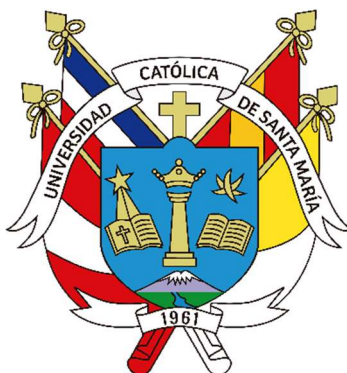


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería de Minas



**Gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado para
aumentar la producción en una unidad minera de Cajamarca, 2024**

Tesis presentada por el Bachiller:

Riega Mogrovejo, Yimar Jeremy

ORCID: 0009-0007-5277-7611

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Barreda de la Cruz, Miguel Alberto

ORCID: 0000-0002-9329-4460

Arequipa - Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 10 de Noviembre del 2025

Dictamen: 016974-C-EPIM-2025

Visto el borrador del expediente 016974, presentado por:

2019828011 - RIEGA MOGROVEJO YIMAR GEREMY

Titulado:

**GESTIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DEL MINERAL VOLADO PARA
AUMENTAR LA PRODUCCIÓN EN UNA UNIDAD MINERA DE CAJAMARCA, 2024**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

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

INGENIERO DE MINAS

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



**40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



Gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado para aumentar la producción en una unidad minera de Cajamarca, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	13%	0%	13%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	6%
	Trabajo del estudiante	
2	Submitted to Universidad Nacional de Cajamarca	4%
	Trabajo del estudiante	
3	repositorio.continental.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
4	Submitted to uncedu	1%
	Trabajo del estudiante	
5	repositorio.uchile.cl	1%
	Fuente de Internet	
6	bibliotecas.unsa.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
7	repositorio.unsa.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
8	cybertesis.uni.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a mi amada familia, el refugio donde siempre encuentro fuerza y esperanza.

A mis padres, Wilfredo y Yesika, quienes con amor, esfuerzo y ejemplo me enseñaron el verdadero valor de la perseverancia. Gracias por ser mis pilares firmes, por guiar mis pasos y confiar en mis sueños incluso cuando yo dudaba.

A mi madre Beatriz, por su ternura infinita y su apoyo incondicional, que se convirtieron en el faro que ilumina mi camino en los momentos de oscuridad.

A mis hermanas, Astrid y Fanny, compañeras de vida y de recuerdos, con quienes comparto alegrías, desafíos y sueños. Su compañía es la certeza de que nunca camino solo.

Y con especial amor a mis abuelitos, Efraín y Juana, que hoy me acompañan desde el cielo.

Sus enseñanzas, su ejemplo y sus bendiciones trascienden el tiempo y la distancia; su recuerdo vive en mí como una herencia eterna que guía mis pasos y fortalece mi espíritu.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de corazón a todas las personas que hicieron posible la culminación de esta tesis, pues cada gesto de apoyo, consejo y compañía ha dejado huella en este camino.

A mi asesor, Miguel Alberto Barreda de la Cruz, por su paciencia, orientación y sabiduría, que fueron guía fundamental para alcanzar este logro académico.

A los docentes e ingenieros de la universidad, por compartir sus conocimientos y experiencias, pilares que enriquecieron mi formación profesional.

A mis compañeros y amigos, por su compañía incondicional, por las largas horas de estudio, las conversaciones alentadoras y la solidaridad en los momentos más exigentes.

Este logro no es solo mío, sino también de quienes me acompañaron y creyeron en mí.

¡Gracias por ser parte de esta etapa tan significativa de mi vida!

RESUMEN

La presente investigación tendrá como objetivo gestionar la optimización de la fragmentación del mineral volado en una Unidad Minera Superficial en Cajamarca, con el fin de mejorar la eficiencia operativa y aumentar la producción bajo el sistema ROM. Para ello, se analizarán los efectos de la optimización de los parámetros de perforación y voladura en la granulometría del material, enfocándose en su impacto en los procesos de carguío, transporte, apilamiento y recuperación metalúrgica. La comparación entre el segundo y tercer trimestre del 2024 evidencia una mejora sustancial en los indicadores operativos: la producción promedio aumentará en un 15.67%, pasando de 1,463.33 a 1,692.63 toneladas por hora; el tiempo de ciclo disminuirá en 10.90%, de 0.6 a 0.5 horas; y el P80 se reducirá de 5.3 a 4.3 pulgadas, lo cual representa una mejora del 18.76% en la fragmentación. Asimismo, se incrementará la carga explosiva específica de 0.167 a 0.188 kg/t (+12.47%) y la eficiencia del proceso aumentará del 83% al 87% (+4.98%).

Estos resultados validarán que una fragmentación optimizada contribuye significativamente a la mejora del rendimiento operativo en una operación ROM, especialmente en el apilamiento y lixiviación del mineral, y en la recuperación de oro. La investigación empleará un diseño cuasi-experimental y un enfoque cuantitativo, utilizando herramientas como Split-Online para el análisis granulométrico y registros operacionales para el contraste de resultados antes y después de la mejora.

El resultado de la prueba estadística $p = 0,000$ otorga el argumento conciso para poder indicar que existe diferencia entre la producción del segundo trimestre y tercer trimestre del 2024, con ello se logró indicar que se pudo optimizar la producción.

Palabras claves: Fragmentación, producción, optimización

ABSTRACT

This research will aim to optimize the fragmentation of blasted minerals at a surface mining unit in Cajamarca, aiming to improve operational efficiency and increase production under the ROM system. To this end, the effects of optimizing drilling and blasting parameters on the material grain size will be analyzed, focusing on their impact on loading, transportation, stacking, and metallurgical recovery processes. A comparison between the second and third quarters of 2024 shows a substantial improvement in operational indicators: average production will increase by 15.67%, from 1,463.33 to 1,692.63 tons per hour; cycle time will decrease by 10.90%, from 0.6 to 0.5 hours; and the P80 will be reduced from 5.3 to 4.3 inches, representing an 18.76% improvement in fragmentation. Likewise, the specific explosive charge will be increased from 0.167 to 0.188 kg/t (+12.47%), and process efficiency will increase from 83% to 87% (+4.98%).

These results will validate that optimized fragmentation contributes significantly to improving operational performance in a ROM operation, particularly in ore stockpiling and leaching, and in gold recovery. The research will employ a quasi-experimental design and a quantitative approach, using tools such as Split-Online for particle size analysis and operational logs to compare results before and after the improvement.

The statistical test result of $p = 0.000$ provides a concise argument to indicate that there is a difference between production in the second and third quarters of 2024, thereby indicating that production could be optimized.

Keywords: Fragmentation, production, optimization

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 3

1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION..... 4

1.1. Planteamiento del Problema 4

1.2. Objetivos de la Investigación 5

1.2.1 General..... 5

1.2.2 Específicos..... 5

1.3. Preguntas de Investigación 5

1.3.1 General..... 5

1.3.2 Específicos..... 5

1.4. Línea de Investigación 6

1.5. Solución Propuesta..... 6

1.5.1 Justificación e Importancia..... 7

CAPÍTULO II 9

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 10

2.1. Estado del arte..... 10

2.1.1 A Nivel Internacional..... 11

2.1.2 A Nivel Nacional. 12

2.1.3 A Nivel Local..... 14

2.2. Bases Teóricas de la Investigación..... 17

2.2.1 Fragmentación del mineral 17

2.2.2 Voladura..... 17

2.2.3 Sistema ROM (Run of Mine) 17

2.2.4 Pad de lixiviación 17

2.2.5 Índice Axb..... 18

2.2.6	Granulometría	18
2.2.7	Burden y espaciamiento.....	18
2.2.8	Eficiencia operative	18
2.2.9	Recuperación metalúrgica	19
2.2.10	Gestión de voladura	19
2.3.	Hipótesis de investigación	19
2.3.1	Hipótesis general de investigación	19
2.3.2	Hipótesis específica	19
2.4.	Variable	19
2.4.1	Variable independiente:	19
2.4.2	Variable dependiente:	20
2.4.3	Operacionalización de variables	21
CAPÍTULO III		22
3. MARCO METODOLOGICO		23
3.1.	Alcances y Limitaciones	23
3.1.1	Alcances del Proyecto	23
3.1.2	Limitaciones	23
3.2.	Tipo y nivel de la Investigación	24
3.2.1	Tipo de Investigación	24
3.2.2	Nivel de Investigación.....	24
3.2.3	Diseño de investigación.....	24
3.3.	Población y Muestra o Universo.....	24
3.3.1	Población	24
3.3.2	Muestra	25
3.3.3	Criterio.....	25
3.4.	Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	25
3.4.1	Métodos	25
3.4.2	Técnicas de Recolección de Datos	25
3.5.	Plan de análisis de datos	26
3.5.1	Técnicas de análisis de datos.	26

3.6.	Procedimiento de la investigación	26
3.7.	Descripción de la unidad.....	28
3.7.1	Ubicación.....	28
3.7.2	Geología.....	29
3.8.	Geología general del yacimiento Shahuindo	33
3.8.1	Introducción.....	33
3.8.2	Tipo de yacimiento	35
3.8.3	Origen del yacimiento	35
3.8.4	Minerales	36
3.8.5	Zona de sulfuros	39
3.8.6	Descripción de cada una de las estructuras mineralizadas	45
CAPÍTULO IV		49
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES		50
4.1.	Análisis de las variables operacionales.....	50
4.2.	Descripción de las pruebas experimentales	50
4.3.	Presentación y análisis de los resultados	76
4.3.1	Estadística aplicada para la demostración de la optimización.....	76
4.3.2	Supuesto de normalidad.....	76
4.3.3	Prueba de hipótesis	78
4.4.	Pruebas de validación del modelo experimental.....	81
4.4.1	Malla antes de la implementación	82
4.4.2	Malla después de la implementación.....	83
4.4.3	Imágenes post voladura del segundo trimestre del 2024.....	84
4.4.4	Desplazamiento de mineral del segundo trimestre del 2024	86
4.4.5	Plano de voladura	87
4.4.6	Imágenes post voladura del tercer trimestre del 2024	88
4.4.7	Desplazamiento de mineral del tercer trimestre del 2024	90
4.4.8	Plano de voladura	91
4.5.	Contrastación de la hipótesis	92
4.5.1	Hipótesis general:	92
4.5.2	Hipótesis específica 1:	92

4.5.3	Hipótesis específica 2:	92
4.5.4	Hipótesis específica 3:	93

CONCLUSIONES

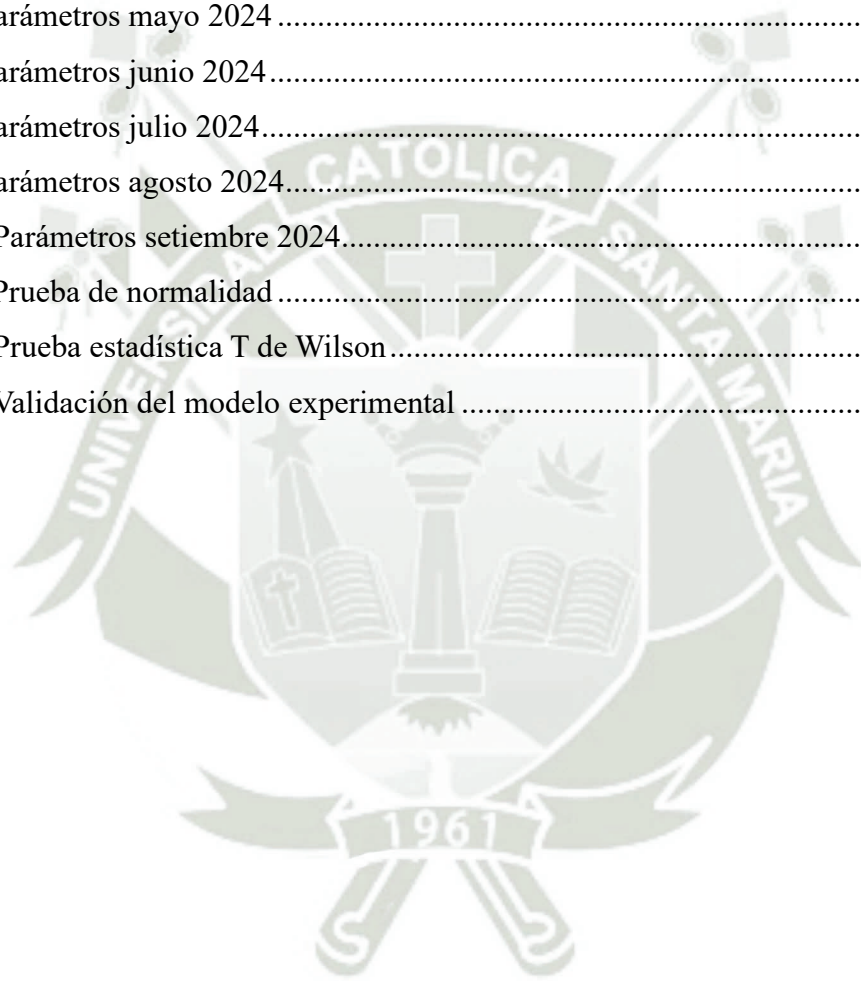
RECOMENDACIONES

REFERENCIAS



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables operacionales	21
Tabla 2 Principales tipos de roca en la UM.....	29
Tabla 3 Parámetros del segundo trimestre.....	50
Tabla 4 Parámetros del tercer trimestre	51
Tabla 5 Parámetros abril 2024.....	52
Tabla 6 Parámetros mayo 2024	54
Tabla 7 Parámetros junio 2024.....	56
Tabla 8 Parámetros julio 2024.....	58
Tabla 9 Parámetros agosto 2024.....	60
Tabla 10 Parámetros setiembre 2024.....	62
Tabla 11 Prueba de normalidad	77
Tabla 12 Prueba estadística T de Wilson.....	79
Tabla 13 Validación del modelo experimental	81



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Chalarina.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2 Sección transversal y columna estratigráfica.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3 Arenisca y venillas.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4 Cristales de pirita.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5 Venillas de arenisca.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 6 Areniscas, venillas de cuarzo.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 7 Pirita gruesa.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 8 Pirita diseminada.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9 Areniscas cuarzosas presentes en la UM.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10 Arenisca / limonita presentes en la UM.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11 Dacita porfírica presente en la UM.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12 Brecha monolítica de arenisca presente en la UM.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 13 Cobertura coluvial.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 14 Falla San José y SE.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 15 Falla la Cruz y Cholo que.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 16 Fallas N-S y E-W.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17 Producción de los meses del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 18 Ciclo ROM mensual del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 19 Fragmentación mensual del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 20 Factor de potencia mensual del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 21 %Recuperación mensual del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 22 Producción del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 23 Ciclo ROM del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 24 Fragmentación del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 25 Factor de potencia del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 26 %Recuperación del segundo y tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 27 Producción del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 28 Producción del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 29 Producción del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 30 Ciclo ROM del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 31 Ciclo ROM del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 32 Ciclo ROM del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>71</i>

<i>Figura 33 Fragmentación del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 34 Fragmentación del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35 Fragmentación del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36 Factor de potencia del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024</i>	<i>73</i>
<i>Figura 37 Factor de potencia del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 38 Factor de potencia del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39 % Recuperación del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40 % Recuperación del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41 % Recuperación del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 42 Prueba de normalidad en software estadístico SPSS</i>	<i>77</i>
<i>Figura 43 Malla 6.80 x 5.80</i>	<i>82</i>
<i>Figura 44 Coordenadas de taladros 6.80 x 5.80</i>	<i>82</i>
<i>Figura 45 Malla 7.20 x 6.20</i>	<i>83</i>
<i>Figura 46 Coordenadas de taladros 7.20 x 6.20</i>	<i>83</i>
<i>Figura 47 Captura aérea post voladura del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 48 Captura fotográfica post voladura del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 49 Captura fotográfica post voladura del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 50 Captura fotográfica post voladura del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 51 Desplazamiento del mineral del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 52 Desplazamiento de mineral del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 53 Desplazamiento del mineral del segundo trimestre del 2024.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 54 Plano de influencia de voladura del segundo trimestre del 2024</i>	<i>87</i>
<i>Figura 55 Captura aérea post voladura del tercer trimestre del 2024</i>	<i>88</i>
<i>Figura 56 Captura fotográfica post voladura del tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 57 Captura fotográfica post voladura del tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 58 Captura fotográfica post voladura del tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 59 Desplazamiento del mineral del tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 60 Desplazamiento del mineral del tercer trimestre del 2024.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 61 Plano de influencia de voladura del tercer trimestre del 2024</i>	<i>91</i>

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Reporte de voladura antes de la implementación	100
Anexo 2: Reporte de voladura después de la implementación.....	101



INTRODUCCIÓN

En la minería a tajo abierto, cada etapa del proceso extractivo cumple un rol estratégico para alcanzar los objetivos de producción, reducir costos y garantizar la eficiencia operativa. Dentro de esta cadena, la fragmentación del mineral producto de la voladura representa un eslabón clave, especialmente en operaciones que aplican el sistema ROM (Run of Mine), en el cual el mineral es transportado directamente al pad de lixiviación sin pasar por un chancado primario. Bajo este modelo, la calidad de la fragmentación no solo afecta el rendimiento del carguío y acarreo, sino también la conformación del pad, la permeabilidad del mineral y, por tanto, la recuperación metalúrgica (Morales & Tapia, 2019).

Una fragmentación deficiente puede generar sobre tamaños que dificultan el trabajo de los equipos, así como finos que alteran el comportamiento hidráulico del pad. Estas condiciones derivan en menores tasas de lixiviación, interrupciones operativas y un descenso progresivo en la productividad general de la unidad minera. Por esta razón, optimizar la fragmentación desde la etapa de diseño de voladura no solo es una medida técnica, sino una decisión estratégica que impacta directamente en la eficiencia de todo el sistema ROM (BHP Billiton, 2017).

En diversas operaciones mineras de Perú y Chile se ha comprobado que una gestión adecuada de la fragmentación, basada en el control de parámetros de perforación, carga de explosivos y secuencia de disparo, permite mejorar significativamente la distribución granulométrica del material, reduciendo los cuellos de botella y elevando los indicadores de producción (Codelco, 2018; Sociedad Minera Shahuindo, 2020). Sin embargo, en muchas unidades mineras esta gestión aún no se encuentra debidamente implementada, lo que limita el verdadero potencial del sistema ROM.

Esta investigación busca abordar dicha problemática mediante un estudio técnico enfocado en la gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado, con el propósito de

mejorar la eficiencia operativa y aumentar la producción en una mina superficial. El análisis permitirá identificar oportunidades de mejora en el diseño y ejecución de voladuras, alineando los resultados con los requerimientos específicos de un sistema ROM eficiente y sostenible.



CAPÍTULO I



1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del Problema

En las operaciones mineras a tajo abierto que aplican el sistema ROM (Run of Mine), la calidad de la fragmentación obtenida en la voladura se ha identificado como un factor determinante para la eficiencia global del proceso productivo. A diferencia de los métodos convencionales donde el mineral pasa por chancado primario, en el ROM el material es transportado directamente al pad de lixiviación, lo que exige un mayor control sobre la granulometría generada en la voladura.

Diversos estudios han abordado esta problemática en contextos similares. En la mina Radomiro Tomic, ubicada en el norte de Chile, se llevó a cabo una investigación centrada en la relación entre el diseño de voladura y la eficiencia del riego en el pad ROM. Se demostró que una fragmentación más uniforme, sin presencia significativa de sobre tamaños, mejoró la permeabilidad del pad y elevó los índices de recuperación del cobre. La experiencia resaltó la importancia de adaptar los tiempos de retardo y la carga de explosivo al tipo de roca y a los objetivos metalúrgicos del proceso.

Por otro lado, en la unidad minera Shahuindo, en Perú, se realizó un análisis técnico-operativo del rendimiento de las voladuras aplicadas a zonas de mineral ROM. El estudio reveló que al implementar diseños de malla optimizados, con el uso de explosivos de mayor energía específica y control del burden, se logró una fragmentación más adecuada, reduciendo los ciclos de carguío y mejorando el ritmo de apilamiento. Esto se tradujo en un incremento del tonelaje tratado por día y en una mayor estabilidad del pad, lo que reforzó la eficiencia metalúrgica del sistema.

De igual forma, investigaciones desarrolladas en Minera Escondida y Spence, también en Chile, han confirmado que una gestión eficiente de la voladura puede tener impacto directo

sobre los costos operativos, al evitar el uso de chancado adicional y minimizar los tiempos muertos asociados a la remoción de bloques grandes que interfieren con el flujo del proceso.

Estos antecedentes coinciden en que la fragmentación del mineral es una variable crítica dentro del sistema ROM, y que su correcta gestión a partir de la voladura representa una oportunidad concreta para incrementar la producción y mejorar la rentabilidad sin necesidad de realizar grandes inversiones en infraestructura adicional.

1.2. Objetivos de la Investigación

1.2.1 General

- Gestionar la optimización de la fragmentación del mineral volado para mejorar la eficiencia operativa y aumentar la producción en minera Shahuindo que opera bajo el sistema ROM.

1.2.2 Específicos

- Evaluar la situación actual de la fragmentación del mineral volado y su influencia en los procesos de carguío, transporte y apilamiento en la operación ROM.
- Determinar los parámetros críticos de perforación y voladura que pueden ser optimizados para obtener una granulometría adecuada al proceso ROM.
- Analizar el impacto de una fragmentación optimizada en la eficiencia del pad de lixiviación y en los niveles de recuperación metalúrgica.

1.3. Preguntas de Investigación

1.3.1 General

- ¿Cómo influye la gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado en el incremento de la producción en minera Shahuindo que opera bajo el sistema ROM?

1.3.2 Específicos

- ¿Cuál es la situación actual de la fragmentación del mineral volado y cómo afecta los tiempos de carguío, acarreo y apilamiento en la operación ROM?

- ¿Qué parámetros de perforación y voladura pueden ser ajustados para mejorar la distribución granulométrica del mineral volado?
- ¿Qué impacto tiene una fragmentación optimizada en la eficiencia del pad de lixiviación y en la recuperación metalúrgica bajo el sistema ROM?

1.4. Línea de Investigación

La presente investigación se enmarca en la línea de Optimización de Procesos Mineros, específicamente en el área de optimización de procesos de perforación y voladura aplicados a sistemas de lixiviación tipo ROM (Run of Mine). Esta línea aborda el estudio y mejora de las variables operativas que influyen directamente en la eficiencia del ciclo minero, desde la fragmentación inicial del macizo rocoso hasta su disposición final en el pad de lixiviación. Palabras Clave

Palabras clave en español:

- Fragmentación
- Producción
- Optimización

Keywords in English:

- Fragmentation
- Production
- Optimization

1.5. Solución Propuesta

Maximizar la productividad mediante la aplicación de criterios técnicos en diseño de voladura, control granulométrico y análisis del impacto operativo, todo ello con el propósito de elevar los estándares de eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad en operaciones a tajo abierto.

1.5.1 Justificación e Importancia.

En el contexto actual de la minería superficial, la eficiencia de la voladura representa un factor clave en la calidad de la fragmentación del mineral, especialmente en sistemas ROM (Run of Mine), donde el material extraído se transporta directamente al pad de lixiviación. Desde un enfoque técnico, la optimización de los parámetros de perforación y voladura —como el burden, espaciamiento, diámetro de taladro, tipo de explosivo y tiempos de retardo— permite obtener una granulometría más uniforme, reduciendo la generación de sobre tamaños y finos no deseados (Morales & Tapia, 2019). Esta investigación aporta al desarrollo técnico del proceso, promoviendo un enfoque más riguroso y predictivo en el diseño de voladuras para operaciones ROM.

Desde el punto de vista operativo, una fragmentación adecuada mejora la fluidez en las etapas de carguío, transporte y apilamiento del mineral. La presencia de bloques grandes puede ocasionar atascos en los equipos de carguío y retrasos en los ciclos de acarreo, mientras que el exceso de finos disminuye la permeabilidad del pad de lixiviación. Al gestionar adecuadamente la fragmentación desde el inicio del proceso, se logra una operación más continua, estable y eficiente, lo cual se traduce en un mejor uso de los equipos y menor desgaste mecánico (Codelco, 2018).

En términos económicos, la mejora en la fragmentación reduce los costos asociados al retrabajo, uso de equipos auxiliares para la fragmentación secundaria, y tiempos improductivos. Además, al elevar la recuperación metalúrgica mediante un pad con mejor distribución granulométrica, se incrementa el valor recuperado por tonelada de mineral tratado (Sociedad Minera Shahuindo, 2020). Esto convierte a la gestión de voladura en una herramienta no solo técnica, sino también estratégica para reducir costos operativos y aumentar la rentabilidad del proceso ROM.

La seguridad también se ve beneficiada. Al evitar la presencia de grandes bloques inestables o zonas con apilamientos irregulares, se minimizan los riesgos de accidentes durante las maniobras de carguío, acarreo y operación del pad. Una voladura bien diseñada reduce la necesidad de intervenciones manuales o el uso de maquinaria adicional para romper bloques, disminuyendo la exposición del personal operativo a condiciones de riesgo (BHP Billiton, 2017). Asimismo, se mejora el control de vibraciones, gases post-voladura y proyecciones, contribuyendo a un entorno laboral más seguro.

Finalmente, esta investigación se justifica por su aporte al conocimiento aplicado en el campo de la ingeniería minera, específicamente en la mejora del rendimiento de sistemas ROM mediante el control de la fragmentación. Si bien existen experiencias documentadas en minas de Chile y Perú, muchas operaciones aún presentan deficiencias en la gestión técnica de la voladura. Este estudio propone una metodología integral que permite alinear los objetivos de producción con una ejecución más eficiente, segura y rentable del proceso minero desde su fase inicial.



CAPÍTULO II

2.FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Estado del arte

Según las ecuaciones de Kuznetsov (1973) & Rosin-Rammler (1993), (1) con el modelo Kuz-Ram, ha sido ampliamente utilizado como referente para estimar el tamaño promedio de partículas producto de la voladura. Sin embargo, diversos autores señalan limitaciones al aplicarlo en contextos geológicos específicos, pues tiende a sobrestimar el tamaño medio y no describe con precisión la proporción de finos (Ouchterlony et al., 2019). Frente a ello, la función Swebrec surge como alternativa, ofreciendo un ajuste más consistente en toda la curva granulométrica (Ouchterlony et al., 2005).

De acuerdo a las investigaciones realizadas por Kiyua, E (2022), (2) destaca que la eficacia del procesamiento metalúrgico depende tanto de la micro-fracturación inducida en los fragmentos como del tamaño de las partículas del mineral run-of-mine. El autor afirma que si se incrementa la energía empleada en la voladura, es probable que disminuya el consumo total de energía y que aumente la productividad de los equipos de conminución; esto último significa un aumento en la eficiencia operacional. Además, destacan que la existencia de microgrietas aumenta la permeabilidad del material, lo que mejora la recuperación de minerales en procesos de lixiviación en pilas; no obstante, enfatizan que las ventajas dependen considerablemente de la textura y los rasgos mineralógicos del depósito.

Según señalan Kinyua et al (2022), (3) tamaños equilibrados reducen el consumo de energía y los costos operacionales, mientras que Zhang et al (2023) argumentan que tamaños excesivamente grandes pueden causar cuellos de botella en la planta de procesamiento.

Según Sanchidrián, J (2022), (4) en la minería, ha sido una práctica establecida el uso de imágenes digitales y programas informáticos para procesarlas. Split-Desktop® o WipFrag® son aplicaciones que posibilitan el cambio de imágenes a curvas granulométricas usando algoritmos de escalado y segmentación. Aunque estas herramientas requieren protocolos de

captura rigurosos y calibración apropiada para minimizar errores relacionados con partículas ocultas o superposición de fragmentos, representan una opción económica.

2.1.1 A Nivel Internacional.

Según Rojas Rivera, R. A. (2021), (5) en su investigación titulada: Metodología Para Integración Del Proceso Mina & Planta. En la industria minera constantemente se habla respecto de la productividad que se debe alcanzar para mantenerse competitivo, y para un negocio que requiere una alta inversión, posee buen grado de incertidumbre, la mayoría de las operaciones utilizan la metodología de Integración Mina & Planta” como filosofía para producir más por unidad de tiempo. Sin embargo, habiendo visto como se implementa esta filosofía en algunas compañías mineras, sumado a las opiniones de profesionales del rubro, se ha logrado detectar que no todas las compañías implementan correctamente la metodología, simplemente no se tiene experiencia al respecto o bien solo se habla de ella sin hacerla real, lo que no permite agregar el valor que se promete o se ha conseguido en otros sitios. Entonces, este proyecto de tesis consiste en definir una metodología clara y simple, para que en las compañías mineras, independiente del lugar o región en donde se encuentren, logren implementar adecuadamente la filosofía de Integración de Mina & Planta, y con ello generar más valor o excedentes en un determinado periodo de tiempo. Para concretar lo anterior, revisaremos primero los conceptos teóricos en que se sustenta, luego construiremos un modelo en el cual la metodología pueda desarrollarse, para finalmente establecer la metodología y justificarla económicamente. (Rojas Rivera, 2021)

- Según Garcés, D. A., & Castrillón, O. D. (2017), (6). Diseño de una Técnica Inteligente para Identificar y Reducir los Tiempos Muertos en un Sistema de Producción. La herramienta utilizada es WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) con el modelo de árbol de clasificación J48. El resultado de la metodología propuesta en comparación a la metodología actual es positivo, ya que se logra un incremento de 3.58 puntos porcentuales en

el indicador de eficiencia global. Se concluye que la herramienta sirve para identificar y reducir los tiempos muertos de una línea de producción. (7).

Según Rojas Canales, V. J. (2022), (8) El trabajo titulado (9) "Metodología de Optimización del Programa Revisión B de Preparación Minera Considerando Incertidumbre Operacional" fue realizado por Valentina Javiera Rojas Canales en 2022 en la Universidad de Chile, con sede en Santiago. El principal objetivo de esta investigación fue desarrollar una metodología que permita optimizar el programa de preparación minera (Revisión B) incorporando las incertidumbres operacionales típicas del proceso minero, mejorando así la toma de decisiones bajo condiciones de variabilidad. La metodología incluyó el uso de modelos matemáticos y simulaciones para integrar la incertidumbre en las fases de planificación minera. El diseño del estudio fue cuantitativo y experimental, utilizando una muestra de datos operacionales históricos de la mina en cuestión. En el resumen, se destaca que la metodología propuesta permite generar planes más robustos frente a las fluctuaciones operacionales, lo que mejora la eficiencia y reduce riesgos. Las conclusiones subrayan la importancia de considerar la incertidumbre para optimizar el programa de preparación minera, logrando una mayor estabilidad y eficiencia en el proceso.

2.1.2 A Nivel Nacional.

Según Pari, E. (2018) (10) en su tesis “Dimensionamiento de Equipos de carguío-acarreo y optimización del Plan de Mantenimiento de vías para los tajos Pampa Verde y San Pedro Sur mina La Zanja S.R.L.”, el objetivo fue analizar el dimensionamiento de los equipos de carguío y acarreo, con el fin de cumplir con la producción desde enero a junio del 2017, meses que se consideran críticos debido a las condiciones climatológicas adversas; tales como fuertes precipitaciones fluviales, neblina densa, tormentas eléctricas, etc., lo cual trae como consecuencia retrasos. Se concluyó que, al tener conocimiento del ciclo de las operaciones (acarreo y transporte), se puede tener un cálculo de la flota o equipos que se requieran para

dichos servicios a un bajo precio unitario y con una máxima producción en unidad de tiempo. De igual manera, el uso de los indicadores de desempeño en las operaciones básicas de minado incrementará el conocimiento de las operaciones, lo cual se refleja en la disminución de los costos de operación. Es necesario que se tenga una correcta identificación de los indicadores más relevantes del desempeño en referencia a las operaciones elementales de carguío y transporte, para la realización de los controles necesarios para un óptimo desarrollo de las operaciones mineras, de acuerdo a las actividades programadas en la planificación previa. El ordenamiento en la gestión de costos producirá efectos positivos en la productividad en las actividades mineras, así como una reducción de la presencia de accidentes al interior de las operaciones mineras. Por lo tanto, se puede decir que la gestión en las operaciones de minado mediante la aplicación de los indicadores de desempeño, tiene una incidencia positiva en el control operativo que sirve para la estandarización y conocimiento de una forma más precisa los elementos problemáticos para una rápida optimización en las operaciones.

Según Osorio Mancco, J., & Reinoso Lara, A. (2023), (11) en su investigación titulada: Análisis de variables operacionales bajo el concepto mine to mill para el cumplimiento de los planes de producción - Mina Cobriza. Durante el desarrollo de la tesis se aplica el método analítico, en base al análisis descriptivo y explicativo. El trabajo es preexperimental, en el que se analizará la granulometría y su implicancia en el tonelaje, tiempo operacional, número de viajes y el rendimiento asociado a los equipos de carguío y acarreo durante los periodos de enero a marzo del 2018 y un escenario actual con la finalidad del cumplimiento de los planes de producción mediante la aplicación del concepto mina planta. (Osorio Mancco, Reinoso Lara, 2023)

Según Vargas Ticona, C. (2019), (12) en su investigación titulada: Optimización en las operaciones de carguío y transporte para el mejoramiento de la productividad. El propósito de esta investigación es ver una nueva forma de enfoque dentro del proceso productivo buscando

un sistema de mejoramiento para elevar la producción en base a la productividad eficiente de los equipos de carguío y transporte. Teniendo como factor característico el tiempo de cada ciclo de las operaciones, se analizó las causas que no permiten que las operaciones sean optimas, luego se identificó para eliminar o minimizar su incidencia en la productividad, con el fin de mejorar y elevar los rendimientos en la productividad. Eliminando los tiempos muertos que se originan en el punto de carguío, en el transcurso del transporte y en el punto de descarga donde no se vio un buen manejo de parámetros de ingeniería de un buen equilibrio entre los equipos de carguío y transporte. Optimizando todos estos factores en ciclo de carguío se redujo a 1.97 minutos y en el ciclo de transporte se redujo a 12.23 minutos.

2.1.3 A Nivel Local

Según Vicos, J. (2009), (13) en su tesis titulada "Mejoramiento de acarreo y transporte mediante dispatch en Cerro Verde" tiene por finalidad, investigar la mejora de la extracción y el transporte mediante el uso del transporte marítimo y tecnologías relacionadas que se basan en un informe técnico, que nos permite comprender cómo esta tecnología puede aumentar la productividad efectiva de nuestras flotas de transporte de carguío y acarreo. Cabe mencionar que el Dispatch puede lograr automáticamente una distribución óptima y dinámica de las flotas de camiones. Para ello, Dispatch ofrece un plan de optimización, en el que interactúan algoritmos matemáticos para obtener los mejores resultados. Se concluye, que la capacidad de obtener datos simultáneamente y cálculos de KPI, abren muchas posibilidades operativas, igualmente Dispatch proporciona herramientas de gestión de información muy potentes. Finalmente, se sugiere que todos los integrantes de Dispatch tengan experiencia en ingeniería para comprender los objetivos del sistema. Para la implementación del DISPATCH en las empresas mineras, permite la maximización del trabajo de carga en sus flotas y la mejora del uso de sus equipos. Las empresas deben considerar que se requiere la instalación de una computadora para una mejor comunicación entre los operadores a cargo de los equipos y el

personal a cargo del despacho; lo cual permitirá que el operador del sistema DISPATCH pueda realizar notificaciones rápidamente y con facilidad para conocimiento del despachador sobre las modificaciones en la condición de los equipos de trabajo.

Según Rivera, J. (2018) (14) en su tesis titulada “Mejoramiento de la flota de carguío y acarreo en operaciones mina, para el incremento de la producción Sociedad Minera Cerro Verde S. A. A.”, Tuvo como finalidad desarrollar un método para controlar las operaciones y los costos de los equipos de movimiento de tierras, carga y acarreo, que permita a las empresas identificar, comparar y seleccionar la mejor flota de camiones, optimizar la producción y lograr reducir los costos unitarios de carga y acarreo. Para este estudio se aplicaron los siguientes pasos: Primero, los datos del registro histórico se procesan para determinar los indicadores de rendimiento actuales (KPI) como el volumen de producción, los costos unitarios y la eficiencia, el equipo y las operaciones, lo que indica que los márgenes operativos actuales son bajos y los costos son altos. En segundo lugar, a partir del estudio del número de operaciones de los equipos de manipulación, se realizó un trabajo de campo para determinar su funcionamiento y producción potencial. En tercer lugar, a través de estimaciones de producción potencial utilizando coeficientes de coincidencia, se determinó el tamaño de la flota de transporte y se analizaron los costos de producción y unitarios para cargar con una excavadora CAT 336DL. En cuarto lugar, se compara el rendimiento existente con el rendimiento potencial, lo que permite elegir la excavadora más adecuada para su economía y eficiencia de producción. Como resultado, se selecciona la mejor flota de máquinas de movimiento de tierras. Se concluye que, en operación, existen deficiencias en el sistema de carga y transporte, y la falta de acoplamiento entre los equipos de carga y transporte incide en la baja producción y altos costos de operación, debido a la flota sub dimensionada en el frente de desarrollo. Finalmente, se sugiere un análisis para comprender la carga de intervención y los diferentes factores de las actividades de transporte que deben optimizarse. El trabajo administrativo orientado a la mejora de la productividad en

una flota de carguío y acarreo requiere que se identifiquen y reduzcan los tiempos muertos, que tienen una afectación directa en la productividad de las empresas mineras. Los retrasos en las actividades operativas, producen paras y/o demoras innecesarias de las unidades de carga a pesar de tener carga en espera de ser trasladada. Por otro lado, las deficiencias en la gestión de cambios de turno podrían originar demoras en la ejecución del trabajo y el incremento de los costos debido al pago de horas extras al personal a cargo; por lo cual se debe priorizar la implementación de estrategias de gestión adecuadas.

Pacheco, O. F. D. (2013) (15) en su investigación titulada: Voladuras De Alta Intensidad Y Su Influencia En El Chancado Y Molienda Del Pórfido Cupríferos De Cerro Verde. En los últimos años se ha demostrado la gran influencia que posee la voladura en los procesos de chancado y molienda, debido a su mayor Ciclo ROM eléctrica versus la energía química de los explosivos. Siendo vital el nuevo enfoque de optimización hacia operaciones unitarias más eficientemente energéticas, como es el caso de la voladura. Es por eso que un aumento sustancial en el factor de carga de diseños de voladura de alta intensidad, predispone al mineral a un menor tiempo de proceso en planta y por ende a un menor costo de tratamiento, el cual justifica ampliamente el mayor uso de explosivo a un menor costo global. Esta tesis está basada en la técnica de integración de la operación y control de la mina hasta la concentradora (Mine to Mill), aplicada a un yacimiento tipo pórfido cuprífero diseminado; la cual consistió en el análisis total del circuito de chancado y molienda al tratar el material resultante del diseño estándar de voladura en el dominio litológico duro/grueso; para luego determinar los lineamientos y ajustes en el circuito para un diseño de voladura de alta intensidad optimizado. (Oscar Fernando, 2013)

2.2. Bases Teóricas de la Investigación

2.2.1 Fragmentación del mineral

La fragmentación del mineral es el resultado directo del proceso de voladura y representa la distribución de tamaños en los fragmentos del macizo rocoso. Una adecuada fragmentación facilita el carguío, transporte, apilamiento y posterior tratamiento del mineral, especialmente en sistemas ROM donde no se aplica chancado primario. Según (Morales y Tapia, 2019), la fragmentación condiciona el desempeño de toda la operación minera, por lo que debe ser controlada desde la etapa de diseño de voladura.

2.2.2 Voladura

La voladura es el proceso mediante el cual se fractura el macizo rocoso utilizando explosivos de alta energía. Este proceso es crítico dentro de la minería a tajo abierto, ya que afecta directamente la fragmentación, la seguridad operativa y los costos posteriores (Jimeno y Carcedo, 1995) explican que la correcta selección de parámetros de voladura, como tipo de explosivo, burden, espaciamento y retardo, es fundamental para una operación eficiente.

2.2.3 Sistema ROM (Run of Mine)

El sistema ROM, por sus siglas en inglés Run of Mine, se refiere al método en el que el mineral extraído de la voladura es transportado directamente al pad de lixiviación sin pasar por chancado. Esto implica una exigencia mayor en el control de la fragmentación inicial. Según (Codelco, 2018), este modelo reduce costos energéticos, pero requiere de una gestión técnica rigurosa para asegurar la eficiencia metalúrgica.

2.2.4 Pad de lixiviación

El pad de lixiviación es una estructura diseñada para contener el mineral apilado y permitir su irrigación con soluciones químicas que disuelven los metales valiosos, como el cobre. La eficiencia del proceso depende de la granulometría del mineral y la permeabilidad del

pad (Wills y Finch, 2015). Destacan que una mala distribución de tamaños puede generar zonas inactivas y pérdidas en la recuperación.

2.2.5 Índice Axb

El índice Axb es un parámetro derivado del Drop Weight Test y se utiliza para predecir la resistencia a la fractura del mineral. Es especialmente útil para ajustar el diseño de voladuras en función de la dureza del macizo rocoso (Napier-Munn et al., 2005) señalan que este índice permite predecir la fragmentación y, por ende, mejorar la eficiencia en sistemas ROM y de chancado directo.

2.2.6 Granulometría

La granulometría se refiere a la distribución del tamaño de partículas en un conjunto de material fragmentado. Es un indicador clave para evaluar la calidad de la voladura y su impacto en las siguientes etapas del proceso. Según (Wills y Finch, 2015), el control granulométrico permite anticipar cuellos de botella y ajustar parámetros operativos para mejorar la eficiencia del sistema.

2.2.7 Burden y espaciamiento

El burden es la distancia desde el taladro de voladura hasta la cara libre del banco, y el espaciamiento es la distancia entre taladros contiguos. Ambos parámetros influyen directamente en la eficiencia de la fragmentación (Jimeno et al., 1995) indican que un diseño equilibrado entre burden y espaciamiento evita sobre tamaños y reduce la necesidad de voladuras secundarias.

2.2.8 Eficiencia operative

La eficiencia operativa se define como la capacidad del proceso minero para alcanzar altos niveles de rendimiento con el menor uso de recursos y tiempo (Tapia, 2020) señala que esta eficiencia está directamente relacionada con el control de variables como la fragmentación, el tiempo de ciclo y la disponibilidad de los equipos.

2.2.9 Recuperación metalúrgica

La recuperación metalúrgica representa el porcentaje del metal valioso que puede ser extraído del mineral tratado, en relación con su contenido total (Wills y Finch, 2015). Explican que una buena fragmentación mejora la permeabilidad del pad y facilita el contacto entre la solución lixiviante y el mineral, aumentando así la recuperación.

2.2.10 Gestión de voladura

La gestión de voladura es el conjunto de prácticas técnicas y administrativas orientadas a planificar, ejecutar y controlar el proceso de voladura (Morales y Tapia, 2019). Destacan que una gestión eficiente permite obtener una fragmentación adecuada, reducir costos operativos y mejorar la seguridad en la operación minera.

2.3. Hipótesis de investigación

2.3.1 Hipótesis general de investigación

"La gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado mejora significativamente la eficiencia operativa y contribuye al aumento de la producción en minera Shahuindo que opera bajo el sistema ROM.."

2.3.2 Hipótesis específica

- La fragmentación actual del mineral volado afecta negativamente los tiempos de carguío, transporte y apilamiento, disminuyendo la productividad en operaciones ROM.
- El ajuste técnico de los parámetros de perforación y voladura permite obtener una granulometría más uniforme y adecuada para el sistema ROM.
- Una fragmentación optimizada mejora la permeabilidad del pad de lixiviación y aumenta los niveles de recuperación metalúrgica en el proceso ROM.

2.4. Variable

2.4.1 Variable independiente:

Fragmentación de mineral volado.

2.4.2 Variable dependiente:

Producción en una mina superficial que opera bajo el sistema ROM.



2.4.3 Operacionalización de variables

Tabla 1: Variables operacionales

Variable	Definición Conceptual	Indicador	Medición	Unidad
Variable Independiente: Fragmentación del mineral volado	Conjunto de acciones técnicas y estratégicas orientadas a mejorar el diseño de voladura para obtener una granulometría adecuada al sistema ROM.	Diseño de voladura optimizado	Análisis del burden, espaciamiento, diámetro, longitud de taladro y secuencia de retardo	Pulgadas, ms, m
		Granulometría del mineral volado	Porcentaje de finos, medios y sobre tamaños mediante análisis de imagen o mallas	% por clase (pulgadas)
		Consumo específico de explosivo	Cantidad de explosivo por tonelada o por volumen de roca	kg/t o kg/m ³
Variable Dependiente: Producción en mina superficial ROM	Volumen de mineral que es efectivamente procesado a través del sistema ROM, medido por su eficiencia operativa y recuperación metalúrgica.	Tonelaje procesado diario	Registro de toneladas de mineral enviado al pad ROM	t/día
		Tiempo promedio de ciclo de acarreo	Duración desde carguío hasta descarga en pad ROM	min/ciclo
		Porcentaje de recuperación metalúrgica	Relación entre metal recuperado y contenido original en el mineral	%

Nota.. Elaboración propia



CAPÍTULO III

3.MARCO METODOLOGICO

3.1. Alcances y Limitaciones

En esta sección se establecen los límites y el alcance del proyecto, definiendo los aspectos que serán considerados dentro del estudio y aquellos que quedan fuera de su alcance. Además, se identifican las condiciones especiales que pueden afectar el desarrollo y la implementación de la solución propuesta.

3.1.1 Alcances del Proyecto

La presente investigación se enfoca en gestionar la optimización de la fragmentación del mineral volado con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y aumentar la producción en la operación bajo el sistema ROM. Para ello, se evalúan los resultados actuales de fragmentación y se comparan con los obtenidos luego de la implementación de mejoras técnicas en los parámetros de perforación y voladura, como el espaciamiento, burden, diámetro de taladro, tipo y cantidad de explosivo. La metodología empleada es de tipo aplicada y enfoque cuantitativo, utilizando herramientas como Split-Online para el análisis granulométrico, registros de producción diaria, tiempos de ciclo y eficiencia de apilamiento. El estudio se realiza en la Unidad Minera Shahuindo, ubicada en la región Cajamarca, Perú, específicamente en los tajos operativos activos durante el segundo y tercer trimestre del año 2024, donde se analiza el comportamiento del mineral volado antes y después de la optimización, considerando condiciones geomecánicas reales y datos operativos de campo.

3.1.2 Limitaciones

Una de las principales limitaciones de la presente investigación radica en el manejo de la información operativa. Si bien se utilizará data real proveniente de la Unidad Minera Shahuindo, esta no será publicada ni difundida de forma detallada debido a compromisos de confidencialidad asumidos con la empresa operadora. Por esta razón, los resultados serán presentados de manera general y agregada, omitiendo valores específicos sensibles, nombres

de áreas internas y cualquier información que pudiera comprometer la seguridad o la estrategia operativa de la compañía.

3.2. Tipo y nivel de la Investigación

3.2.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación que se usará para la presente investigación será una investigación aplicada, debido a que el fin general de esta investigación será la adquisición de nuevos conocimientos del entorno real.

3.2.2 Nivel de Investigación

El nivel de investigación que se usará para esta investigación será relacional, debido a que se relacionaran los datos de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024.

3.2.3 Diseño de investigación

El diseño del estudio fue **cuasi-experimental** de tipo antes-después con un solo grupo, ya que se aplicará un método de sondaje direccional en un entorno real de exploración minera sin asignación aleatoria de grupos, evaluando su impacto en variables como los costos unitarios de perforación, la velocidad y el consumo de diamantina. Para ello, se realizó una comparación de los resultados obtenidos antes y después de la implementación del método, permitiendo identificar si su aplicación mejora la eficiencia y reduce los costos operativos en las labores de perforación diamantina. Este diseño fue adecuado porque permitió medir los efectos prácticos del método propuesto en condiciones reales, sin necesidad de interrumpir el desarrollo normal de las operaciones mineras.

3.3. Población y Muestra o Universo

3.3.1 Población

Para este proyecto de investigación se tendrá como población las voladuras realizadas en Minera Shahuindo en el segundo y tercer trimestre del 2024

3.3.2 Muestra

Como muestra se analizarán las voladuras de Minera Shahuindo de 6 meses:

Del 01-04-2024 al 30-06-2024 (Antes de iniciar la prueba)

Del 01-07-2024 al 30-09-2024 (Después de iniciar la prueba)

3.3.3 Criterio

Se tomará las voladuras del segundo y tercer trimestre del 2024.

3.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Métodos

El método de investigación que se usará en la presente investigación será el método cuantitativo debido a que se usarán los datos numéricos para que puedan ser comparados. Con este tipo de datos se podrán obtener análisis descriptivos inferenciales para comprobar la hipótesis.

3.4.2 Técnicas de Recolección de Datos

Para la variable independiente:

- **Fuentes para recolección de información:** la información que se recolectará será de fuentes internas de la mina, se contará con los datos de producción del segundo trimestre del año 2024.r.

Para la variable dependiente

- **Técnicas para recolección de información:** se implementará optimización de la fragmentación del material volado, se usará como técnica la revisión documentaria de los registros de producción de mineral del tercer trimestre del año 2024.

Instrumentos de Recolección de Datos

Para la recolección de datos en este estudio, se utilizarán los siguientes instrumentos:

- Flexómetro
- Hojas de cálculo
- Libretas de campo
- Laptop
- Lapiceros, etc

3.5. Plan de análisis de datos

3.5.1 Técnicas de análisis de datos.

- La información será obtenida a través del manejo de datos los cuales se verán reflejado en tablas y gráficos que denoten el análisis estadístico descriptivo con su respectiva interpretación.
- Para poder encontrar la relación de los datos de producción antes y después de implementar la optimización de un sistema de ventilación, se ejecutarán a través del software SPSS versión 26 el cual servirá como herramienta para el respectivo análisis, como prueba estadística se usará la prueba T de Wilcoxon para muestras relacionadas.

3.6. Procedimiento de la investigación

- Definición del Problema y Objetivos
- Identificar y describir el problema relacionado con la fragmentación del mineral volado en la mina superficial.
- Establecer los objetivos generales y específicos de la investigación.
- Revisión de Literatura
- Realizar una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre técnicas de fragmentación, voladuras y su impacto en la producción minera.
- Analizar estudios previos y teorías relacionadas que respalden la investigación.

- Diseño de la Investigación
- Seleccionar el enfoque de investigación (cuantitativo).
- Definir el diseño de investigación (longitudinal) para comparar los datos de producción antes y después de la optimización.
- Establecer la muestra y el período de estudio (por ejemplo, segundo y tercer trimestre de 2024).
- Recolección de Datos
- Datos de Producción: Recopilar datos sobre la producción, incluyendo toneladas procesadas por día (TPD) antes y después de la implementación de las optimizaciones.
- Datos de Fragmentación: Realizar análisis de muestras del mineral volado para determinar el tamaño y la distribución de los fragmentos.
- Tecnologías Implementadas: Documentar las tecnologías avanzadas de perforación y voladura aplicadas.
- Análisis de Datos
- Utilizar la prueba estadística T de Wilcoxon para muestras relacionadas para comparar los datos de producción antes y después de la optimización.
- Evaluar los resultados de la fragmentación en función de los indicadores definidos.
- Interpretación de Resultados
- Analizar los resultados obtenidos del análisis estadístico para determinar el impacto de la optimización de la fragmentación en la producción.

- Relacionar los hallazgos con los objetivos y preguntas de investigación.
- Conclusiones y Recomendaciones
- Elaborar conclusiones basadas en los resultados obtenidos, confirmando o refutando la hipótesis planteada.
- Proporcionar recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en la gestión de la fragmentación del mineral.
- Elaboración del Informe Final
- Redactar un informe completo que incluya la introducción, metodología, resultados, discusión y conclusiones.
- Presentar los hallazgos a las partes interesadas de la mina y en conferencias o publicaciones relevantes.

3.7. Descripción de la unidad

3.7.1 Ubicación

Pan American Silver Peru S.A.C (PAS), es titular de la Unidad Minera Shahuindo, que se encuentra ubicada en el distrito de Cachachi, departamento de Cajamarca, aproximadamente a 122 km al sureste de la ciudad de Cajamarca y a 15 km al oeste de la ciudad de Cajabamba. El clima en el área del servicio es típico de la región sierra, con temperaturas variantes entre 7 y 23°C. La altitud promedio de área de la UM Shahuindo varía desde los 2400 msnm hasta 2800 msnm.

Tabla 2
Principales tipos de roca en la UM

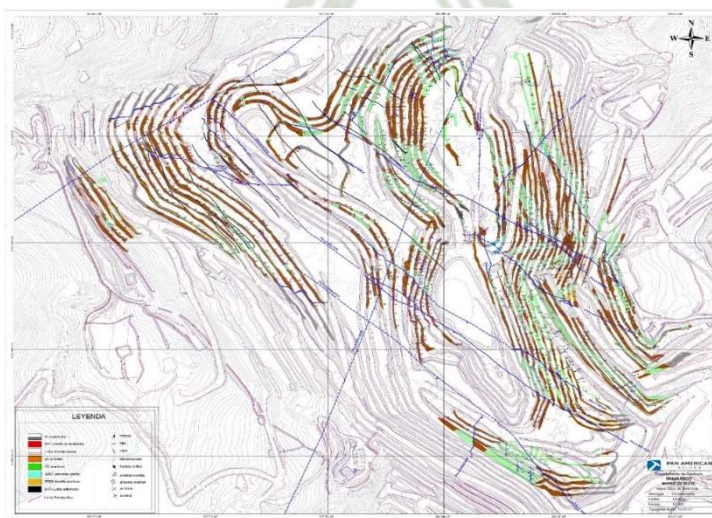
Nomenclatura	Litología	Dureza
SD (verde)	Arenisca	Muy dura
SDST (celeste)	Arenisca - Limonita	Dura
STSD (amarillo)	Limonita - Arenisca	Intermedia
STSD\$	Limonita	Suave

Nota.. Elaboración propia

3.7.2 Geología

3.7.2.1 Geología local

La geología local está comprendida por limolitas, areniscas y cuarcitas en menor grado correspondientes a las unidades Carhuaz y Farrat del Grupo Goyllarisquizga; las que a su vez conforman pliegues anticlinales y sinclinales de orientación andina con estilos estructurales definidos y lo que es más notable aún albergan estructuras mineralizadas, las cuales se orientan muy próximos y siguiendo las superficies axiales de dichos pliegues.

Figura 1 *Chalarina*


Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.7.2.2 Geología estructural

La geología estructural en Shahuindo, se enmarca en una tectónica compresiva que ha permitido el desarrollo de sinclinales y anticlinales de orientación andina, muchas de las cuales en sus zonas de charnela son atravesadas por fallas que presentan orientación sub-paralela a la de los pliegues, extendiéndose por varios cientos de metros indicando su estrecha relación con las zonas de debilidad de las charnelas de dichos pliegues. Tales fallas sirven de conducto y albergue de estructuras mineralizadas. A continuación, se detalla.

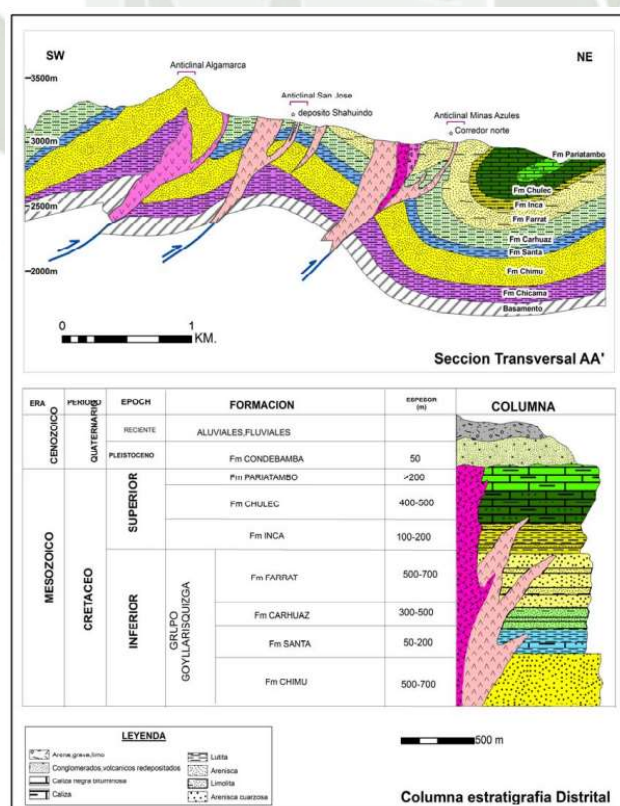
- Sinclinal Santa Rosa: ubicada hacia el borde SW del tajo chalarina, la orientación de su plano axial es N 310°-315°, volcado hacia el SW alcanzando su buzamiento una inclinación de 50°. Su eje presenta inmersión hacia el SE; siendo en el lado sureste de 10° y en el lado noroeste de 33°.
- Alberga a la estructura mineralizada que lleva su mismo nombre, cuya orientación es N 312°, B: 52°- 56°SW.
- Anticlinal San José: se ubica paralela a 50m. al este de Santa Rosa, la orientación de su plano axial es N 296°, volcado hacia el NE alcanzando su buzamiento una inclinación de 84°, próximo a la vertical. Su eje presenta inmersión de 7° hacia el SE. Su estilo estructural es del tipo chevrón.
- Alberga a la estructura mineralizada que lleva su mismo nombre, cuya orientación es N 316°, B: 76°- 82° SW.
- Estructura mineralizada Cecilia: se ubica paralela a 60 m. al este de San José. No se desarrolla sobre la zona de charnela de ningún pliegue y presenta una orientación de N 122°-132°, B: 35°-45° SW.
- Sinclinal Sheila: se ubica paralela a 150m. aprox al este de Cecilia. La orientación de su plano axial es N 298°, volcado hacia el NE alcanzando su buzamiento una inclinación

de 80°. Su eje presenta inmersión de 8° hacia el SE. Su estilo estructural es del tipo chevrón.

- Alberga a la estructura mineralizada que lleva su mismo nombre cuya orientación es: R: 312°-332°, B: 62°-74°.
- Anticlinal Andrea: se ubica paralela a 75m. aprox al este de Sheyla. La orientación de su plano axial es N 296°, volcado hacia el NE en el lado sureste con 82° y SW en el lado Noroeste con 84°. Su eje presenta inmersión de 10° hacia el sureste. Su estilo estructural es del tipo chevrón.
- Alberga a la estructura mineralizada que lleva su mismo nombre cuya orientación es: R: 300°-307°, B: 67°-75° NE.

3.7.2.3 Sección transversal y columna estratigráfica

Figura 2 Sección transversal y columna estratigráfica



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.7.2.4 Secuencia sedimentaria

La secuencia sedimentaria del área local está constituida por rocas clástica, habiéndose observado en afloramiento o determinadas mediante sondajes, se ha considerado como área local unos 500 metros alrededor del proyecto de tajo. Estratigráficamente están constituidas por la formación Santa con facies lutitas negras, la formación Carhuaz constituido tres facies: arenisca/limolita, lutita/arenisca y limolita, la formación Farrat con facies arenisca, además se ha observado cuerpos intrusivos de naturaleza intermedia y acida. La columna litoestratigrafica local donde se muestra las citadas unidades litoestratigráficas con sus facies correspondientes, que es el mapa Litoestratigráfico local que a continuación se detalla por su comportamiento estructural en algunos lugares puede alcanzar mayor o menor grosor.

3.7.2.5 Formacion Farrat

La formación Farrat aflora en el cerro Choloque y en el extremo Este del proyecto de tajo Shahuindo, estratigráficamente es el nivel más alto del proyecto de tajo, caracterizado por su litología que consta de arenisca de cuarzo blanquecinas de grano grueso a medio con morfología dura lo que permite la formación de las partes altas de los cerros, pero de menor intensidad que la formación Chimú. En el área de proyecto de tajo solo se ha diferenciado la facies de arenisca porque estratigráficamente estamos en la base de la formación Farrat, aunque se puede diferenciar otras 2 facies en los niveles medio a superior de la citada unidad.

3.7.2.6 Pórfido feldespático débilmente e inalterado

De color gris oscuro, contiene 10-20 por ciento de fenocristales de plagioclasas, biotita fina de grano medio y en menor cantidad fenocristales de feldespato potásico. La matriz consiste en una masa fundamental feldespática que puede alcanzar un 75 por ciento del tipo de roca. Un cuerpo intrusivo de este tipo está ubicado en la zona de Cerro Redondo, tiene una edad de 25 millones de años (Amireault, 2009).

3.7.2.7 Pórfido de cuarzo – feldespato alterado

Tamaño de grano medio a grueso, comúnmente con alteración hidrotermal: Serícita y arcillas. La intensidad de la alteración es variable y a menudo destruye la textura original de la roca. Fenocristales de cuarzo por lo general comprenden de 5 a 15 por ciento de la roca y se presentan como ojos redondeados de cuarzo que pueden medir hasta 10 milímetros de diámetro. Los feldespatos están comúnmente argilizados y / o sericitizados. Existen variaciones texturales observadas en las unidades del pórfido, varias han sido interpretadas como múltiples fases intrusivas, pero también puede representar, en parte, la sobreimpresión hidrotermal. Un cuerpo de pórfido en el área de San José está fechada en 16 millones de años (Amireault, 2009).

3.7.2.8 Intrusivo félsico carbonatado alterado (sin datación)

Un cuerpo de intrusivo félsico carbonatado alterado se ha localizado en el extremo noroeste del anticlinal de Algamarca, en el centro de la anomalía de zinc. Cuerpos de brechas sedimentarias están expuestos en la parte central del Proyecto. Las brechas se caracterizan por presentar clastos heterolíticos de sedimentos alterados y cuarcitas. La matriz de la brecha oxidada es porosa, y dominada por hematita, en ocasiones con manchas de cuarzo y sulfuros los que en ocasiones han sido remplazados por limonita.

3.8. Geología general del yacimiento Shahuindo

3.8.1 Introducción

El distrito Shahuindo ocurre dentro de la franja de pliegues escurridos del Eoceno del norte del Perú formadas durante la orogenia Incaica II hace ~43 Ma. El distrito ocurre a largo de una franja localizada de intrusiones del Mioceno (~16 Ma) que es mayormente paralela a la tendencia estructural dominante en la franja de pliegues escurridos. La mineralización parece haberse formado en asociación con magmatismo dacítico a riolítico y emplazamiento de brechas diatrema de relativa alta energía.

Cinco fases intrusivas no brechadas y tres fases intrusivas con brechas están reconocidas. Tres principales centros intrusivos están presentes en el distrito: 1) a lo largo de la

franja principal mineralizada Shahuindo, 2) al oeste del área Corredor Norte, y 3) en la Zona de Anomalía de Zinc. Cada centro intrusivo está caracterizado por cuerpos de diatrema o brecha heterolítica que es de emplazamiento posterior al pórfido dacítico y andesita.

La mejor evidencia mapeable de mineralización en rocas oxidadas e intemperizadas en superficie incluyen la presencia de vacíos y moldes de cristal posterior a la piritita y otros sulfuros (especialmente cuando el contenido original de piritita está estimado ser $>10\%$), y la presencia de arcilla blanca cristalina o sericita. Las evidencias de campo indican que importantes controles en mineralización incluyen flancos de pliegues y superficies axiales de pliegues, fracturas asociadas a pliegues, fallas y fracturas relacionadas a extensión, cuerpos de brechas irregulares y diques debrechas, y contactos ígneos intrusivos.

La principal zona mineralizada en Shahuindo incluye la falla San José y ocurre en una franja alineada NW entre dos pliegues de gran amplitud y escala regional, el anticlinal recto Algamarca y el anticlinal tumbado Pampa de Arena. Estos pliegues forman un gran anticlinorio o estructura cajón-pliegue que tiene una excepcional franja de afloramiento con ancho entre dos sinclinales a escala regional. Es hipotético que el pliegue Algamarca formado sobre el extremo de una falla de propagación que se desprende de un detachment principal, y que este ensanchamiento fue localizado encima de una falla normal de arquitectura de cuenca en el basamento. La ubicación de la falla San José, y de esta manera el corredor principal Shahuindo, es hipotetizada a estar bien controlada por la falla de basamento con rumbo NW que además controlaría la orientación de estructuras en la franja de pliegues escurridos. Esta falla normal fue reactivada en el Mioceno y controlaría la intrusión del pórfido dacítico, el complejo de brechas adyacentes y mucho de la mineralización a lo largo del corredor Shahuindo.

La mineralogía de sulfuros y alteración asociada indican que el distrito Algamarca-Shahuindo es un sistema epitermal tipo cordillerano polimetálico tal como Tantahuatay o Colquijirca. En particular, Shahuindo pertenece a una sub-clase de este tipo de yacimientos,

primero descrito por Montoya y otros (1995) y referido como yacimientos de oro hospedado en areniscas. Mineralización de pirita tetraedrita-tenantita-covelita está asociada con un ensamble de alteración temprana de alunita pirofilita-diáspora y es cortada por venillas de pirita, esfalerita, galena y estibina asociada con cuarzo-illita. La mineralización de oro en el corredor principal en Shahuindo parece estar asociada con el evento posterior cuarzo-illita.

3.8.2 Tipo de yacimiento

La evidencia de campo sugiere que la mineralización de Shahuindo pertenece al depósito tipo epitermal de oro (Guilbert y Park, 1986; Hedenquist et al, 1999, 2000. White y Hedenquist de 1995, y Taylor, 2007).

En general, este tipo depósito se componen de disseminaciones y venas controladas a nivel estructural y estratigráfica, dentro de un ambiente de poca profundidad (menos de 1.5 kilómetros). La mineralización está dominada por el oro y la plata, aunque también existen cantidades variables de cobre, plomo y zinc hacia zonas más profundas.

La definición, alteración, mineralización y las características del yacimiento Shahuindo son consistentes con un sistema epitermal de intermedia a alta sulfuración-(Hedenquist et al., 2000). La alteración se produce generalmente en forma de sílice, pirofilita y sericita, aunque ocurrencias menores de minerales indicativas de alta sulfuración fueron observados por (Hodder, 2010a). El depósito carece de la enargita característica de los sistemas de alta sulfuración y no tiene la adularia, diagnóstico de los sistemas de baja sulfuración, por lo que se cree que estos indicativos solo ocurren en ambientes volcánicos.

3.8.3 Origen del yacimiento

En la fase Quechua I (23 Ma), se desarrollan grabens y horsts, intrusiones calcoalcalinas e intermedias (Pórfidos diorítico y dacítico), que marcan el inicio de la evolución de centros del tipo pórfidos y resurgencias que generan la mineralización Etapa II (Metales preciosos) en sistemas epitermales San José y Minas Azules (NW-SE).

Se estima que la actividad magmática-hidrotermal que generó la mineralización en el distrito de Shahuindo tuvo lugar en el Mioceno.

3.8.4 Minerales

Las evidencias de alteración y mineralización están en superficie asociadas a rocas oxidadas y en reducción. Las observaciones se encuentran a continuación:

3.8.4.1 Zona de óxidos

En esta zona, la oxidación está asociado a jarosita, hematita y goetita, estos óxidos son el producto de la alteración supérgena de sulfuros primarios tales como pirita, esfalerita, tetraedrita, galena y covelita, el oro se libera mediante este proceso y ocurren como disseminaciones y rellenando fracturas.

3.8.4.2 Óxidos de hierro

Se encuentran en la parte superior del depósito, que es el resultado de la alteración de los sulfuros, entre ellos la pirita y sulfosales, en el entorno cercano a la superficie (Bob Hodder, 2010a). Los contenidos de pirita aumentan a lo largo del Este-Sureste en la zona de recursos, (Figura 3A, 3B).

Figura 3 Arenisca y venillas



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 4 Cristales de pirita



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.4.3 Jarosita

($\text{KFe}_3 + 3 (\text{OH})_6 (\text{SO}_4)_2$), formado en ambientes ácidos por lo general debido a la oxidación de sulfuros de hierro, alojados en rocas próximos a la superficie. La jarosita se produce en forma de venas, venillas y como relleno en matriz de brechas, que a su vez poseen una buena correlación entre la mineralización.

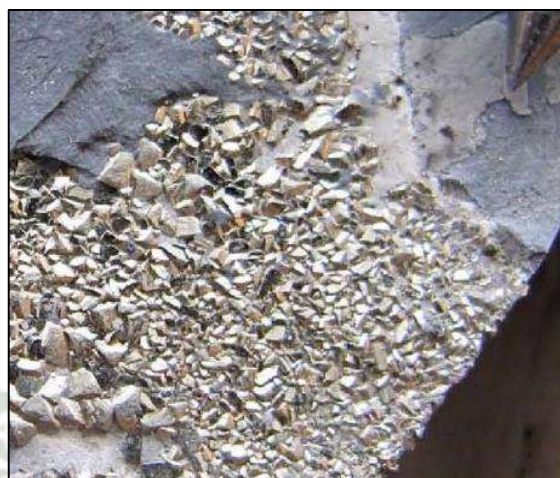
3.8.4.4 Escordita

($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): Ubicado en la parte este-sureste de la zona de recursos.

3.8.4.5 Hematita

(Fe_2O_3), este mineral se encuentra en la matriz de los cuerpos de brechas sedimentarias, en ocasiones reemplazados por limonita. Estas evidencias se encuentran en la parte central del depósito.

Figura 5 Venillas de arenisca



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.4.6 Cuarzo

La mineralización en zona principal de la propiedad Shahuindo se caracteriza por la presencia de vetillas milimétricas de cuarzo que localmente gradan a zonas estrechas de brecha. Se presentan en cristales euhedrales en forma de drusas. Las drusas de cuarzo euhedral correlaciona con mineralización de oro y se extiende más allá del área de recursos. La silicificación con textura similar a la cuarcita, se observa solamente en areniscas, y se cree que está en función de la porosidad original y la permeabilidad de estos horizontes.

Figura 6 Areniscas, venillas de cuarzo



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Se ha realizado un estudio de minerales de alteración hidrotermal como la arcilla. Estudio petrográfico por el Pima en secciones delgadas, que fue completado por Hodder (2010a). Seguido de un estudio de Terraspec realizado por R. Sánchez (2012), aplicado en muestras del taladro, los cuales concluyeron en:

- La alteración hidrotermal parece generar una transformación de las micas, de Fe-Mg (phengite) a una mica sódica (paragonita) a otra potásica (illita-moscovita). Un conjunto de minerales aluminosos (pirofilita, diáspora, alunita) también están presentes con moscovita en la parte sureste del yacimiento.
- Las tendencias de sureste a noroeste a través del depósito, existe un vector de alteración desde: sílice pirofilita, paragonita sílice, paragonita, illita-moscovita. Estos conjuntos son indicativos de una tendencia general de mayor temperatura y un pH más bajo de sureste a noroeste.
- La intrusión muestra un conjunto formado por illita-caolinita

3.8.4.7 Pirofilita

Se encuentra en la zona Este y Moyan Alto, es de grano fino, se presenta diseminada y en venillas, es de color blanco y crema, asociada principalmente al vector principal de la mineralización (eje del anticlinal San José), conjuntamente con sílice gris forman el ensamble más importante para la mineralización de Au, Ag y Cu.

3.8.5 Zona de sulfuros

3.8.5.1 Pirita gruesa cristalizada

Este tipo de origen singenético, básicamente se expone en la formación santa y en algunos niveles lutáceos carbonosos de la formación Carhuáz. Tienen su origen en acumulación de material orgánico en cuenca donde se formaron estas rocas. Asociado a un ambiente

anaeróbico, lo cual la falta de oxígeno hace que la materia orgánica se reduzca formado pirita.

Las características de esta pirita son cristales desarrollados, de color blanco latón, muchas veces se puede observar paralelo a la laminación de las rocas.

Figura 7 Pirita gruesa



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.5.2 Pirita fina negra terrosa

Este evento está asociada a una serie de sulfosales y sulfuros como galena, esfalerita; estas evidencias ocurren desde la línea 500W hacia el oeste. Este evento es importante para la mineralización de metales base, asociado al evento mineralizador de la antigua mina Algamarca Ag-Cu.

Figura 8 Pirita diseminada



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

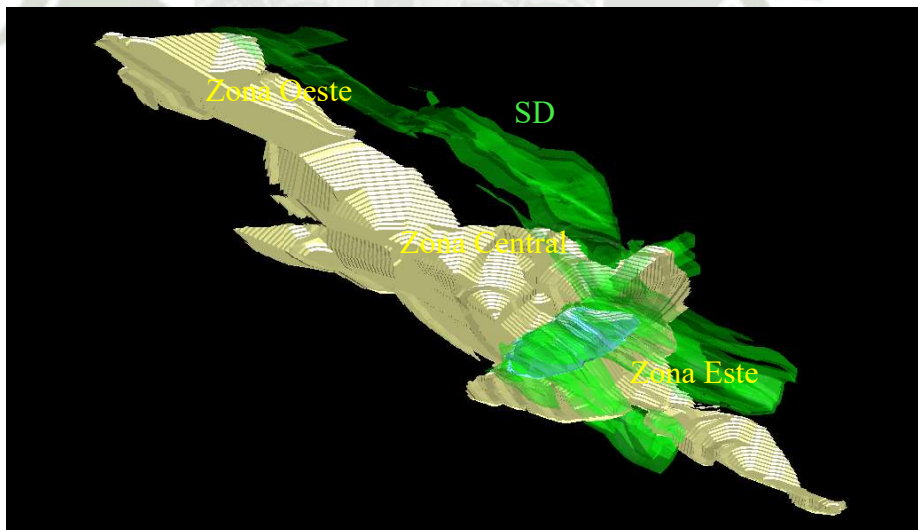
3.8.5.3 Pirita fina masiva

Un tercer evento que es el más importante para la mineralización de oro, es la pirita fina masiva, la mineralización de oro en la zona de sulfuros ocurre asociado a este evento de pirita.

3.8.5.4 Areniscas cuarzosas

De acuerdo al tajo, sus afloramientos se ubican en la zona de Huangamarca (Start Pit). Litológicamente están constituido por areniscas de cuarzo de grano medio a grueso >90%, blanquecinos con estratificación laminar a oblicua indicándonos su posición normal de las capas, el grosor de los estratos va desde 20 y 30 centímetros hasta más de 1 metro, estos horizontes muestran leves intercalaciones con niveles de limolitas blanquecinas algo laminares. El grosor de los paquetes de ésta unidad debe estar alrededor de los 30-35 metros mientras que el grosor de toda la formación Farrat está por los 500 metros.

Figura 9 Areniscas cuarzosas presentes en la UM



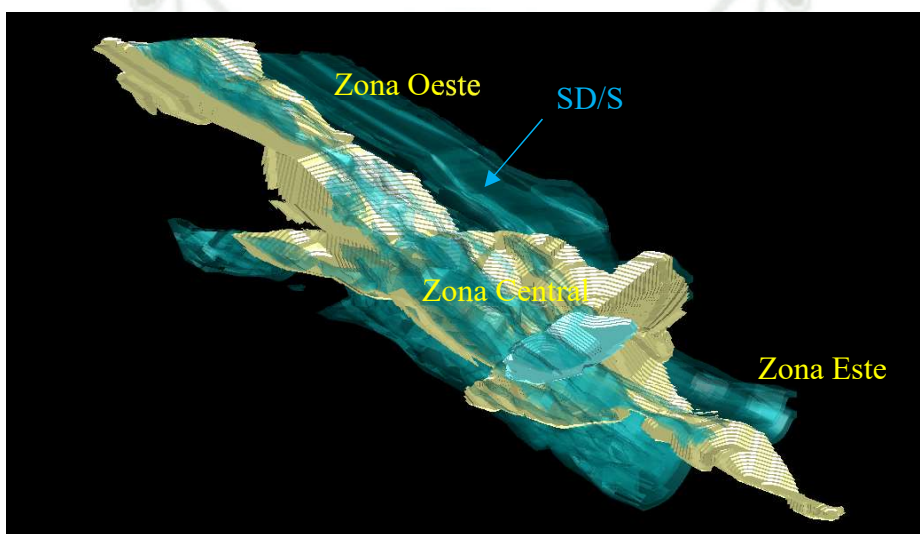
Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.5.5 Arenisca/limonita

Esta unidad muestra importantes afloramientos en la zona Este y Central, aunque este último esta mayormente cubierto por coluvios, dicha unidad tiene una mayor amplitud en grosor

y distribución. Litológicamente se caracteriza por la intercalación de areniscas gris amarillenta a marrón clara de grano medio a fino, intercalado con niveles de limolitas. Los contenidos de areniscas de Qz van en el orden de un $>60\%$. El grosor de estas 2 unidades correspondientes a la formación Carhuáz, identificado de acuerdo a sondajes, está alrededor de los 20-30 metros, aunque también muestra una variación de grosor por razones de plegamiento.

Figura 10 Arenisca / limonita presentes en la UM



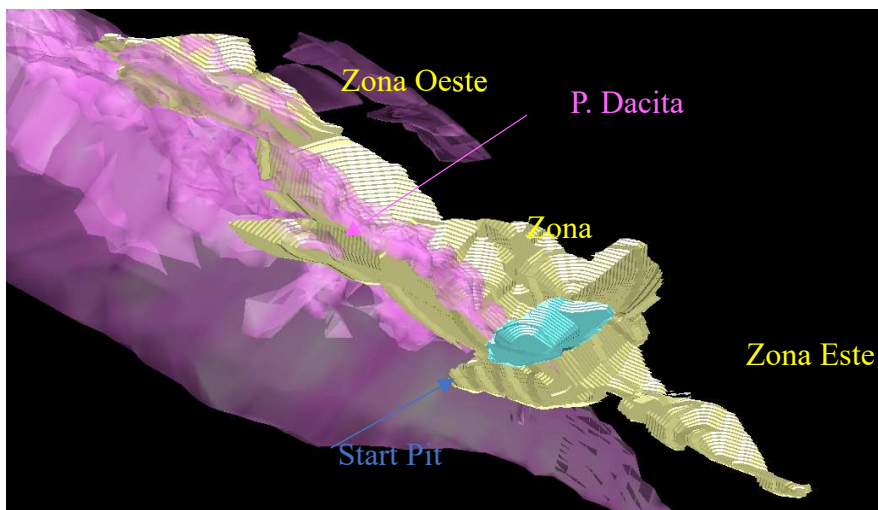
Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.5.6 Dacita porfírica (FPD)

Esta es la intrusión más extendida en la zona del tajo Shahuindo, caracterizado siempre por su argilización. Esta roca muestra contenidos modales de cuarzo en cristales bipiramidales y otros a manera de ojos de hasta un centímetro, por lo general comprenden de 5 a 15 por ciento de la roca, además de fenocristales de biotita y plagioclasa en una masa afanítica. Este cuerpo de dacita porfírica, muestra una mayor exposición a manera de un stock en la parte Oeste de la zona del tajo y disminuye hacia la zona Central en una serie de diques hasta desaparecer finalmente por debajo de la cubierta de la zona Este.

Hacia la margen Este fuera de la zona del tajío, también se muestran estas intrusiones, los cuales se emplazan a manera de sills concordantes a las capas del Carhuáz – Farrat

Figura 11 Dacita porfírica presente en la UM

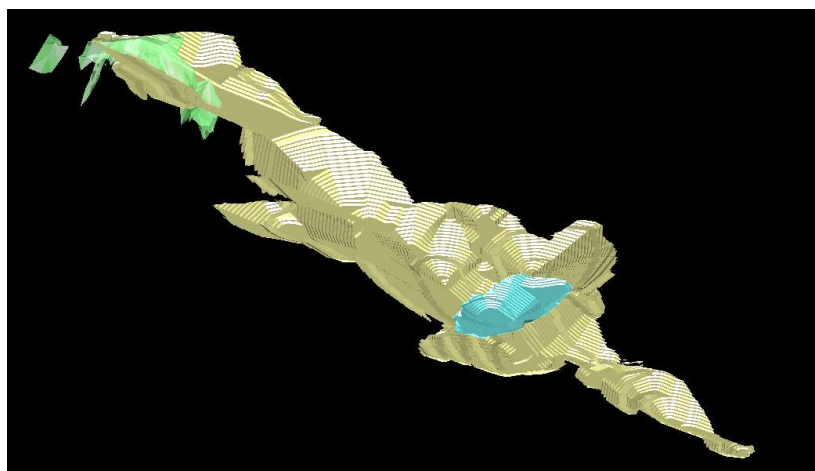


Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.5.7 Brecha monolítica de Arenisca

Sus exposiciones muestran cuerpos estrechos parecidos a diques, con clastos subangulares mayores a 2 cm en diámetro de areniscas, en una matriz de clastos líticos de grano fino y arcillas. La ubicación de este cuerpo está únicamente en la Zona Oeste; esta brecha sedimentaria muestra una mineralización dependiente de las cantidades dísectantes de canales de brecha hidrotermal.

Figura 12 Brecha monolítica de arenisca presente en la UM

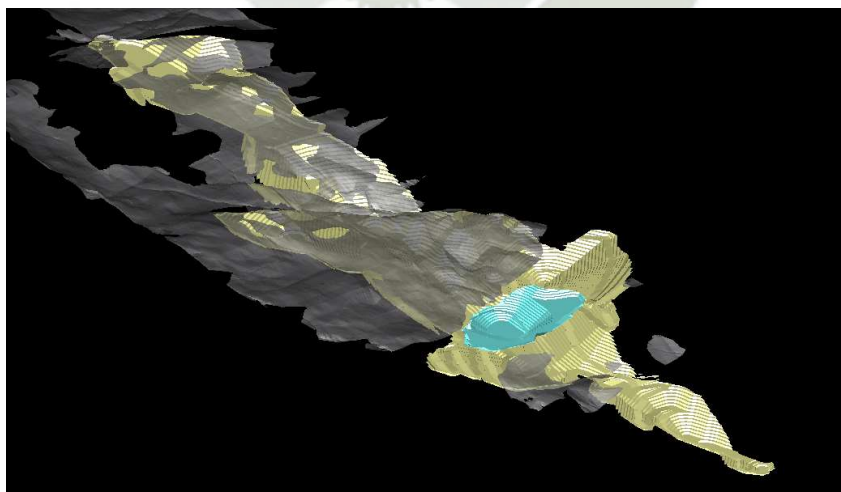


Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.5.8 Cobertura coluvial (Q)

El material grueso coluvial puede llegar de uno a más de 50 metros de espesor y está presente en varias partes de la zona del tajo, en especial de la parte central cubierto por un manto coluvial derivado en parte de la meteorización de la roca subyacente y en parte de material derivado del anticlinal de Algamarca.

Figura 13 Cobertura coluvial



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.6 Descripción de cada una de las estructuras mineralizadas

3.8.6.1 Sistema NW, N125°

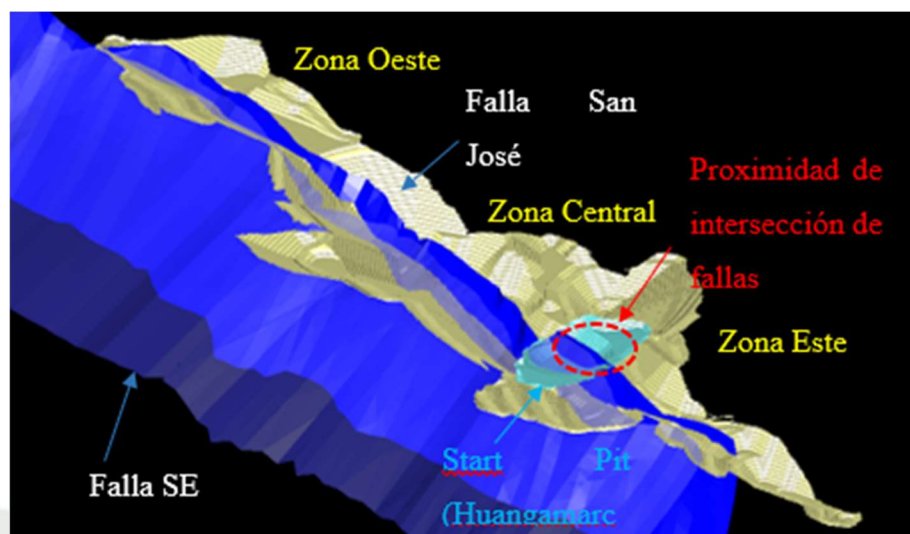
Es el más importante, porque se asocia al periodo de inversión tectónica y estructuración del sistema andino. Las principales fallas longitudinales NW-SE son:

Falla San José, N125, es la estructura más importante del proyecto, es considerada como el principal control de la mineralización en el sector, el cual ha sido reconocido con una longitud de 4 km. Dicha falla por el lado el NW marca el contacto entre las rocas intrusivas y los sedimentos de la Fm. Carhuáz, mientras que al SE presenta los sedimentos plegados de la Fm. Carhuáz, en general, constituye un anticlinal donde la mineralización principal está alojada en la charnela. A nivel local, este sistema ha sido afectado por pequeños desplazamientos causados por fallas ortogonales.

Falla SE, N125, esta estructura tiene mayor importancia en la zona de Huangamarca (Start Pit) y está definido como una estructura en imbricación de bajo ángulo, responsable del brechamiento de las unidades competentes, favoreciendo a la mineralización subsecuente.

La mayor concentración de la mineralización en la zona de Huangamarca (Start Pit), ocurre justo en la proximidad de la intersección de estas 2 fallas.

Figura 14 Falla San José y SE



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.6.2 Sistema NE, N35°

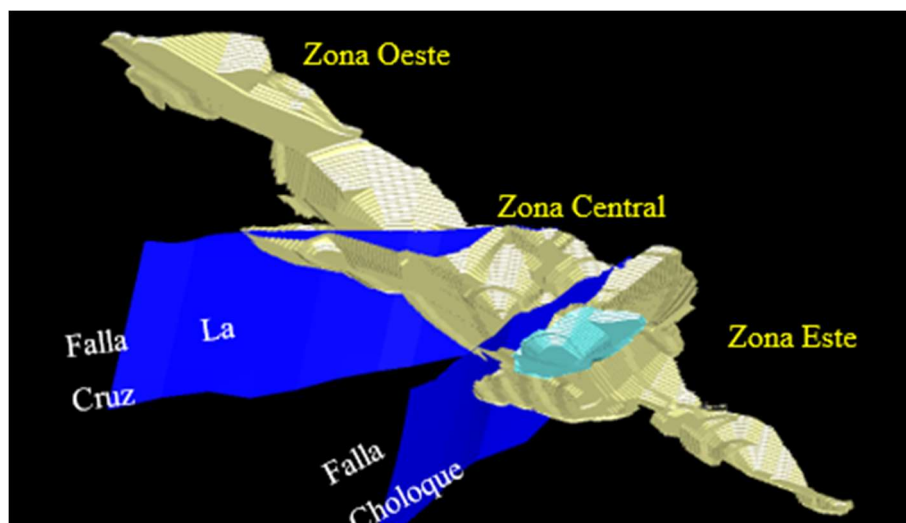
Este sistema de fallas está relacionado con los movimientos verticales, formando bloques levantados y hundidos, las principales fallas transversales reconocidas son las siguientes:

La Cruz, tiene una tendencia N40E, buzamiento al SE, secciona al anticlinal Algamarc hundiendo el lado sur del mencionado anticlinal, en la zona central limita las intrusiones.

Falla Choloque, tiene un rumbo N20E, forma parte del control estructural de la mineralización en San José, marca el límite entre las zonas Central y Este del proyecto, es la evidencia más clara del sistema de movimientos de bloques subverticales; entre esta falla y la Cruz existe un bloque hundido en donde la secuencia sedimentaria Carhuáz está parcialmente erosionada, lo que ha sido probado según lo indicado en los sondajes realizados, principalmente porque no hay muchos afloramientos, mientras que los sedimentos al Este de la falla se conservan mejor.

Una serie de fracturas de tensión o "extensional" se han generado como resultado del estrés compresional SW- NE, que actúa sobre un conjunto de estratos competentes como las areniscas cuarzosas de la formación Farrat en la Zona Este.

Figura 15 Falla la Cruz y Choloque



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

3.8.6.3 Sistema N-S, N0°

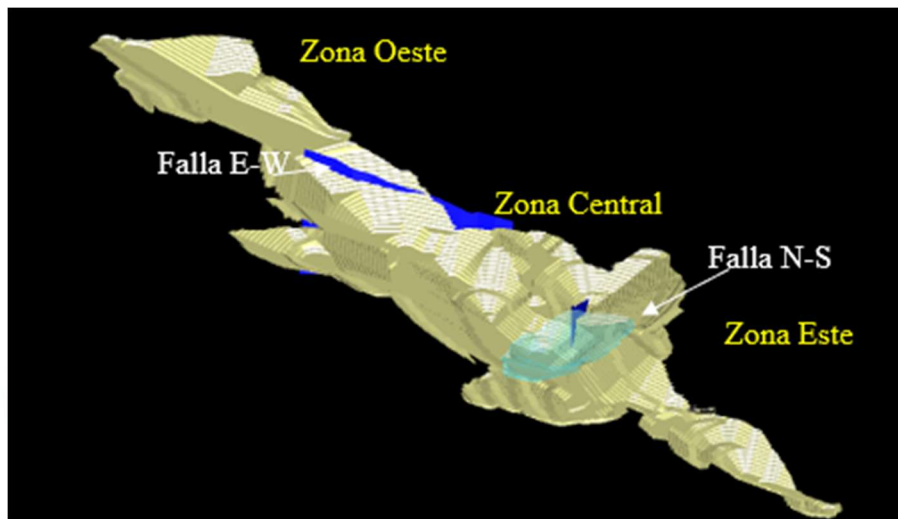
Este dominio ha sido reconocido en la margen Este de la falla Choloque (zona Este), posiblemente correspondiente a un sistema conjugado de la misma, se caracteriza por la presencia de brechas hidrotermales con fragmentos de areniscas cuarzosas en una matriz con óxidos de hierro, de acuerdo con la interpretación de las perforaciones realizadas, ha tomado mucho interés por los resultados obtenidos, se debe considerar como una estructura independiente del dominio NW-SE.

3.8.6.4 Sistema E-W, N90°

Su importancia radica en la formación de estructuras conjugadas que permiten una mayor concentración de la mineralización, además como una estructura limitante del sistema principal. Evidencia de lo indicado, se encuentra en el cuerpo San José y Cerro Coshpío, en este

sector el dominio estructural marca un cambio en la dirección de la mineralización de NW-SE pasa localmente a E-W.

Figura 16 Fallas N-S y E-W



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

En resumen, la ubicación del anticlinal San José, y por lo tanto del corredor principal Shahuindo, está bien controlada por la falla de basamento de rumbo NW, N125° que además controla la orientación de estructuras en la franja de plegamiento-escurrimiento.

Los “ore shoots” de más alta ley, muestran generalmente un fuerte control estructural, donde estos están controlados por fallas transversales de rumbo N-S, NE, y E-W, las cuales son secantes a la falla principal de orientación N125°.

Dentro de la concepción de este modelo, se refiere a la presencia de ambas fallas como importantes para la generación de un ore shoot, el paso de los fluidos hidrotermales ha sido favorable en dichas zonas de intersección estructural.

CAPÍTULO IV



4.RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis de las variables operacionales

Durante la elaboración del presente trabajo de investigación se tomó como referencia el segundo y tercer trimestre de operación de la Mina Shahuindo, considerando las voladuras de abril, mayo y junio (escenario anterior) y julio, agosto y septiembre del 2024 como (escenario después).

4.2. Descripción de las pruebas experimentales

Se realizará implementándola optimización de la fragmentación para aumentar la producción con las voladuras del tercer trimestre, con lo cual ayudará al aumento del rendimiento de la trituración con una disminución de su Ciclo ROM por hora al tener menor esfuerzo en triturar el material voladura debido a la menor fragmentación. Ajustar los parámetros de voladura y basándose en los resultados obtenidos para maximizar la producción.

Tabla 3

Parámetros del segundo trimestre

Mes	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
Mes 1	1,461.60	0.570	5.303	0.167	0.829
Mes 2	1.459.39	0.570	5.284	0.168	0.830
Mes 3	1,469.00	0.572	5.271	0.167	0.828
Total	1,463.29	0.571	5.287	0.167	0.829

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y %

Recuperación de los meses de abril, mayo y junio del 2024.

Tabla 4

Parámetros del tercer trimestre

Mes	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
Mes 1	1,696.81	0.507	4.293	0.187	0.869
Mes 2	1.693.74	0.510	4.279	0.189	0.872
Mes 3	1,687.33	0.508	4.313	0.188	0.870
Total	1,692.68	0.509	4.295	0.188	0.870

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y %

Recuperación de los meses de julio, agosto y septiembre del 2024

Tabla 5
Parámetros abril 2024

Fecha	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
01/04/2024	1,499.00	0.570	5.410	0.170	0.840
02/04/2024	1.448.00	0.570	5.230	0.168	0.830
03/04/2024	1,491.00	0.570	5.230	0.170	0.830
04/04/2024	1,462.00	0.580	5.320	0.165	0.840
05/04/2024	1,456.00	0.560	5.420	0.170	0.820
06/04/2024	1,426.00	0.560	5.280	0.168	0.830
07/04/2024	1,480.00	0.560	5.222	0.165	0.830
08/04/2024	1,454.00	0.560	5.390	0.164	0.840
09/04/2024	1,465.00	0.580	5.230	0.164	0.830
10/04/2024	1,488.00	0.580	5.370	0.168	0.820
11/04/2024	1,445.00	0.580	5.400	0.170	0.840
12/04/2024	1,427.00	0.570	5.290	0.169	0.820
13/04/2024	1,436.00	0.560	5.380	0.170	0.840
14/04/2024	1,444.00	0.570	5.370	0.171	0.820
15/04/2024	1,462.00	0.560	5.340	0.165	0.830
16/04/2024	1,461.00	0.570	5.420	0.168	0.830
17/04/2024	1,453.00	0.580	5.240	0.170	0.820
18/04/2024	1,480.00	0.570	5.330	0.171	0.820
19/04/2024	1,463.00	0.570	5.360	0.165	0.820

20/04/2024	1,478.00	0.570	5.410	0.168	0.830
21/04/2024	1,475.00	0.580	5.420	0.164	0.820
22/04/2024	1,468.00	0.580	5.170	0.161	0.840
23/04/2024	1,444.00	0.570	5.290	0.166	0.820
24/04/2024	1,479.00	0.560	5.170	0.164	0.830
25/04/2024	1,476.00	0.560	5.290	0.163	0.840
26/04/2024	1,449.00	0.570	5.170	0.164	0.830
27/04/2024	1,441.00	0.560	5.230	0.171	0.830
28/04/2024	1,500.00	0.570	5.340	0.165	0.830
29/04/2024	1,457.00	0.570	5.210	0.165	0.820
30/04/2024	1,453.00	0.560	5.400	0.171	0.840
Promedio	1,462.00	0.569	5.315	0.167	0.829

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y %

Recuperación de abril del 2024.

Tabla 6
Parámetros mayo 2024

Fecha	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
01/05/2024	1,493.00	0.560	5.420	0.170	0.840
02/05/2024	1.469.00	0.580	5.400	0.164	0.820
03/05/2024	1,459.00	0.570	5.340	0.164	0.840
04/05/2024	1,469.00	0.560	5.300	0.167	0.820
05/05/2024	1,425.00	0.580	5.220	0.171	0.820
06/05/2024	1,435.00	0.560	5.310	0.166	0.830
07/05/2024	1,457.00	0.560	5.270	0.164	0.830
08/05/2024	1,456.00	0.560	5.380	0.165	0.840
09/05/2024	1,474.00	0.580	5.240	0.166	0.830
10/05/2024	1,435.00	0.570	5.220	0.167	0.820
11/05/2024	1,471.00	0.560	5.190	0.166	0.830
12/05/2024	1,499.00	0.580	5.210	0.166	0.830
13/05/2024	1,466.00	0.560	5.360	0.163	0.840
14/05/2024	1,475.00	0.580	5.160	0.165	0.830
15/05/2024	1,498.00	0.570	5.300	0.166	0.830
16/05/2024	1,427.00	0.580	5.240	0.169	0.830
17/05/2024	1,466.00	0.580	5.340	0.164	0.830
18/05/2024	1,456.00	0.580	5.310	0.167	0.820
19/05/2024	1,500.00	0.570	5.400	0.170	0.840
20/05/2024	1,480.00	0.570	5.420	0.167	0.840
21/05/2024	1,483.00	0.560	5.380	0.170	0.840

22/05/2024	1,496.00	0.560	5.210	0.170	0.820
23/05/2024	1,447.00	0.570	5.300	0.164	0.830
24/05/2024	1,446.00	0.580	5.320	0.163	0.820
25/05/2024	1,431.00	0.560	5.350	0.166	0.840
26/05/2024	1,447.00	0.580	5.210	0.166	0.840
27/05/2024	1,438.00	0.580	5.410	0.165	0.830
28/05/2024	1,434.00	0.560	5.410	0.170	0.840
29/05/2024	1,481.00	0.570	5.150	0.165	0.820
30/05/2024	1,475.00	0.570	5.350	0.170	0.830
31/05/2024	1,433.0	0.570	5.380	0.170	0.840
Promedio	1,462.74	0.569	5.306	0.167	0.831

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y %
Recuperación de mayo del 2024.

Tabla 7*Parámetros junio 2024*

Fecha	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
01/06/2024	1,449.00	0.580	5.4340	0.165	0.840
02/06/2024	1.453.00	0.570	5.270	0.163	0.820
03/06/2024	1,437.00	0.560	5.160	0.167	0.820
04/06/2024	1,436.00	0.560	5.190	0.163	0.830
05/06/2024	1,481.00	0.560	5.370	0.167	0.820
06/06/2024	1,485.00	0.520	5.320	0.165	0.820
07/06/2024	1,436.00	0.560	5.330	0.170	0.830
08/06/2024	1,488.00	0.560	5.150	0.165	0.830
09/06/2024	1,483.00	0.560	5.250	0.163	0.820
10/06/2024	1,487.00	0.570	5.250	0.163	0.820
11/06/2024	1,470.00	0.570	5.150	0.168	0.830
12/06/2024	1,476.00	0.560	5.280	0.163	0.830
13/06/2024	1,435.00	0.560	5.270	0.166	0.820
14/06/2024	1,457.00	0.580	5.210	0.170	0.840
15/06/2024	1,500.00	0.570	5.200	0.169	0.840
16/06/2024	1,472.00	0.570	5.400	0.170	0.840
17/06/2024	1,453.00	0.560	5.560	0.171	0.840
18/06/2024	1,484.00	0.580	5.270	0.168	0.830
19/06/2024	1,456.00	0.560	5.260	0.169	0.830
20/06/2024	1,426.00	0.560	5.330	0.165	0.840
21/06/2024	1,428.00	0.570	5.330	0.169	0.840

22/06/2024	1,431.00	0.560	5.320	0.163	0.830
23/06/2024	1,451.00	0.580	5.400	0.163	0.840
24/06/2024	1,428.00	0.580	5.260	0.171	0.830
25/06/2024	1,491.00	0.560	5.330	0.171	0.820
26/06/2024	1,492.00	0.570	5.410	0.163	0.840
27/06/2024	1,437.00	0.580	5.260	0.168	0.820
28/06/2024	1,434.00	0.560	5.370	0.170	0.840
29/06/2024	1,500.00	0.570	5.400	0.169	0.820
30/06/2024	1,432.00	0.560	5.290	0.170	0.830
Promedio	1,459.60	0.567	5.284	0.167	0.830

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y %
Recuperación de junio del 2024.

Tabla 8
Parámetros julio 2024

Fecha	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
01/07/2024	1,704.00	0.520	4.220	0.192	0.880
02/07/2024	1.721.00	0.500	4.310	0.183	0.860
03/07/2024	1,716.00	0.500	4.250	0.183	0.880
04/07/2024	1,691.00	0.500	4.200	0.183	0.880
05/07/2024	1,677.00	0.520	4.310	0.183	0.880
06/07/2024	1,660.00	0.500	4.350	0.190	0.870
07/07/2024	1,724.00	0.510	4.290	0.190	0.880
08/07/2024	1,721.00	0.510	4.380	0.191	0.880
09/07/2024	1,724.00	0.520	4.310	0.188	0.860
10/07/2024	1,702.00	0.510	4.400	0.187	0.880
11/07/2024	1,660.00	0.510	4.220	0.190	0.870
12/07/2024	1,702.00	0.510	4.390	0.192	0.860
13/07/2024	1,729.00	0.520	4.330	0.189	0.860
14/07/2024	1,400.00	0.510	4.350	0.192	0.860
15/07/2024	1,671.00	0.510	4.220	0.192	0.860
16/07/2024	1,681.00	0.510	4.200	0.186	0.860
17/07/2024	1,715.00	0.520	4.360	0.187	0.880
18/07/2024	1,667.00	0.500	4.410	0.183	0.860
19/07/2024	1,712.00	0.520	4.300	0.188	0.880
20/07/2024	1,687.00	0.500	4.280	0.188	0.870
21/07/2024	1,704.00	0.520	4.310	0.185	0.880

22/07/2024	1,699.00	0.520	4.390	0.190	0.860
23/07/2024	1,673.00	0.520	4.290	0.185	0.880
24/07/2024	1,720.00	0.500	4.210	0.189	0.860
25/07/2024	1,697.00	0.520	4.220	0.185	0.880
26/07/2024	1,732.00	0.520	4.350	0.187	0.860
27/07/2024	1,723.00	0.500	4.270	0.190	0.870
28/07/2024	1,691.00	0.520	4.210	0.189	0.880
29/07/2024	1,663.00	0.520	4.270	0.186	0.860
30/07/2024	1,662.00	0.500	4.380	0.185	0.860
31/07/2024	1,678.00	0.500	4.220	0.187	0.860
Promedio	1,696.97	0.511	4.297	0.188	0.870

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y % Recuperación de junio del 2024.

Tabla 9
Parámetros agosto 2024

Fecha	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
01/08/2024	1,731.00	0.510	4.310	0.184	0.860
02/08/2024	1.657.00	0.500	4.270	0.184	0.870
03/08/2024	1,658.00	0.510	4.300	0.192	0.870
04/08/2024	1,689.00	0.520	4.380	0.186	0.870
05/08/2024	1,652.00	0.520	4.250	0.189	0.880
06/08/2024	1,700.00	0.520	4.250	0.183	0.860
07/08/2024	1,719.00	0.500	4.340	0.192	0.870
08/08/2024	1,721.00	0.520	4.250	0.186	0.880
09/08/2024	1,722.00	0.510	4.410	0.191	0.870
10/08/2024	1,729.00	0.510	4.350	0.188	0.870
11/08/2024	1,660.00	0.510	4.410	0.185	0.870
12/08/2024	1,688.00	0.520	4.280	0.189	0.860
13/08/2024	1,663.00	0.500	4.350	0.186	0.860
14/08/2024	1,730.00	0.500	4.270	0.187	0.860
15/08/2024	1,721.00	0.510	4.370	0.184	0.860
16/08/2024	1,688.00	0.510	4.300	0.184	0.880
17/08/2024	1,666.00	0.500	4.360	0.183	0.870
18/08/2024	1,655.00	0.510	4.240	0.189	0.880
19/08/2024	1,676.00	0.520	4.280	0.187	0.880
20/08/2024	1,661.00	0.500	4.230	0.187	0.880
21/08/2024	1,688.00	0.500	4.400	0.183	0.880

22/08/2024	1,704.00	0.510	4.260	0.188	0.870
23/08/2024	1,680.00	0.510	4.370	0.192	0.870
24/08/2024	1,694.00	0.520	4.320	0.189	0.880
25/08/2024	1,686.00	0.520	4.200	0.183	0.870
26/08/2024	1,727.00	0.500	4.220	0.186	0.860
27/08/2024	1,664.00	0.520	4.390	0.186	0.860
28/08/2024	1,663.00	0.500	4.210	0.183	0.860
29/08/2024	1,712.00	0.500	4.210	0.191	0.870
30/08/2024	1,688.00	0.520	4.240	0.190	0.880
31/08/2024	1,702.00	0.510	4.280	0.191	0.880
Promedio	1,690.13	0.510	4.300	0.187	0.870

Nota.. Elaboración propia

Análisis

Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y % Recuperación de agosto del 2024.

Tabla 10
Parámetros setiembre 2024

Fecha	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
01/09/2024	1,651.00	0.520	4.380	0.187	0.870
02/09/2024	1.666.00	0.500	4.400	0.189	0.880
03/09/2024	1,701.00	0.510	4.280	0.189	0.870
04/09/2024	1,703.00	0.500	4.210	0.192	0.880
05/09/2024	1,690.00	0.510	4.310	0.184	0.870
06/09/2024	1,705.00	0.520	4.300	0.185	0.880
07/09/2024	1,661.00	0.520	4.360	0.190	0.880
08/09/2024	1,651.00	0.510	4.300	0.187	0.870
09/09/2024	1,680.00	0.510	4.290	0.188	0.870
10/09/2024	1,679.00	0.520	4.350	0.191	0.870
11/09/2024	1,674.00	0.510	4.260	0.186	0.870
12/09/2024	1,661.00	0.520	4.290	0.191	0.860
13/09/2024	1,689.00	0.500	4.270	0.188	0.860
14/09/2024	1,663.00	0.500	4.410	0.192	0.870
15/09/2024	1,684.00	0.500	4.310	0.187	0.870
16/09/2024	1,664.00	0.510	4.260	0.185	0.870
17/09/2024	1,671.00	0.500	4.300	0.191	0.860
18/09/2024	1,703.00	0.500	4.350	0.187	0.880
19/09/2024	1,686.00	0.500	4.290	0.192	0.860
20/09/2024	1,677.00	0.510	4.300	0.185	0.870
21/09/2024	1,713.00	0.520	4.350	0.192	0.860

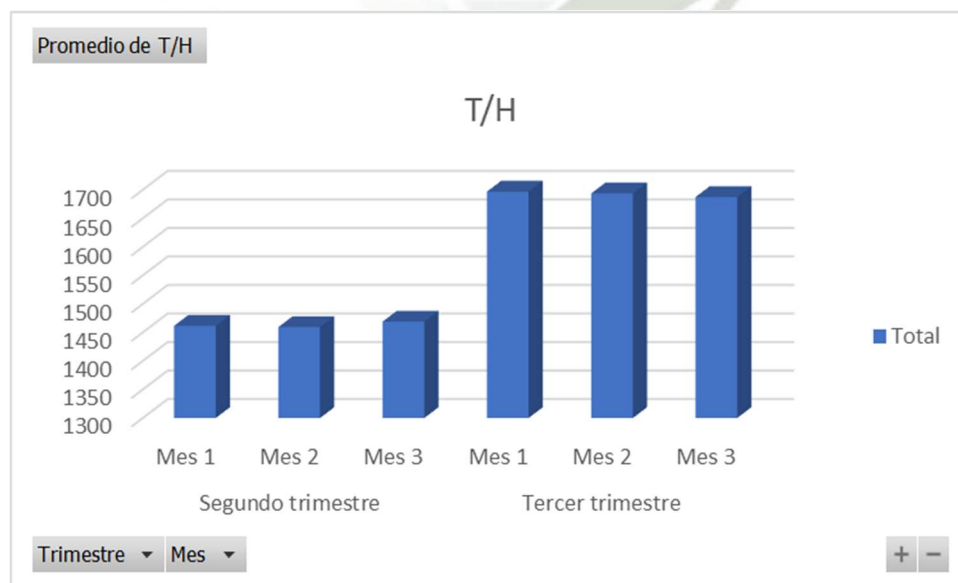
22/09/2024	1,727.00	0.520	4.250	0.189	0.860
23/09/2024	1,693.00	0.500	4.350	0.190	0.880
24/09/2024	1,656.00	0.500	4.300	0.188	0.860
25/09/2024	1,700.00	0.510	4.230	0.189	0.870
26/09/2024	1,713.00	0.510	4.320	0.189	0.870
27/09/2024	1,725.00	0.500	4.200	0.187	0.880
28/09/2024	1,673.00	0.510	4.270	0.184	0.880
29/09/2024	1,705.00	0.500	4.260	0.188	0.870
30/09/2024	1,702.00	0.510	4.380	0.192	0.880
Promedio	1,685.53	0.508	4.304	0.188	0.871

Nota.. Elaboración propia

Análisis

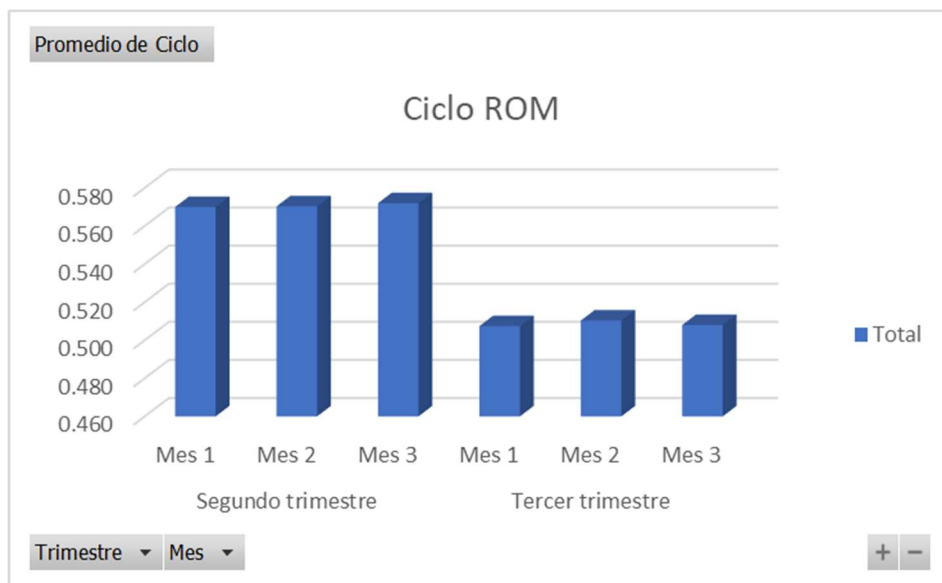
Parámetros de producción, Ciclo ROM, fragmentación, factor de potencia y % Recuperación de setiembre del 2024.

Figura 17 Producción de los meses del segundo y tercer trimestre del 2024



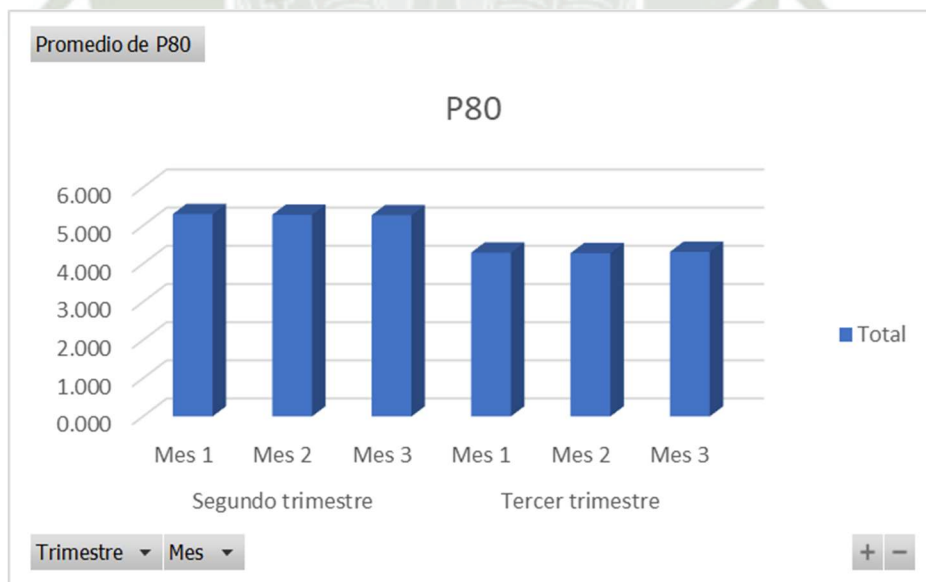
Nota.. Elaboración propia

Figura 18 Ciclo ROM mensual del segundo y tercer trimestre del 2024



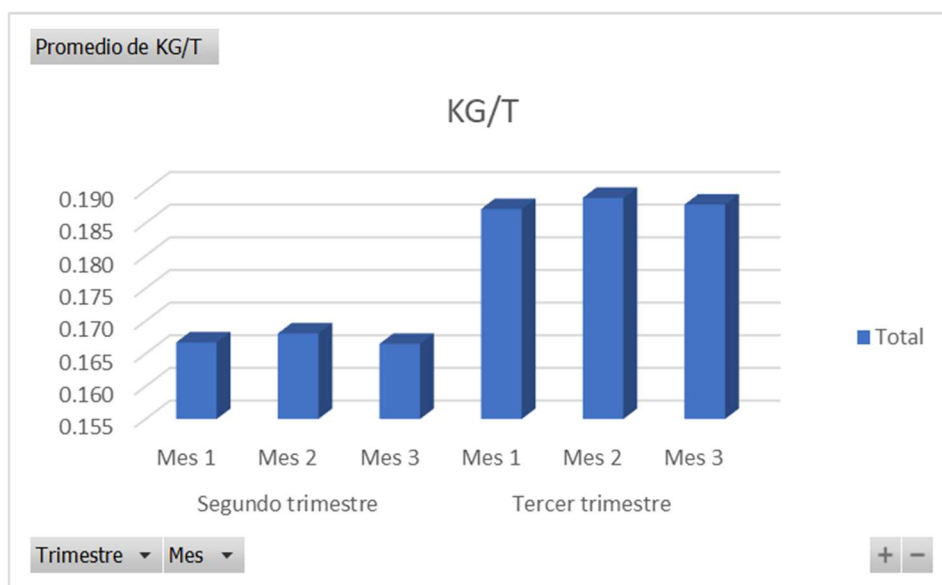
Nota.. Elaboración propia

Figura 19 Fragmentación mensual del segundo y tercer trimestre del 2024



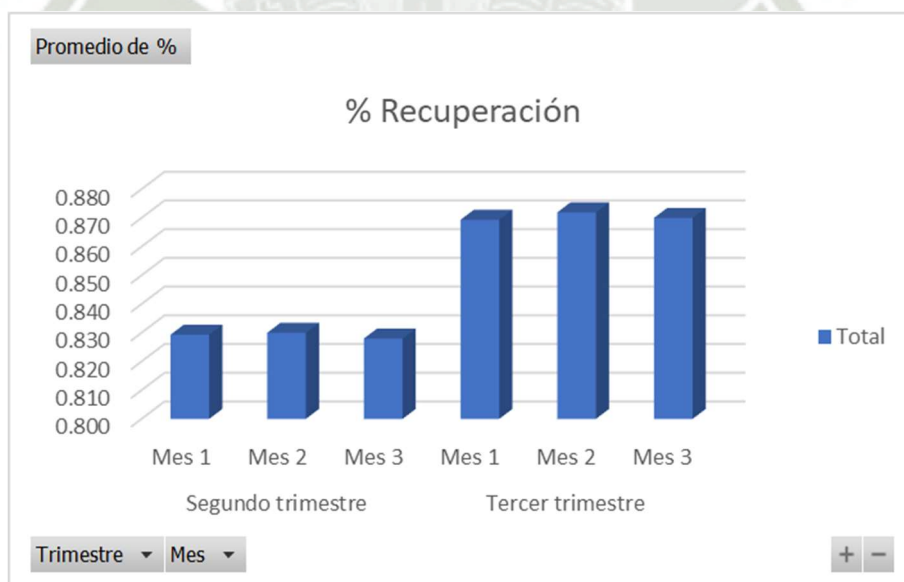
Nota.. Elaboración propia

Figura 20 Factor de potencia mensual del segundo y tercer trimestre del 2024



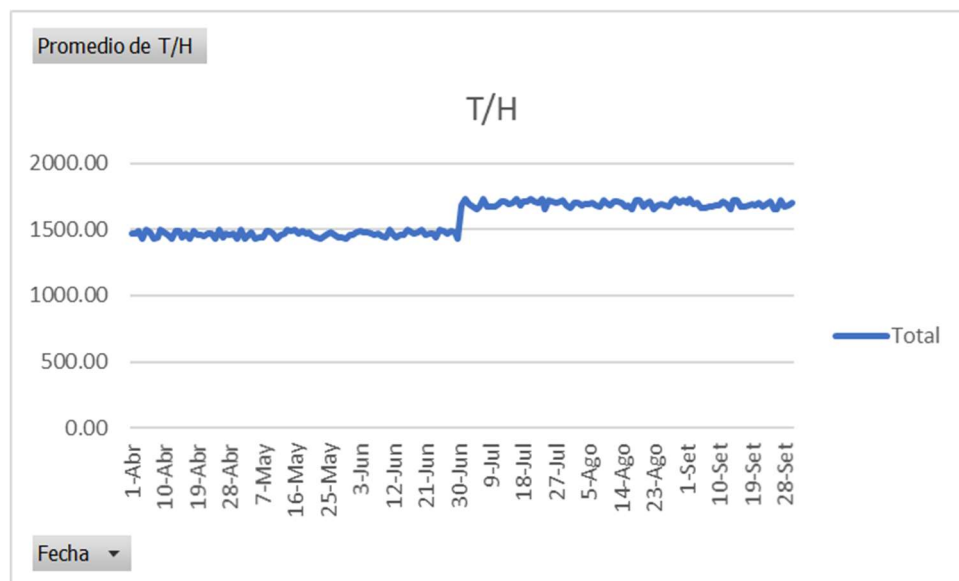
Nota.. Elaboración propia

Figura 21 %Recuperación mensual del segundo y tercer trimestre del 2024



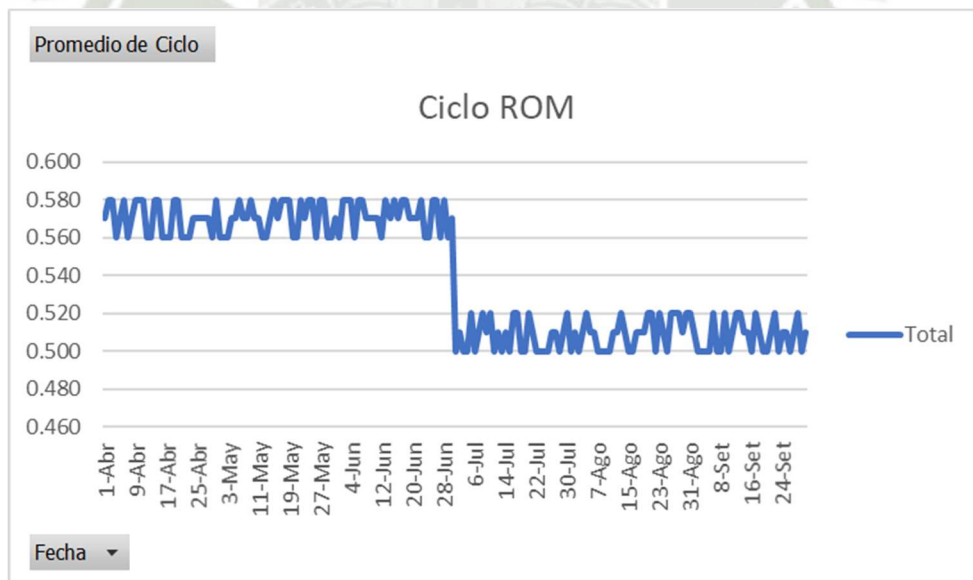
Nota.. Elaboración propia

Figura 22 Producción del segundo y tercer trimestre del 2024



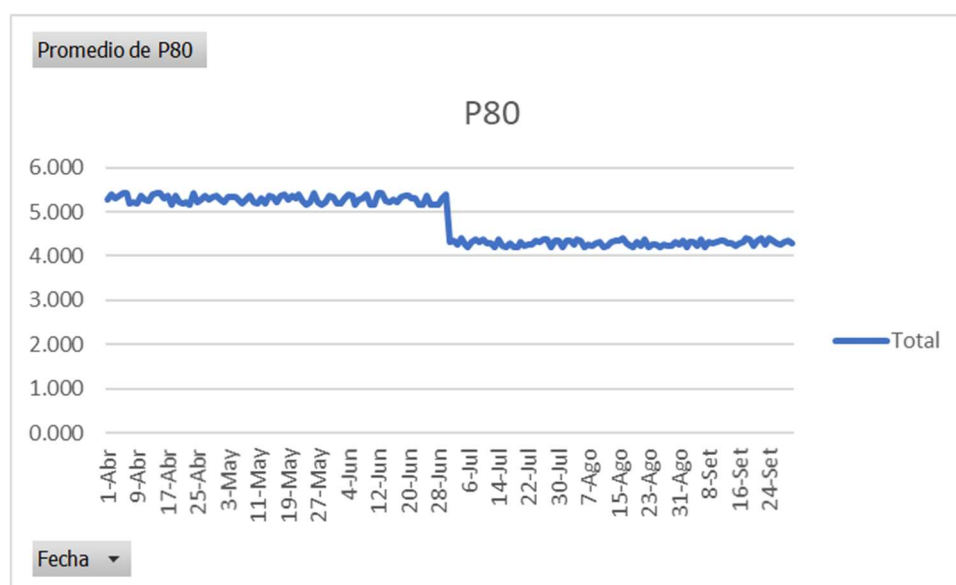
Nota.. Elaboración propia

Figura 23 Ciclo ROM del segundo y tercer trimestre del 2024



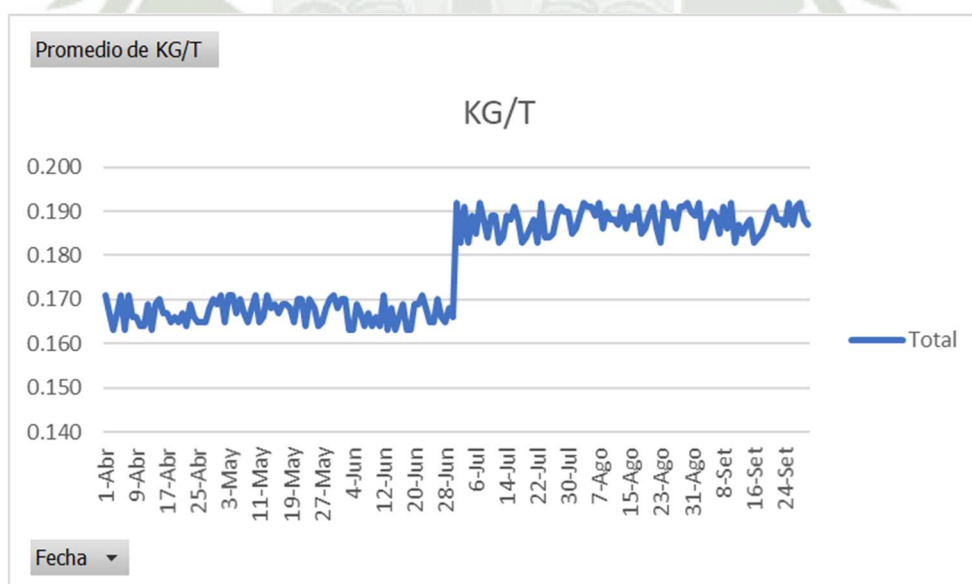
Nota.. Elaboración propia

Figura 24 Fragmentación del segundo y tercer trimestre del 2024



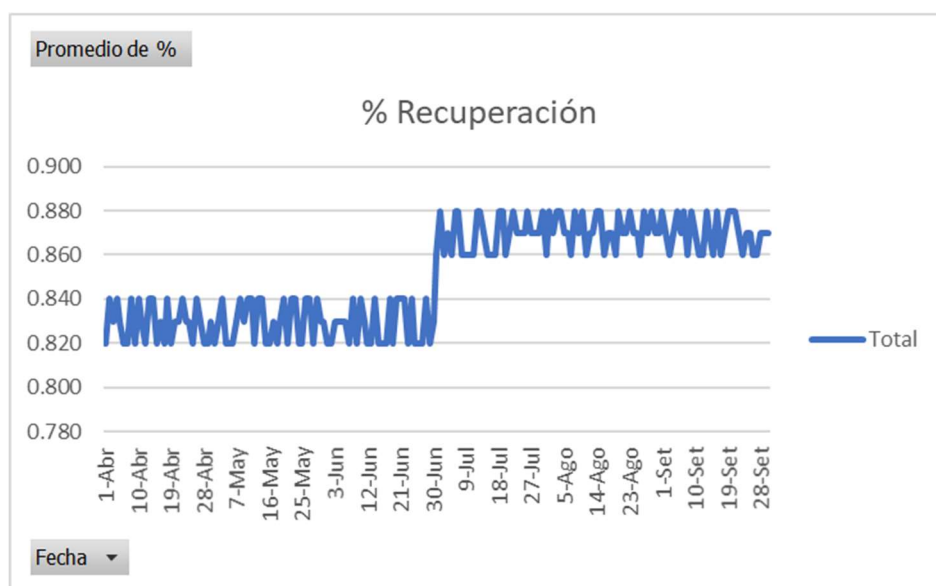
Nota.. Elaboración propia

Figura 25 Factor de potencia del segundo y tercer trimestre del 2024



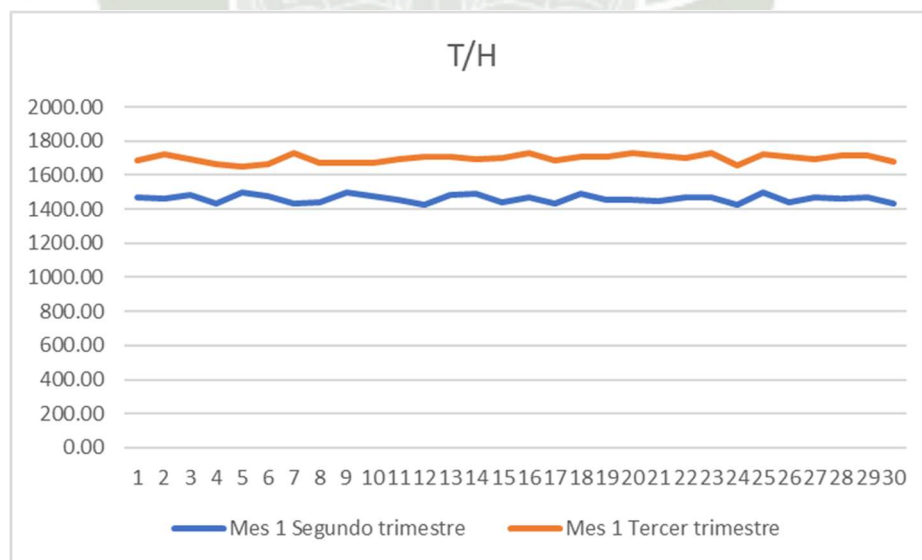
Nota.. Elaboración propia

Figura 26 %Recuperación del segundo y tercer trimestre del 2024



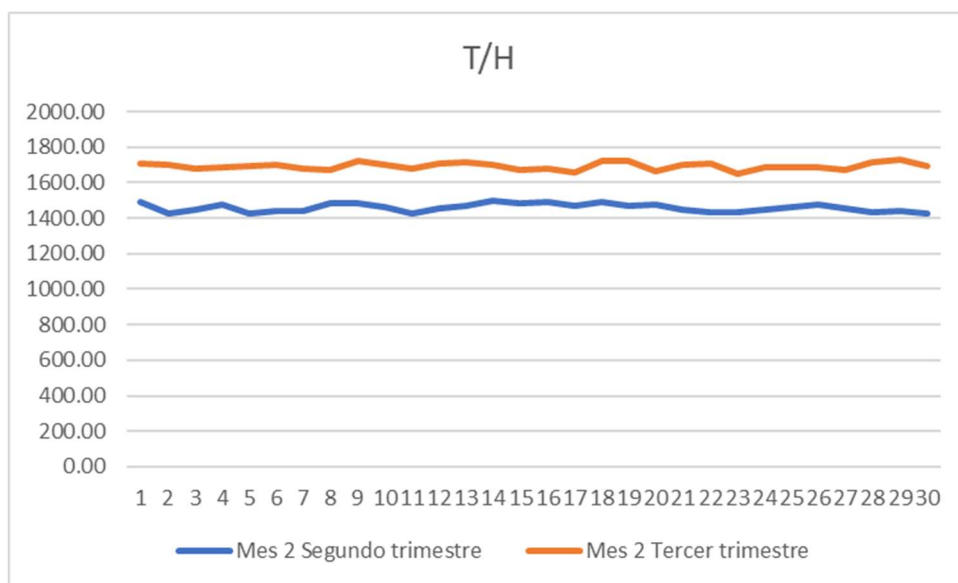
Nota.. Elaboración propia

Figura 27 Producción del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024



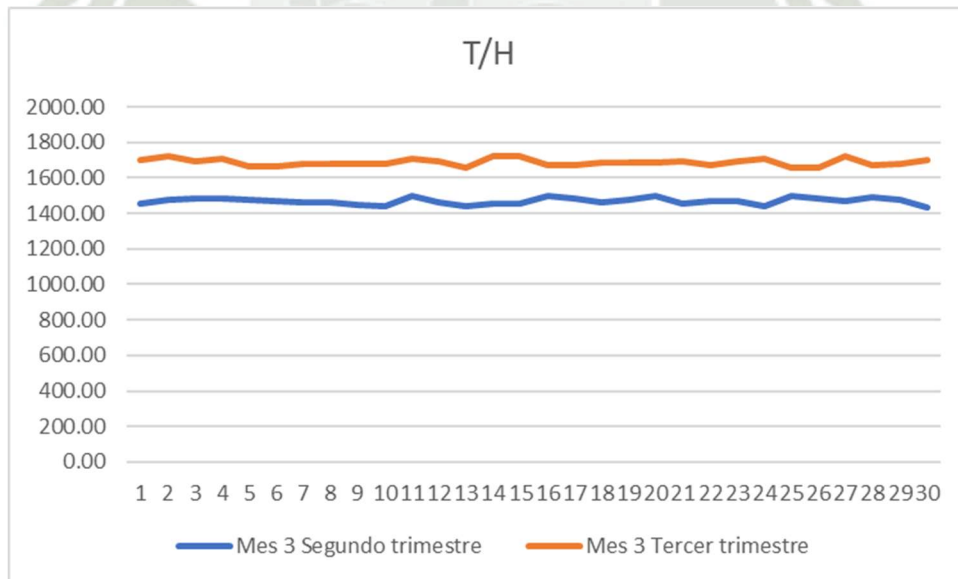
Nota.. Elaboración propia

Figura 28 Producción del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024



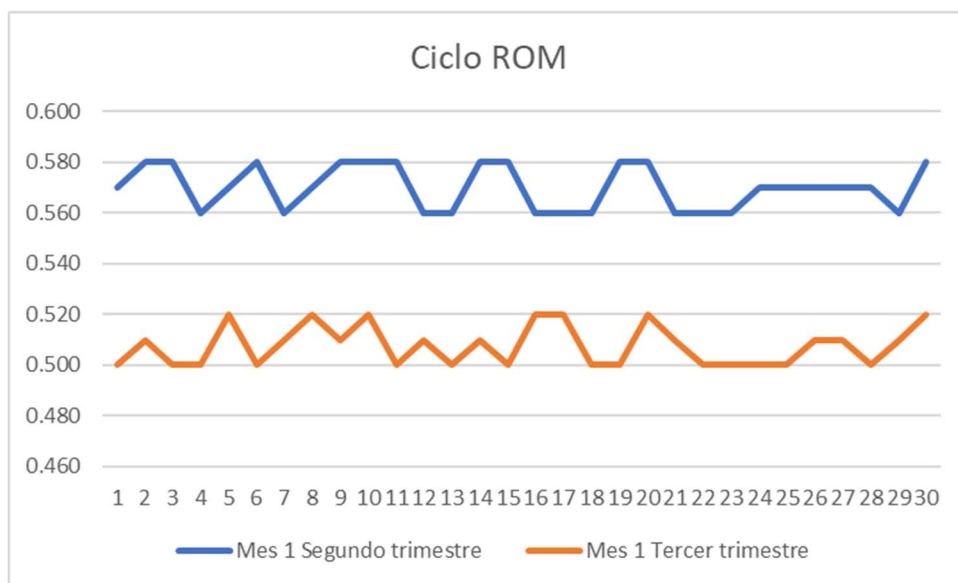
Nota.. Elaboración propia

Figura 29 Producción del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024



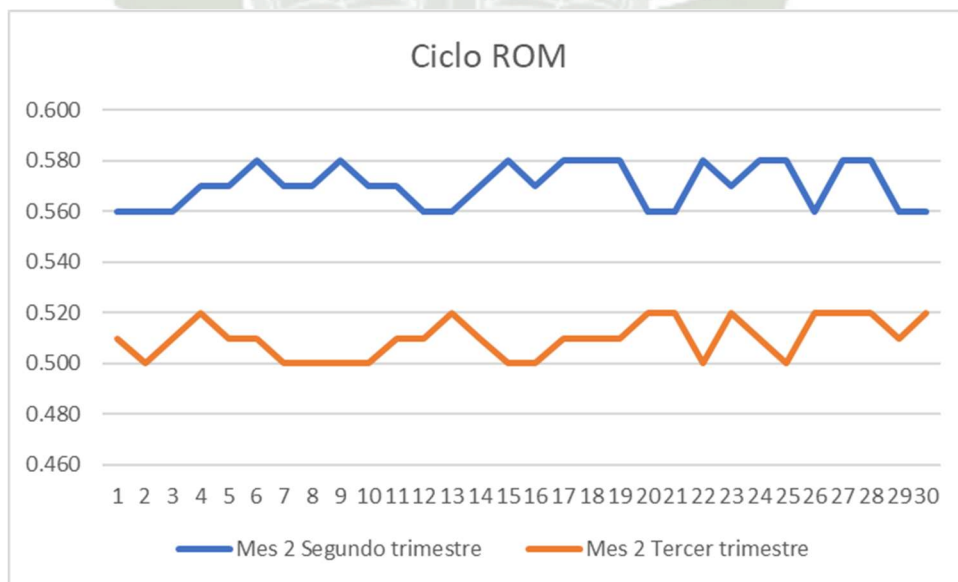
Nota.. Elaboración propia

Figura 30 Ciclo ROM del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024



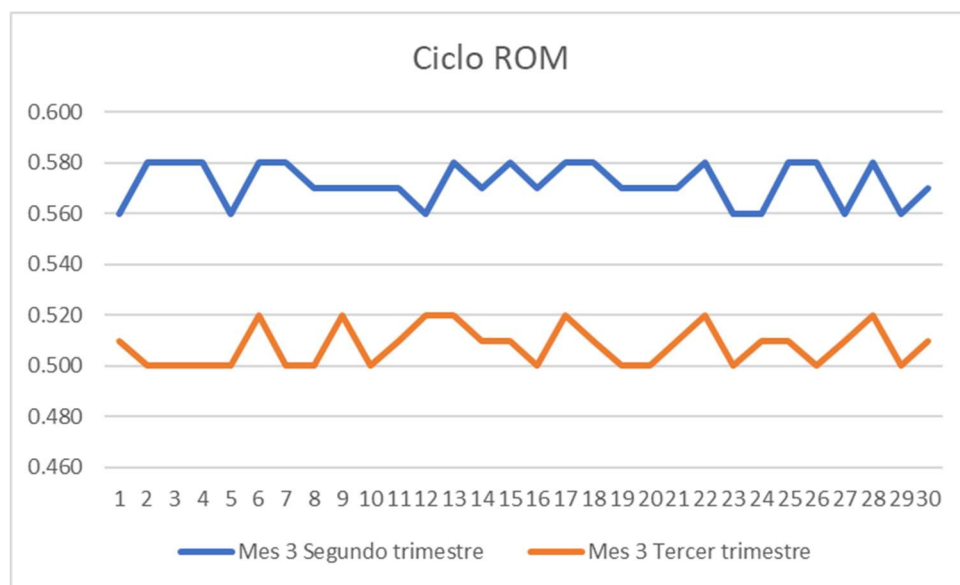
Nota.. Elaboración propia

Figura 31 Ciclo ROM del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024



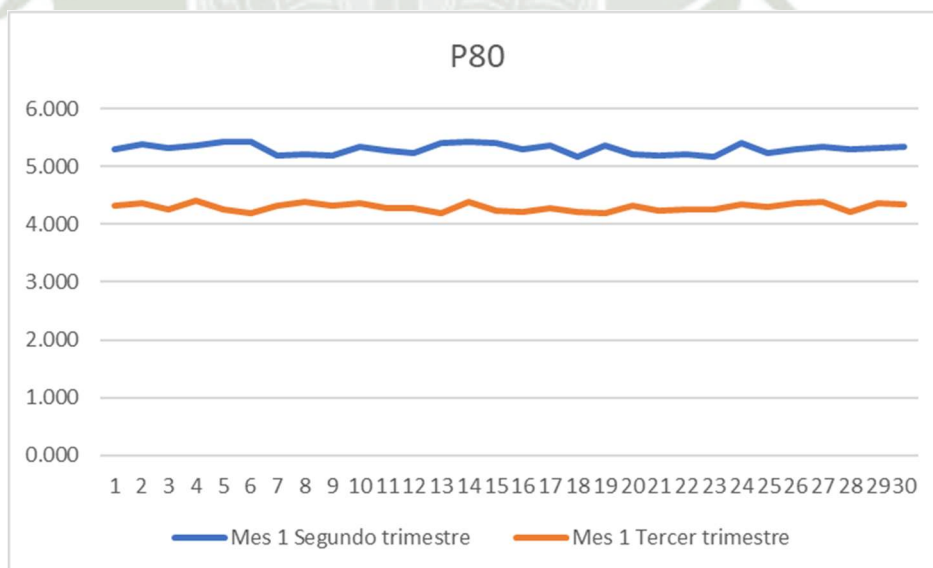
Nota.. Elaboración propia

Figura 32 Ciclo ROM del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024



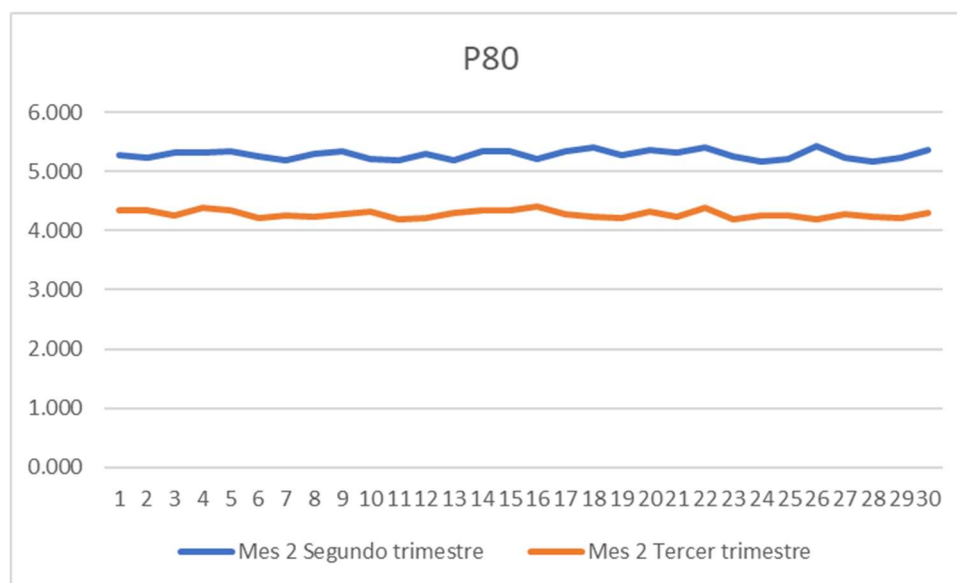
Nota.. Elaboración propia

Figura 33 Fragmentación del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024



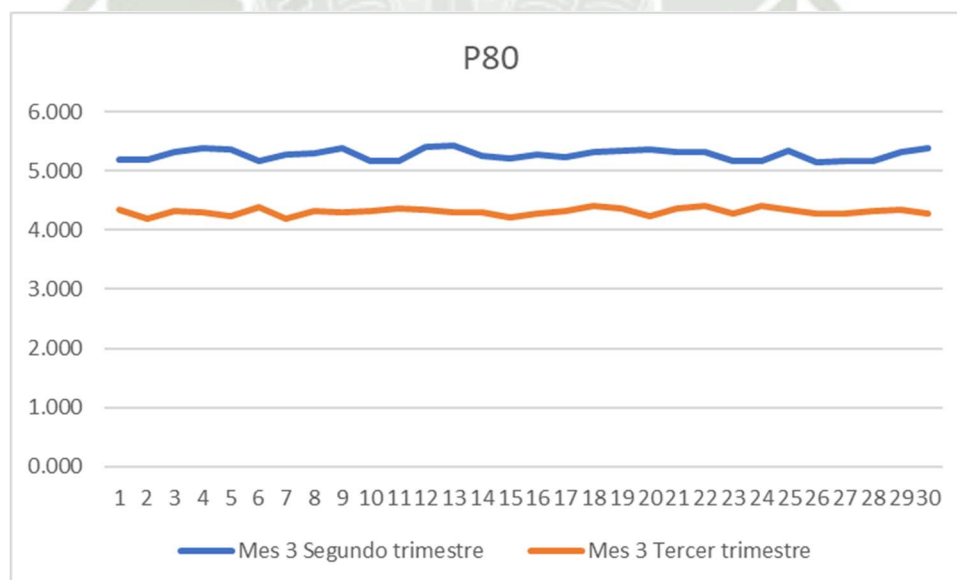
Nota.. Elaboración propia

Figura 34 Fragmentación del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024



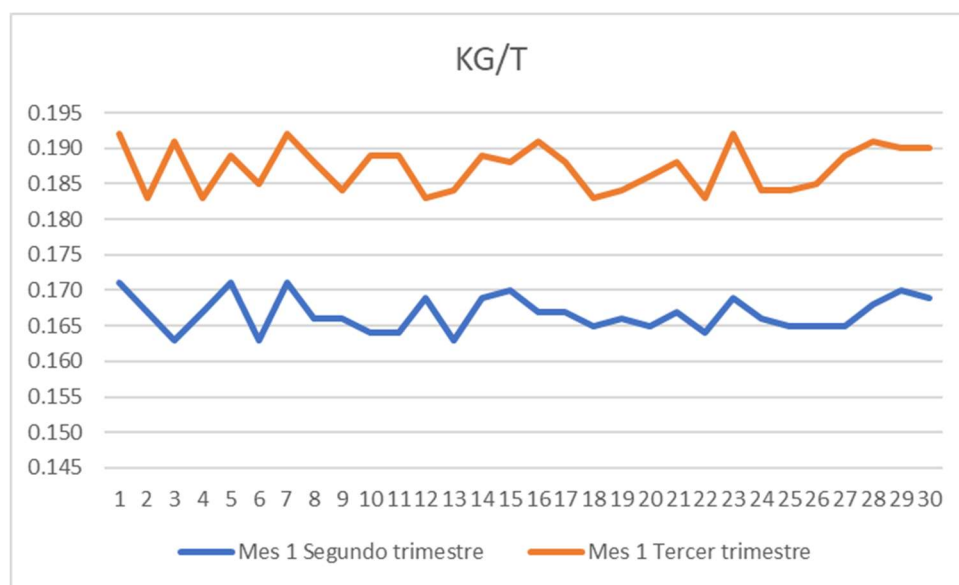
Nota.. Elaboración propia

Figura 35 Fragmentación del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024



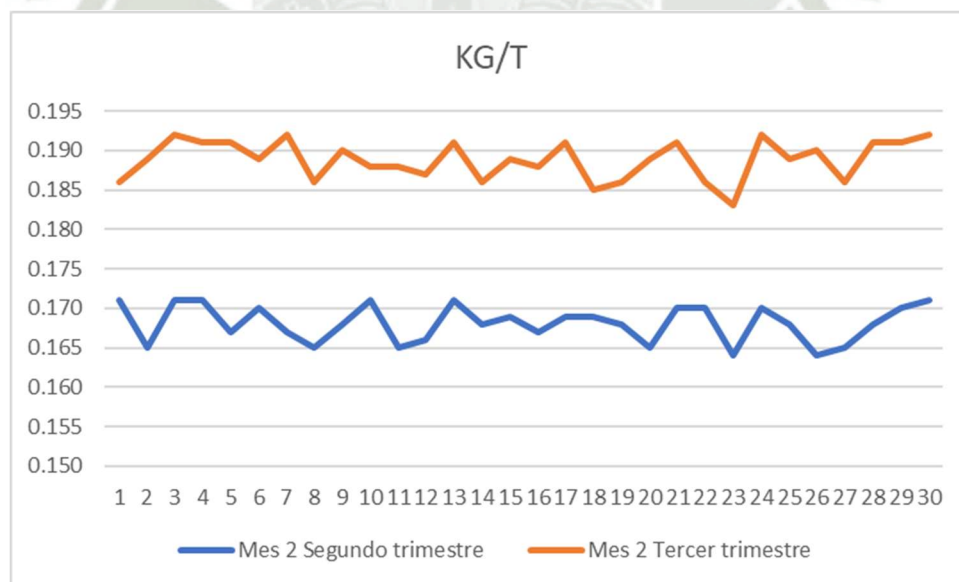
Nota.. Elaboración propia

Figura 36 Factor de potencia del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024



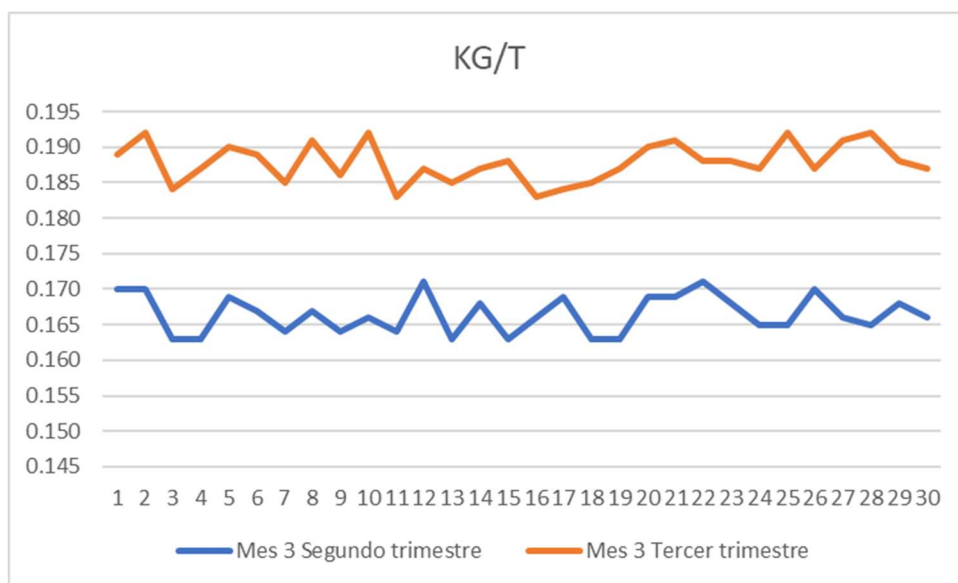
Nota.. Elaboración propia

Figura 37 Factor de potencia del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024



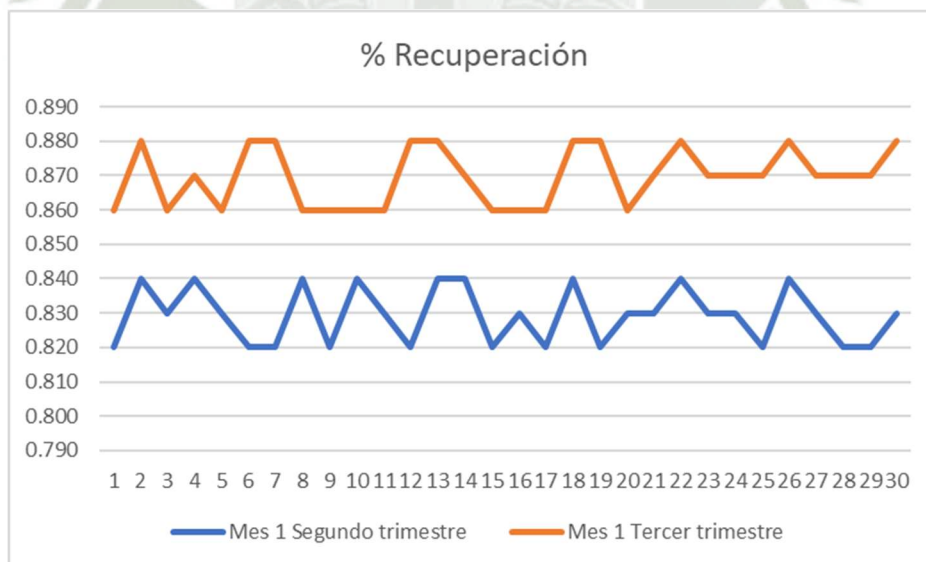
Nota.. Elaboración propia

Figura 38 Factor de potencia del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024



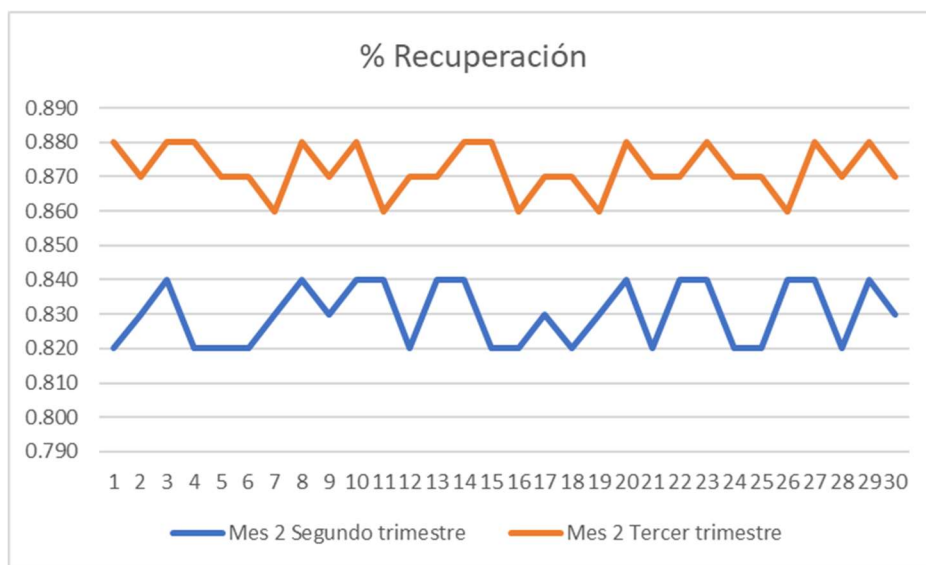
Nota.. Elaboración propia

Figura 39 % Recuperación del mes 1 del segundo vs tercer trimestre del 2024



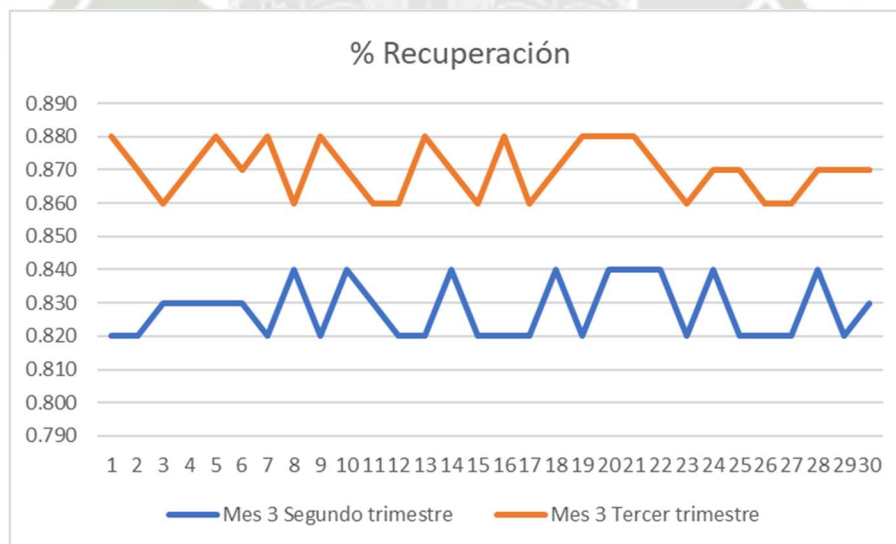
Nota.. Elaboración propia

Figura 40 % Recuperación del mes 2 del segundo vs tercer trimestre del 2024



Nota.. Elaboración propia

Figura 41 % Recuperación del mes 3 del segundo vs tercer trimestre del 2024



Nota.. Elaboración propia

4.3. Presentación y análisis de los resultados

4.3.1 Estadística aplicada para la demostración de la optimización

4.3.1.1 Análisis inferencial

Para el análisis inferencial de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024, se aplicó los supuestos de continuidad y normalidad. Al respecto Kerlinger y Lee (2002) indican que los supuestos de continuidad y normalidad son aquellos que determinan el uso de datos estadísticos paramétricos y no paramétricos. Posteriormente se efectuó la contrastación de las hipótesis planteadas.

4.3.1.2 Supuesto de continuidad

Los datos recolectados para la variable producción del segundo y tercer trimestre del 2024, son de naturaleza cuantitativa, la naturaleza de medición propia de las variables no se vio afectada, por tal motivo, se optó por el empleo de la estadística no paramétrica debido a que no se cumple con el supuesto de continuidad.

4.3.2 Supuesto de normalidad

La prueba de normalidad se realizó con la aplicación del método de Kolmogorov Smirnov, el cual se aplica siempre y cuando el tamaño de las muestras sea mayor o igual a 30 unidades (Kerlinger, Lee, 2002), teniendo el presente estudio una muestra mayor a 30 datos. La prueba de normalidad se realizó introduciendo los datos de cada variable en el software estadístico SPSS 26.0, se halló la diferencia entre los resultados de las variables para poder ejecutar la prueba de kolmogorov Smirnov con un nivel de confiabilidad del 95%, bajo las siguientes condiciones:

Si:

-Sig. < 0.05 Adopta una distribución no normal

-Sig. ≥ 0.05 Adopta una distribución normal

Donde:

-Sig. P-valor o nivel crítico del contraste

Los resultados de la prueba de normalidad fueron los siguientes:

Figura 42 Prueba de normalidad en software estadístico SPSS

Pruebas de normalidad						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
G	,073	91	,200 [*]	,981	91	,222

^{*}. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.
a. Corrección de significación de Lilliefors

Nota.. “Software estadístico SPSS”

Tabla 11

Prueba de normalidad

Kolmogorov - Smimov			
	Estadístico	gl	Sig
Diferencia	,073	9	,000

Nota.. Elaboración propia

Análisis

En la tabla se puede observar el resultado de la prueba de normalidad para la diferencia de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024, los cuales indican que la significación para los valores de producción del segundo y tercer trimestre del 2024 fue de 0.000, cuyo valor es menor que el error asumido de 0.05, lo que indica que los datos de ambas

variables no tienen un comportamiento normal; por lo cual se optó por el empleo de pruebas no paramétricas.

4.3.3 Prueba de hipótesis

Uso de la prueba de hipótesis para la presente investigación

La prueba de hipótesis es una regla que especifica cuando se puede aceptar o rechazar una afirmación sobre una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos. La prueba de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

Pasos para la prueba de hipótesis:

- Paso 1 redacción de hipótesis

H_0 = No existe diferencia significativa en las medias de resultados de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024.

H_1 = Existe una diferencia significativa en las medias de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024.

- Paso 2 definición del nivel alfa

Nivel alfa del 5 %

En notación decimal: 0.05

- Paso 3 elección de la prueba

La prueba de t de Wilcoxon es una prueba no paramétrica para muestras relacionadas, es decir, se le aplican dos medidas en momentos diferentes de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024; como es un estudio longitudinal, entonces las posibilidades de la prueba a utilizar se restringen a dos medidas, una medida antes y una medida después, es decir, la

variable de comparación. En este sentido, la prueba a utilizar es t de Wilcoxon para muestras relacionadas.

- Paso 4 de la prueba de hipótesis calcular el p valor

Tabla 12

Prueba estadística T de Wilson

	Segundo – Tercer Trimestre 2024
Z	-8,258 ^b
Sig. asintónica (bilateral)	,000

Nota. Prueba

a. Prueba de rangos con signo de Wilson

b. Se basa en rangos positivos

Nota.. Elaboración propia

P Valor = 0.000 < $\alpha = 0.05$

Análisis

En dicha prueba podemos decir:

Si la probabilidad obtenida P Valor $\leq \alpha$, se rechaza H0 (se acepta H1)

Si la probabilidad obtenida P Valor $> \alpha$, no se rechaza H0 (se acepta H0)

- Paso 5 decisión estadística

Existe diferencia significativa en las medias de la producción del segundo y tercer trimestre del 2024; es decir, la implementación de la optimización de la fragmentación sí tuvo un efecto significativo sobre la producción, por lo cual se puede concluir que existe diferencia estadísticamente significativa entre la producción del segundo y tercer trimestre del 2024 antes y después de implementar la optimización de la fragmentación; por lo que se logró mejorar la producción.

Se puede definir lo siguiente:

Análisis comparativo de la producción antes y después de la implementación del método de derribo. En los siguientes cuadros se hace una comparación del total de producción de las diferencias entre el segundo y tercer trimestre del 2024 de los días y 30 días al mes para poder comparar el primer, segundo y tercer mes de los segundo y tercer trimestre.

En los resultados encontrados en la presente investigación se observó que la implementación de la optimización de la fragmentación es un 12.59% de aumento de producción en el tercer trimestre respecto del segundo trimestre.

4.4. Pruebas de validación del modelo experimental

Tabla 13

Validación del modelo experimental

	T/H	Ciclo	P80	KG/T	%
Mes 1	1,581.13	0.54	4.8	0.177	0.85
Segundo trimestre	1,461.60	0.57	5.3	0.167	0.83
Tercer trimestre	1,491.00	0.51	4.3	0.187	0.87
Mes 2	1,576.56	0.54	4.8	0.178	0.85
Segundo trimestre	1,459.39	0.57	5.3	0.168	0.83
Tercer trimestre	1,693.74	0.51	4.3	0.189	0.87
Mes 3	1,578.17	0.54	4.8	0.177	0.85
Segundo trimestre	1,469.00	0.57	5.3	0.167	0.83
Tercer trimestre	1,687.33	0.51	4.3	0.188	0.87
Total general	1,578.61	0.54	4.8	0.178	0.85
Variación mes 1	16.09%	-10.98%	-19.05%	12.25%	4.83%
Variación mes 2	16.06%	-10.52%	-19.02%	12.36%	5.05%
Variación mes 3	14.86%	-11.19%	-18.23%	12.81%	5.07%
Segundo trimestre	1,463.33	0.6	5.3	0.167	0.83
Tercer trimestre	1,692.63	0.5	4.3	0.188	0.87
Variación 2 vs 3 trimestre	15.67%	-10.90%	-18.76%	12.47%	4.98%

Nota.. Elaboración propia

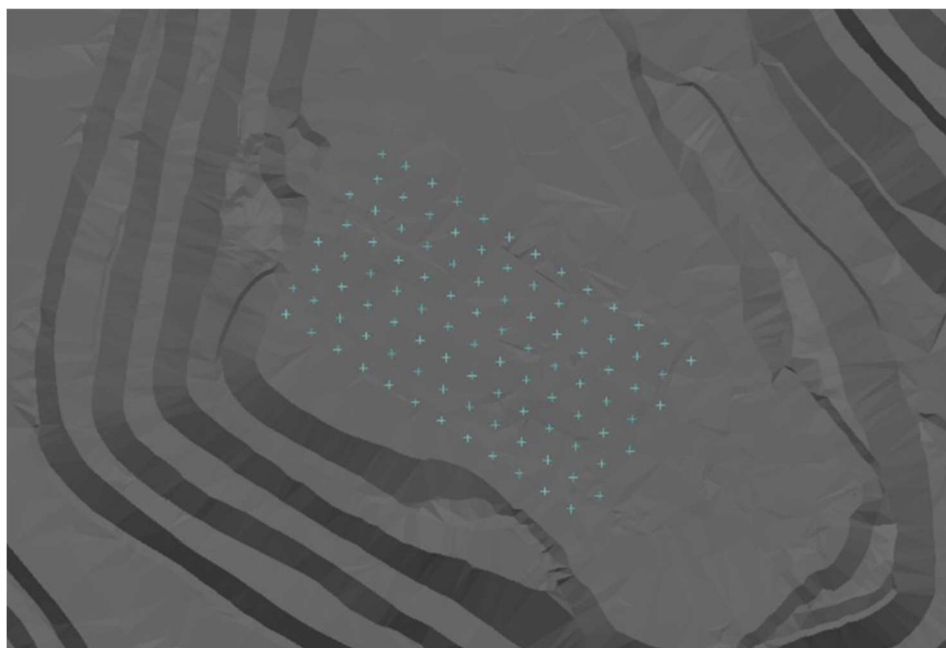
Análisis

Resultados de las pruebas de validación del modelo experimental

De las 4 hipótesis se desprende la discusión de resultados

4.4.1 Malla antes de la implementación

Figura 43 Malla 6.80 x 5.80



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

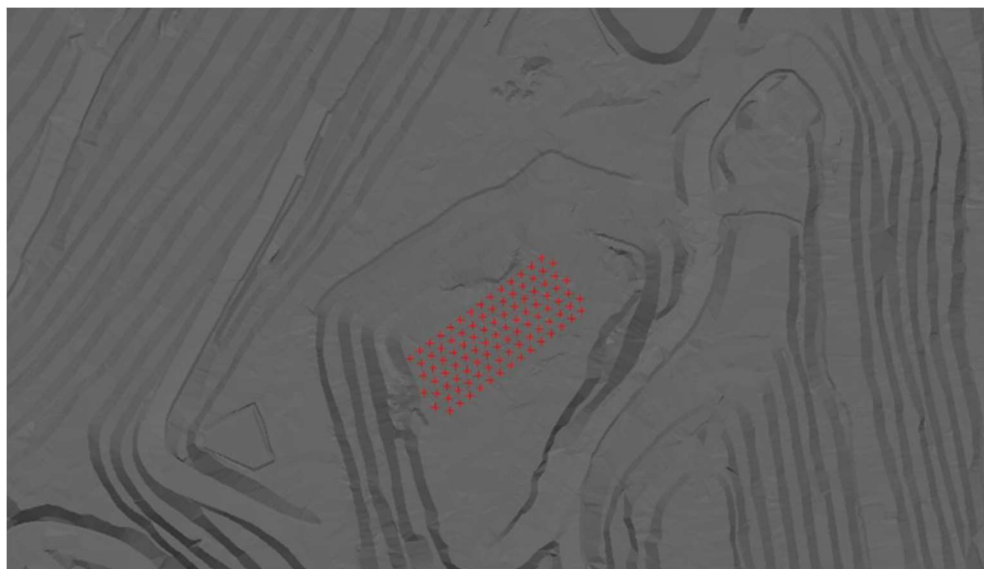
Figura 44 Coordenadas de taladros 6.80 x 5.80

	Name	Easting	Northing	Elevation	Length	Az	Dip
1	1	807891.56	9157384.00	2518.81	0.00	0.00	-90.00
2	2	807897.18	9157380.16	2518.81	0.00	0.00	-90.00
3	3	807902.79	9157376.33	2518.81	0.00	0.00	-90.00
4	4	807908.41	9157372.49	2518.81	0.00	0.00	-90.00
5	5	807914.02	9157368.66	2518.81	0.00	0.00	-90.00
6	6	807919.64	9157364.82	2518.81	0.00	0.00	-90.00
7	7	807925.25	9157360.98	2518.81	0.00	0.00	-90.00
8	8	807930.87	9157357.15	2518.81	0.00	0.00	-90.00
9	9	807936.48	9157353.31	2518.81	0.00	0.00	-90.00
10	10	807942.10	9157349.48	2518.81	0.00	0.00	-90.00
11	11	807947.71	9157345.64	2518.81	0.00	0.00	-90.00
12	12	807953.33	9157341.81	2518.81	0.00	0.00	-90.00
13	13	807897.69	9157386.95	2518.81	0.00	0.00	-90.00
14	14	807903.31	9157383.11	2518.81	0.00	0.00	-90.00
15	15	807908.92	9157379.27	2518.81	0.00	0.00	-90.00
16	16	807914.54	9157375.44	2518.81	0.00	0.00	-90.00
17	17	807920.15	9157371.60	2518.81	0.00	0.00	-90.00
18	18	807925.77	9157367.77	2518.81	0.00	0.00	-90.00
19	19	807931.38	9157363.93	2518.81	0.00	0.00	-90.00
20	20	807937.00	9157360.09	2518.81	0.00	0.00	-90.00
21	21	807942.61	9157356.26	2518.81	0.00	0.00	-90.00
22	22	807948.23	9157352.42	2518.81	0.00	0.00	-90.00
23	23	807953.84	9157348.59	2518.81	0.00	0.00	-90.00
24	24	807959.46	9157344.75	2518.81	0.00	0.00	-90.00
25	25	807898.21	9157393.73	2518.81	0.00	0.00	-90.00
26	26	807903.82	9157389.89	2518.81	0.00	0.00	-90.00

Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

4.4.2 Malla después de la implementación

Figura 45 Malla 7.20 x 6.20



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 46 Coordenadas de taladros 7.20 x 6.20

Name	Easting	N
75	807944.96	915
76	807951.18	915
77	807957.40	915
78	807963.62	915
79	807969.84	915
80	807976.06	915
81	807982.27	915
82	807906.91	915
83	807913.13	915
84	807919.35	915
85	807925.57	915
86	807931.79	915
87	807938.01	915
88	807944.23	915
89	807950.45	915
90	807956.67	915
91	807962.89	915
92	807969.11	915
93	807975.33	915
94	807981.55	915
95	807987.77	915
96	807978.05	915
97	807986.93	915
98	807902.31	915
99	807897.02	915
100	807892.67	915

Select bhs in the table or from the viewer using the button

Grid Name Adjust Line Fill Verify Export Options

Origin/Orientation

Easting: 807708.69 Northing: 9157541.00 Elevation (collar): 2537.73

Angle: 42.37

☒ Show grid axes

Extent Column: 80.81 Row: 44.35

Size Column: 7.20 Row: 6.24

Width 3.60

Offset 0.00

☒ Create BHs in Grid

Numbering [Additional parameters on Name page]

Start Column: 1 Row Inc: 0

Column Inc: 1 ☐ Odd Row Inc: 0

☐ Up and back on rows

Clipping

☐ Clipping boundary ☐ Clip before numbering

Apply Preview Cancel

Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

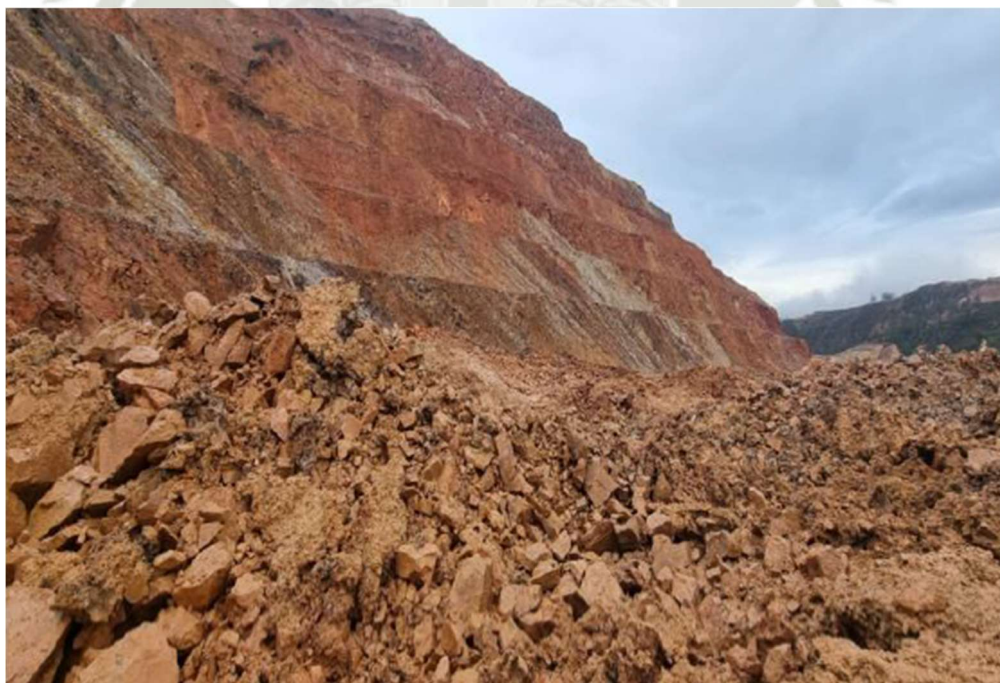
4.4.3 Imágenes post voladura del segundo trimestre del 2024

Figura 47 Captura aérea post voladura del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 48 Captura fotográfica post voladura del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 49 Captura fotográfica post voladura del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 50 Captura fotográfica post voladura del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

4.4.4 Desplazamiento de mineral del segundo trimestre del 2024

Figura 51 Desplazamiento del mineral del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 52 Desplazamiento de mineral del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

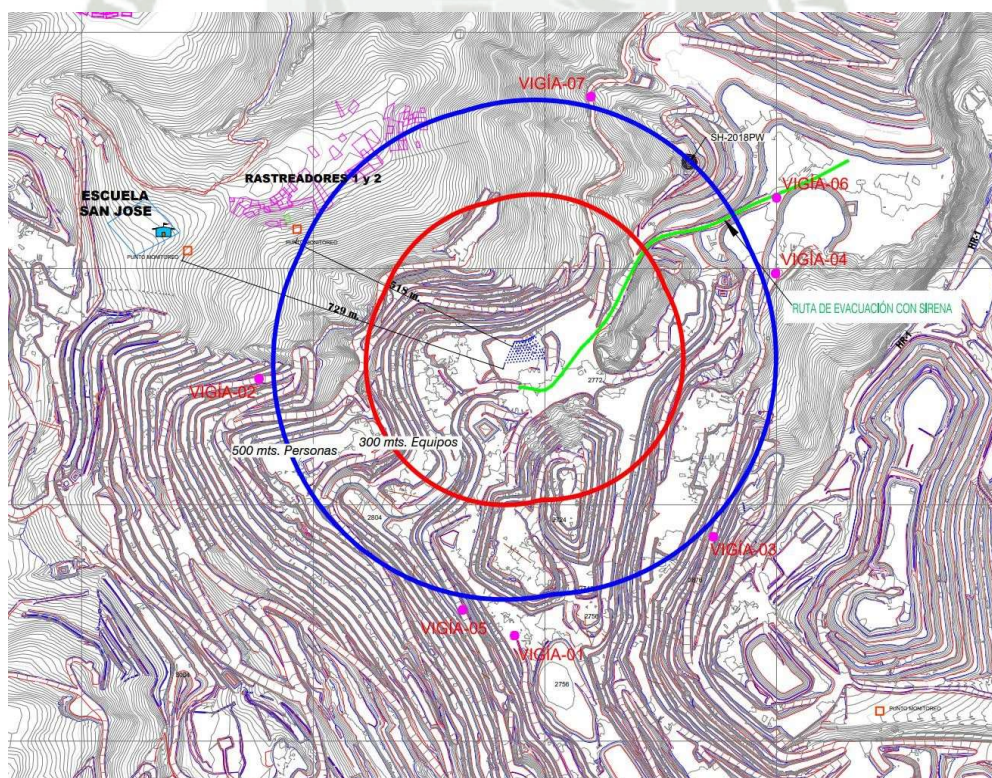
Figura 53 Desplazamiento del mineral del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

4.4.5 Plano de voladura

Figura 54 Plano de influencia de voladura del segundo trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

4.4.6 Imágenes post voladura del tercer trimestre del 2024

Figura 55 Captura aérea post voladura del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 56 Captura fotográfica post voladura del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 57 Captura fotográfica post voladura del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

Figura 58 Captura fotográfica post voladura del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

4.4.7 Desplazamiento de mineral del tercer trimestre del 2024

Figura 59 Desplazamiento del mineral del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

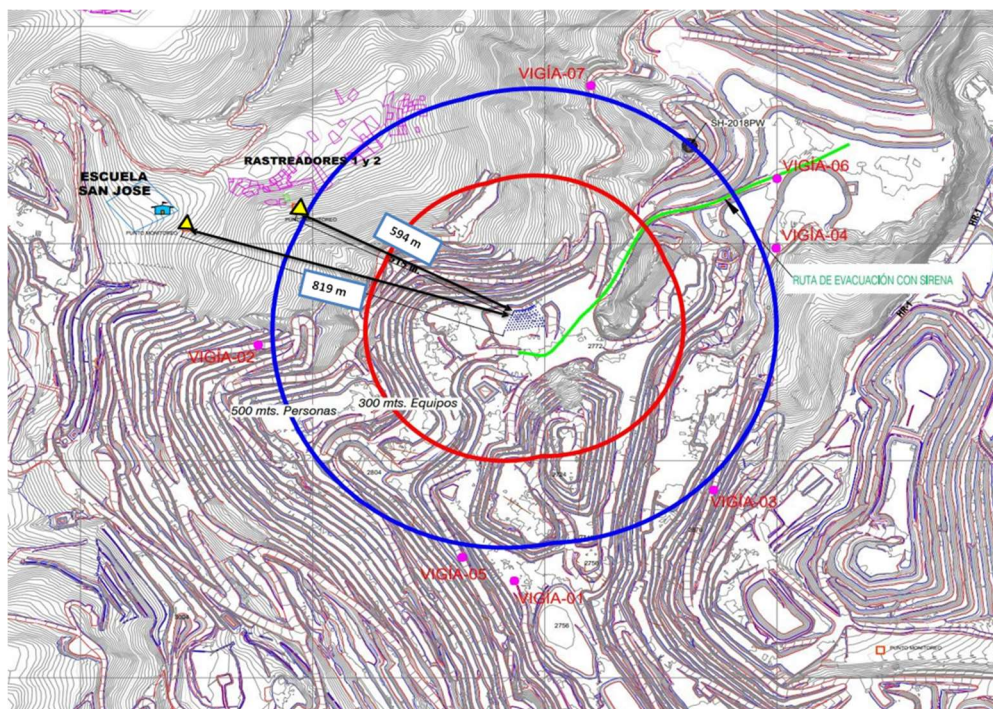
Figura 60 Desplazamiento del mineral del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuindo S.A.C

4.4.8 Plano de voladura

Figura 61 Plano de influencia de voladura del tercer trimestre del 2024



Nota.. Minera Shahuidno S.A.C

4.5. Contrastación de la hipótesis

4.5.1 Hipótesis general:

La hipótesis general será confirmada a partir de los resultados observados entre el segundo y tercer trimestre del año 2024, los cuales demuestran que la gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado generará mejoras significativas en la eficiencia operativa y un incremento en la producción bajo el sistema ROM. En efecto, la producción promedio aumentará en un 15.67%, el tiempo de ciclo disminuirá en 10.90% y el P80 se reducirá en 18.76%, pasando de 5.3 a 4.3 pulgadas, lo que facilita el carguío y apilamiento directo del material sin requerir chancado adicional. Además, el incremento en la energía específica de voladura (de 0.167 a 0.188 kg/t) estará asociado a una mayor fragmentación y mejora del rendimiento del proceso.

4.5.2 Hipótesis específica 1:

La fragmentación actual afectará negativamente los tiempos de carguío, transporte y apilamiento, como se observará en el segundo trimestre de 2024, donde el tiempo de ciclo promedio alcanzará 0.6 horas. Tras la optimización de los parámetros de voladura, este valor disminuirá a 0.5 horas en el tercer trimestre, evidenciando una mejora del 10.90%. Esto confirmará que una fragmentación inadecuada genera retrasos operativos en el sistema ROM, mientras que una fragmentación adecuada reduce los tiempos de manipulación del mineral.

4.5.3 Hipótesis específica 2:

La mejora técnica en los parámetros de perforación y voladura (diámetro de taladro, espaciamiento, burden, carga por taladro y tipo de explosivo) conducirá a una reducción del P80 de 5.3 a 4.3 pulgadas, lo que representará una mejora del 18.76%. Esta variación validará que el ajuste técnico permitirá obtener una granulometría más adecuada y

consistente con los requerimientos del sistema ROM, favoreciendo la fluidez del material en el pad y evitando atascos o apilamientos ineficientes.

4.5.4 Hipótesis específica 3:

Se validará que una fragmentación optimizada influye positivamente en la eficiencia del pad de lixiviación. Aunque el estudio no medirá directamente la recuperación metalúrgica, el incremento del porcentaje de eficiencia operativa del 83% al 87% y la mejora en la permeabilidad del pad —derivada del menor tamaño de partícula— permitirán inferir un entorno más favorable para el contacto entre solución lixivante y mineral, lo que repercutirá en una mayor recuperación de oro.

En conclusión, los resultados empíricos respaldarán la validez de la hipótesis general y de las hipótesis específicas, evidenciando que una adecuada gestión de la fragmentación del mineral volado no solo mejora los indicadores operativos, sino que también tiene un impacto positivo en los procesos metalúrgicos subsiguientes.

CONCLUSIONES

1. La gestión de la optimización de la fragmentación del mineral volado permitirá incrementar significativamente la eficiencia operativa en la Unidad Minera superficial en Cajamarca, evidenciado por una mejora del 15.67% en la producción promedio diaria, una reducción del tiempo de ciclo en 10.90% y una disminución del P80 en 18.76%. Estos resultados validarán que un adecuado diseño y control de los parámetros de perforación y voladura se traducirá directamente en un aumento de la productividad bajo el sistema ROM.
2. La evaluación de la situación actual de la fragmentación durante el segundo trimestre del 2024 mostrará deficiencias que afectarán negativamente los tiempos de carguío, transporte y apilamiento. Tras la implementación de mejoras en el tercer trimestre, se observarán tiempos de ciclo más eficientes (de 0.6 a 0.5 horas), lo que confirmará que una granulometría mal controlada limita la eficiencia del proceso ROM.
3. La optimización técnica de los parámetros de perforación y voladura, incluyendo el incremento del factor de carga específica de 0.167 a 0.188 kg/t, será decisiva para obtener una granulometría adecuada. Este cambio se asociará a una mejora sustancial en la fragmentación del material, contribuyendo a la disminución del esfuerzo de manipulación del mineral y facilitando su disposición eficiente en el pad de lixiviación.
4. En términos operativos, se demostrará que la implementación de un control más estricto y técnico en las etapas de perforación y voladura no solo mejora el rendimiento inmediato del sistema ROM, sino que también representa una estrategia costo-efectiva para la minería aurífera a tajo abierto, al minimizar retrabajos, maximizar el uso de los equipos y contribuir a una mayor sostenibilidad del proceso extractivo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda mantener la estrategia de optimización de los parámetros de perforación y voladura, con énfasis en el control del P80 objetivo, priorizando valores menores a 4.5 pulgadas para garantizar una adecuada fragmentación del mineral compatible con el sistema ROM y mejorar la eficiencia del apilamiento en el pad de lixiviación.
2. Es importante implementar un sistema de monitoreo continuo de la fragmentación mediante tecnologías como Split-Online o drones con procesamiento fotogramétrico, lo que permitirá realizar ajustes en tiempo real a los diseños de malla de perforación y carga explosiva según la dureza del macizo rocoso y las condiciones operativas del tajo.
3. Se sugiere establecer protocolos operativos que consideren la variabilidad litológica de la mina y que definan rangos específicos de carga explosiva por tonelada (kg/t), con el objetivo de mantener una fragmentación estable que evite material sobremedido que afecte negativamente la lixiviación y provoque reprocesamientos.
4. Se recomienda capacitar periódicamente al personal técnico de perforación y voladura en prácticas de diseño y ejecución optimizada, incluyendo simulaciones de voladura, evaluación de impacto ambiental y uso eficiente de explosivos de alta energía, para fomentar una cultura operativa basada en eficiencia y precisión.
5. Finalmente se sugiere extender el estudio a una evaluación metalúrgica directa del impacto de la fragmentación optimizada en la recuperación de oro, mediante pruebas de lixiviación controladas, que permitan cuantificar de manera precisa el beneficio adicional de esta gestión en la etapa de recuperación y mejorar la toma de decisiones estratégicas a nivel operativo y gerencial.

REFERENCIAS

VICOS. Mejoramiento de acarreo y transporte mediante dispatch en Cerro Verde. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa : 2009.

RIVERA. Mejoramiento de la flota de carguío y acarreo en operaciones mina, para el incremento de la producción Sociedad Minera Cerro Verde S. A. A. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa : 2018.

FERNANDO, Oscar y PACHECO, David. Voladuras De Alta Intensidad Y Su Influencia En El Chancado Y Molienda Del Pórfido Cupríferos De Cerro Verde. Universidad Nacional de Arequipa, Arequipa : 2013.

PARI. Dimensionamiento de Equipos de carguío- acarreo y optimización del Plan de Mantenimiento de vías para los tajos Pampa Verde y San Pedro Sur mina La Zanja S.R.L. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca : 2018.

REINOSO, Osorio. Análisis de variables operacionales bajo el concepto mine to mill para el cumplimiento de los planes de producción. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca : 2023.

VARGAS, Cesar. Optimización en las operaciones de carguío y transporte para el mejoramiento de la productividad. Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca : 2019.

VARGAS, C. Optimización en las operaciones de carguío y transporte para el mejoramiento de la productividad. Puno : Universidad Nacional Del Altiplano, 2019.

ROJAS, Roberto. Metodología Para Integración Del Proceso Mina & Planta. Universidad de Madrid, Madrid : 2021.

GARCES, Diego y CASTRILLON, Omar. Diseño de una Técnica Inteligente para Identificar y Reducir los Tiempos Muertos en un Sistema de Producción. Madrid : 2021.

Diseño de una Técnica Inteligente para Identificar y Reducir los Tiempos Muertos en un Sistema de Producción. GARCES, D. A y CASTRILLON, O. D. 3, 2017, Información tecnológica, Vol. 28, págs. 157-170.

ROJAS, Valentina. Metodología de Optimización del Programa Revisión B de Preparación Minera Considerando Incertidumbre Operacional. Universidad de Chile, Santiago : 2022.

Metodología de Optimización del Programa Revisión B de Preparación Minera Considerando Incertidumbre Operacional. Universidad de Chile, Santiago : 2022.

LOPEZ JIMENO, Carlos. Minería a Cielo Abierto. Madrid : E.T.S.I. Minas, 1999. 8460086986.

Codelco. (2018). Mejoras en la eficiencia de riego en pads ROM mediante control de fragmentación en la mina Radomiro Tomic. Gerencia de Ingeniería, División Radomiro Tomic. <https://www.codelco.com>

Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. (2020). Optimización de la fragmentación en operaciones ROM en la unidad Cerro Verde. Reporte técnico interno.

BHP Billiton. (2017). Gestión de la voladura y su efecto en la recuperación metalúrgica en la mina Escondida. Departamento de Ingeniería de Procesos. <https://www.bhp.com>

BHP Spence. (2019). Estudio de fragmentación y continuidad operativa en pads ROM – Unidad Spence. Unidad de Ingeniería Geotécnica y Procesos. <https://www.bhp.com/spence>

Compañía Minera Antapaccay. (2021). Evaluación del índice Axb y su influencia en la fragmentación para operaciones ROM en zonas piloto. Reporte técnico – Departamento de Voladura.

Cauas, D. (2015). *Metodología de la investigación científica: Fundamentos y aplicaciones en estudios sociales y técnicos*. Lima: Editorial Universitaria.

BHP Billiton. (2017). Gestión de la voladura y su efecto en la recuperación metalúrgica en la mina Escondida. Departamento de Ingeniería de Procesos.

Codelco. (2018). Mejoras en la eficiencia de riego en pads ROM mediante control de fragmentación en la mina Radomiro Tomic. Gerencia de Ingeniería, División Radomiro Tomic.

Morales, M., & Tapia, R. (2019). Diseño y control de voladuras para operaciones ROM en minería superficial. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Minas*, 21(3), 45–58.

Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. (2020). Optimización de la fragmentación en operaciones ROM en la unidad Cerro Verde. Reporte técnico interno.

Codelco. (2018). Mejoras en la eficiencia de riego en pads ROM mediante control de fragmentación en la mina Radomiro Tomic. Gerencia de Ingeniería, División Radomiro Tomic.

Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. (1995). Voladura de rocas. Madrid: McGraw-Hill.

Morales, M., & Tapia, R. (2019). Diseño y control de voladuras para operaciones ROM en minería superficial. *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Minas*, 21(3), 45–58.

Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (2005). *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization*. Brisbane: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.

Tapia, R. (2020). *Gestión minera aplicada*. Lima: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

ANEXOS

Anexo 1: Reporte de voladura antes de la implementación

MALLA		6.80 x 5.80 m		ELECTRÓNICO	
Disparo Primario		Taladros		Parámetros Perforación	
Preparado por	-.	Tal. Perforados	100	Altura banco Prom	(m) 8.00
Guardia Turno	B	Tal. Cargados	100	Sobre-perforacion	(pulg) 0.50
Supervisor de mina	-	Tal. Perforados sin cargar	0	Altura total del taladro	(m) 8.50
Fecha de inicio de carguio	Primer Trimestre 2024	Taladros de Precorte	0	Diametro broca	(Pulg) 7 7/8
Fecha de disparo	Primer Trimestre 2024	Tal. De Producción	100	Espaciamiento.	(m) 6.80
Tajo	Chalarina	Tal. De Buffer	0	Burden Prom.	(m) 5.80
Fase	Fase 5D	Tal. Cortos	0	Altura agua Prom.	(m) 5.00
Hora de disparo	12:51:09 p. m.	Tal. Agua	0	Taco Inicial	(m) 4.50
Proyecto	13	Metros Perforados	908.0	Taco Final	(m) 4.00
Nivel	2764	Metros Lineales de Carga	498	Material para el taco	(m) Grava
Banco	2756	Volumen roto (m³)	26,452	Malla	Triangular
Tipo de disparo	Primario	Explosivos y cables de disparo		Parámetros Voladura	
Metodo de carguio	Bombeado y Vaciado	Booster 11Lb	(und) 100	Toneladas rotas	(t) 62,956
Consumo de Explosivo		Cordon SP	(m) 0	Ton. Roto/Tal. Carg.	(t) 700
Emulsion Gasificada	(kg) 17,971	Exsaline	(Kg) 0	Densidad de roca	(t/m³) 2.380
Producción	(kg) 17,331	Accesorios de voladura		Carga Total	(Kg) 17,971
Buffer	(kg) 640	LSF 500M	(m) 0	Factor de carga	(kg/m³) 0.679
Densidad del Explosivo		Cable de disparo DigiPro	(m) 0	Factor de potencia	(kg/t) 0.285
Slurrex-G-Inicial	(g/cm3) 1.310	Digishot 15 m	(und) 0	Factor de carga Prod.	(kg/m³) 0.655
Slurrex-G-Final	(g/cm3) 1.146	Digishot 20 m	(und) 0	Factor de potencia Prod.	(kg/t) 0.275
Agentes de Voladura		Exsanel simple 10.2 m	(und) 100	Factor de Rotura	(t/m) 69.874
Emulsión Matriz	17,934	Exsanel dual 800/17, 15 m	(und) 0	Factor de Perforacion	(t/tal) 593.926
L - 8	37	CUSE 25 ms	(und) 0	Costo de disparo	
PLASTEX	0	CUSE 42 ms	(und) 0	Costo total	(\$) 15,746
Parámetros de secuencia de iniciación		CTD 75 ms	(und) 0		
Sistema de Voladura	Electrónico	CTD 100 ms	(und) 0	Taladros con humos	0
Secuencia de Salida	Echelón & V	Balines	(pza) 0	Nivel de Humos	0
Tiempo entre taladros	17 ms 94ms	I-Kon	(und) 100	Camión Mezclador	AUO 756
Tiempo entre filas	196 ms	Cable de disparo I-kon	(m) 1000	Back Up	0
UBICACIÓN					
					

Anexo 2: Reporte de voladura después de la implementación

MALLA		REPORTE DE VOLADURA 7.20 x 6.26 m		ELECTRÓNICO	
Disparo Primario		Taladros		Parámetros Perforación	
Preparado por	-	Tal. Perforados	100	Altura banco Prom (m)	8,00
Guardia Turno	B	Tal. Cargados	100	Sobre-perforacion (pulg)	0,50
Supervisor de mina	-	Tal. Perforados sin cargar	0	Altura total del taladro (m)	8,50
Fecha de inicio de carguio	Segundo Trimestre 2024	Taladros de Precorte	0	Diametro broca (Pulg)	7 7/8
Fecha de disparo	Segundo Trimestre 2024	Tal. De Producción	100	Espaciamiento. (m)	7,20
Tajo	Chalarina	Tal. De Buffer	0	Burden Prom. (m)	6,26
Fase	Fase SE	Tal. Cortos	0	Altura agua Prom. (m)	5,00
Hora de disparo	2:47:19 p. m.	Tal. Agua	0	Taco Inicial (m)	4,50
Proyecto	39	Metros Perforados	909.5	Taco Final (m)	4,00
Nivel	2796	Metros Lineales de Carga	417	Material para el taco (m)	Grava
Banco	2788	Volumen roto (m³)	38,587	Malla	Triangular
Tipo de disparo	Primario	Explosivos y cables de disparo		Parámetros Voladura	
Metodo de carguio	Bombeado y Vaciado	Booster 1Lb (und)	100	Toneladas rotas (t)	91,837
Consumo de Explosivo		Cordon 5P (m)	0	Ton. Roto/Tal. Carg. (t)	858
Emulsion Gasificada (kg)	18,387	Exsaline (Kg)	0	Densidad de roca (t/m³)	2,380
Producción (kg)	18,387	Accesorios de voladura		Carga Total (Kg)	18,387
Buffer (kg)	0	LSF 500M (m)	0	Factor de carga (kg/m³)	0,477
Densidad del Explosivo		Cable de disparo DigiPro (m)	0	Factor de potencia (kg/t)	0,205
Slurrex-G-Inicial (g/cm3)	1,293	Digishot 15 m (und)	0	Factor de carga Prod. (kg/m³)	0,489
Slurrex-G-Final (g/cm3)	1,128	Digishot 20 m (und)	0	Factor de potencia Prod. (kg/t)	0,205
Agentes de Voladura		Exsanel simple 10.2 m (und)	100	Factor de Rotura (t/m)	100.975
Emulsión Matriz	18,369	Exsanel dual 800/17, 15 m (und)	0	Factor de Perforacion (t/tal)	858.290
L - 8	18	CUSE 25 ms (und)	0	Costo de disparo	
PLASTEX	0	CUSE 42 ms (und)	0	Costo total (\$)	14,997
Parámetros de secuencia de iniciación		CTD 75 ms (und)	0		
Sistema de Voladura	Electrónico	CTD 100 ms (und)	0	Taladros con humos	0
Secuencia de Salida	Echelon	Balines (pza)	0	Nivel de Humos	0
Tiempo entre taladros	27 ms	i-Kon (und)	100	Camión Mezclador	AUO 756
Tiempo entre filas	218 ms	Cable de disparo i-kon (m)	1000	Back Up	0
UBICACIÓN					
					