pendiente de operación no debe ser mayor al 5%, con el fin de asegurar la estabilidad de los equipos sobre neumáticos y mantener condiciones de seguridad en la operación.

Asimismo, se requiere mejorar las condiciones de ventilación, ya que la movilidad de equipos incrementa la generación de polvo y gases. Para tal efecto, la labor debe estar provista de un sistema de ventilación secundaria con ventiladores de 10,000 CFM de capacidad, garantizando una adecuada renovación del aire y la reducción de contaminantes en el frente de trabajo.

De manera complementaria, deben considerarse obras auxiliares como cunetas y drenajes adecuados para evitar acumulaciones de agua que afecten la operatividad de los equipos sobre neumáticos, así como la señalización y control de tránsito interno para evitar interferencias entre unidades. En conjunto, estas adecuaciones conforman la base para una transición eficiente hacia el sistema semimecanizado, garantizando no solo la compatibilidad física de la maquinaria con la infraestructura, sino también la seguridad y continuidad del proceso productivo.

Tabla 16*Modificaciones para la implementación*

Aspecto	Sistema convencional (carro minero + pala neumática)	Sistema semimecanizado (mucking loader + minidumper eléctrico)
Superficie de rodado	Rieles metálicos con durmientes.	Piso nivelado y compactado para tránsito continuo sobre neumáticos.
Vías de tránsito	Rectilíneas, dependientes de trocha fija.	Flexibles, permiten maniobrar en curvas y radios de giro menores.
Pendiente de operación	Limitada por tracción en rieles; sin control estricto.	No mayor a 5%, para garantizar seguridad y estabilidad de equipos.
Drenaje	No crítico en la vía.	Fundamental: acumulación de agua afecta a neumáticos.
Ventilación	Requerimientos básicos	Se exige ventilación secundaria con ventiladores de 10,000 CFM, para controlar polvo y gases.
Comunicación y control	Coordinación limitada al paso de locomotoras en rieles.	Requiere mayor control de tráfico interno y señalización.

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. CAPACITACIÓN DEL PERSONAL OPERATIVO

La capacitación del personal constituye un componente estratégico en la implementación de nuevas tecnologías dentro de la mina, puesto que el rendimiento del mucking loader y de los minidumpers depende directamente de la correcta operación y el mantenimiento realizados por los

trabajadores. El proceso de formación debe incluir aspectos como la manipulación de los controles hidráulicos, la sincronización en la operación conjunta con los equipos de acarreo y la detección temprana de fallas mecánicas o eléctricas que puedan comprometer la seguridad o la disponibilidad del equipo.

Tabla 17

Personal requerido

Equipo	Personal	Unid
Mucking Loader	1	Personal/Equipo
Minidumper	1	Personal/Equipo

Fuente: Elaboración propia

En el caso del ciclo CX-06 en el nivel 1350 de la U.E.A. Orión, la transición de un sistema convencional a uno semimecanizado con mucking loader y minidumpers demanda no solo adecuaciones en la infraestructura, sino también la capacitación específica del personal que opera y mantiene dichos equipos. La experiencia registrada en este ciclo demuestra que el rendimiento de las labores depende en gran medida de la pericia de los operadores en la manipulación de los controles hidráulicos y en la coordinación con el acarreo, así como de la capacidad del personal de mantenimiento para ejecutar inspecciones preventivas y correctivas de manera oportuna.

De igual forma, el personal de mantenimiento debe recibir entrenamiento específico en procedimientos preventivos y correctivos adaptados a los nuevos equipos, considerando sistemas hidráulicos, eléctricos y componentes estructurales. Esta capacitación técnica no solo asegura la eficiencia operativa, sino que también disminuye la probabilidad de accidentes y prolonga la vida útil de los equipos semimecanizados, generando un impacto positivo tanto en la productividad como en los costos de operación.

3.5.4. ESTRATEGIA OPERATIVA DE SINCRONIZACIÓN CON EL ACARREO

La sincronización entre el mucking loader y los minidumpers es fundamental para mantener la continuidad del ciclo de carguío y reducir al mínimo las esperas. En el cruce 06, con una distancia de 96 metros hasta la tolva de descarga, el tiempo de operación de cada dumper se distribuye en 2 minutos de carguío, 30 segundos de traslado cargado, 1 minuto de descarga y 35 segundos de retorno vacío, sumando un ciclo total de aproximadamente 4,1 minutos. Este valor permite dimensionar la flota necesaria para que el loader trabaje de manera continua.

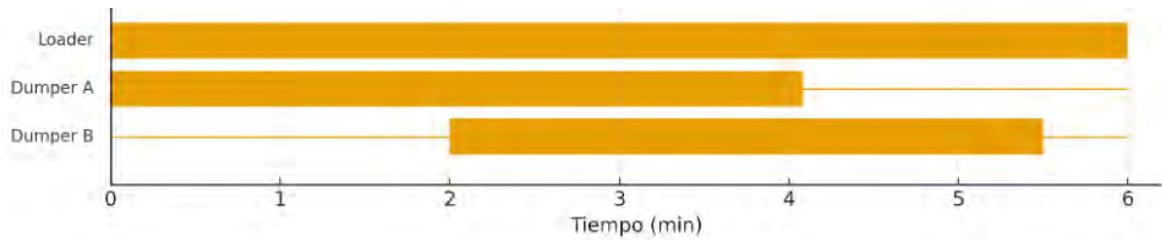
El análisis muestra que con dos minidumpers se logra un equilibrio óptimo: mientras uno se encuentra en proceso de descarga y retorno, el otro está siendo cargado por el loader. Esta alternancia asegura que el equipo de carguío permanezca ocupado casi todo el tiempo, con apenas un 2 % de ociosidad, evitando las colas y demoras que se producirían con una flota insuficiente. Un tercer dumper puede emplearse como equipo de reserva para cubrir fallas o incrementos de distancia, pero su uso permanente generaría tiempos de espera innecesarios y mayor congestión en la vía.

El diseño del tránsito también es clave para evitar interferencias. Se establece que los minidumpers cargados siempre tienen prioridad de paso, mientras que los equipos vacíos deben esperar o apartarse en los refugios habilitados cada 100 metros.

Para este caso en los 96 a 100 m, la utilización del mucking loader incrementara con dos minidumper, aunque podría generar un poco de espera en los minidumpers, es muy eficiente la utilización que generan ambos.

Figura 4

Diagrama para 100 metros



Fuente: Elaboración propia

Al extender la distancia a 150 metros, el ciclo se incrementa a 4,7 minutos, lo que provoca que el loader quede ocioso alrededor del 15 % del tiempo si se trabaja solo con dos dumpers. En este escenario, la alternancia deja de ser suficiente y comienzan a generarse huecos operativos que afectan la continuidad. La incorporación de un tercer dumper resulta necesaria para recuperar la saturación del loader, logrando con ello la capacidad máxima de unas 30 cargas por hora, equivalentes a aproximadamente 100 toneladas por hora. De esta forma, tres equipos en rotación aseguran que mientras uno se descarga y otro retorna, el tercero ingrese a carguío sin interrupciones.

Figura 5

Diagrama para 150 m



Fuente: Elaboración propia

A una distancia de 200 metros, el ciclo del dumper se amplía hasta 5,3 minutos. Con dos equipos, la utilización del loader se reduce al 76 %, lo que significa que casi una cuarta parte de su tiempo operativo se pierde en espera. En la práctica, cuando el primer dumper retorna, el segundo ya ha concluido su carguío y tampoco ha regresado a tiempo, generándose periodos prolongados de inactividad. La presencia de un tercer dumper permite restablecer el balance, manteniendo la alternancia continua y evitando tiempos muertos, aunque la operación ya exige una mayor coordinación en tránsito y el uso disciplinado de refugios para evitar bloqueos.

Figura 6

Diagrama para 200 metros



Fuente: Elaboración propia

En el caso de 250 metros, el ciclo se prolonga hasta 5,9 minutos. En estas condiciones, incluso con tres dumpers la sincronización no logra abastecer plenamente al loader, persistiendo lapsos de espera que reducen la productividad global. Para mantener continuidad plena a esta distancia, es indispensable contar con un cuarto dumper que compense el desfase y mantenga al loader cargando de forma continua. Más allá de 250 metros, la operación requiere no solo de mayor número de equipos sino de un replanteo logístico, ya sea acercando el punto de descarga, incrementando la capacidad de las tolvas o mejorando las condiciones del piso para alcanzar mayores velocidades de circulación.

Figura 7

Diagrama de 250 m



Fuente: Elaboración propia

De esta manera, puede concluirse que el sistema de carguío con loader y dos dumpers es rentable y eficiente únicamente hasta distancias cercanas a 128 metros. A partir de ese punto, la utilización del loader desciende por debajo del 90 %, lo cual obliga a incorporar un tercer equipo entre los 150 y 200 metros para recuperar la capacidad plena. Finalmente, a distancias de 250 metros o superiores, es necesario operar con cuatro dumpers o rediseñar la estrategia de acarreo, ya que el simple incremento de la flota sin mejoras logísticas no garantiza la misma eficiencia alcanzada en distancias cortas.

Tabla 18*Resumen de la distribución de equipos*

Distancia frente–descarga (m)	Tiempo de ciclo T(D) (min)	Utilización del loader con 2 dumpers (%)	Recomendación operativa
100 m	4.13	97 %	2 dumpers (óptimo, loader casi saturado; el 3.º no aporta)
150 m	4.69	85 %	3 dumpers (con 2 hay ociosidad; 3 saturan al loader)
200 m	5.26	76 %	3 dumpers (2 no abastecen, loader con esperas largas)
250 m	5.88	68 %	4 dumpers (3 aún generan inactividad; 4 mantienen continuidad)

Fuente: Elaboración propia

3.6.RESULTADOS TÉCNICOS Y OPERATIVOS OBTENIDOS

El análisis de los resultados técnicos y operativos constituye la fase en la que se contrastan los indicadores obtenidos tras la implementación del mucking loader con los valores de referencia registrados en la etapa inicial. Este apartado se enfoca en mostrar la magnitud de los cambios en términos de tiempos de ciclo, productividad horaria, número de ciclos por turno, tiempo de limpieza y porcentaje de utilización del equipo. Se busca presentar de manera estructurada y objetiva los resultados alcanzados, de modo que se pueda medir con claridad el impacto de la mecanización en la eficiencia operativa.

3.6.1. COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE CICLO ANTES Y DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN

La comparación del tiempo de ciclo constituye un indicador fundamental para dimensionar el efecto directo de la implementación tecnológica en el proceso de carguío. Se analizan los valores registrados en la etapa inicial frente a los obtenidos tras la puesta en marcha del mucking loader, considerando las variaciones en la duración de las maniobras de carga, traslado y descarga. Este análisis permite cuantificar la reducción en minutos por ciclo y estimar el impacto acumulado en términos de ciclos adicionales por turno.

Tabla 19*Tiempos nuevos con la implementación del Mucking loader*

N° Ciclo	Tiempo de Carguío (min)	Tiempo de Ida (seg)	Tiempo de Vuelta (seg)	Tiempo de Descarga (seg)
1	1.45	34	1.14	34
2	2.06	23	43	37
3	2.24	18	38	32
4	1.55	26	40	54
5	2.03	34	43	35
6	2.16	26	38	41
7	2.18	25	38	29
8	1.47	39	60	48
9	1.42	22	36	22
10	2.01	27	38	36
11	2.18	54	52	38
12	2.16	32	50	24
13	2.13	26	46	45
14	1.58	27	36	56
15	1.44	30	44	74

Fuente: Elaboración propia

En términos generales, los quince ciclos analizados reflejan la dinámica completa del proceso de carguío, acarreo y descarga. Los tiempos de carguío se ubican en un rango aproximado entre 1.4 y 3 minutos, mostrando variaciones que distinguen claramente entre ciclos rápidos e

intermedios, y algunos más prolongados. Los tiempos de ida fluctúan en valores cercanos a 20 a 60 segundos, mientras que los tiempos de retorno tienden a ser ligeramente superiores en la mayoría de los casos, alcanzando valores de hasta 80 segundos en los recorridos más largos. Finalmente, los tiempos de descarga se distribuyen entre 20 y 70 segundos, evidenciando diferencias en la eficiencia de la maniobra según cada ciclo. Esto a su vez es muy positivo ya que, a comparación de los equipos convencionales usados anteriormente, aquí se emplea un poco menos de tiempo pero la capacidad de los minidumpers permite que el tonelaje extraído final sea mucho mayor, algo bastante bueno para la producción del día.

Tabla 20

Tiempos resumen después de la implementación

Fecha	Equipo	N° Viajes	Tiempo Promedio Total Viaje (Min)
06 Jun	Minidumper	15	3.7

Fuente: Elaboración propia

El análisis de los tiempos promedio de viaje del Carro Minero U-35 muestra un desempeño relativamente estable, con valores entre 3.5 y 3.7, manteniendo un rango similar al observado en equipos de referencia. Si bien el tiempo promedio es comparable al de los métodos convencionales, la diferencia sustancial radica en la capacidad de carga, ya que mientras el sistema anterior permitía transportar únicamente 1 m³ por viaje, el U-35 alcanza hasta 1.5 m³, lo que representa un incremento del 50 % en la capacidad unitaria de extracción. Esta mejora implica que, aun con tiempos de ciclo semejantes, la productividad global se incrementa de manera significativa, al trasladar un mayor volumen de material en la misma cantidad de viajes diarios. De esta forma, el equipo no solo garantiza continuidad operativa, sino que optimiza la relación tiempo–volumen, consolidándose como una alternativa más eficiente frente al sistema convencional.

3.6.2. INCREMENTO EN LA PRODUCTIVIDAD

El incremento en la productividad horaria y en el número de ciclos por turno refleja el beneficio operativo más tangible de la mecanización. Este análisis evalúa la cantidad de toneladas cargadas por hora y el número de viajes completados en una jornada, comparando los resultados previos con los alcanzados después de la implementación. La evaluación permite establecer el grado de mejora en el ritmo de producción y la forma en que este incremento contribuye al cumplimiento de los programas de avance lineal en el crucero 06.

Tabla 21

Producción después de la implementación

Fecha	Ancho (m)	Altura (m)	Avance efectiva (m)	Capacidad (m3)	Peso específico	m3	TM
7-jun	2.3	2.51	1.81	1.5	2.8	10.44	29.25

Fuente: Elaboración propia

El 7 de junio, en el crucero CX-6, se registraron parámetros de avance con un ancho promedio de 2.30 m, altura de 2.51 m y avance efectivo de 1.68 m, alcanzando un volumen de 9.68 m³ y un tonelaje de 27.15, considerando un peso específico de 2.8 t/m³. Estos resultados evidencian un incremento del 10% respecto al sistema convencional aplicado en frentes de avance, lo que demuestra una mayor eficiencia en el método implementado.

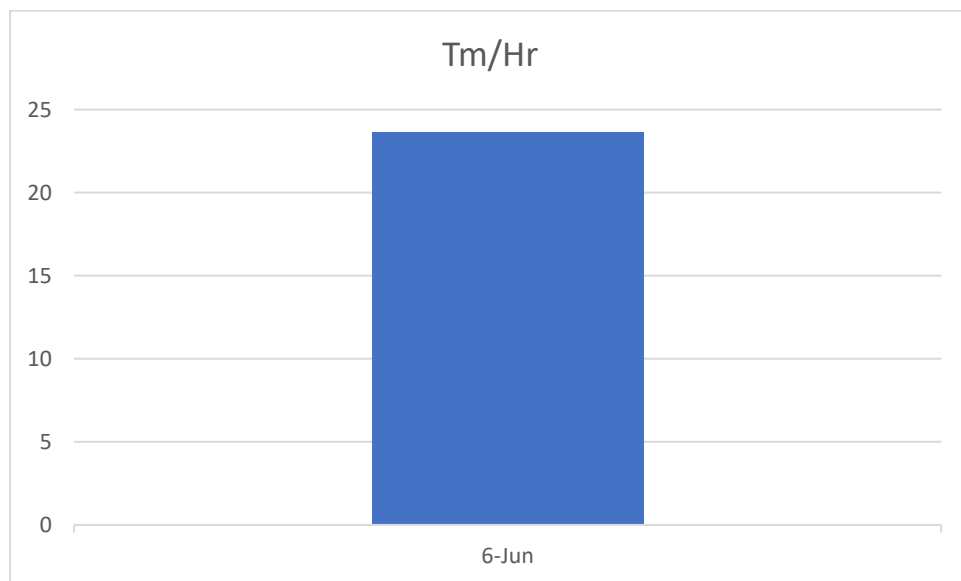
El análisis confirma que el nuevo sistema no solo optimiza la capacidad volumétrica y tonelaje obtenido, sino que además genera un mejor aprovechamiento del frente, reduciendo pérdidas operativas y mejorando la relación entre avance efectivo y tonelaje extraído.

Tabla 22*Resumen de tiempos*

Fecha	Tiempo total del ciclo (min)	Tiempo total del ciclo (Hr)
06 jun	55.5	1.24
Fuente: Elaboración propia		

Tabla 23*Resumen de rendimiento operativo*

m3	TM	Tiempo total del ciclo (Hr)	m3/Hr	Tm/Hr
10.44	29.25	1.24	8.43	23.6
Fuente: Elaboración propia				

Gráfica 7*Rendimiento operativo*

Fuente: Elaboración propia

Con los registros obtenidos se determinó que el sistema mecanizado alcanzó un volumen promedio de 10.44 m³ y 29.25 toneladas por ciclo, con un tiempo total de 1.24 horas, lo que

representa una productividad de 8.43 m³/h y 23.6 t/h. Estos valores reflejan un desempeño estable y sostenido durante la operación, lo cual facilita la planificación de la producción diaria.

En contraste, el sistema semimecanizado evidenció resultados más variables. En el mejor de los escenarios, se alcanzaron productividades de 10.13 m³/h y 28.36 t/h, sin embargo, en condiciones menos favorables los valores descendieron hasta 5.43 m³/h y 15.22 t/h. El promedio general se situó en 7.47 m³/h y 20.91 t/h, lo que demuestra que, si bien puede igualar o incluso superar en determinados casos al sistema mecanizado, presenta una marcada dispersión en sus resultados.

Al realizar la comparación entre ambos métodos, se confirma que el sistema mecanizado no solo ofrece una productividad horaria ligeramente superior, sino que también aporta una mayor estabilidad y regularidad en los ciclos de trabajo. Esto constituye una ventaja significativa, ya que permite contar con indicadores más confiables para la proyección de tonelajes diarios y la programación de actividades. En cambio, la semimecanización, pese a sus picos de productividad, no garantiza la misma consistencia, lo que puede generar incertidumbre en la estimación del rendimiento real.

3.6.3. REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LIMPIEZA POR AVANCE

La reducción del tiempo de limpieza por avance representa uno de los efectos indirectos más relevantes de la implementación del mucking loader, ya que un menor tiempo en esta fase permite iniciar antes las siguientes operaciones del ciclo minero. El análisis compara los tiempos de limpieza previos, que superaban los 90 minutos por avance, con los registrados tras la mecanización, destacando la forma en que esta mejora repercute en la continuidad operativa y en la reducción de tiempos muertos en el cronograma de producción.

En la siguiente tabla se presenta el ciclo de actividades desarrollado durante la jornada, donde se evidencia el tiempo invertido en cada una de las operaciones. En particular, se observa la reducción significativa en la etapa de limpieza, la cual optimiza el avance de la labor y permite una mayor continuidad en el proceso productivo. Este análisis resulta fundamental para demostrar el impacto del nuevo método aplicado en comparación con el convencional, ya que contribuye a disminuir tiempos improductivos y mejorar los indicadores de eficiencia operativa.

Tabla 24

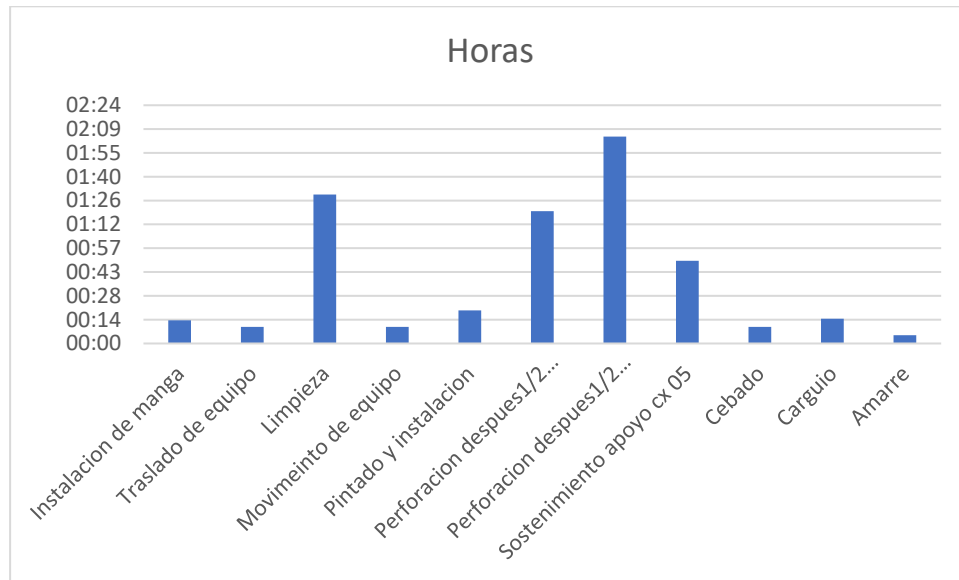
Tiempos después de la implementación

CX 06_Nv. 1350			
Ciclo	Inicio	Final	Horas
Instalación de manga	8:26	8:40	0:14
Traslado de equipo	8:40	8:50	0:10
Limpieza	8:50	9:50	1:30
Movimiento de equipo	9:50	10:00	0:10
Pintado y instalación	10:00	10:20	0:20
Perforación despues1/2 guardia	10:20	12:10	1:20
Perforación despues1/2 guardia	13:40	15:45	2:05
Sostenimiento apoyo cx 05	15:45	16:35	0:50
Cebado	16:35	16:45	0:10
Carguío	16:45	17:00	0:15
Amarre	17:00	17:05	0:05
Total			6:49

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Resumen de tiempos



Fuente: Elaboración Propia

A comparación del otro método convencional de limpieza vemos que el tiempo empleado disminuyo poco más del 50%, una cifra bastante significativa considerando que el tonelaje que se extrae es mayor, permitiendo que la producción sea manera más optima y adecuada según los indicadores a gestionar.

Además de ello se debe considerar que este nuevo sistema tiene una mayor capacidad de los minidumpers frente a los carros mineros U 35, eso en pocas palabras involucra que a menor tiempo se extrae más material.

3.6.4. EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DEL EQUIPO MUCKING LOADER

El porcentaje de utilización del mucking loader constituye un indicador clave para evaluar su integración en el ciclo operativo. En este apartado se analizan las horas efectivas de trabajo frente a las horas disponibles, identificando los factores que permiten un mayor aprovechamiento

del equipo en comparación con los métodos convencionales. Se busca determinar si el nuevo sistema reduce los tiempos muertos y eleva el nivel de utilización, lo cual representa un estándar de eficiencia en operaciones subterráneas mecanizadas.

De manera global, la disponibilidad mecánica por guardia para este tipo de equipos se ubica entre 60 y 70 % según los reportes de mantenimiento, dentro de nuestro análisis haremos uso de los datos extraídos de un día en interior mina, considerando las horas efectivas y demoras operacionales. Es importante señalar que, una vez concluido el ciclo en el frente, los equipos suelen ser desplazados hacia otras labores con características similares, optimizando así su aprovechamiento.

Tabla 26

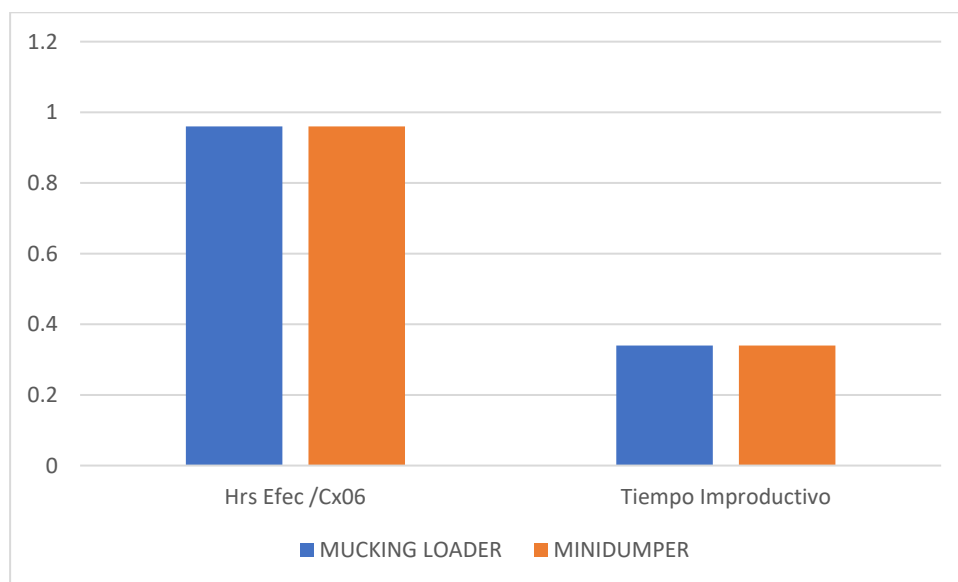
Tiempos de Mucking Loader y minidumper

	Programado	Hrs Efec /Cx06	Tiempo Improductivo
Mucking Loader	7 H/Guardia	0.96	0.34
Minidumper	8 H/Guardia	0.96	0.34

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8

Comparación de tiempos



Fuente: Elaboracion propia

En cuanto a la utilización, esta se calculó como la relación entre el tiempo efectivamente trabajado y el tiempo total registrado en el ciclo, según la fórmula:

En este caso, el tiempo efectivo fue de 57.6 min, mientras que el tiempo total del ciclo ascendió a 168 min (57.6 min efectivos + 20.4 min improductivos + 90 min de limpieza). Al aplicar la fórmula:

En el análisis de la utilización, los resultados muestran que tanto el Mucking Loader como el Minidumper alcanzaron un valor de 34.3 %, cifra que supera al 24.1 % que se corrobora en el uso de métodos convencional en U.E.A. Orión. Esta diferencia de aproximadamente 10 puntos porcentuales refleja que, en comparación con el estándar, los equipos están logrando un mayor aprovechamiento de sus tiempos efectivos dentro del ciclo de trabajo, lo cual constituye un aspecto positivo desde la perspectiva operativa. Sin embargo, es importante destacar que, pese a esta mejora relativa, la utilización sigue siendo reducida, ya que dos tercios del ciclo continúan

concentrándose en actividades no productivas, principalmente limpieza y tiempos improductivos. En este sentido, la ventaja respecto al valor convencional no debe generar una falsa percepción de eficiencia plena; por el contrario, debe motivar a profundizar en la optimización de las labores de apoyo y en la reducción de pérdidas operativas, con el fin de consolidar una mejora sostenida en la productividad de los equipos.

Este registro constituye un insumo fundamental para la evaluación de la eficiencia operativa, ya que permite identificar brechas entre las horas programadas y las horas efectivamente utilizadas, así como establecer criterios de mejora en la gestión del mantenimiento, el cual se realiza de manera diaria al finalizar cada guardia bajo la responsabilidad del área de mantenimiento.

3.7.RESULTADOS ECONÓMICOS Y DE COSTO-BENEFICIO

El análisis económico permite evaluar la sostenibilidad de la implementación del mucking loader en términos de costos operativos unitarios, ahorros acumulados y retorno de la inversión. Este apartado integra los aspectos financieros más relevantes para determinar la viabilidad del proyecto, considerando tanto los gastos iniciales de adquisición y adecuación como los costos recurrentes de operación y mantenimiento. De esta manera, se establece una visión clara de los beneficios económicos obtenidos y del impacto proyectado en el corto y mediano plazo.

3.7.1. CÁLCULO DEL COSTO OPERATIVO UNITARIO POST-IMPLEMENTACIÓN

El cálculo del costo operativo unitario post-implementación permite medir el efecto de la mecanización en la relación costo-beneficio. Se analizan los valores obtenidos tras la incorporación del mucking loader, considerando rubros como consumo energético, mantenimiento, repuestos y mano de obra. Este indicador se compara con los costos registrados

en la etapa inicial, lo que posibilita dimensionar la magnitud de la reducción alcanzada y su impacto en la competitividad de la operación.

Para este caso los costos el incremento de la producción juega un rol indispensable ya que se paso de perforaciones de 6 pies a 8 pies generado el incremento del avance efectivo a 2.3 metros que se da en promedio, generando un volumen de 11.24 m3 plasmado en 31.47 toneladas por disparo, haremos un análisis considerando los parámetros ya evaluados.

Tabla 27

Costos después de la implementación

Ítem	Costos		
	\$ x Disparo	\$ / metro	\$ / TM
Personal	99.33	43.19	3.16
Implementos de seguridad	10.23	4.45	0.33
Herramientas y materiales	73.07	31.77	2.32
Materiales limpieza	0	0.00	0.00
Materiales perforación	144.28	62.73	4.58
Materiales voladura	153.81	66.87	4.89
Sostenimiento	102.27	44.47	3.25
Generación de energia y aire	38.51	16.74	1.22
Servicios al Personal	86.66	37.68	2.75
Ventilacion	151.62	65.92	4.82
TOTAL	675.08	307.90	22.50

Fuente: Elaboracion propia

3.7.2. EVALUACIÓN DEL RETORNO DE INVERSIÓN DEL EQUIPO

El cálculo del retorno de inversión (ROI) y del valor actual neto (VAN) constituye un paso esencial para evaluar la viabilidad financiera de la implementación. Se analizan los flujos de caja derivados de los ahorros operativos frente a la inversión inicial, determinando el tiempo estimado de recuperación de la inversión y la rentabilidad proyectada a lo largo de la vida útil del equipo. Este análisis permite validar la conveniencia económica de la decisión de incorporar el mucking loader como parte del sistema de carguío.

Para esta evaluación se toma en cuenta la adquisición de nuevos equipos, en este caso se hará el análisis de un cargador Mucking Loader y 2 minidumpers, los cuales permitirán que el acarreo convencional usado con anterioridad ahora sea semimecanizada.

Tabla 28

Inversión inicial

Equipos	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Mucking Loader	1	22000	22000
Minidumper	3	22000	66000
	Total		88000

Fuente: Elaboracion propia

Considerando los costos hallados podemos hacer una comparativa, considerando que en cada guardia se realiza y se trabaja 1 disparo, haremos la comparación entre lo convencional y semimecanizado.

Tabla 29

Comparación entre método convencional y semimecanizado

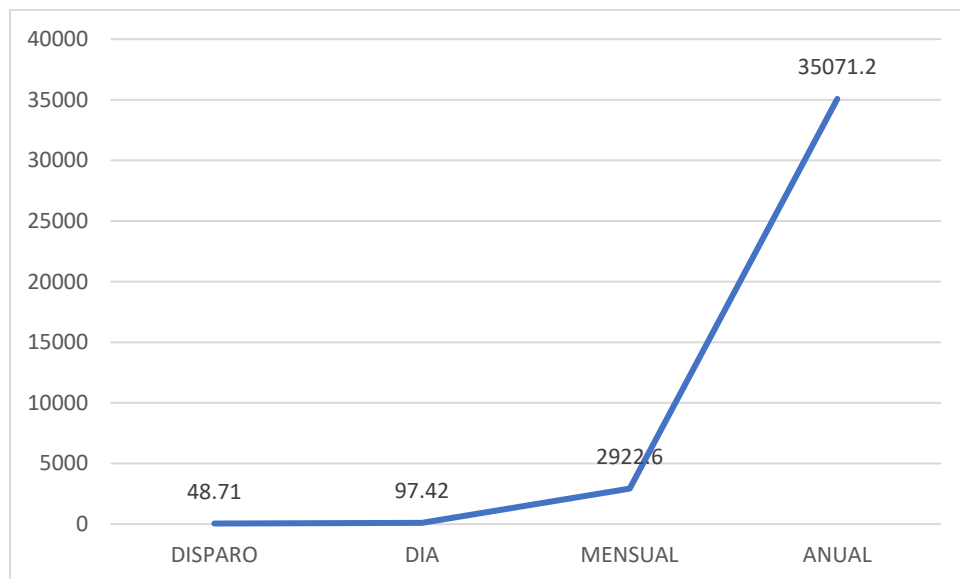
Periodo de evaluación	Método convencional (USD)	Método semimecanizado (USD)	Ahorro generado (USD)
------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------

Por disparo	422.53	373.82	48.71
Por día	845.06	747.64	97.42
Mensual	25,351.80	22,429.20	2,922.60
Anual	304,221.60	269,150.40	35,071.20

Fuente: Elaboracion propia

Gráfica 9

Ahorros a través del tiempo



Fuente: Elaboracion propia

Con esta información tendremos como resultado que el ahorro anual debido a este cambio en el modo de acarreo con el mucking loader es de 35 71.2 \$, un montón alto y que permitirá la recuperación de la inversión a corto plazo, para lo cual también haremos un análisis proyectando una mayor rentabilidad en nuestra operación.

Tabla 30

Análisis de flujo de caja

AÑO	INVERSION INICIAL	REMANENTE	INGRESO NETO
AÑO 0	-88000	-88000	35071.2

AÑO 1	-52928.8	35071.2
AÑO 2	-17857.6	35071.2
AÑO 3	17213.6	35071.2
AÑO 4	52284.8	35071.2

Fuente: Elaboración propia

El análisis del flujo de caja muestra que la inversión inicial de 88,000 se va recuperando gradualmente con los ingresos netos anuales de 35,071.2. Al finalizar el segundo año, aún queda un remanente negativo de 17,857.6, lo que indica que la inversión no se ha recuperado completamente. Sin embargo, durante el tercer año, los ingresos superan este remanente, logrando recuperar la inversión total aproximadamente a mitad del año 3. Esto significa que el proyecto tiene un tiempo de recuperación de inversión de 2.5 años, lo cual evidencia que es capaz de recuperar el capital invertido en un período relativamente corto y empezar a generar excedentes posteriormente.

3.7.3. IMPACTO FINANCIERO PROYECTADO EN EL CORTO Y MEDIANO PLAZO

El impacto financiero proyectado en el corto y mediano plazo resume los efectos económicos de la implementación en la operación minera, considerando horizontes temporales de uno a cinco años. Se analizan variables como la estabilidad de los costos unitarios, la generación de ahorros acumulados y la mejora en la rentabilidad neta del proyecto. Este apartado busca evidenciar que la inversión en mecanización no solo resuelve limitaciones operativas inmediatas, sino que también garantiza una base financiera sólida para el desarrollo sostenible de la mina en el futuro.

3.7.3.1. CORTO PLAZO

Como principal medida, se considera la recuperación del monto invertido, la cual, según el análisis de flujos, se logrará aproximadamente entre el segundo y tercer año, lo que representa una recuperación rápida y eficiente. Proyectando el comportamiento financiero a cinco años, se observa una tendencia sostenida de ganancia, debido a los ahorros generados por la implementación del cambio de un proceso convencional a uno mecanizado. Esta proyección sugiere que, además de recuperar la inversión inicial, el proyecto generará remanentes positivos crecientes año tras año, fortaleciendo la liquidez y la rentabilidad del proyecto en el mediano plazo. Por lo tanto, la inversión no solo se recupera de manera temprana, sino que también aporta un beneficio económico adicional a lo largo del horizonte proyectado, lo que respalda su viabilidad financiera.

3.7.3.2. MEDIANO PLAZO

A largo plazo, el proyecto muestra un elevado potencial de expansión y optimización operativa. Considerando la inversión inicial recuperada a los 2.5 años, se proyecta que la implementación de secciones mecanizadas adicionales podría incrementar la productividad entre un 20% y 35% en comparación con los procesos convencionales. Esto se lograría mediante la reducción de tiempos de ciclo, disminución de errores operativos y optimización de recursos humanos. Los ahorros acumulados anuales, que actualmente ascienden a 35,071.2 por sección, podrían ser reinvertidos en la adquisición de nuevas unidades mecanizadas, mantenimiento preventivo y capacitación especializada del personal, ampliando gradualmente la cobertura mecanizada de la operación.

Desde el punto de vista financiero, esta expansión permitiría que los remanentes positivos se incrementen progresivamente, generando excedentes que superarían la inversión inicial en cada

nueva sección implementada. Adicionalmente, la automatización y mecanización sostenida contribuiría a la reducción de riesgos laborales y a la eficiencia energética, fortaleciendo la rentabilidad y sostenibilidad económica del proyecto en el largo plazo. Así, la estrategia de expansión de secciones mecanizadas asegura no solo un incremento continuo de la productividad, sino también un impacto financiero positivo consistente y sostenible, consolidando la viabilidad del proyecto a futuro y su capacidad de generar valor agregado de manera constante.

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.RESULTADOS

El análisis integral de los resultados permite valorar en qué medida la implementación del Mucking Loader y los Minidumpers en el crucero 06 – Nivel 1350 de la Mina Orión responde al problema planteado y a los objetivos de la investigación. Para ello, se contrastan los indicadores operativos y económicos obtenidos en la etapa convencional (pala neumática + carros U-35) con aquellos registrados después de la mecanización del sistema de carguío y acarreo.

En primer lugar, respecto a los tiempos de ciclo, el sistema convencional presentaba un tiempo promedio de carguío por ciclo superior a 6,5 minutos, al que se sumaban demoras significativas en el acarreo y la descarga, configurando ciclos largos y poco eficientes. Tras la implementación del mucking loader y el minidumper, el análisis de quince ciclos representativos muestra tiempos de carguío entre 1,4 y 3 minutos, con desplazamientos de ida y retorno que oscilan entre 20 y 80 segundos, y tiempos de descarga entre 20 y 70 segundos. Esta reducción en los

componentes del ciclo indica una mejora sustancial en la rapidez de las operaciones, permitiendo completar más ciclos efectivos por guardia y sentando la base para el incremento de la productividad horaria.

Un segundo aspecto crítico es el tiempo de limpieza por avance. En la etapa convencional, la limpieza del frente después de cada voladura superaba los 90 minutos, generando cuellos de botella en la secuencia de actividades del ciclo minero. Con el nuevo sistema, el análisis del ciclo diario evidencia que el tiempo de limpieza se reduce en más del 50 %, manteniendo la continuidad operativa y permitiendo iniciar con mayor anticipación las etapas de perforación, voladura y carguío. Esta disminución de tiempos improductivos se traduce en una mejor utilización de la guardia, mayor disponibilidad del frente y una reducción efectiva de los retrasos acumulados en la programación de avances.

En términos de productividad, el sistema convencional con palas neumáticas y carros U-35 registraba valores de 15–20 t/h, asociados a una capacidad de transporte limitada (1 m³ por viaje) y a tiempos de ciclo prolongados. Luego de la mecanización, los registros del sistema con mucking loader indican un volumen promedio de 10,44 m³ y 29,25 toneladas por ciclo, con un tiempo total de 1,24 horas, lo que equivale a productividades de 8,43 m³/h y 23,6 t/h, con picos que alcanzan las 29 t/h. Estos resultados confirman un incremento superior al 25 % en la productividad horaria respecto al rango convencional, alineado con la evidencia reportada en estudios previos sobre el desempeño de mucking loaders en labores de desarrollo.

El comportamiento de la utilización de los equipos refuerza esta tendencia. En la etapa convencional se registraba una utilización del orden de 24,1 %, reflejando una alta proporción de tiempos improductivos. Tras la implementación del mucking loader y el minidumper, la utilización se incrementa hasta 34,3 %, es decir, un aumento cercano a 10 puntos porcentuales. Aunque esta

cifra evidencia una mejora clara en el aprovechamiento del tiempo efectivo de operación, el análisis muestra que aún dos tercios del ciclo se concentran en actividades no productivas (limpieza, demoras y tiempos auxiliares), lo cual señala un margen adicional de optimización en la gestión de apoyo, la coordinación entre áreas y la reducción de pérdidas operativas.

Desde la perspectiva económica, el cambio tecnológico también resulta significativo. Bajo el sistema convencional, el costo total por metro avanzado alcanzaba 422,52 USD/m, equivalente a 29,95 USD/t, siendo los rubros de limpieza, acarreo, personal y equipos los de mayor incidencia en la estructura de costos. Luego de la implementación del mucking loader y los minidumpers, el costo unitario se reduce a 22,50 USD/t, manteniéndose el mismo costo total por disparo pero distribuyéndose sobre un mayor tonelaje (31,47 t frente a 22,54 t), gracias al incremento del avance efectivo y del volumen por disparo. Esta reducción cercana al 25 % en el costo por tonelada confirma que la mecanización genera una mejor relación costo–beneficio, al concentrar el gasto en actividades de mayor valor agregado y reducir prácticamente a cero los costos de limpieza específicos para la labor analizada.

El análisis de costo–beneficio y del retorno de inversión refuerza la lógica de la mejora. La comparación entre el método convencional y el sistema semimecanizado muestra ahorros de 48,71 USD por disparo, que se traducen en 2 922,6 USD mensuales y 35 071,2 USD anuales. Considerando una inversión inicial de 88 000 USD (un mucking loader y tres minidumpers), el retorno de inversión se estima en aproximadamente 2,5 años, lo que, para una operación de desarrollo subterráneo, constituye un periodo de recuperación atractivo y compatible con la vida útil de los equipos.

En síntesis, el análisis de resultados evidencia que la implementación del mucking loader y los minidumpers en el crucero 06 produce mejoras concurrentes en todos los indicadores críticos:

se reducen los tiempos de ciclo y de limpieza, se incrementa la productividad horaria y el tonelaje por disparo, se eleva el porcentaje de utilización y se disminuyen de manera importante los costos unitarios de operación, generando además ahorros anuales que justifican la inversión realizada. No obstante, el hecho de que aún persista una proporción elevada de tiempos improductivos sugiere que la mecanización, si bien es condición necesaria para optimizar el carguío y acarreo, debe complementarse con una gestión más rigurosa del mantenimiento, la planificación de actividades auxiliares y la coordinación operativa, a fin de consolidar una mejora sostenible en la eficiencia global del sistema.

4.1.1. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CARGUÍO Y ACARREO MEDIANTE LA METODOLOGÍA DMAIC

La optimización del proceso de carguío y acarreo en el Crucero 06 – Nivel 1350 de la Mina Orión se analizó mediante la metodología DMAIC, herramienta de mejora continua utilizada para evaluar y optimizar procesos existentes a partir de indicadores medibles. Las siglas DMAIC significan: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar. Esta metodología resulta adecuada para la presente investigación porque permite pasar de un diagnóstico operativo inicial hacia una propuesta de mejora sustentada en datos reales de productividad, tiempos de ciclo, costos unitarios y ahorro económico.

En la fase Definir, se identificó como problema principal la baja eficiencia del sistema convencional de carguío y acarreo, conformado por pala neumática y carros mineros U-35. Este sistema presentaba limitaciones relacionadas con tiempos prolongados de ciclo, menor capacidad de transporte, baja continuidad operativa y costos unitarios elevados. Frente a ello, se planteó la implementación del Mucking Loader y el Minidumper como alternativa semimecanizada para mejorar el rendimiento del proceso.

En la fase Medir, se estableció la línea base del sistema convencional. Se registró un volumen movilizado de 7,37 m³, equivalente a 20,65 TM, en un tiempo total de 120,9 minutos, es decir, 2,01 horas. Con estos datos, la productividad horaria fue de 10,27 TM/h, calculada al dividir 20,65 TM entre 2,01 h. Este resultado evidenció que el proceso convencional tenía una baja capacidad de producción por hora efectiva de trabajo.

En la fase Analizar, se identificó que la baja productividad estaba asociada a la limitada capacidad de acarreo, los tiempos improductivos, la espera entre carguío y transporte, y la demora en la limpieza del frente. Asimismo, el sistema convencional dependía de una secuencia operativa menos continua, lo que generaba interrupciones dentro del ciclo de minado y afectaba el cumplimiento eficiente del avance programado.

En la fase Mejorar, se evaluó el sistema semimecanizado con Mucking Loader y Minidumper. Con esta implementación se movilizó un volumen de 10,44 m³, equivalente a 29,25 TM, en un tiempo de 1,24 horas. La productividad horaria alcanzó 23,60 TM/h, calculada al dividir 29,25 TM entre 1,24 h. Al comparar este valor con la productividad inicial de 10,27 TM/h, se obtuvo un incremento de 13,33 TM/h, equivalente a una mejora de 129,80 %.

Tabla 31

DMAIC - 1

Indicador técnico	Sistema convencional	Sistema semimecanizado	Resultado de mejora
Volumen movilizado	7,37 m ³	10,44 m ³	+3,07 m ³
Tonelaje movilizado	20,65 TM	29,25 TM	+8,60 TM
Tiempo de ciclo	2,01 h	1,24 h	-0,77 h
Productividad horaria	10,27 TM/h	23,60 TM/h	+13,33 TM/h
Incremento de productividad	—	—	+129,80 %

Desde el punto de vista económico, el sistema convencional registró un costo unitario de 29,95 USD/TM, mientras que el sistema semimecanizado redujo dicho valor a 22,50 USD/TM. La diferencia fue de 7,45 USD/TM, lo que representa una reducción de 24,87 % en el costo unitario. Además, la comparación económica muestra un ahorro de 48,71 USD por disparo, 97,42 USD por día, 2 922,60 USD mensuales y 35 071,20 USD anuales.

Tabla 32

DMAIC - 2

Indicador económico	Sistema convencional	Sistema semimecanizado	Resultado de mejora
Costo unitario	29,95 USD/TM	22,50 USD/TM	-7,45 USD/TM
Ahorro por disparo	422,53 USD	373,82 USD	48,71 USD
Ahorro diario	845,06 USD	747,64 USD	97,42 USD
Ahorro mensual	25 351,80 USD	22 429,20 USD	2 922,60 USD
Ahorro anual	304 221,60 USD	269 150,40 USD	35 071,20 USD

En la fase Controlar, se plantea que la mejora debe sostenerse mediante el seguimiento continuo de indicadores como productividad horaria, tiempo de ciclo, tiempo de limpieza, utilización de equipos, costo unitario y ahorro acumulado. Este control permite verificar que los beneficios obtenidos no sean aislados, sino que se mantengan durante la operación regular del sistema semimecanizado.

Finalmente, considerando una inversión inicial de 88 000 USD y un ahorro anual de 35 071,20 USD, el periodo simple de recuperación se obtiene al dividir 88 000 entre 35 071,20, dando como resultado 2,51 años, equivalente aproximadamente a 2 años y 6 meses. Por tanto, la aplicación de la metodología DMAIC permite sustentar técnicamente el término optimización, ya que el proceso fue definido, medido, analizado, mejorado y proyectado para su control mediante indicadores cuantitativos reales.

4.2. COMPROBACIÓN DE HIPOTESIS

El análisis de los resultados obtenidos tras la implementación del mucking loader en el crucero 06 de la U.E.A. Orión demuestra mejoras significativas en los principales indicadores técnicos y económicos respecto al sistema convencional. Los tiempos de ciclo, que en el método tradicional con carro minero y pala neumática variaban entre 7.11 minutos por viaje, se estabilizaron con el mucking loader en un rango de 3.7 a 4.1 minutos, mostrando una reducción de la dispersión y una mayor regularidad operativa. Esta disminución se tradujo en un incremento en el número de ciclos realizados por turno y en un mejor aprovechamiento del frente de trabajo. En cuanto a la productividad, los registros evidencian que con el método convencional se alcanzaban entre 15 y 20 toneladas por hora, mientras que con el mucking loader se lograron promedios de 23,6 toneladas por hora, con picos que llegaron hasta 29 toneladas, lo cual representa un incremento cercano al 25 %. Del mismo modo, el tiempo de limpieza de frente se redujo en más del 50 %, pasando de más de 90 minutos con el sistema tradicional a alrededor de 45 minutos con el equipo mecanizado, favoreciendo la continuidad del ciclo de minado. También se observó una mejora en el porcentaje de utilización, que pasó de valores de 24 % a un 34 %, lo que refleja un mayor aprovechamiento del tiempo efectivo de trabajo, aunque todavía persisten oportunidades de optimización en la gestión de las demoras y en la coordinación operativa. Desde el punto de vista económico, el costo unitario por tonelada cargada descendió de 29,95 a 22,50 dólares, generando un ahorro anual estimado de 35 071,2 dólares y permitiendo recuperar la inversión inicial de 88 000 dólares en aproximadamente 2,5 años.

A partir de estos resultados se procedió a la comprobación de las hipótesis planteadas. La hipótesis general, que sostenía que la implementación del mucking loader mejoraría la eficiencia del proceso de carguío en el crucero 06, se confirma plenamente, dado que se evidencia una mejora

sostenida en productividad, reducción de tiempos, aumento de utilización y disminución de costos unitarios. De igual modo, las hipótesis específicas también se validaron. La primera, referida al incremento del rendimiento del carguío, se confirma porque la productividad horaria se elevó en promedio un 25 % y se logró un mayor número de ciclos por turno. La segunda, que planteaba la reducción de costos operativos, se demuestra con la disminución de más de siete dólares por tonelada y la obtención de ahorros anuales considerables, que permiten recuperar la inversión en un periodo relativamente corto. La tercera hipótesis, que señalaba que la mecanización incrementaría la eficiencia operativa y la utilización de los equipos, también se cumple, ya que se observó un incremento de 10 puntos porcentuales en la utilización y una mayor estabilidad en los tiempos de ciclo.

En conclusión, la implementación del mucking loader en la U.E.A. Orión permitió mejorar la eficiencia del proceso de carguío, reducir costos y optimizar la utilización de los equipos, validando la hipótesis general de la investigación. Se concluye además que la productividad horaria aumentó en torno al 25 %, el costo unitario se redujo de 29,95 a 22,50 dólares por tonelada, y la utilización del equipo se incrementó en 10 puntos porcentuales. Estos resultados demuestran la pertinencia de la mecanización en labores similares de la unidad minera. Se recomienda, en primer lugar, implementar de manera sistemática el mucking loader en frentes con condiciones comparables, ya que se comprobó que su uso garantiza incrementos de productividad y sostenibilidad económica. Asimismo, se sugiere consolidar un plan de mantenimiento preventivo y una capacitación constante de los operadores, con el fin de preservar los tiempos de ciclo dentro de rangos óptimos y evitar pérdidas de eficiencia. Desde la perspectiva de costos, se recomienda establecer un sistema de monitoreo continuo del costo unitario por tonelada, de forma que se puedan identificar desviaciones y adoptar decisiones correctivas en tiempo oportuno. Finalmente,

en lo referido a la eficiencia operativa, resulta pertinente implementar un sistema de control y registro en campo de los tiempos de ciclo, que permita identificar y reducir las causas de inactividad, de modo que la utilización del equipo se mantenga por encima del 90 % y se asegure la continuidad del carguío y la rentabilidad global de la operación.

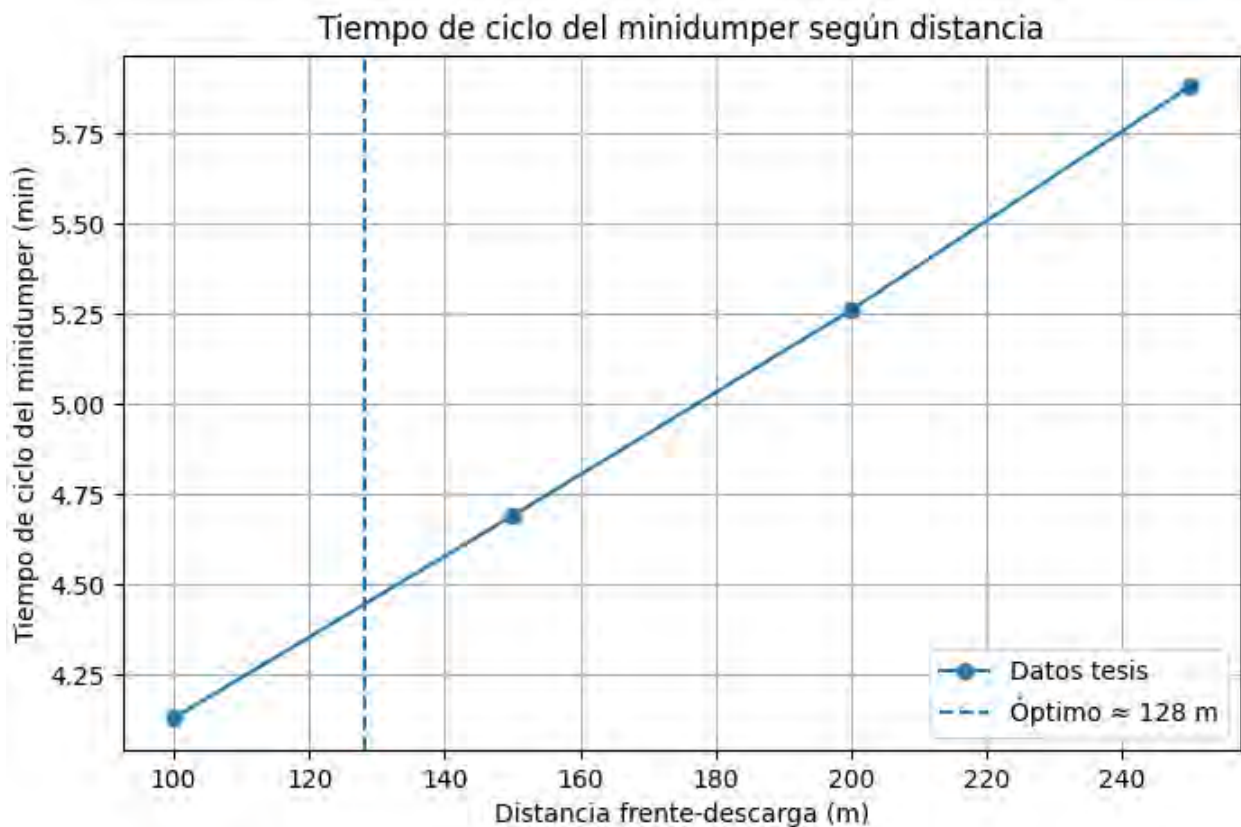
4.3.VALIDACIÓN DE RESULTADOS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL (I.A.)

La validación de resultados con Inteligencia Artificial se realizó mediante un modelo computacional desarrollado en Python, con el propósito de comprobar la sincronización operativa entre el Mucking Loader y los Minidumpers en función de la distancia frente–descarga. Para ello, se tomaron como base los datos de la tesis correspondientes a distancias de 100 m, 150 m, 200 m y 250 m, considerando sus respectivos tiempos de ciclo, utilización del loader y recomendación de número de dumpers.

El modelo evaluó diferentes escenarios con 2, 3 y 4 minidumpers, incorporando restricciones propias de minería subterránea, como vía angosta, ausencia de cruce libre, espera en refugios, maniobras de retroceso y prioridad de paso del equipo cargado. De esta manera, la validación no se limitó a un cálculo teórico, sino que simuló condiciones operativas más cercanas al trabajo real en el Crucero 06.

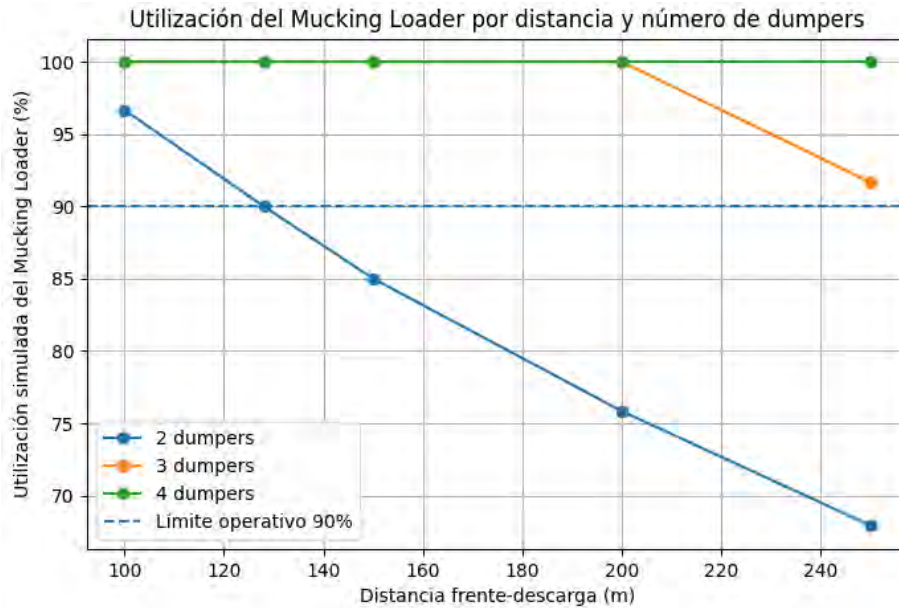
Los códigos utilizados para esta validación se presentan en los anexos, donde se incluye el procesamiento en Python mediante librerías como NumPy, Pandas y Matplotlib. Estos códigos permiten interpolar tiempos de ciclo, calcular la utilización del Mucking Loader, estimar la ociosidad, evaluar la espera promedio de los minidumpers y determinar la productividad esperada según distancia y cantidad de equipos.

Gráfica 10 *Tiempo de ciclo del minidumper según distancia*



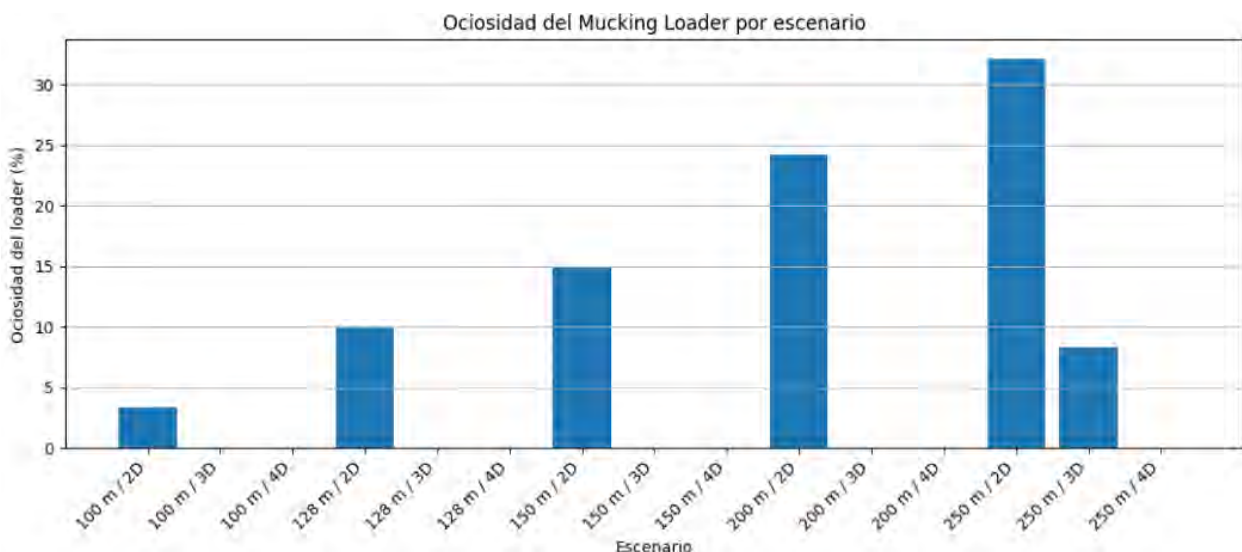
La gráfica muestra que el tiempo de ciclo del minidumper aumenta progresivamente conforme se incrementa la distancia entre el frente de trabajo y el punto de descarga. A 100 m el ciclo es de 4.13 min, mientras que a 250 m llega a 5.88 min. La línea vertical ubicada cerca de los 128 m representa el punto óptimo aproximado, donde el sistema aún puede trabajar eficientemente con 2 minidumpers sin generar una pérdida significativa de utilización del Mucking Loader.

Gráfica 11 Utilización del Mucking Loader por distancia y número de dumpers



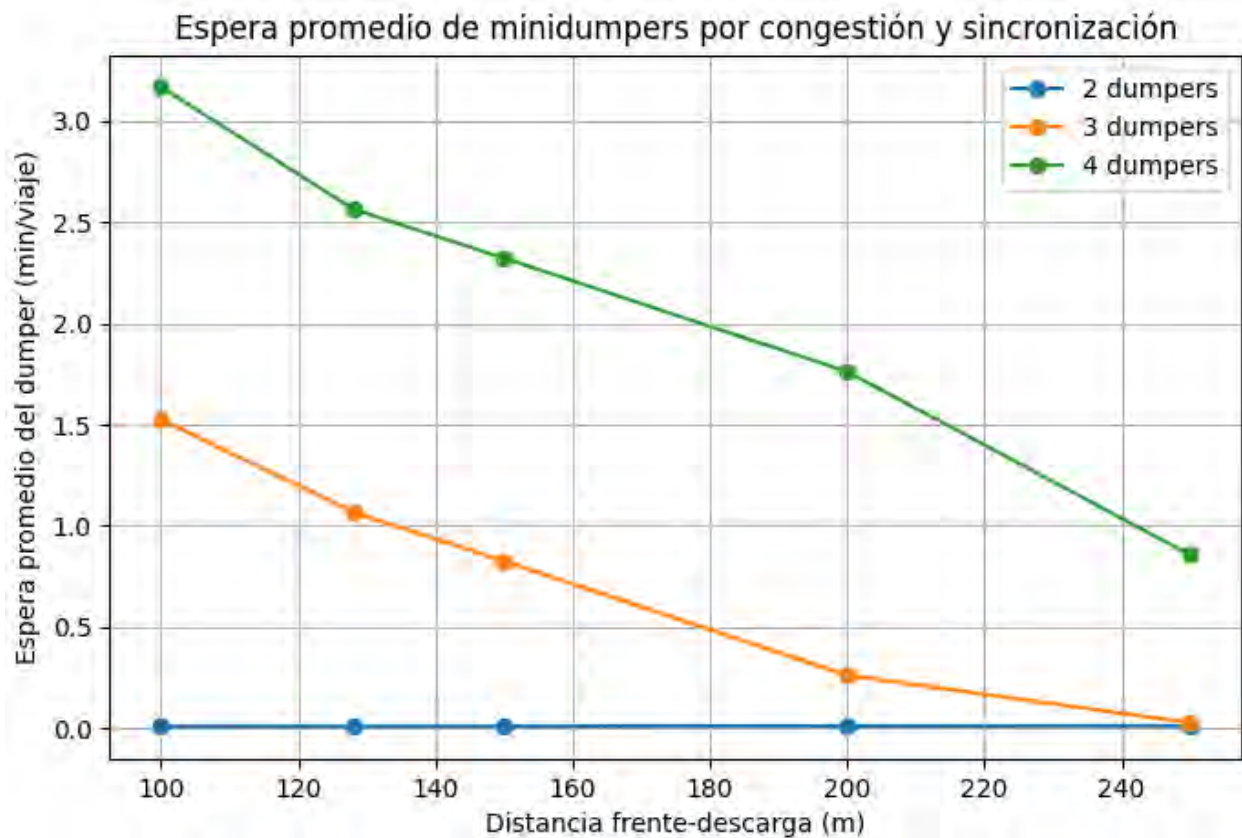
La gráfica evidencia que con 2 minidumpers la utilización del Mucking Loader disminuye conforme aumenta la distancia de acarreo. A distancias cortas el sistema es eficiente, pero a partir de 150 m la utilización cae por debajo del límite operativo del 90 %. Con 3 minidumpers, el sistema mejora en distancias medias y largas, mientras que con 4 minidumpers se mantiene una utilización elevada, aunque puede generar congestión si la labor no permite cruces adecuados.

Gráfica 12 Ociosidad del Mucking Loader por escenario



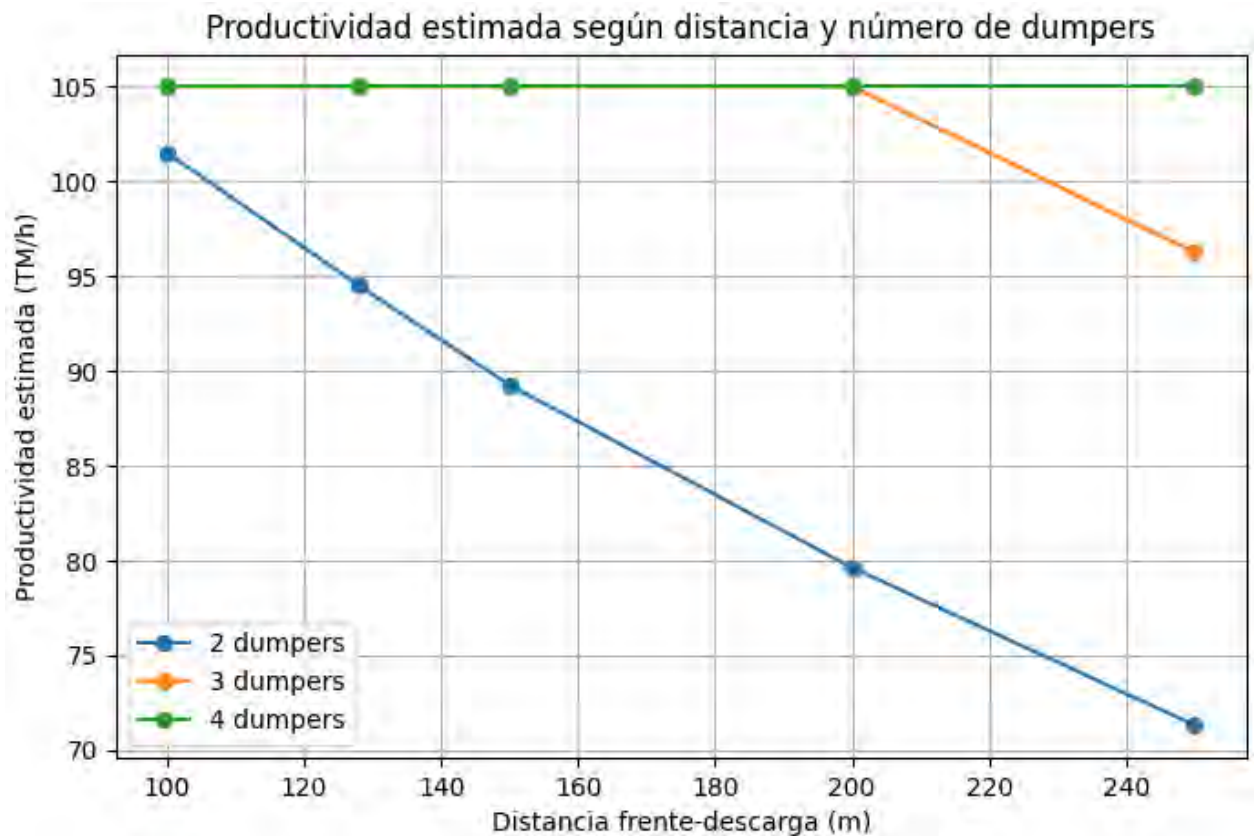
La ociosidad representa el tiempo en que el Mucking Loader permanece sin cargar por falta de minidumper disponible. La gráfica muestra que, con 2 dumpers, la ociosidad aumenta conforme crece la distancia, llegando a ser mayor en 200 m y 250 m. Esto confirma que, en distancias largas, dos equipos de acarreo no son suficientes para mantener la continuidad del carguío.

Gráfica 13 *Espera promedio de minidumpers por congestión y sincronización*



La gráfica indica que con 2 minidumpers prácticamente no existe espera, porque el sistema trabaja con menor congestión. Sin embargo, con 3 y 4 minidumpers aparece mayor espera promedio, especialmente en distancias cortas, debido a la congestión, maniobras y falta de cruce libre en vía angosta. Esto demuestra que aumentar equipos no siempre mejora el sistema si no se controla la sincronización operativa.

Gráfica 14 Productividad estimada según distancia y número de dumpers



La productividad estimada disminuye con 2 dumpers a medida que aumenta la distancia, porque el Mucking Loader queda más tiempo ocioso. Con 3 dumpers se mantiene una productividad más alta en distancias medias y largas, mientras que con 4 dumpers se alcanza una productividad elevada y estable; sin embargo, su aplicación debe evaluarse junto con la congestión de la labor. Por ello, el modelo valida que la cantidad óptima de minidumpers depende de la distancia de acarreo y de las condiciones reales de tránsito subterráneo.

4.4.DISCUSIÓN

4.4.1. COMPARACIÓN CON ESCOBAR (2017) – ESTUDIO DE TIEMPOS Y

MOVIMIENTOS EN EL ACARREO SUBTERRÁNEO

Escobar (2017) identifica que aproximadamente el 30 % del tiempo operativo en el sistema de acarreo correspondía a actividades no productivas, recomendando mejoras en la organización del ciclo y en la coordinación entre carguío y transporte. Los resultados obtenidos en la Mina Orión coinciden con estas conclusiones, ya que el sistema convencional con pala neumática y carros mineros U-35 presentaba tiempos de ciclo prolongados y una elevada proporción de tiempos muertos. La implementación del Mucking Loader y el Minidumper permitió reducir de manera significativa dichos tiempos improductivos, incrementando el número de ciclos efectivos por turno y confirmando que la optimización del flujo operativo es un factor determinante para mejorar el desempeño del carguío y acarreo subterráneo.

4.4.2. COMPARACIÓN CON EL ANTECEDENTE NACIONAL – MINA EL TINGO

(UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO)

El estudio realizado en la Mina El Tingo concluye que la implementación del Mucking Loader permitió prácticamente duplicar la productividad del sistema de limpieza frente a equipos convencionales, además de reducir el costo por tonelada cargada, aun cuando el costo horario del equipo era mayor. De manera consistente, los resultados de la presente investigación muestran que la productividad horaria del carguío y acarreo en el Crucero 06 se incrementó hasta valores promedio de 23,6 tm/h, con picos de 29 tm/h, y que el costo unitario se redujo de 29,95 USD/tm a 22,50 USD/tm. Esta similitud confirma que el beneficio económico del Mucking Loader radica principalmente en el aumento de la productividad y no únicamente en el costo del equipo.

4.4.3. COMPARACIÓN CON QUISPE Y ARISNABARRETA (2022) – USO DE MINIDUMPER ELÉCTRICO EN ACARREO SUBTERRÁNEO

Quispe y Arisnabarreta (2022) demostraron que el uso de Minidumpers eléctricos permitió superar las metas de acarreo y reducir los costos operativos mensuales frente a sistemas tradicionales con carros mineros. En la presente investigación, el Minidumper desempeñó un rol clave en la mejora del sistema de acarreo, al facilitar una mejor sincronización con el Mucking Loader y reducir los tiempos de transporte y descarga del material. Ambos estudios coinciden en que el Minidumper es una alternativa eficiente para labores de desarrollo con distancias cortas a medias, mejorando la productividad y disminuyendo la carga física del trabajador.

CONCLUSIONES

La implementación de los equipos Mucking Loader y Minidumper en el Crucero 06 – Nivel 1350 de la Mina Orión permitió optimizar el proceso de carguío y acarreo, evidenciándose una reducción importante del tiempo de limpieza, al pasar de valores mayores a 90 minutos por avance con el sistema convencional a rangos promedio de 40 a 45 minutos por avance, demostrando una mejora directa en la eficiencia operativa del desarrollo subterráneo.

El diagnóstico del sistema convencional basado en pala neumática y carros mineros U-35 evidenció una productividad horaria limitada de aproximadamente 12 a 15 TM/h, baja utilización de los equipos y elevados tiempos muertos asociados a maniobras, descarga y retorno, confirmando que el proceso inicial presentaba restricciones operativas que afectaban la eficiencia técnica y económica del carguío y acarreo.

Con la implementación del sistema semimecanizado, la productividad horaria promedio aumentó a 23.6 TM/h, alcanzando picos de hasta 29 TM/h. Asimismo, se logró una mejor utilización de los equipos y una mayor continuidad del ciclo operativo, validando que la sincronización entre el Mucking Loader y el Minidumper constituye un factor determinante para mejorar el rendimiento del proceso de carguío y acarreo.

El análisis económico evidenció una reducción del costo unitario de 29.95 USD/TM a 22.50 USD/TM, fortaleciendo la rentabilidad de la operación. Desde el enfoque de geología económica y reservas, esta disminución de costos permite sostener la viabilidad económica del yacimiento, mejorar el ritmo de habilitación de labores y optimizar la exposición de reservas económicamente explotables.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Gerencia de Operaciones de la Mina Orión replicar el uso del Mucking Loader y Minidumper en otras labores de desarrollo con secciones similares, con el fin de incrementar la productividad en más del 70 % y reducir los costos unitarios por tonelada, fortaleciendo la eficiencia global de la operación.

Se recomienda al Área de Planeamiento y Geología incorporar los nuevos parámetros de productividad (≥ 23 TM/h) y tiempos de ciclo optimizados en los programas de desarrollo, con la finalidad de mejorar la estimación y explotación de reservas, reduciendo retrasos en la habilitación de frentes y mejorando la confiabilidad del planeamiento minero.

Se recomienda al Área de Mantenimiento establecer un plan de mantenimiento preventivo específico para los equipos implementados, orientado a garantizar una disponibilidad mecánica mayor al 90 %, con el propósito de evitar pérdidas productivas y asegurar la continuidad del proceso de carguío y acarreo.

Se recomienda al Área de Seguridad y Salud Ocupacional fortalecer la capacitación de los operadores en equipos semimecanizados para reducir la exposición directa al frente de trabajo, y a futuras investigaciones se les recomienda evaluar la relación entre optimización del carguío, dilución y recuperación del mineral, y su impacto en el valor económico de las reservas.

BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, N. (2019). *Implementación del equipo mucking loader para aumentar la productividad en la cortada 5000 mina el Tingo de Compañía Minera Poderosa*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Atlas Copco. (2013). *Mining Equipment Catalogues: Scooptram, Mucker, and Dumpers*.
- Bhargava, A. K. (2013). *Maintenance Engineering and Management*. PHI Learning.
- Camus, J. P. (2002). *Management of Mineral Resources*. SME.
- Caterpillar. (2012). *Performance Handbook*. Caterpillar Inc.
- Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. CRC Press.
- Elkington, M., & Readett, D. J. (2005). *Mobile Equipment Operating Costs*. AusIMM Bulletin.
- Escobar, D. (2017). *Estudio de tiempos y movimientos del proceso de acarreo en una mina y propuesta para mejorar su eficiencia*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. John Wiley & Sons.
- Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (2013). *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- López Jimeno, C. (2008). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Fundación Gómez Pardo.
- Mining Equipment Ltd. (2022). *Air Powered Muckers and Loaders*.
- Mining Equipment Ltd. (2022). *Air Powered Mucking Machines: Technical Specifications*.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020). *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería*.

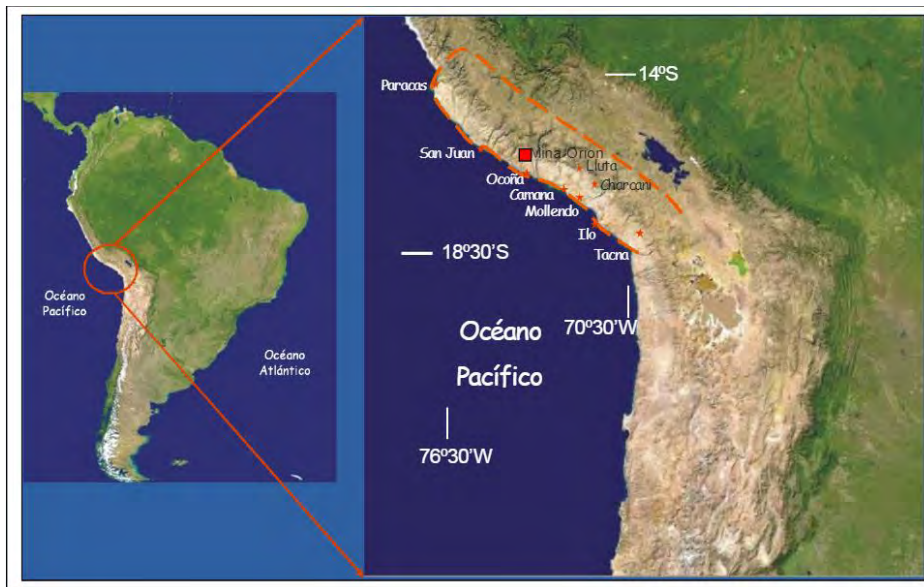
- Quispe, F., & Arisnabarreta, J. (2022). *Uso de Mini Dumper Eléctrico para la Mejora de la productividad en el sistema de acarreo en el Proyecto Avispa Nivel 740, por ECMINAS.A.C. - U.M. San Juan de Chorunga*. Universidad César Vallejo.
- Runge, I. C. (1998). *Mining Economics and Strategy*. SME.
- Sandvik. (2020). *Battery and Diesel Loaders for Underground Applications*.
- Sandvik Mining and Rock Technology. (2020). *Loader Product Catalogue*.
- Uribe, P. (2014). *Análisis de la funcionalidad y desempeño de la operación semiautónoma en equipos de carga; acarreo y descarga en minería subterránea Load Haul-Dump Vehicle (LHD)*. Universidad de Chile.

ANEXOS

ÁMBITO GEOGRÁFICO

La mina Orion está localizada en el departamento de Arequipa, distrito de Chala, provincia de Caraveli, el área de estudio se encuentra a una altura promedio entre 1700 a 2500 m.s.n.m. Los terrenos superficiales no corresponden a ninguna comunidad campesina registrada en el lugar (ver Figura 1). La mina Orión es perfectamente accesible por una carretera afirmada de 60km desde la ciudad de Chala, el trayecto toma aproximadamente 2 horas de viaje en camioneta.

Ubicación de la mina. Orión



Fuente: Chara (2017)

UBICACIÓN.

La U.E.A Mina Orión-Chala que pertenece a la empresa minera Analytica Mineral Services S.A.C. está localizado al sur del Perú en el departamento de Arequipa, provincia de Caravelí, distritos de Atiquipa y Yauca, el área de estudio se encuentra a una altitud comprendida entre de 1600 a 2500 m.s.n.m. en la Carta Nacional 32-ñ (Chala).

Políticamente se encuentra en:

Departamento : Arequipa.

Provincia : Caravelí.

Distritos : Atiquipa-Yauca.

Lugar : Cerro Francia.

Los terrenos superficiales no corresponden a ninguna comunidad campesina registrada en el lugar.

Las coordenadas centrales del área de estudio son:

COORDENADAS		ALTITUD m.s.n.m.	DATUM	ZONA
Este	578500	2000	UTM PSAD 56	18 S
Norte	8276000			

ACCESIBILIDAD.

La U.E.A. Mina Orión-Chala tiene como acceso principal la carretera Panamericana sur, siendo la ruta Lima-Arequipa hasta la ciudad de Chala con una distancia de 616 Kilómetros, la otra ruta es Arequipa-Lima hasta la ciudad de Chala con una distancia de 396 Kilómetros, y desde la ciudad de Chala hasta la U.E.A. Mina Orión-Chala se accede por una vía afirmada con una distancia de 40 Kilómetros.

RUTA	DISTANCIA (Km)	TIEMPO (Horas)	TIPO DE VIA
------	-------------------	-------------------	-------------

Lima - Chala	616	08	Asfaltada	Asfaltada
Arequipa - Chala	396	06	Afirmada	
Chala - Mina Orión	40	02		

CLIMA Y VEGETACIÓN

El clima en el área de estudio presenta variaciones marcadas, propias de la franja costera, condicionadas principalmente por las diferencias de altitud y la cercanía al océano Pacífico.

En la zona litoral y a lo largo de la Cadena Costanera predomina un clima templado y húmedo; durante gran parte del año el cielo se mantiene nublado y, en ocasiones, se registran lloviznas ligeras que favorecen el crecimiento de pastos naturales que cubren el terreno, conformando las denominadas “lomas”. Entre aproximadamente 1 200 y 1 800 m.s.n.m. son frecuentes las nubes estratocúmulo que cubren el área y reducen la visibilidad.

Entre los 1 800 y 3 000 m.s.n.m. el clima se torna más seco, configurando una zona árida, donde las precipitaciones se concentran principalmente entre los meses de enero y marzo. En este intervalo altitudinal, las temperaturas oscilan entre 24 °C y 27 °C (SENAMHI).

Por encima de los 3 000 m.s.n.m., las condiciones climáticas cambian a un régimen frío, con inviernos secos y veranos lluviosos. Durante el invierno, las temperaturas se sitúan aproximadamente entre 13 °C y 15 °C (SENAMHI).

GEOLOGÍA LOCAL

La geología del yacimiento aurífero Mina Orión está constituida por diversas unidades litológicas, que se describen a continuación

Mesozoico

Formación Guaneros (Js-gu)

En esta formación se reconoce una sucesión de lavas andesíticas de color gris verdoso, con textura porfirítica y matriz afanítica, intercaladas con delgados niveles de areniscas cuarzosas blancas compactas. Sobre estos niveles se disponen bancos de areniscas cuarzosas blancas de grano medio a grueso (aflorantes en los cerros Francia y Orión). Hacia la parte superior de la secuencia se observa un paquete de areniscas rojizas de grano medio a fino, con cemento arcilloso, intercaladas con limo–areniscas de cemento calcáreo y limolitas de color beige a anaranjado.

Esta secuencia se encuentra cortada por diques de pórfido diorítico (de carácter hornbléndico) y pequeños stocks de diorita. En los contactos con los intrusivos se han desarrollado zonas de metamorfismo de intensidad moderada, donde se observan esquistos de sericita, micas y andalucita, así como corneanas de cuarzo, micas y andalucita, determinadas mediante el estudio de secciones delgadas.

Formación Yauca (Ki-ya)

Al suroeste del cerro Francia aflora una secuencia de intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino a medio, de color blanco a rojizo, con pirita diseminada. Se asocian limo–areniscas con cemento calcáreo de tonos rojizos a pardos, además de limolitas y lutitas gris rojizas. En los contactos con cuerpos intrusivos se desarrollan hornfels compactos y venillas de epidota. La litología y la presencia de restos de plantas fosilizadas indican que esta formación se depositó en un ambiente transicional entre continental y marino somero.

Formación Hualhuani (Ki-hu)

En el extremo oeste del área estudiada se presenta una secuencia de areniscas cuarzosas de grano medio, de color blanco, con venillas de óxidos de hierro (jarosita y hematita) y pirita débilmente diseminada. Esta unidad es sucedida por un conjunto de areniscas arcósicas de grano medio, de color gris rojizo, con intersticios rellenos por óxidos de hierro.

La ausencia de fósiles sugiere que esta formación se originó en un ambiente de depósito litoral. La Formación Hualhuani sobreyace en concordancia a la Formación Yauca.

Cenozoico

Depósitos recientes (Qh-al, Qh-c)

En el área se identifican depósitos aluviales en el fondo de quebradas, así como depósitos coluviales y eluviales en las laderas y pendientes de los cerros. Estos están constituidos por bloques angulosos a subangulosos de tamaño variable, desde centímetros hasta metros. En algunos sectores, estos depósitos cubren los afloramientos de las estructuras mineralizadas, dificultando su observación directa.

Rocas ígneas

Complejo Bella Unión (Ks-an)

En el área de estudio, este complejo intruye a las formaciones cretácicas Yauca y Hualhuani en forma de diques y sills. El análisis petrográfico ha permitido clasificarlas como andesitas porfiríticas (con actinolita), de color gris verdoso. En ciertos sectores, estas rocas son a su vez cortadas por monzodioritas pertenecientes a la Súper Unidad Linga.

Las principales estructuras mineralizadas reconocidas en la zona se emplazan en esta unidad, principalmente asociadas a diques andesíticos.

Súper Unidad Linga (Ks-li/mz, Ks-li/mzdi)

Al noroeste del área afloran pequeños stocks constituidos por monzonitas y monzodioritas (plagioclasa, ortosa, hornblenda y cuarzo), con textura fanerítica de grano medio a grueso y colores que varían entre rosado y blanco. Estas rocas muestran venillas de cuarzo hialino-lechoso, epidota y algunas estructuras con óxidos de hierro.

Diorita (J-di)

Hacia el este del cerro Francia aflora una importante masa de rocas plutónicas de composición diorítica, que constituye la unidad de mayor extensión en el área. Se trata de un stock de diorita compuesto por plagioclasa, hornblenda y biotita, con textura fanerítica de grano medio a grueso y tonalidades verdosas. Presenta cloritización moderada en los minerales máficos y una ligera argilización asociada a procesos de intemperismo.

Algunas estructuras mineralizadas se alojan en estas rocas, aprovechando su alta reactividad química frente al paso de fluidos hidrotermales.

GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Agentes y factores del modelamiento geomorfológico

Considerando los objetivos del presente estudio, los factores más relevantes para diferenciar las unidades geomorfológicas son los siguientes:

Sustrato geológico

El sustrato rocoso, entendido como el tipo de litología y su posición estructural, constituye el factor de mayor influencia, ya que condiciona directamente el desarrollo del relieve y su respuesta a los procesos de modelado y erosión.

El tipo de roca (intrusiva, volcánica, sedimentaria o metamórfica) determina la resistencia relativa frente a la acción erosiva, mientras que la disposición estructural —asociada a plegamientos, fallas y disposición de los cuerpos rocosos— controla la forma y magnitud del relieve. En términos generales:

Las rocas intrusivas y ciertas rocas metamórficas silíceas suelen ser más resistentes a la erosión hidroclimática.

Las rocas sedimentarias, especialmente cuando están intensamente fracturadas o diaclasadas, presentan menor resistencia a los procesos erosivos.

Tectónica

La interacción entre las placas Nazca y Sudamericana ha generado movimientos de tipo epirogenético que, antes del vulcanismo y de los eventos glaciares más recientes, contribuyeron a modelar las cuencas de los ríos Chala y Yauca.

En la actualidad, la actividad sísmica asociada a la zona de subducción sigue siendo un factor importante, aunque las estructuras tectónicas actúan fundamentalmente como controladores pasivos de los procesos morfodinámicos activos.

Relieve

El relieve del área de estudio está conformado por superficies rocosas de distinta naturaleza litológica, con pendientes fuertes y abruptas en las partes altas, lo que favorece la acción de los procesos de denudación a través del escurrimiento superficial.

Factores antrópicos

Las actividades humanas, como la construcción de campamentos, vías de acceso a bocaminas y echaderos de desmonte, modifican la morfología natural del terreno, acelerando o retardando los procesos de erosión y sedimentación. En la zona de operación minera, estas intervenciones antrópicas se encuentran entre los agentes que más transforman el paisaje.

Unidades geomorfológicas

Sistema montañoso

Este sistema está conformado por geoformas relacionadas con la actividad tectónica y volcánica, así como por procesos de denudación que actúan sobre diferentes tipos litológicos.

A. Altas cumbres y lomas (M-Ac)

Corresponde a las zonas de mayor elevación y topografía más accidentada, con pendientes muy pronunciadas. En esta unidad se encuentran los cerros Francia y Galleras, además de otras elevaciones situadas hacia el este, en el entorno inmediato del yacimiento.

B. Laderas (M-La)

Son las pendientes laterales de las altas cumbres, con inclinaciones relativamente regulares que no superan, en general, los 65°. Se observan con mayor frecuencia en las porciones inferiores de los cerros Francia, Bonanza y Galleras.

Sistema fluvial

Los procesos de erosión hídrica han dado lugar a diversas formas fluviales en el área de estudio, las cuales concentran actualmente la mayor parte de los procesos morfodinámicos activos.

A. Valle en V (F-Vs)

Se trata de un valle estrecho con perfil transversal en forma de V, que atraviesa el área con dirección aproximada N–S. Es típico de cursos fluviales con pendiente moderada hacia la vertiente del Pacífico. En la actualidad el cauce se encuentra seco, aunque es probable que durante la época de lluvias transporte un caudal significativo.

B. Quebradas (F-Qb)

Son pequeños valles encajonados generados por erosión, limitados por laderas abruptas que descienden bruscamente hacia el fondo del cauce. Este tipo de geoforma se observa principalmente en las zonas altas del área de estudio.

C. Abanico aluvial (F-A, al)

Se reconoce al noreste del área de estudio un abanico aluvial de escala reducida, cuya forma en planta recuerda a un abanico. Se originó por la deposición de sedimentos transportados por una corriente fluvial que pierde energía de manera súbita al disminuir la pendiente del terreno.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

El área de estudio se ubica dentro de una zona de bloques fallados del Batolito de la Costa, limitada por dos fallas regionales principales: la falla El Faro, al norte, y la falla Cateador, al sur, generando un bloque estructural deprimido donde se emplaza la Mina Orión (Chala, Arequipa).

Se han reconocido varios sistemas de fallas. El primero está conformado por fallas de rumbo $N10^{\circ}$ – 30° E, con buzamientos de 60° – 80° hacia el NW y anchos que varían entre 0,80 m y 10,00 m, así como por estructuras de rumbo $N30^{\circ}$ – 50° W, subverticales, con longitudes de afloramiento de hasta 300 m. Estas últimas muestran abundante arcilla y brechas en superficie, y se consideran fallas de primer orden. Un segundo grupo, de fallas de menor escala (segundo orden), presenta rumbos $N30^{\circ}$ – 60° E, también subverticales, y desplazamientos relativamente pequeños, de entre 2,00 y 10,00 m, tanto de carácter sinistral como dextral. Ambos sistemas afectan y fragmentan los principales conjuntos de vetas reconocidos en la zona.

El área en la que se concentran las observaciones se divide en tres segmentos controlados por fallas postmineralización de rumbo NE–SW. La denominada falla Norte–Sur limita, hacia el sur, el sistema de vetas–fallas de rumbo NW–SE (Francia, Almacén y Vaduz) y, hacia el norte, el sistema de vetas–fallas Chinchilicos, también de rumbo NW–SE. Por su parte, la falla Katty, de rumbo NE–SW, ubicada en la parte central, separa al sistema de vetas Francia (al sur) y a la veta Bonanza (al norte), ambas de rumbo NW–SE. Finalmente, la falla Norte, con rumbo NE–SW, marca el límite norte de la veta Bonanza y el límite sur de la veta Burra Muerta, constituyendo la continuación de esta última. Estas fallas de primer orden evidencian movimientos iniciales de tipo sinistral, con reactivaciones posteriores de carácter dextral. La clasificación en fallas de primer, segundo y tercer orden se basa en su dimensión y envergadura, sin implicar necesariamente una secuencia cronológica.

Fallas de primer orden

Falla Norte–Sur

Esta estructura presenta un rumbo N10°–30°E y buzamiento de 70°–75° hacia el NW, con anchos que oscilan entre 0,80 m y 10,00 m. Se interpreta como una falla postmineral con movimiento sinistral y reactivación dextral, que desplaza el sistema de vetas de rumbo NW en magnitudes que van desde 20 m hasta 40 m. Su traza puede seguirse a lo largo de aproximadamente 5 km.

A lo largo de esta falla se observan rasgos importantes, tales como una zona de relleno de hasta 20 m de espesor compuesta por arcillas, material triturado y numerosas venillas rellenas de arcilla, ubicada detrás de las oficinas de la mina. También se reconocen planos de falla y brechas tectónicas frente al área de mantenimiento y en labores subterráneas (Cx 725, Nv 1 975). Esta falla interrumpe hacia el sur los sistemas mineralizados de las vetas Francia, Almacén y Vaduz, generando desplazamientos de hasta 50 m en sentido dextral.

Falla Katty

La falla Katty posee un rumbo N10°–40°E, con buzamiento subvertical y un ancho aproximado de 5 m. Presenta una zona fuertemente alterada, con relleno arcilloso y superficies estriadas. Su traza se puede seguir en superficie por unos 500 m, afectando al sistema mineralizado de la veta Bonanza. En el interior de mina (Nv 2 020, Cx 900, veta Bonanza) se ha identificado el plano de falla y una brecha con fragmentos subangulosos y cemento arcilloso. Sobre el plano se observan estrías subhorizontales que indican movimientos de naturaleza dextral, aunque no fue posible establecer una cronología relativa detallada.

Falla Norte

Esta falla muestra un rumbo N50°–60°E y un ancho cercano a 10 m, con abundantes arcillas y brechas en superficie. Corta y desplaza de manera dextral, entre 150 m y 200 m, al sistema de vetas Bonanza, Cristina, Burra Muerta y a un conjunto de estructuras de rumbo N20°–50°W ubicadas al NE de Burra Muerta. La traza de la falla puede seguirse por unos 3 km.

Fallas de segundo orden

El sistema de fallas de segundo orden está conformado por estructuras más pequeñas, generadas por la actividad de las fallas principales. Presentan rumbos N10°–20°E y N50°–60°E, son subverticales y sus longitudes de traza varían desde unos pocos metros hasta cerca de 300 m. Su efecto sobre las estructuras mineralizadas es menor, con desplazamientos que se sitúan entre 2 m y 5 m.

ANEXO 2 CÓDIGO DE VALIDACIÓN DE OPTIMIZACIÓN CON IA

```
# =====
# VALIDACIÓN OPERATIVA DE SINCRONIZACIÓN:
# MUCKING LOADER + MINIDUMPER
# Crucero 06 - Nivel 1350 - Mina Orión
# =====
# Objetivo:
# Validar mediante simulación si la distancia óptima cercana a 128 m
# es técnicamente razonable para trabajar con 2 minidumpers, y evaluar
# si al aumentar la distancia conviene incorporar 3 o 4 equipos.
#
# El modelo compara:
# 1) Cálculo teórico de la tesis.
# 2) Simulación operativa con restricción de vía angosta.
# 3) Resultados en tablas y gráficas.
# =====

# =====
# 0. LIBRERÍAS
# =====

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from IPython.display import display
```

```

# =====
# 1. DATOS BASE TOMADOS DE LA TESIS
# =====
# Fuente interna de la tesis:
# - Sección 4.2.4: estrategia operativa de sincronización con el acarreo.
# - Tabla 17: resumen de distribución de equipos por distancia.
#
# Datos usados:
# 100 m -> 4.13 min
# 150 m -> 4.69 min
# 200 m -> 5.26 min
# 250 m -> 5.88 min
#
# Estos tiempos representan el ciclo total aproximado del minidumper:
# carguío + traslado cargado + descarga + retorno vacío.

datos_tesis = pd.DataFrame({
    "Distancia_m": [100, 150, 200, 250],
    "Ciclo_tesis_min": [4.13, 4.69, 5.26, 5.88],
    "Util_loader_2_dumpers_tesis_%": [97, 85, 76, 68],
    "Recomendacion_tesis": [
        "2 dumpers",
        "3 dumpers",
        "3 dumpers",
        "4 dumpers"
    ]
})

print("DATOS BASE TOMADOS DE LA TESIS")
display(datos_tesis)

# =====
# 2. PARÁMETROS OPERATIVOS DEL MODELO
# =====
# Tiempo de carguío:
# En la tesis se indica que cada minidumper requiere aproximadamente
# 2 minutos de carguío con el Mucking Loader.

TIEMPO_CARGUIO_MIN = 2.00

# Capacidad del minidumper:
# Colocar el dato real si se tiene.
# Si no se tiene, se usa 1.00 TM/viaje para validar la lógica operativa.
# Este valor afecta la productividad en TM/h, pero no cambia la utilización
# del loader ni la sincronización.

CAPACIDAD_DUMPER_TM = 3.50

# Duración de la guardia:

```

```

# Ajustar si la operación usa otra duración.

HORAS_GUARDIA = 8
DURACION_SIM_MIN = HORAS_GUARDIA * 60

# Distancias a evaluar:
# Se incluye 128 m porque es el punto observado como óptimo.

DISTANCIAS_EVALUADAS = [100, 128, 150, 200, 250]

# Número de minidumpers a comparar.

FLOTAS_EVALUADAS = [2, 3, 4]

# =====
# 3. PARÁMETROS DE CAMPO PARA RESTRICCIÓN DE TRÁNSITO
# =====
# Según la observación de campo:
# - La sección de la labor es reducida: 2.10 m a 2.40 m.
# - No permite cruce libre de dos equipos.
# - El equipo vacío debe esperar en una ventana/refugio.
# - El equipo cargado tiene prioridad de paso.
#
# Estos valores son calibrables. Deben ajustarse con cronometraje real.

ANCHO_MIN_M = 2.10
ANCHO_MAX_M = 2.40
CRUCE_LIBRE = False

# Distancia entre refugios o ventanas.
# Se usa 50 m según la observación de campo/reglamento mencionada.
# Si en el plano operativo se usan ventanas cada 100 m, cambiar este valor a 100.

REFUGIO_CADA_M = 100

# Penalizaciones de tránsito:
# Representan pérdidas promedio por espera, maniobra, retroceso o pase.
# Están expresadas en minutos por ciclo.
#
# Si se desea un modelo más conservador, aumentar estos valores.
# Si el tránsito está bien controlado, reducirlos.

TIEMPO_ESPERA_POR_REFUGIO_MIN = 0.15
TIEMPO_MANIOBRA_RETROCESO_MIN = 0.20

# Factor general para calibrar congestión.
# 1.00 = escenario base.
# 0.50 = menos congestión.
# 1.50 = más congestión.

```

```

FACTOR_CONGESTION = 1.00

# =====
# 4. FUNCIONES DE CÁLCULO
# =====

def interpolar_ciclo_tesis(distancia_m):
    """
    Interpola el tiempo de ciclo del minidumper a partir de los datos de la tesis.
    Sirve para calcular tiempos intermedios como 128 m.
    """
    return float(np.interp(
        distancia_m,
        datos_tesis["Distancia_m"],
        datos_tesis["Ciclo_tesis_min"]
    ))

def calcular_utilizacion_teorica_loader(distancia_m, n_dumpers):
    """
    Cálculo teórico simple:
    Utilización del loader = (número de dumpers x tiempo de carguío) / ciclo total
    Se limita a 100%, porque el loader no puede trabajar más de su capacidad máxima.
    """
    ciclo = interpolar_ciclo_tesis(distancia_m)
    utilizacion = (n_dumpers * TIEMPO_CARGUIO_MIN / ciclo) * 100
    return min(utilizacion, 100)

def calcular_penalidad_transito(distancia_m, n_dumpers):
    """
    Calcula la penalidad por tránsito en vía angosta.

    Criterio:
    - Con 2 minidumpers, se asume alternancia controlada.
    - Con 3 o más minidumpers, aumenta la posibilidad de cola, espera y maniobra.
    - La penalidad aumenta con:
        a) más distancia,
        b) más refugios/ventanas,
        c) más equipos simultáneos,
        d) ausencia de cruce libre.
    """

    if CRUCE_LIBRE:
        return 0.0

    if n_dumpers <= 2:
        return 0.0

```

```

numero_refugios = max(1, int(np.ceil(distancia_m / REFUGIO_CADA_M)))
exceso_equipos = n_dumpers - 2

penalidad = (
    (numero_refugios * TIEMPO_ESPERA_POR_REFUGIO_MIN)
    + TIEMPO_MANIOBRA_RETROCESO_MIN
) * exceso_equipos * FACTOR_CONGESTION

return penalidad

def simular_escenario(distancia_m, n_dumpers):
    """
    Simulación determinística de un sistema:
    - 1 Mucking Loader.
    - n Minidumpers.
    - El loader carga un minidumper a la vez.
    - Cada minidumper, después de ser cargado, sale, descarga y retorna.
    - Si el minidumper llega y el loader está ocupado, espera.
    - Si el loader queda sin minidumper disponible, queda ocioso.

    Esta parte es la simulación propiamente dicha.
    """

    ciclo_base = interpolar_ciclo_tesis(distancia_m)
    penalidad_transito = calcular_penalidad_transito(distancia_m, n_dumpers)

    # El ciclo base incluye carguío + traslado + descarga + retorno.
    # Para la simulación, se separa:
    # - tiempo de carguío en el loader
    # - tiempo fuera del loader: traslado, descarga, retorno y penalidad por tránsito

    tiempo_fuera_loader = max(
        0,
        ciclo_base - TIEMPO_CARGUIO_MIN + penalidad_transito
    )

    ciclo_real_ajustado = TIEMPO_CARGUIO_MIN + tiempo_fuera_loader

    # Estado inicial:
    # Todos los dumpers están disponibles al inicio.

    llegada_dumper_al_loader = [0.0 for _ in range(n_dumpers)]

    tiempo_actual = 0.0
    tiempo_loader_ocupado = 0.0
    tiempo_loader_ocioso = 0.0
    espera_total_dumpers = 0.0
    viajes_realizados = 0

```

```

# =====
# INICIO DE LA SIMULACIÓN
# =====

while tiempo_actual < DURACION_SIM_MIN:

    # Se elige el dumper que llega primero al loader.
    idx_dumper = int(np.argmin(llegada_dumper_al_loader))
    tiempo_llegada = llegada_dumper_al_loader[idx_dumper]

    # Si el loader está libre y no hay dumper, el loader espera.
    if tiempo_llegada > tiempo_actual:
        tiempo_loader_ocioso += tiempo_llegada - tiempo_actual
        tiempo_actual = tiempo_llegada

    # Si el dumper llegó antes, espera al loader.
    else:
        espera_total_dumpers += tiempo_actual - tiempo_llegada

    # Proceso de carguío.
    inicio_carguio = tiempo_actual
    fin_carguio = inicio_carguio + TIEMPO_CARGUIO_MIN

    # Si el carguío ya no entra dentro de la guardia, se detiene.
    if fin_carguio > DURACION_SIM_MIN:
        break

    tiempo_loader_ocupado += TIEMPO_CARGUIO_MIN
    viajes_realizados += 1

    # El dumper sale cargado, descarga, retorna vacío y vuelve al loader.
    llegada_dumper_al_loader[idx_dumper] = fin_carguio + tiempo_fuera_loader

    # El loader queda disponible para el siguiente dumper.
    tiempo_actual = fin_carguio

# Si queda tiempo libre al final de la guardia, se contabiliza como ociosidad.
if tiempo_actual < DURACION_SIM_MIN:
    tiempo_loader_ocioso += DURACION_SIM_MIN - tiempo_actual

utilizacion_loader = (tiempo_loader_ocupado / DURACION_SIM_MIN) * 100
ociosidad_loader = 100 - utilizacion_loader

viajes_hora = viajes_realizados / HORAS_GUARDIA
productividad_tmh = viajes_hora * CAPACIDAD_DUMPER_TM

espera_promedio_dumper = (
    espera_total_dumpers / viajes_realizados
    if viajes_realizados > 0 else 0
)

```

```

    return {
        "Distancia_m": distancia_m,
        "N_dumpers": n_dumpers,
        "Ciclo_tesis_min": round(ciclo_base, 3),
        "Penalidad_transito_min": round(penalidad_transito, 3),
        "Ciclo_real_ajustado_min": round(ciclo_real_ajustado, 3),
        "Util_teorica_loader_%":
round(calcular_utilizacion_teorica_loader(distancia_m, n_dumpers), 2),
        "Util_simulada_loader_%": round(utilizacion_loader, 2),
        "Ociosidad_loader_%": round(ociosidad_loader, 2),
        "Ociosidad_loader_min_guardia": round(tiempo_loader_ocioso, 2),
        "Espera_prom_dumper_min_viaje": round(espera_promedio_dumper, 3),
        "Viajes_guardia": viajes_realizados,
        "Viajes_hora": round(viajes_hora, 2),
        "Productividad_TM_h": round(productividad_tmh, 2)
    }

# =====
# 5. EJECUCIÓN DE ESCENARIOS
# =====

resultados = []

for distancia in DISTANCIAS_EVALUADAS:
    for n in FLOTAS_EVALUADAS:
        resultados.append(simular_escenario(distancia, n))

df_resultados = pd.DataFrame(resultados)

print("RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN POR DISTANCIA Y NÚMERO DE MINIDUMPERS")
display(df_resultados)

# =====
# 6. VALIDACIÓN DE LA DISTANCIA ÓPTIMA CON 2 MINIDUMPERS
# =====
# Criterio:
# Se considera distancia óptima máxima aquella donde el loader mantiene
# al menos 90% de utilización con 2 minidumpers.
#
# Fórmula:
# Utilización = (2 dumpers x 2 min de carguío) / ciclo total
# Para 90%:
#  $0.90 = 4 / \text{ciclo}$ 
#  $\text{ciclo} = 4 / 0.90 = 4.444 \text{ min}$ 
#
# Luego se interpola la distancia donde el ciclo alcanza 4.444 min.

```

```

distancias_continuas = np.arange(100, 251, 1)
validacion_2_dumpers = []

for d in distancias_continuas:
    validacion_2_dumpers.append(simular_escenario(d, 2))

df_2_dumpers = pd.DataFrame(validacion_2_dumpers)

df_optimo_90 = df_2_dumpers[df_2_dumpers["Util_simulada_loader_%"] >= 90]

distancia_optima_simulada = df_optimo_90["Distancia_m"].max()

# Cálculo teórico exacto por interpolación entre 100 y 150 m.

ciclo_limite_90 = (2 * TIEMPO_CARGUIO_MIN) / 0.90

distancia_optima_teorica = np.interp(
    ciclo_limite_90,
    datos_tesis["Ciclo_tesis_min"],
    datos_tesis["Distancia_m"]
)

print("VALIDACIÓN DE DISTANCIA ÓPTIMA CON 2 MINIDUMPERS")
print(f"Ciclo límite para 90% de utilización del loader: {ciclo_limite_90:.3f} min")
print(f"Distancia óptima teórica aproximada: {distancia_optima_teorica:.1f} m")
print(f"Distancia óptima simulada aproximada: {distancia_optima_simulada:.0f} m")

# =====
# 7. RECOMENDACIÓN OPERATIVA AUTOMÁTICA
# =====
# Criterios:
# - Se busca que el loader tenga utilización >= 90%.
# - Se prefiere el menor número de dumpers posible.
# - Se controla que la espera promedio de dumpers no sea excesiva.
# - Si hay demasiada espera, se marca como "saturado/congestionado".

def recomendar_operacion(grupo):
    """
    Genera recomendación por distancia.
    """
    grupo = grupo.sort_values(["N_dumpers"])

    candidatos = grupo[
        (grupo["Util_simulada_loader_%"] >= 90)
    ]

    if len(candidatos) == 0:
        mejor = grupo.sort_values(
            ["Util_simulada_loader_%", "Productividad_TM_h"],

```

```

        ascending=[False, False]
    ).iloc[0]
    estado = "No alcanza 90% de utilización; revisar flota o logística"
else:
    mejor = candidatos.iloc[0]

    if mejor["Espera_prom_dumper_min_viaje"] > 0.75:
        estado = "Opera con loader saturado, pero genera espera en dumpers"
    elif mejor["Penalidad_transito_min"] > 0:
        estado = "Viable, pero depende de buena gestión de refugios/ventanas"
    else:
        estado = "Óptimo operativo"

    return pd.Series({
        "N_dumpers_recomendado_modelo": int(mejor["N_dumpers"]),
        "Util_loader_%": mejor["Util_simulada_loader_%"],
        "Espera_prom_dumper_min_viaje": mejor["Espera_prom_dumper_min_viaje"],
        "Productividad_TM_h": mejor["Productividad_TM_h"],
        "Estado": estado
    })

df_recomendacion = (
    df_resultados
    .groupby("Distancia_m")
    .apply(recomendar_operacion)
    .reset_index()
)

print("RECOMENDACIÓN OPERATIVA SEGÚN SIMULACIÓN")
display(df_recomendacion)

# =====
# 8. GRÁFICAS DE RESULTADOS
# =====

# -----
# Gráfica 1: Tiempo de ciclo según distancia
# -----

plt.figure(figsize=(8, 5))
plt.plot(datos_tesis["Distancia_m"], datos_tesis["Ciclo_tesis_min"], marker="o",
label="Datos tesis")
plt.axvline(distancia_optima_teorica, linestyle="--", label=f"Óptimo ≈
{distancia_optima_teorica:.0f} m")
plt.xlabel("Distancia frente-descarga (m)")
plt.ylabel("Tiempo de ciclo del minidumper (min)")
plt.title("Tiempo de ciclo del minidumper según distancia")
plt.grid(True)
plt.legend()

```

```

plt.show()

# -----
# Gráfica 2: Utilización simulada del loader por flota
# -----

plt.figure(figsize=(8, 5))

for n in FLOTAS_EVALUADAS:
    df_n = df_resultados[df_resultados["N_dumpers"] == n]
    plt.plot(df_n["Distancia_m"], df_n["Util_simulada_loader_%"], marker="o",
label=f"{n} dumpers")

plt.axhline(90, linestyle="--", label="Límite operativo 90%")
plt.xlabel("Distancia frente-descarga (m)")
plt.ylabel("Utilización simulada del Mucking Loader (%)")
plt.title("Utilización del Mucking Loader por distancia y número de dumpers")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# -----
# Gráfica 3: Ociosidad del loader por escenario
# -----

df_resultados["Escenario"] = (
    df_resultados["Distancia_m"].astype(str)
    + " m / "
    + df_resultados["N_dumpers"].astype(str)
    + "D"
)

plt.figure(figsize=(11, 5))
plt.bar(df_resultados["Escenario"], df_resultados["Ociosidad_loader_%"])
plt.xticks(rotation=45, ha="right")
plt.xlabel("Escenario")
plt.ylabel("Ociosidad del loader (%)")
plt.title("Ociosidad del Mucking Loader por escenario")
plt.grid(axis="y")
plt.tight_layout()
plt.show()

# -----
# Gráfica 4: Espera promedio del minidumper
# -----

plt.figure(figsize=(8, 5))

```

```

for n in FLOTAS_EVALUADAS:
    df_n = df_resultados[df_resultados["N_dumpers"] == n]
    plt.plot(df_n["Distancia_m"], df_n["Espera_prom_dumper_min_viaje"], marker="o",
label=f"{n} dumpers")

plt.xlabel("Distancia frente-descarga (m)")
plt.ylabel("Espera promedio del dumper (min/viaje)")
plt.title("Espera promedio de minidumpers por congestión y sincronización")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# -----
# Gráfica 5: Productividad estimada
# -----

plt.figure(figsize=(8, 5))

for n in FLOTAS_EVALUADAS:
    df_n = df_resultados[df_resultados["N_dumpers"] == n]
    plt.plot(df_n["Distancia_m"], df_n["Productividad_TM_h"], marker="o", label=f"{n}
dumpers")

plt.xlabel("Distancia frente-descarga (m)")
plt.ylabel("Productividad estimada (TM/h)")
plt.title("Productividad estimada según distancia y número de dumpers")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

# =====
# 9. EXPORTACIÓN DE RESULTADOS
# =====
# En Google Colab, estos archivos se generarán en el entorno de trabajo.
# Luego pueden descargarse desde el panel lateral de archivos.

df_resultados.to_excel("resultados_simulacion_loader_minidumper.xlsx", index=False)
df_recomendacion.to_excel("recomendacion_operativa_loader_minidumper.xlsx",
index=False)

print("ARCHIVOS GENERADOS:")
print("- resultados_simulacion_loader_minidumper.xlsx")
print("- recomendacion_operativa_loader_minidumper.xlsx")

# =====
# 10. INTERPRETACIÓN AUTOMÁTICA
# =====

```

```

print("\nINTERPRETACIÓN GENERAL:")

print(f"""
1. Con 2 minidumpers, la distancia óptima se ubica aproximadamente en
{distancia_optima_teorica:.0f} m,
    porque hasta ese punto el Mucking Loader mantiene una utilización cercana o
superior al 90%.

2. A 100 m, el sistema con 2 minidumpers es eficiente porque el loader presenta baja
ociosidad.

3. A 128 m, el sistema sigue siendo técnicamente viable con 2 minidumpers y representa
un límite operativo razonable.

4. A partir de 150 m, el sistema con 2 minidumpers empieza a perder continuidad, por
lo que se evalúa la incorporación
    de un tercer equipo.

5. Sin embargo, en una vía angosta de {ANCHO_MIN_M:.2f} m a {ANCHO_MAX_M:.2f} m, el
tercer o cuarto equipo no debe validarse
    solo por productividad teórica, sino también por espera en refugios, retroceso,
prioridad del equipo cargado
    y congestión operativa.

6. Si la espera promedio del dumper aumenta mucho, significa que el loader puede estar
saturado, pero el sistema
    global no necesariamente es más eficiente.
""")

```