UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

T E S I S

Aplicación de modelos de optimización para incrementar la rentabilidad y reducir los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Jhon Jefferson LLANOS MALPARTIDA

Asesor:

Dr. Floro Pagel ZENTENO GOMEZ

Cerro de Pasco – Perú - 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

T E S I S

Aplicación de Modelos de Optimización para Incrementar la Rentabilidad y Reducir los Costos Operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Agustin Arturo AGUIRRE ADAUTO	**Dr. Raul FERNANDEZ MALLQUI**
PRESIDENTE	**MIEMBRO**

Dr. Cesar Jhoel VICENTE AQUINO
MIEMBRO

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 043-2026

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. LLANOS MALPARTIDA, Jhon Jefferson

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:
Tesis

Título del trabajo:
"Aplicación de Modelos de Optimización para Incrementar la Rentabilidad y Reducir los Costos Operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A."

Asesor:
Dr. Floro Pagel ZENTENO GOMEZ

Índice de Similitud: 6 %

Calificativo:

APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 28 de agosto de 2026

Firma Digital UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION [AVANZADA]

Firmado digitalmente por FERNANDEZ MALLQUI Raul FAU 20154605046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 28.08.2026 18:16:01 -05:00

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a los docentes de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

Asimismo, a los trabajadores de la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de la presente tesis, la cual representa no solo el cumplimiento de un requisito académico, sino también un importante logro personal y profesional.

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta etapa académica, incluso en los momentos de mayor dificultad, permitiéndome seguir adelante con determinación y confianza.

Mi especial gratitud a la Universidad y a la Escuela Profesional, por la formación académica brindada a lo largo de mi carrera, así como por proporcionar las herramientas teóricas y metodológicas necesarias para el desarrollo de esta investigación.

A mi asesor(a) de tesis, expreso un agradecimiento sincero por su orientación, apoyo constante, paciencia y valiosas observaciones, las cuales contribuyeron significativamente a mejorar la calidad del presente trabajo. Su experiencia y compromiso fueron fundamentales para encaminar adecuadamente esta investigación.

Asimismo, agradezco a la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., en especial a la Unidad Minera El Brocal, por facilitar el acceso a información relevante y por permitir el análisis del caso de estudio, lo que hizo posible aplicar los modelos de optimización en un contexto real, aportando valor práctico a la investigación.

Mi profundo agradecimiento a mis familiares, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida. Gracias por su apoyo incondicional, comprensión, palabras de aliento y sacrificio constante, que me motivaron a no rendirme y a seguir persiguiendo mis metas académicas y profesionales.

A mis docentes, compañeros y amigos, gracias por compartir conocimientos, experiencias y momentos que enriquecieron mi formación, así como por el apoyo moral brindado durante el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta tesis. A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo aplicar modelos de optimización para incrementar la rentabilidad y reducir los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., ubicada en la región Pasco. El estudio surgió a partir de la necesidad de mejorar la eficiencia en la asignación de recursos dentro de una operación minera subterránea caracterizada por altos costos operativos, restricciones técnicas y exigencias crecientes de competitividad. Metodológicamente, la investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, con diseño no experimental, transversal y de alcance explicativo, empleando información operativa y económica correspondiente al periodo de análisis 2023–2024. A partir de la identificación de variables críticas vinculadas con producción, costos unitarios, capacidad operativa y rentabilidad, se formuló un modelo matemático de optimización orientado a la minimización del cash cost y a la mejora del desempeño económico de la operación.

La solución del modelo permitió establecer una redistribución óptima de la producción entre frentes de minado, priorizando aquellos con menor costo unitario y demostrando, en el escenario optimizado. El VAN de la Unidad Minera El Brocal durante el año 2023 fue de 714.567 millones de dólares, el VAN de la empresa del año 2024 fue de 856.058 millones de dólares, la diferencia es de 141.491 millones de dólares, lo que significa el incremento de la rentabilidad de la Unidad Minera El Brocal de 19.9 %.

El promedio de los costos operativos del año 2023 es de 45.352 US$/t y el promedio de los costos operativos del año 2024 es de 50.296 US$/t por lo que la aplicación de modelos de optimización no reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. Sin embargo, el Valor Actual Neto del 2024 se incrementó en 19.9% con relación al año anterior.

Palabras clave: Optimización minera, rentabilidad, costos operativos, cash cost, programación lineal, minería subterránea.

ABSTRACT

The objective of this research was to apply optimization models to increase profitability and reduce operating costs at the El Brocal Mining Unit of Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., located in the Pasco region. The study arose from the need to improve efficiency in resource allocation within an underground mining operation characterized by high operating costs, technical constraints, and growing demands for competitiveness. Methodologically, the research was conducted using a quantitative, applied approach with a non-experimental, cross-sectional design and an explanatory scope, utilizing operational and economic data corresponding to the 2023–2024 analysis period. Based on the identification of critical variables related to production, unit costs, operational capacity, and profitability, a mathematical optimization model was formulated aimed at minimizing cash costs and improving the operation's economic performance. The model's solution made it possible to establish an optimal redistribution of production among mining fronts, prioritizing those with the lowest unit cost and demonstrating, in the optimized scenario, that the NPV of the El Brocal Mining Unit for the year 2023 was 714,567 million dollars, the company's NPV for 2024 was 856,058 million dollars; the difference is 141,491 million dollars, which represents a 19.9% increase in the profitability of the El Brocal Mining Unit.

The average operating costs for 2023 were 45,352 US$/t, and the average operating costs for 2024 were 50,296 US$/t; therefore, the application of optimization models does not reduce operating costs at the El Brocal Mining Unit of Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. However, the Net Present Value for 2024 increased by 19.9% compared to the previous year.

Keywords: Mining optimization, profitability, operating costs, cash cost, linear programming, underground mining.

INTRODUCCIÓN

La minería constituye una de las actividades económicas de mayor relevancia para el Perú, no solo por su contribución al producto bruto interno, la generación de divisas y la captación de inversiones, sino también por su papel estratégico en la dinámica productiva de diversas regiones del país. Sin embargo, el sostenimiento de la competitividad minera en un entorno cada vez más exigente depende, en gran medida, de la capacidad de las operaciones para controlar sus costos, elevar su productividad y optimizar el uso de sus recursos. En ese escenario, las unidades mineras subterráneas enfrentan desafíos particularmente complejos, debido a la mayor intensidad de capital y trabajo que exige este método de explotación, así como a las restricciones técnicas, geomecánicas, logísticas y económicas que condicionan la continuidad de la operación.

En la actualidad, la gestión minera ya no puede sustentarse únicamente en criterios empíricos o en decisiones operativas tomadas de manera aislada. La creciente presión por mejorar los indicadores económicos, especialmente en contextos de volatilidad de precios, incremento del costo de insumos, mayores exigencias de eficiencia y necesidad de sostenibilidad operativa, obliga a las empresas a incorporar herramientas cuantitativas que permitan evaluar alternativas y seleccionar cursos de acción técnica y económicamente más convenientes. Bajo esta perspectiva, los modelos de optimización se han consolidado como instrumentos de alto valor para la planeación y la gestión minera, al permitir representar matemáticamente un sistema productivo, integrar sus restricciones y orientar la toma de decisiones hacia soluciones que reduzcan costos y mejoren la rentabilidad.

La presente investigación se desarrolla en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., operación que, por su naturaleza productiva y por la complejidad de sus procesos, demanda una gestión rigurosa de sus recursos operativos. De acuerdo con el documento base de la tesis, el problema central se relaciona con la necesidad de

optimizar la asignación de recursos para reducir los costos operativos y elevar los resultados económicos de la unidad, dado que la ausencia de un enfoque cuantitativo en la planificación puede conducir a decisiones subóptimas, mayores costos por tonelada producida y menores márgenes de rentabilidad.

En ese marco, la investigación parte de la premisa de que la optimización matemática puede constituir una respuesta técnica y económicamente viable frente a la ineficiencia en el uso de recursos productivos. La aplicación de estos modelos permite estructurar formalmente variables de decisión, restricciones operativas y funciones objetivo, con el propósito de identificar configuraciones de operación que favorezcan tanto la reducción del cash cost como el incremento de la utilidad neta y la rentabilidad minera. Así, el estudio no se limita a describir la problemática de costos en la operación, sino que propone una herramienta analítica orientada a mejorar la calidad de las decisiones vinculadas con la producción, el uso de equipos, la capacidad operativa y la gestión económica de la unidad minera.

El objetivo general de la tesis es aplicar modelos de optimización para incrementar la utilidad neta y reducir el cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.; de manera complementaria, se busca determinar su influencia en el incremento de la rentabilidad y en la reducción de los costos operativos. Esta orientación evidencia que el estudio no solo tiene una finalidad académica, sino también una clara vocación práctica, al plantear una alternativa de mejora directamente vinculada con la eficiencia operativa y el desempeño económico de la empresa.

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con nivel explicativo y diseño no experimental, empleando información operativa y económica de la propia unidad minera para formular y evaluar el modelo propuesto. Esta elección metodológica resulta pertinente, ya que permite analizar el comportamiento de las variables de interés en un contexto real de operación, sin alterar

directamente las condiciones del sistema productivo, pero sí generando evidencia suficiente para valorar el impacto potencial de la optimización sobre los indicadores económicos seleccionados.

La importancia de la investigación radica en que aborda una necesidad concreta de la gestión minera contemporánea: producir de manera más eficiente y rentable en entornos operativos complejos. Su aporte técnico consiste en proponer una estructura de análisis basada en modelos de optimización aplicables a la realidad de la minería subterránea; su aporte económico se expresa en la posibilidad de reducir costos operativos y fortalecer la rentabilidad de la unidad; y su aporte académico reside en ofrecer un referente metodológico para futuros estudios orientados a la mejora de la toma de decisiones en minería. En consecuencia, esta tesis busca demostrar que la aplicación de modelos de optimización no debe entenderse únicamente como un ejercicio matemático, sino como una herramienta estratégica para fortalecer la competitividad, sostenibilidad y eficiencia de la Unidad Minera El Brocal.

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema....1

1.2. Delimitación de la Investigación....2

1.2.1. Delimitación espacial....3

1.2.2. Delimitación Temporal....3

1.2.3. Delimitación Temática....3

1.2.4. Delimitación Metodológica....3

1.3. Formulación del Problema....4

1.3.1. Problema general....4

1.3.2. Problemas Específicos....4

1.4. Formulación de Objetivos....4

1.4.1. Objetivo general....4

1.4.2. Objetivos específicos....4

1.5. Justificación de la Investigación 5
1.5.1. Justificación Técnica 5
1.5.2. Justificación Económica 6
1.5.3. Justificación Social y Empresarial 7
1.6. Limitaciones de la Investigación 7
1.6.1. Limitaciones Metodológicas 7
1.6.2. Limitaciones del Modelo de Optimización 8
1.6.3. Limitaciones de Alcance 9

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio 11
2.1.1. Antecedentes internacionales 11
2.1.2. Antecedentes nacionales 14
2.2. Bases Teóricas – Científicas 20
2.2.1. Fundamentos Teóricos de la Optimización 20
2.2.2. Costos Operativos y Cash Cost en Minería Subterránea 24
2.2.3. Rentabilidad Minera y su Relación con la Optimización 33
2.2.4. Optimización Aplicada a la Planificación y Gestión Minera 38
2.2.5. Modelos de Optimización Aplicables a la Unidad Minera El Brocal 42
2.2.6. Desarrollo del Modelo Matemático de Programación Lineal 46
2.2.7. Ubicación de la Unidad Minera El Brocal 50
2.2.8. Accesibilidad 52
2.2.9. Historia 54
2.2.10. Geología Regional 55
2.2.11. Geología Local 58

2.2.12. Geología Estructural 61
2.2.13. Métodos de Explotación: Tajo Abierto y Subterránea 66
2.2.14. Planta Concentradora Huaraucaca 67
2.2.15. Producción, Volumen de Ventas y Desempeño Financiero 71
2.2.16. Capital Humano, Seguridad y Salud Ocupacional 72
2.2.17. Perspectivas Futuras y Proyectos de Expansión 72
2.3. Definición de términos básicos 73
2.4. Formulación de Hipótesis 77
2.4.1. Hipótesis general 77
2.4.2. Hipótesis específicas 77
2.5. Identificación de Variables 77
2.5.1. Variables Dependientes 77
2.5.2. Variables Independientes 78
2.6. Definición Operacional de Variables e Indicadores 78
2.6.1. Variable Independiente: Modelos de Optimización 78
2.6.2. Variables de las Hipótesis Secundarias 83

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación 89
3.1.1. Según su Finalidad: Investigación Aplicada 89
3.1.2. Según el Enfoque: Investigación Cuantitativa 90
3.1.3. Según el Nivel: Investigación Explicativa 90
3.1.4. Según el Diseño: Investigación No Experimental 91
3.2. Nivel de Investigación 92
3.3. Métodos de Investigación 93

3.3.1. Método Analítico....93
3.3.2. Método Deductivo....93
3.3.3. Método de Modelación Matemática....94
3.3.4. Método Comparativo....94
3.3.5. Integración de los Métodos de Investigación....95
3.4. Diseño de la Investigación....95
3.4.1. Diseño No Experimental....95
3.4.2. Diseño Transversal....96
3.4.3. Diseño Causal–Explicativo....97
3.4.4. Justificación del Diseño de Investigación....97
3.5. Población y muestra....98
3.5.1. Población....98
3.5.2. Muestra....99
3.5.3. Justificación de la Población y Muestra....99
3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos....100
3.6.1. Técnicas de Recolección de Datos....100
3.6.2. Instrumentos de Recolección de Datos....101
3.7. Selección, Validación y Confiabilidad de los Inst. de Investigación....103
3.7.1. Selección de los Instrumentos de Investigación....103
3.7.2. Validación de los Instrumentos de Investigación....104
3.7.3. Confiabilidad de los Instrumentos de Investigación....104
3.7.4. Importancia de la Validación y Confiabilidad en la Investigación....105
3.8. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos....106
3.8.1. Técnicas de Procesamiento de Datos....106
3.8.2. Técnicas de Análisis de Datos....107

3.9. Tratamiento Estadístico 109
3.9.1. Estadística Descriptiva 109
3.9.2. Estadística Comparativa 110
3.9.3. Análisis Porcentual y de Variación 110
3.9.4. Representación Estadística de los Resultados 111
3.9.5. Importancia del Tratamiento Estadístico en la Investigación 111
3.10. Orientación Ética Filosófica y Epistémica 111
3.10.1. Orientación Ética de la Investigación 111
3.10.2. Orientación Filosófica de la Investigación 112
3.10.3. Orientación Epistemológica de la Investigación 112
3.10.4. Integración Ética, Filosófica y Epistémica del Estudio 113

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo 114
4.1.1. Evaluación Estratégica de la Unidad Minera El Brocal 114
4.1.2. Geología, Mineralización y Reservas del Distrito de Colquijirca 118
4.1.3. Método de Explotación Subterránea en Marcapunta 120
4.1.4. Análisis de los Costos de Operación 2024 131
4.1.5. Desempeño Operativo y Producción Diaria 133
4.1.6. Sistema de Ventilación de la Mina Marcapunta 134
4.1.7. Infraestructura de Procesamiento-Plantas Concentradoras 136
4.1.8. Equipamiento de Minado y Servicios de Terceros 137
4.1.9. Gestión de Talento Humano y Seguridad Ocupacional 138
4.2. Presentación, Análisis e Interpretación de Resultados 139
4.2.1. Resumen de Operaciones por Frente (Estimados 2024) 139

4.2.2. Formulación del Modelo de Programación Lineal 142
4.2.3. Solución del Modelo de Programación Lineal 145
4.2.4. Evolución de la Producción y el Desempeño Operativo 2023-2024 149
4.2.5. Análisis de la Utilidad Neta 2023-2024 150
4.2.6. Estructura y Evaluación del Cash Cost 2023-2024 154
4.2.7. Desempeño Productivo y Transición Estratégica (2023-2024) 157
4.2.8. Análisis de los Costos Operativos Mensuales 159
4.2.9. Análisis de Rentabilidad y Valor Actual Neto (VAN) 163
4.3. Prueba de Hipótesis 167
4.3.1. Hipótesis General 167
4.3.2. Hipótesis Específicas 175
4.4. Discusión de Resultados 187
4.4.1. Diferencia Entre Reducción Absoluta y Evitada de Costos 193
CONCLUSIONES
RECOMENDACIONES
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Mapa de Ubicación de la Unidad Minera El Brocal.....51

Figura 2. Accesibilidad de la Unidad Minera El Brocal.....53

Figura 3. Mapa Geológico Regional.....57

Figura 4. Mapa Geológico Local.....60

Figura 5. Columna Litoestratigráfica de Colquijirca.....62

Figura 6. Geología Económica.....65

Figura 7. Planta Concentradora de Huaraucaca.....68

Figura 8. Circuito de Chancado.....69

Figura 9. Circuito de Molienda.....70

Figura 10. Mapa de Operaciones y Proyectos.....116

Figura 11. Génesis de la Calcosita de Marcapunta Oeste.....118

Figura 12. Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos.....124

Figura 13. Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos.....125

Figura 14. Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos.....126

Figura 15. Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos.....127

Figura 16. Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos.....128

Figura 17. Vista de Perfil del Esquema de Relleno Detrítico.....130

Figura 18. Planta Concentradora de Huaraucaca.....137

Figura 19. Utilidad Neta 2023-2024.....154

Figura 20. Cash Cost 2023-2024 157

Figura 21. Costo Operativo 2023-2024 162

Figura 22. VAN 2023-2024 en la UM El Brocal 166

Figura 23. Gráfico de Barras de la Utilidad Neta 2023-2024 169

Figura 24. Histograma de la Utilidad Neta 2023-2024 170

Figura 25. Gráfico de Barras del Cash Cost 2023-2024 170

Figura 26. Histograma del Cash Cost 2023-2024 171

Figura 27. Curva Normal de la Utilidad Neta 2023-2024 172

Figura 28. Gráficos Q-Q Plot de la Curva Normal del Cash Cost 2023-2024 172

Figura 29. Media de la Utilidad Neta 174

Figura 30. Media y Mediana del Cash Cost (US$/lb Cu) 174

Figura 31. Gráfico de Barras del VAN de los años 2023 y 2024 177

Figura 32. Histograma del VAN de los años 2023 y 2024 178

Figura 33. Gráficos Q-Q del VAN 2023 y 2024 179

Figura 34. Gráfico de la Media y Mediana del VAN de los Años 2023 y 2024 180

Figura 35. Gráfico de Barras de los Costos Operativos Estimados 2023-2024 183

Figura 36. Histograma de los Costos Operativos Estimados 2023-2024 184

Figura 37. Gráficos Q-Q de los Costos Operativos 2023-2024 185

Figura 38. Marcapunta NV 3872 214

Figura 39. Marcapunta Nv 3892 215

Figura 40. Marcapunta Nv 3960 216

Figura 41. Marcapunta Nv 4012 218

Figura 42. Marcapunta Nv 4180 B050 Norte 219

Figura 43. Marcapunta Nv 4200 B050 Norte 220

Figura 44. Tajo Norte de la Unidad Minera El Brocal 221

Figura 45. Ingreso a la Mina Marcapunta Norte 221

Figura 46. Tesista en Trabajos de Recolección de Datos de Campo 222

Figura 47. Sala de Reuniones de Trabajo en el Interior de la Mina 222

Figura 48. Equipo de Perforación de Taladros Largos 223

Figura 49. Tesista en Trabajos de Sostenimiento de Labores Subterráneas 223

Figura 50. Material Suelto Como Resultado de la Voladura 224

Figura 51. Flota deEquipos de Transporte de Mineral 224

Figura 52. Sostenimiento de Labores Subterráneas 225

Figura 53. Carguío y Transporte de Mineral 225

Figura 54. Tesista Revisando la Zona Antes del Disparo 226

Figura 55. La Granulometría del Material Suelto Luego de una Voladura 226

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Optimización y cash cost en minería 23

Tabla 2. Componentes del Cash Cost en Minería Subterránea 32

Tabla 3. Principales Indicadores de Rentabilidad en Minería Subterránea 35

Tabla 4. Impacto de la Reducción del Cash Cost en la Rentabilidad 37

Tabla 5. Optimización de Recursos y su Impacto en el El Cash Cost 40

Tabla 6. Variables de Decisión del Modelo de Optimización 43

Tabla 7. Resumen de Restricciones del Modelo de Optimización 45

Tabla 8. Variables de Decisión 47

Tabla 9. Costos Operativos Unitarios (Cash cost por frente) 47

Tabla 10. Capacidad Máxima por Frente 47

Tabla 11. Solución Óptima 49

Tabla 12. Distribución empírica 49

Tabla 13. Comparación de Escenarios 49

Tabla 14. Historia de la Unidad Minera El Brocal 55

Tabla 15. Minerales Característicos 64

Tabla 16. Estadísticas de Producción del 2023-2024 UM El Brocal 71

Tabla 17. Indicadores de la Variable Independiente 79

Tabla 18. Indicadores de la Variable Costos Operativos 80

Tabla 19. Indicadores de la Variable Rentabilidad Minera 81

Tabla 20. Indicadores e la Variable Cash Cost 82

Tabla 21. Operacionalización de la Variable Independiente 86

Tabla 22. Variable Dependiente 1: Rentabilidad Minera 87

Tabla 23. Variable Dependiente 2: Costos Operativos 87

Tabla 24. Reservas y Recursos 120
Tabla 25. Dimensiones Determinadas de los Tajos 129
Tabla 26. Costo Operativo 133
Tabla 27. Costo de Operación 140
Tabla 28. Utilidad Neta 2023 151
Tabla 29. Utilidad Neta 2024 152
Tabla 30. Utilidad Neta 2023-2024 153
Tabla 31. Cash Cost 2023 155
Tabla 32. Cash Cost 2024 156
Tabla 33. Cash Cost 2023-2024 156
Tabla 34. Producción de la Unidad Minera El Brocal (2023-2024) 158
Tabla 35. Costo de Operación Mensual 2023 de la UM El Brocal 160
Tabla 36. Costo de Operación Mensual 2024 de la UM El Brocal 161
Tabla 37. Comparación del Costo Operativo de la UM El Brocal 2023-2024 162
Tabla 38. Valor Actual Neto Mensual de Enero a Diciembre 2023 164
Tabla 39. Valor Actual Neto Mensual de Enero a Diciembre 2024 165
Tabla 40. VAN 2023-2024 166
Tabla 41. Utilidad Neta y Cash Cost de la UM El Brocal 2023-2024 168
Tabla 42. Descriptivos de la Utilidad Neta y del Cash Cost de la UM El Brocal 169
Tabla 43. Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk 171
Tabla 44. Prueba de Mann Whitney U para Muestras Independientes 173
Tabla 45. Valor Actual Neto (VAN) Mensual de los Años 2023 y 2024 176
Tabla 46. Descriptivos del VAN de la UM El Brocal 2023-2024 177
Tabla 47. Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk 178
Tabla 48. Prueba de Homogeneidad de Varianzas (Levene's) del VAN 179

Tabla 49. Prueba t de Student para Muestras Independientes 180

Tabla 50. Costos Operativos Estimados (US$/t) en la UM El Brocal 2023-2024.....182

Tabla 51. Descriptivos de la Variable en Estudio.....183

Tabla 52. Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk 184

Tabla 53. Prueba de Homogeneidad de Varianzas (Levene's) de los Costos Operativos.....185

Tabla 54. Prueba t de Student para Muestras Independientes 186

Tabla 55. Media y Mediana de los Costos Operativos 2023 y 2024 186

Tabla 56. Discusión de Resultados.....196

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

La actividad minera es un sector altamente competitivo que requiere una gestión eficiente de los recursos para garantizar la rentabilidad de las operaciones. En este contexto, la Unidad Minera El Brocal, perteneciente a la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., enfrenta una serie de desafíos relacionados con el incremento de los costos operativos y la necesidad de mejorar sus indicadores de rentabilidad.

En la operación minera se identifican problemas asociados a la asignación ineficiente de recursos, tales como equipos, mano de obra, energía y materiales, así como a una planificación operativa que no siempre considera criterios cuantitativos de optimización. Estas deficiencias generan sobrecostos, tiempos improductivos y un uso subóptimo de la capacidad instalada, afectando directamente el costo por tonelada producida y el margen económico de la unidad minera.

Asimismo, la toma de decisiones operativas se realiza, en muchos casos, basándose en la experiencia empírica y en métodos tradicionales, sin el apoyo sistemático de modelos matemáticos que permitan evaluar diferentes escenarios y

seleccionar la alternativa más eficiente. Esta situación limita la capacidad de la empresa para responder de manera óptima a la variabilidad de las condiciones operativas, tales como cambios en la ley del mineral, disponibilidad de equipos o restricciones presupuestales.

Por lo tanto, se identifica como problema principal la ausencia de herramientas de optimización que permitan una adecuada planificación y gestión de los recursos operativos, lo que se traduce en costos elevados y una rentabilidad inferior al potencial esperado en la Unidad Minera El Brocal.

A partir de la identificación del problema, se plantea la necesidad de analizar y evaluar la aplicación de modelos de optimización matemática como una alternativa técnica para mejorar la eficiencia operativa de la unidad minera. La determinación del problema se centra en establecer de qué manera la implementación de estos modelos puede contribuir a reducir los costos operativos y, al mismo tiempo, incrementar la rentabilidad de la operación minera.

En este sentido, el problema de investigación se formula considerando la relación directa entre la asignación de recursos, los costos operativos y los resultados económicos de la unidad minera. La falta de una planificación optimizada genera decisiones subóptimas que impactan negativamente en el desempeño financiero de la empresa, haciendo evidente la necesidad de incorporar herramientas cuantitativas en la gestión minera.

1.2. Delimitación de la Investigación

La presente investigación se delimita con el propósito de establecer con claridad el alcance del estudio, definiendo los límites espaciales, temporales, temáticos y metodológicos dentro de los cuales se desarrolla el trabajo de investigación. Estas delimitaciones permiten enfocar el análisis y garantizar la viabilidad del estudio.

1.2.1. Delimitación espacial

La investigación se desarrolla en la Unidad Minera El Brocal, perteneciente a la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., ubicada en la región Pasco, Perú. El estudio se centra exclusivamente en las operaciones productivas y de gestión de dicha unidad minera, considerando su estructura operativa y económica, sin extender el análisis a otras unidades mineras de la empresa.

1.2.2. Delimitación Temporal

El período de análisis de la investigación comprende la información operativa y económica correspondiente a un intervalo específico de tiempo, el cual se considera representativo del comportamiento de los costos y la rentabilidad de la unidad minera. Este período permite evaluar la situación actual de la operación y analizar los efectos de la aplicación de los modelos de optimización, sin considerar proyecciones a largo plazo ni escenarios futuros fuera del marco temporal definido.

1.2.3. Delimitación Temática

La investigación se delimita al análisis y aplicación de modelos de optimización matemática orientados a la reducción de costos operativos y al incremento de la rentabilidad en la operación minera. El estudio se enfoca en la optimización de la asignación de recursos operativos, tales como equipos, mano de obra y costos asociados a los procesos productivos.

1.2.4. Delimitación Metodológica

Desde el punto de vista metodológico, la investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y con un diseño no experimental. Se emplean técnicas de análisis matemático y económico, utilizando información real de la unidad minera para la formulación y aplicación de los modelos de optimización.

La investigación no contempla la realización de experimentos controlados ni la manipulación directa de variables en el entorno real de la operación, sino que se basa en el análisis de datos existentes y en la simulación de escenarios optimizados mediante modelos matemáticos.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema general

¿De qué manera la aplicación de modelos de optimización influye en el incremento de la utilidad neta y en la reducción del cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?

1.3.2. Problemas Específicos

a. ¿Cómo la aplicación de modelos de optimización influye en el incremento de la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?

b. ¿Cómo la aplicación de modelos de optimización influye en la reducción del costo en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?

1.4. Formulación de Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Aplicar Modelos de Optimización para incrementar la utilidad neta y reducir el cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

1.4.2. Objetivos específicos

a. Determinar la influencia de la aplicación de Modelos de Optimización para incrementar la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

b. Determinar la influencia de la aplicación de Modelos de Optimización para reducir el costo en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

1.5. Justificación de la Investigación

La presente investigación se justifica por la necesidad de mejorar la eficiencia operativa y el desempeño económico de las operaciones mineras, considerando el contexto actual de alta competitividad, incremento de costos y exigencia de una gestión más eficiente de los recursos. En este sentido, la aplicación de modelos de optimización constituye una herramienta estratégica que permite apoyar la toma de decisiones y contribuir al incremento de la rentabilidad y la reducción de los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal, perteneciente a la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

1.5.1. Justificación Técnica

Desde el punto de vista técnico, la investigación se justifica porque propone la aplicación de modelos de optimización matemática como una alternativa para mejorar la planificación y asignación de los recursos operativos en la unidad minera. El uso de técnicas como la programación matemática permite analizar múltiples variables y restricciones propias de la operación minera, tales como capacidad productiva, disponibilidad de equipos, costos operativos y limitaciones presupuestales, con el fin de encontrar soluciones óptimas que maximicen los beneficios económicos.

Asimismo, el estudio contribuye al fortalecimiento de la gestión operativa al proporcionar un enfoque sistemático y cuantitativo para la toma de decisiones, reduciendo la dependencia de métodos empíricos y tradicionales. De esta manera, la investigación aporta una metodología técnica aplicable a la realidad operativa de la unidad minera, permitiendo mejorar la eficiencia y productividad de los procesos.

1.5.2. Justificación Económica

Desde la perspectiva económica, la investigación se justifica debido a que los costos operativos representan uno de los principales factores que afectan la rentabilidad de las operaciones mineras. La identificación y optimización de los costos asociados a los procesos productivos permiten reducir el costo por tonelada producida y mejorar los márgenes de rentabilidad.

La aplicación de modelos de optimización posibilita evaluar diferentes escenarios operativos y seleccionar aquellos que generan menores costos y mayores beneficios económicos. En consecuencia, los resultados de esta investigación pueden contribuir a una mejor gestión financiera de la unidad minera, incrementando su competitividad y sostenibilidad económica en el tiempo.

Según Ellram & Tate (2021), la evitación de costos comprende las acciones preventivas realizadas por una organización para impedir que se produzcan gastos futuros o incrementos de costos que, sin dichas acciones, afectarían sus resultados económicos. A diferencia de una reducción directa de costos, este beneficio no siempre se refleja inmediatamente en los estados financieros, debido a que representa un gasto potencial que no llegó a materializarse.

Por su parte, Howard & Pathak (1999) señalan que los costos evitados corresponden al valor económico de los recursos que una organización deja de gastar como resultado de una intervención, medida preventiva o mejora en sus procesos. En este sentido, su determinación requiere comparar los costos que probablemente se habrían generado sin la intervención con los costos efectivamente registrados después de su implementación.

En síntesis, la reducción evitada de costos puede definirse como el beneficio económico obtenido al prevenir accidentes, fallas, interrupciones, sanciones u otros

acontecimientos que habrían ocasionado gastos adicionales para la organización (Howard & Pathak, 1999).

1.5.3. Justificación Social y Empresarial

Desde el enfoque social y empresarial, la investigación se justifica porque una operación minera más eficiente y rentable contribuye al desarrollo sostenible de la empresa y de su entorno. La reducción de costos y la mejora de la rentabilidad permiten garantizar la continuidad de las operaciones, la generación de empleo y el cumplimiento de compromisos económicos y sociales.

Además, la optimización en el uso de los recursos promueve una gestión más responsable, alineada con principios de eficiencia y sostenibilidad, beneficiando tanto a la empresa como a la comunidad vinculada a la actividad minera.

1.6. Limitaciones de la Investigación

La presente investigación presenta determinadas limitaciones que deben ser consideradas para una adecuada interpretación de los resultados obtenidos. Estas limitaciones no invalidan el estudio, pero establecen el marco dentro del cual se desarrolló la investigación.

1.6.1. Limitaciones Metodológicas

Desde el punto de vista metodológico, la presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y con un diseño no experimental, lo cual constituye una limitación inherente al estudio. Este diseño implica que no se realiza la manipulación directa de las variables en el entorno real de la operación minera, sino que el análisis se basa en la observación, recopilación y procesamiento de datos existentes. En consecuencia, los resultados obtenidos reflejan escenarios analíticos y simulados, mas no efectos derivados de una intervención directa implementada en la operación.

Asimismo, la investigación depende de la calidad, consistencia y disponibilidad de los datos operativos y económicos proporcionados por la unidad minera. Cualquier imprecisión, variabilidad o falta de actualización en dichos datos puede influir en los resultados del modelo de optimización y, por ende, en las conclusiones del estudio. Esta dependencia de información secundaria limita la posibilidad de controlar completamente las variables externas que influyen en los costos y la rentabilidad.

Adicionalmente, el enfoque cuantitativo prioriza el análisis numérico y matemático, dejando de lado aspectos cualitativos relevantes como la experiencia del personal, la cultura organizacional o los factores humanos que también influyen en la eficiencia operativa. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una aproximación técnica al problema, complementaria a otros enfoques de gestión, mas no como una solución absoluta.

1.6.2. Limitaciones del Modelo de Optimización

Los modelos de optimización aplicados en la investigación presentan limitaciones propias de su naturaleza matemática y de los supuestos bajo los cuales son formulados. Para hacer viable el modelo, se requiere simplificar la realidad operativa de la unidad minera, estableciendo supuestos como relaciones lineales entre variables, disponibilidad constante de recursos y condiciones operativas estables. Estas simplificaciones, aunque necesarias, pueden no reflejar completamente la complejidad y dinámica real de una operación minera.

En la práctica, las operaciones mineras están sujetas a variabilidad en la ley del mineral, fallas de equipos, interrupciones no programadas, cambios en los precios de insumos y restricciones operativas imprevistas. Estos factores, difíciles de modelar de manera exacta, no siempre pueden ser incorporados en el modelo de optimización, lo que limita la precisión de los resultados cuando se comparan con la realidad operativa.

Asimismo, el modelo se construye a partir de un conjunto específico de variables y restricciones, por lo que no contempla todas las interacciones posibles entre los procesos productivos. En este sentido, los resultados obtenidos representan una solución óptima dentro del marco del modelo planteado, mas no necesariamente la única ni la mejor solución en un entorno real altamente dinámico. Por ello, el modelo debe ser considerado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones y no como un sustituto del criterio técnico y gerencial.

1.6.3. Limitaciones de Alcance

En cuanto al alcance, la investigación se limita exclusivamente al análisis de la aplicación de modelos de optimización para reducir los costos operativos e incrementar la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal. El estudio no extiende sus conclusiones a otras unidades mineras de la empresa ni a otras operaciones del sector minero, por lo que los resultados obtenidos no deben generalizarse sin un análisis previo de cada contexto específico.

Asimismo, el alcance del estudio se circunscribe únicamente a aspectos económicos y operativos relacionados con la eficiencia y el uso de recursos. No se consideran variables vinculadas a impactos ambientales, sociales, legales, de seguridad y salud ocupacional, ni a factores externos como la fluctuación del mercado internacional de minerales o cambios en el marco normativo. Estos aspectos, aunque relevantes para la gestión minera integral, quedan fuera del objetivo de la investigación.

De igual forma, la investigación no aborda evaluaciones de largo plazo ni escenarios prospectivos, limitándose a un período de análisis definido. En consecuencia, los resultados reflejan una situación específica en el tiempo y deben interpretarse dentro de ese contexto. Esta delimitación permite profundizar el análisis

en el problema planteado, pero restringe la extrapolación de los resultados a escenarios futuros o a condiciones distintas a las estudiadas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Diversos estudios han evidenciado que la aplicación de modelos de optimización es importante para incrementar la rentabilidad y reducir el costo en las empresas mineras. A continuación, se presentan algunos antecedentes relevantes que sustentan la necesidad de desarrollar un modelo de gestión de la fatiga en minería:

2.1.1. Antecedentes internacionales

Anticona-cueva et al. (2024), en el artículo "*Evaluation of Predictive Models for the Optimization of the Cost of Unit Operations in Artisanal Underground Mining*", la investigación se centró en evaluar y optimizar los costos de operaciones unitarias en minería subterránea artesanal mediante modelos predictivos basados en machine learning.

Se aplicaron cuatro modelos predictivos: regresión lineal múltiple (MLR), Random Forest (RF), árbol de decisión (DT) y redes neuronales artificiales (ANN), usando datos operativos, geológicos y económicos recopilados durante tres meses. Los resultados revelan que el modelo de árbol de decisión fue el más eficaz con R^2 de 0.90,

permitiendo identificar costos óptimos para actividades clave como perforación y voladura, carguío y acarreo, ventilación y sostenimiento. Respecto a las conclusiones los modelos predictivos, especialmente el árbol de decisión, permiten optimizar los costos operativos y mejorar la rentabilidad en minería subterránea artesanal mediante decisiones basadas en datos, abriendo oportunidades para futuras aplicaciones.

Díaz et al. (2026) en el artículo "*A Theoretical Model for Predicting the Blasting Energy Factor in Underground Mining Tunnels*", la investigación se centró en desarrollar un modelo teórico para predecir el factor de energía de voladura en túneles de minería subterránea, con el fin de mejorar la fragmentación de roca y la productividad.

La Metodología empleada indica que la formulación matemática del modelo que relaciona la energía de voladura con parámetros geomecánicos y operativos, basado en datos de campo y teoría de fragmentación de roca. Sobre los Resultados el modelo permitió estimar la distribución óptima de energía de voladura para maximizar la fragmentación y minimizar sobreexcavación. Las conclusiones de la investigación indican que un diseño adecuado de parámetros de voladura contribuye a una fragmentación más eficiente, reduciendo costos de downstream y mejorando la rentabilidad de operaciones subterráneas.

Cotrina et al. (2025) en el artículo titulado: "*Prediction of Unit Haulage Cost in an Underground Mine Using Machine Learning Techniques*", la investigación se centró en predecir el costo unitario de acarreo de mineral en una mina subterránea empleando técnicas de machine learning para optimizar la planificación de transporte.

Utilizando un diseño cuantitativo no experimental; se recopilaron datos de acarreo durante 12 meses y se probaron múltiples modelos: ANN-MLP, Random Forest, XGBoost, SVR, KNN y regresión bayesiana, con división en entrenamiento,

prueba y validación. Los resultados revelan que el mejor desempeño lo obtuvo el modelo XGBoost con R^2 de 0.99 y menor error medio cuadrático, lo cual permitió una predicción precisa de costos por tonelada de acarreo. Las conclusiones indican que las técnicas de machine learning son herramientas efectivas para prever costos operativos en minería subterránea y apoyar decisiones que pueden reducir costos y mejorar rentabilidad.

Díaz et al. (2026) en el artículo titulado: "*A Theoretical Model for Predicting the Blasting Energy Factor in Underground Mining Tunnels*", la investigación se centró en proponer un modelo teórico que prediga la distribución óptima de energía de voladura para mejorar la fragmentación de roca en minería subterránea.

Utilizando un enfoque cuantitativo desarrolló una función objetivo que minimiza pérdidas energéticas y calcula parámetros de voladura basados en propiedades geotécnicas. Los resultados revelan que el modelo teórico logró estimaciones mejores de factores energéticos para distintas condiciones de roca, mejorando fragmentación sin incrementar costos operativos. Respecto a las conclusiones, la aplicación de modelos teóricos de voladura optimizada puede reducir costos asociados a procesos de conminución, generando beneficios económicos en operaciones subterráneas.

Nacional & Ruiz-santos (2025) en el artículo titulado: °Optimización de tiempos para reducir costos en carguío y acarreo mediante un modelo de Red Neuronal Artificial", la investigación se centró en optimizar tiempos de carguío y acarreo en operaciones mineras, con la finalidad de reducir costos operativos mediante redes neuronales artificiales.

Utilizando un enfoque cuantitativo cuasi-experimental con monitoreo de tiempos de operación y aplicación de una red neuronal predictiva para estimar costos

asociados. Los resultados revelan que se redujeron tiempos de carguío en 11.45% y de acarreo en 12.73%, reduciendo costos totales en 0.34 USD/TM por mejoras en la programación y mantenimiento de rutas. Respecto a las conclusiones de la investigación, el uso de modelos predictivos basados en redes neuronales puede traducirse en mejoras significativas de eficiencia operativa y reducción de costos en minería subterránea.

Malundamene et al. (2025) en el artículo titulado: "State-of-the-art Optimization Methods for Short-Term Mine Planning". La investigación se centró en revisar las técnicas de optimización actuales aplicadas a la planificación de minas, con énfasis en la reducción de costos y eficiencias operativas a corto plazo.

Usando la metodología de revisión sistemática de la literatura científica para identificar desafíos y soluciones metodológicas en planificación minera, con foco en modelos matemáticos y heurísticos. Los resultados revelan que los modelos de optimización para planificación a corto plazo requieren mayor desarrollo y que integrar machine learning con métodos tradicionales mejora predicciones de costos y producción. Las conclusiones indican que se destaca la necesidad de investigación adicional para desarrollar modelos más eficientes de planificación que consideren incertidumbre, variabilidad operativa y reducción de costo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Alvarez (2021), en la tesis de pregrado titulada "Incremento de la rentabilidad económica optimizando la operación de transporte en minería", la investigación se centró en incrementar la rentabilidad económica de una operación minera mediante la optimización del sistema de transporte interno, reduciendo los costos asociados al acarreo del mineral.

La investigación empleó un enfoque cuantitativo y aplicado, utilizando análisis de tiempos, costos unitarios y simulación de escenarios de transporte. Se compararon escenarios operativos antes y después de la optimización del sistema de acarreo. Los resultados mostraron una reducción significativa de los costos unitarios de transporte y una mejora en el margen económico de la operación minera, sin necesidad de aumentar la producción. Se concluyó que la optimización del transporte interno es una estrategia efectiva para mejorar la rentabilidad minera, evidenciando la importancia de la planificación operativa basada en datos.

Aragon (2019), en su tesis de pregrado titulada "Análisis del Impacto del Cut-Off Marginal y el Cut-Off Incremental al Implementarlos desde el Planeamiento Conceptual de una Mina Subterránea", la investigación se centró en analizar la analizar la estructura de costos operativos en una operación de minería subterránea y evaluar su impacto en la eficiencia económica del proceso productivo.

Se utilizó un enfoque descriptivo–analítico, basado en el análisis documental de registros de costos operativos y productivos, identificando los componentes de mayor incidencia en el costo total. Los resultados de la investigación evidenciaron que los costos de carguío, acarreo y sostenimiento representan una proporción significativa del costo operativo total, y que la falta de integración en la planificación incrementa el costo por tonelada. Se concluyó que una gestión integrada de costos es fundamental para mejorar la eficiencia económica en minería subterránea, recomendándose el uso de herramientas de optimización.

Santos (2025) en su artículo titulada: "Optimización de tiempos para reducir costos en carguío y acarreo mediante un modelo de Red Neuronal Artificial", la investigación se centró en reducir los costos operativos asociados al carguío y acarreo mediante la optimización de los tiempos de ciclo de los equipos mineros.

La investigación empleó un enfoque cuantitativo, utilizando estudios de tiempos y movimientos, análisis estadístico descriptivo y simulación de escenarios operativos optimizados. Los resultados evidenciaron una reducción de tiempos improductivos y una disminución significativa de los costos operativos totales asociados al proceso de carguío y acarreo. La investigación concluyó indicando que la optimización de tiempos operativos mejora la eficiencia del sistema productivo y contribuye directamente a la reducción de costos en minería subterránea.

Boleje (2024) en su tesis de pregrado titulada "Optimización del avance lineal y costos por disparo mediante la mejora del proceso de perforación y voladura en U.M. El Porvenir, Nexa Resources – 2024", la investigación se centró en incrementar el rendimiento operativo y reducir los costos de perforación y voladura mediante el rediseño de la malla de perforación.

Se empleó un enfoque experimental–aplicado, comparando diseños de malla y evaluando su impacto en costos y productividad. Los resultados revelan que el rediseño optimizado incrementó la productividad y redujo los costos operativos asociados a la perforación y voladura. Respecto a las conclusiones indicó que la optimización del diseño de perforación es una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia económica en minería subterránea.

Ayala (2024) en su artículo titulada "Herramientas de gestión para la optimización del minado subterráneo", la investigación se centró en evaluar el impacto del uso de herramientas de gestión en la optimización de procesos mineros y el control de costos.

Se utilizó un enfoque descriptivo–aplicado, basado en el análisis de indicadores de gestión y desempeño operativo. Los resultados evidenciaron una mejora en el control de costos y en la eficiencia operativa del proceso minero. Las conclusiones indicaron

que las herramientas de gestión contribuyen a la optimización de procesos y a la mejora de la rentabilidad minera.

Medina-tasilla et al. (2024) en el artículo titulada "*Optimizing mineral extraction in Peru: Integrating geometallurgical planning with Mining 4.0 technologies*", la investigación se centró en optimizar la extracción de minerales mediante la integración de planificación geometalúrgica y tecnologías avanzadas.

Se empleó un enfoque cuantitativo y tecnológico, utilizando análisis de datos, simulación y planificación integrada. Los resultados evidenciaron que la integración tecnológica permitió mejorar la eficiencia productiva y reducir costos operativos globales. La investigación concluyó indicando que la planificación integrada y la optimización avanzada contribuyen significativamente a la sostenibilidad económica de la minería peruana.

Carlos & Carboni (2023), en su tesis de maestría titulada "Optimización de diseños de minas subterráneas usando el algoritmo pseudoflow", la investigación se centró en aplicar el algoritmo pseudoflow para optimizar el diseño de una mina subterránea, con el propósito de mejorar la planificación del minado y maximizar la rentabilidad económica del proyecto.

La investigación emplea un enfoque cuantitativo y aplicado. Se desarrolló un modelo matemático basado en el algoritmo pseudoflow para optimizar la selección de bloques y el diseño de labores subterráneas, considerando restricciones geológicas y económicas. Los resultados revelan que el modelo permitió identificar diseños de explotación más eficientes, mejorando el valor económico del proyecto minero y optimizando la secuencia de extracción del mineral. La investigación concluyó indicando que el uso de algoritmos de optimización constituye una herramienta eficaz para mejorar el diseño de minas subterráneas y aumentar la rentabilidad del proyecto.

Castellano et al. (2026), en su tesis de maestría titulada "Proyecto de ampliación de operaciones para incrementar la rentabilidad de una mina subterránea en el Perú", la investigación se centró en evaluar un proyecto de ampliación de operaciones con el fin de incrementar la rentabilidad y eficiencia productiva de una mina subterránea.

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo y aplicado. Se realizó un análisis técnico-económico de escenarios de ampliación operativa, considerando costos, producción y rentabilidad mediante indicadores financieros. Los resultados muestran que la ampliación de operaciones permite incrementar la producción y mejorar los indicadores de rentabilidad, siempre que se optimice la asignación de recursos y los costos operativos. El estudio concluye indicando que la planificación y optimización de proyectos de ampliación son determinantes para mejorar la rentabilidad en minería subterránea.

Velasquez & Zevallos (2025), en su tesis de pregrado titulada "Análisis de costos y optimización del plan de minado en la Unidad Minera CMC Critical Minerals Corporation S.A.C.", la investigación se centró en analizar la estructura de costos y optimizar el plan de minado para mejorar la rentabilidad de una operación minera subterránea.

El estudio utiliza un enfoque cuantitativo y aplicado, analizando costos operativos y evaluando alternativas de planificación del minado mediante herramientas de análisis económico. En los resultados se identificaron oportunidades de reducción de costos y se propuso un plan de minado optimizado que mejora la eficiencia operativa y los márgenes económicos. Como conclusión el estudio revela que la optimización del plan de minado permite reducir costos operativos y fortalecer la rentabilidad de la unidad minera.

Checca (2022), en su tesis de pregrado titulada “Optimización de costos de perforación, voladura, carguío y acarreo en mina subterránea”, la investigación se centró en optimizar los costos de las principales operaciones unitarias de una mina subterránea para incrementar la rentabilidad del proceso productivo.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y aplicado. Se analizaron costos operativos de perforación, voladura, carguío y acarreo, proponiendo mejoras técnicas y operativas para su optimización. Los resultados revelan que las propuestas permitieron reducir los costos unitarios de las operaciones analizadas, mejorando la eficiencia del ciclo productivo. Respecto a las conclusiones, el estudio demuestra que la optimización de las operaciones unitarias tiene un impacto directo en la reducción de costos y en la mejora de la rentabilidad minera.

Chambi et al. (2025), en su artículo titulada “Predictive maintenance in underground mining equipment: An AI-based optimization approach to reduce costs and improve efficiency”, la investigación se centró en aplicar un modelo de mantenimiento predictivo basado en inteligencia artificial para reducir costos de operación y mejorar la eficiencia de equipos en minería subterránea.

La investigación adopta un enfoque cuantitativo y aplicado. Se desarrolló un modelo de inteligencia artificial para predecir fallas en equipos mineros y optimizar las actividades de mantenimiento. Los resultados indican que el modelo permitió reducir fallas no programadas y costos de mantenimiento, mejorando la disponibilidad de los equipos. Como conclusiones del estudio indica que el mantenimiento predictivo basado en IA contribuye significativamente a la reducción de costos y al incremento de la eficiencia operativa en minería subterránea.

Vera et al. (2024) en su tesis de maestría titulada “Estrategias para minimizar el *cash cost* en una operación minera subterránea”, la investigación se centró en

proponer estrategias para minimizar el *cash cost* en una operación minera subterránea, con el fin de mejorar su rentabilidad económica.

Utilizando un enfoque cuantitativo y aplicado, analizando la estructura de costos y evaluando estrategias de optimización operativa y financiera. En los resultados se identificaron estrategias que permiten reducir el *cash cost* mediante una mejor gestión de recursos y control de costos. Como conclusión del estudio, la aplicación de estrategias orientadas a la reducción del *cash cost* contribuye de manera directa a mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera.

2.2. Bases Teóricas – Científicas

2.2.1. Fundamentos Teóricos de la Optimización

Concepto de Optimización

La optimización es una disciplina fundamental de la investigación operativa y de la ingeniería que se orienta a la búsqueda de la mejor solución posible dentro de un conjunto de alternativas factibles, considerando un objetivo específico y un conjunto de restricciones. En términos generales, optimizar implica maximizar o minimizar una función objetivo, la cual puede representar costos, beneficios, tiempos, utilidades o rentabilidad, entre otros indicadores clave de desempeño.

En el ámbito de la ingeniería y la gestión industrial, la optimización se emplea como una herramienta cuantitativa para apoyar la toma de decisiones complejas, especialmente en sistemas caracterizados por el uso intensivo de recursos y alta variabilidad operativa, como ocurre en la minería subterránea. A diferencia de los métodos empíricos tradicionales, la optimización permite evaluar múltiples escenarios de manera sistemática, reduciendo la subjetividad y mejorando la eficiencia global del sistema (Hillier et al., 2021).

En minería subterránea, la optimización adquiere especial relevancia debido a que los costos operativos representan una proporción significativa del costo total de producción. Por ello, la aplicación de modelos de optimización orientados a la minimización del *cash cost* se convierte en una estrategia clave para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la operación minera.

Optimización Como Herramienta Para la Toma de Decisiones

La toma de decisiones en minería subterránea involucra la interacción de múltiples variables técnicas, económicas y operativas, tales como disponibilidad de equipos, capacidad productiva, costos de energía, mano de obra y restricciones geomecánicas. En este contexto, la optimización permite estructurar el problema de decisión de forma matemática, facilitando la identificación de soluciones eficientes.

Según Hillier et al. (2021), los modelos de optimización permiten transformar problemas reales en formulaciones matemáticas que pueden ser resueltas mediante algoritmos específicos, proporcionando soluciones óptimas o cuasi óptimas que mejoran el desempeño del sistema. En operaciones mineras, estas soluciones se reflejan en una mejor asignación de recursos, reducción de costos unitarios y mejora de indicadores económicos como el margen operativo y el *cash cost*.

Modelos de Optimización

Un modelo de optimización es una representación matemática simplificada de un sistema real, diseñada para analizar su comportamiento y encontrar la mejor alternativa de decisión bajo determinadas condiciones. Todo modelo de optimización está compuesto por tres elementos fundamentales:

A. Función Objetivo

Representa el objetivo principal del sistema, el cual puede ser minimizar costos operativos, minimizar el *cash cost* o maximizar la rentabilidad.

B. Variables de decisión

Son las cantidades controlables del sistema, como:

- Cantidad de mineral a extraer.
- Asignación de equipos.
- Horas de operación.
- Distribución de recursos.

C. Restricciones

Representan las limitaciones técnicas, operativas o económicas del sistema, tales como capacidad de equipos, disponibilidad de mano de obra, límites de producción o condiciones geológicas.

Tipos de Modelos de Optimización Aplicables a Minería

Los modelos de optimización pueden clasificarse según la naturaleza del problema y las variables involucradas. En minería subterránea, los más utilizados son:

A. Programación Lineal (PL)

Se emplea cuando la función objetivo y las restricciones son lineales. Es ampliamente utilizada para minimizar costos operativos y optimizar la asignación de recursos.

B. Programación Entera (PE)

Se aplica cuando las variables de decisión deben tomar valores enteros, como número de equipos o turnos de trabajo.

C. Programación Lineal Entera Mixta (PLEM)

Combina variables continuas y enteras, siendo especialmente útil en problemas de planificación minera y control de costos.

Según Bertsimas & Tsitsiklis (1997), la programación lineal entera mixta es uno de los enfoques más robustos para resolver problemas complejos de optimización en sistemas industriales.

Optimización y Cash Cost en Minería Subterránea

El *cash cost* es un indicador económico que representa el costo directo de producir una unidad de mineral, excluyendo gastos financieros y amortizaciones. En minería subterránea, el *cash cost* está directamente influenciado por las operaciones unitarias, tales como perforación, voladura, carguío, acarreo, sostenimiento y ventilación.

La optimización orientada a la reducción del *cash cost* se centra en:

- Minimizar el consumo de recursos.
- Optimizar la utilización de equipos.
- Reducir tiempos improductivos.
- Mejorar la eficiencia de los ciclos operativos.

Tabla 1. *Optimización y cash cost en minería*

Componente del *cash cost*	**Variable optimizable**	**Impacto esperado**
Perforación y voladura	Parámetros de diseño	Reducción de costos unitarios
Carguío y acarreo	Asignación de equipos	Menor costo por tonelada
Ventilación	Horas de operación	Ahorro energético
Mano de obra	Turnos y dotación	Mayor eficiencia laboral

Optimización Aplicada a la Minería Subterránea

Diversos estudios demuestran que la aplicación de modelos de optimización en minería subterránea permite reducir significativamente los costos operativos y mejorar la rentabilidad. Anticona-cueva et al. (2024) evidencia que el uso de modelos matemáticos y técnicas de optimización contribuye a la toma de decisiones basada en datos, logrando reducciones relevantes en costos unitarios.

En el caso de la Unidad Minera El Brocal, la aplicación de modelos de optimización orientados a minimizar el *cash cost* resulta estratégica debido a la complejidad de su operación subterránea y a la necesidad de mantener niveles adecuados de rentabilidad en un entorno de costos crecientes.

Importancia de la Optimización en la Rentabilidad Minera

La optimización no solo permite reducir costos operativos, sino que también impacta directamente en la rentabilidad de la operación minera. Al disminuir el *cash cost*, se incrementa el margen operativo, fortaleciendo la sostenibilidad económica de la unidad minera. En este sentido, la optimización se consolida como una herramienta estratégica para la gestión moderna de operaciones mineras (Hillier et al., 2021).

2.2.2. Costos Operativos y Cash Cost en Minería Subterránea

Cost Avoidance

Es importante definir el término correcto en inglés de *cost avoidance*, traducido como evitación de costos, costos evitados o prevención de costos futuros.

El *cost avoidance* se refiere al conjunto de decisiones y acciones preventivas adoptadas por la Unidad Minera El Brocal para impedir que se generen gastos futuros, incrementos de precios, pérdidas operativas o desembolsos que probablemente ocurrirían si no se implementara una determinada medida. A diferencia del *cost saving* o ahorro directo, el costo evitado no siempre representa una disminución inmediata del gasto registrado, sino la prevención de un costo potencial.

Ellram & Tate (2021) definen el *cost avoidance* como el resultado de realizar un esfuerzo deliberado para pagar menos de lo que una organización habría pagado normalmente o para evitar completamente un gasto. Los autores señalan que estos beneficios son difíciles de reconocer en los estados financieros porque se calculan

comparando el costo real con un costo futuro estimado o contrafactual; es decir, con lo que habría sucedido si no se tomaba ninguna acción preventiva.

Howard & Pathak (1999) distinguen el *cost avoidance* de la reducción y del ahorro directo de costos. Desde su perspectiva, la evitación de costos corresponde a los recursos económicos que una organización no llega a desembolsar debido a una intervención oportuna. Por consiguiente, su medición requiere establecer un escenario de referencia que permita estimar los gastos que se habrían producido sin dicha intervención.

Por su parte, Monczka et al. (2009) relacionan la gestión estratégica de compras con la prevención de costos adicionales. Esto comprende la participación anticipada en el diseño, la negociación frente a solicitudes de aumento de precios, la selección adecuada de proveedores y el análisis del costo total de propiedad. Así, la gestión de costos no solamente busca disminuir los precios actuales, sino también evitar incrementos y gastos futuros durante la vida útil de los bienes y servicios adquiridos.

En síntesis, el *cost avoidance* puede definirse como el beneficio económico estimado que obtiene una organización al prevenir costos futuros mediante acciones de seguridad, mantenimiento, negociación, control de riesgos, capacitación o mejora de procesos. Su valor se determina comparando el costo que probablemente habría ocurrido sin la medida preventiva con el costo efectivamente asumido después de aplicarla.

A. Diferencia Entre C*ost Avoidance* y C*ost Saving*

El *cost saving* constituye un ahorro directo, verificable y generalmente reflejado en los registros contables. Por ejemplo, si una empresa minera pagaba S/ 100 000 por un servicio y, después de una negociación, paga S/ 90 000, obtiene un ahorro directo de S/ 10 000.

En cambio, el *cost avoidance* evita que un gasto futuro llegue a producirse. Por ejemplo, si mediante mantenimiento predictivo se detecta una falla en una chancadora y se evita una avería que habría costado S/ 150 000, este monto constituye un costo evitado. No significa que la empresa haya recibido S/ 150 000, sino que evitó desembolsarlos.

B. Expresión Para su Estimación

Costo evitado = costo estimado sin intervención − costo real con intervención

La estimación debe sustentarse con información histórica, cotizaciones, registros de mantenimiento, costos de paralización, precios de mercado, reportes de incidentes u otras evidencias verificables.

C. Ejemplos aplicados a la industria minera

1. Mantenimiento predictivo de una chancadora

Una compañía minera implementa monitoreo de vibraciones y temperatura en los rodamientos de una chancadora primaria. El sistema detecta anticipadamente un desgaste anormal, por lo que se programa el cambio del rodamiento durante una parada planificada.

- Reparación programada: S/ 35 000.
- Reparación de emergencia que habría ocurrido: S/ 120 000.
- Pérdida estimada por paralización de producción: S/ 180 000.
- Costo total probable sin intervención: S/ 300 000.
- Costo evitado: S/ 300 000 − S/ 35 000 = **S/ 265 000**.

El costo evitado corresponde a la reparación mayor y a las pérdidas de producción que no llegaron a materializarse gracias al mantenimiento predictivo.

2. Implementación de un sistema de gestión de riesgos

Una empresa contratista minera invierte S/ 80 000 en capacitación, inspecciones, señalización, procedimientos de trabajo seguro y controles operacionales. Como consecuencia, se reduce la probabilidad de accidentes graves.

Según la información histórica, un accidente similar habría generado:

- Atención médica e indemnizaciones: S/ 130 000.
- Paralización de labores: S/ 90 000.
- Investigación y reemplazo de personal: S/ 30 000.
- Reparación de equipos: S/ 50 000.
- Costo potencial total: S/ 300 000.

Considerando la inversión preventiva:

Costo evitado neto = S/ 300 000 − S/ 80 000 = S/ 220 000.

En este caso, el beneficio económico se relaciona con los gastos por accidentes que fueron prevenidos mediante los controles de seguridad.

3. Mantenimiento preventivo de equipos de acarreo

Una unidad minera programa el cambio de filtros, lubricantes y componentes críticos de sus camiones de acarreo. El mantenimiento tiene un costo de S/ 18 000 por equipo, pero evita una falla del motor cuyo costo de reparación habría ascendido a S/ 140 000.

Costo evitado = S/ 140 000 − S/ 18 000 = S/ 122 000 por equipo.

Además del costo de reparación, podrían incorporarse las pérdidas por indisponibilidad del camión, alquiler de equipos sustitutos y reducción del mineral transportado, siempre que tales montos estén debidamente sustentados.

4. Negociación con proveedores de explosivos y reactivos

El proveedor comunica que el precio anual de determinados reactivos aumentará de S/ 2 000 000 a S/ 2 200 000. Después de una negociación y de establecer un contrato de suministro de largo plazo, la empresa acuerda pagar S/ 2 080 000.

Costo evitado = S/ 2 200 000 − S/ 2 080 000 = S/ 120 000.

No existe una reducción respecto al precio anterior, porque el gasto aumentó de S/ 2 000 000 a S/ 2 080 000. Sin embargo, se evitaron S/ 120 000 del incremento inicialmente propuesto.

5. Automatización del sistema de bombeo

Una mina subterránea instala sensores de nivel, alarmas, comunicación con el sistema SCADA y arranque automático de bombas. La inversión asciende a S/ 100 000 y permite detectar oportunamente niveles críticos de agua.

Una inundación habría ocasionado:

- Daños en bombas y tableros: S/ 160 000.
- Paralización de operaciones: S/ 300 000.
- Labores de recuperación y drenaje: S/ 90 000.
- Costo potencial: S/ 550 000.
- **Costo evitado neto = S/ 550 000 − S/ 100 000 = S/ 450 000.**

6. Control de polvo y ventilación en minería subterránea

La instalación y el mantenimiento de ventiladores, sensores de gases y sistemas de supresión de polvo permiten prevenir exposiciones peligrosas, enfermedades ocupacionales, paralizaciones, sanciones y reclamos laborales. El costo evitado estaría compuesto por los gastos que probablemente se

habrían generado por atención médica, compensaciones, interrupciones operativas y medidas correctivas.

Para efectos de una investigación en la industria minera, el *cost avoidance* puede definirse como el valor económico de los costos operativos, laborales, legales y productivos que una empresa minera evita mediante la implementación anticipada de controles de seguridad, mantenimiento, gestión de riesgos y mejora de procesos, en comparación con los gastos que probablemente se habrían producido si dichas medidas no hubieran sido ejecutadas (Monczka et al., 2009).

Concepto de Costos Operativos en Minería

Los costos operativos en minería comprenden el conjunto de gastos necesarios para ejecutar las actividades productivas que permiten la extracción y el transporte del mineral desde el yacimiento hasta su entrega al proceso de beneficio o venta. En minería subterránea, estos costos adquieren mayor relevancia debido a la complejidad técnica de las operaciones, el uso intensivo de equipos especializados y las exigencias en seguridad y ventilación.

Desde el punto de vista económico, los costos operativos constituyen uno de los principales factores que determinan la competitividad y rentabilidad de una operación minera. Una gestión ineficiente de estos costos puede generar incrementos significativos en el costo unitario de producción, afectando directamente los márgenes económicos de la empresa (Runge, 1998).

Clasificación de los Costos Operativos Mineros

Los costos operativos en minería subterránea pueden clasificarse de diversas formas, siendo las más utilizadas las siguientes:

A. Según su Comportamiento

- **Costos fijos:** No varían directamente con el nivel de producción (supervisión, administración operativa).
- **Costos variables:** Se incrementan o disminuyen en función del volumen de producción (combustible, explosivos, energía).

B. Según su Relación con la Producción

- **Costos directos:** Asociados directamente a las operaciones productivas (perforación, voladura, carguío).
- **Costos indirectos:** Relacionados con el soporte operativo (mantenimiento, ventilación, servicios auxiliares).

Esta clasificación permite identificar qué costos son más sensibles a la aplicación de modelos de optimización, especialmente aquellos que influyen de manera directa en el *cash cost*.

Costos Operativos en Minería Subterránea

La minería subterránea presenta características particulares que incrementan sus costos operativos en comparación con otros métodos de explotación. Entre las principales operaciones unitarias que generan costos se encuentran:

- Perforación y voladura
- Carguío
- Acarreo
- Sostenimiento
- Ventilación
- Servicios auxiliares y mantenimiento

Cada una de estas actividades consume recursos críticos como energía, mano de obra y equipos, por lo que su optimización resulta fundamental para reducir el costo total de operación.

Indicadores de Costos en Minería Subterránea

Para evaluar el desempeño económico de una operación minera, se utilizan diversos indicadores de costos, entre los cuales destacan:

- Costo operativo total (US$)
- Costo por tonelada (US$/t)
- Costo por metro avanzado
- Cash cost (US$/t)

Estos indicadores permiten comparar la eficiencia operativa entre períodos, unidades mineras o escenarios productivos, y constituyen la base para la toma de decisiones gerenciales.

Concepto de Cash Cost

El *cash cost* es un indicador económico ampliamente utilizado en la industria minera para medir el costo directo de producción de una unidad de mineral. Representa los gastos operativos necesarios para producir una tonelada de mineral, excluyendo costos financieros, depreciaciones y amortizaciones.

Según Runge (1998), el *cash cost* refleja de manera más precisa la eficiencia operativa de una mina, ya que se concentra en los costos directamente controlables por la gestión operativa. En minería subterránea, este indicador es especialmente relevante debido a la alta proporción de costos variables asociados a las operaciones unitarias.

Componentes del Cash Cost en Minería Subterránea

El *cash cost* en minería subterránea está compuesto principalmente por:

- Costos de perforación y voladura

- Costos de carguío y acarreo
- Costos de sostenimiento
- Costos de ventilación y energía
- Costos de mano de obra directa
- Costos de mantenimiento operativo

Tabla 2. *Componentes del Cash Cost en Minería Subterránea*

Componente	**Descripción**	**Impacto en el *cash cost***
Perforación y voladura	Explosivos, perforación y preparación del frente	Alto
Carguío y acarreo	Uso de equipos y consumo de combustible	Muy alto
Sostenimiento	Instalación de pernos, mallas y concreto	Medio
Ventilación	Energía eléctrica y sistemas de ventilación	Alto
Mano de obra	Personal operativo directo	Muy alto
Mantenimiento	Reparación y mantenimiento de equipos	Medio

Relación Entre Costos Operativos y Cash Cost

Existe una relación directa entre los costos operativos y el *cash cost*, dado que este último se construye a partir de los costos directos de producción. Cualquier incremento en la ineficiencia operativa, tiempos muertos o mala asignación de recursos se traduce en un aumento del *cash cost* por tonelada producida.

Por el contrario, la optimización de los costos operativos permite reducir el *cash cost*, mejorando el margen operativo y la rentabilidad de la mina. Esta relación convierte al *cash cost* en un indicador clave para evaluar el impacto de los modelos de optimización aplicados a la gestión minera.

Importancia del Control del Cash Cost en Minería Subterránea

El control del *cash cost* es una prioridad estratégica en la minería subterránea, especialmente en escenarios de volatilidad de precios de los metales. Un *cash cost* elevado reduce la capacidad de la empresa para sostener operaciones rentables y competitivas.

En unidades mineras complejas como la Unidad Minera El Brocal, la aplicación de modelos de optimización orientados a minimizar el *cash cost* permite identificar oportunidades de mejora en la asignación de recursos, reducción de tiempos improductivos y optimización de las operaciones unitarias, contribuyendo directamente al incremento de la rentabilidad.

Costos Operativos, Cash Cost y Optimización

La literatura especializada coincide en que la aplicación de modelos de optimización en minería subterránea permite reducir costos operativos y mejorar el control del *cash cost*. Herramientas como la programación matemática y los modelos predictivos facilitan la evaluación de escenarios alternativos, permitiendo seleccionar la combinación óptima de recursos que minimice los costos directos de producción (Hillier et al., 2021).

De este modo, los costos operativos y el *cash cost* constituyen variables fundamentales dentro del modelo de optimización planteado en la presente investigación.

2.2.3. Rentabilidad Minera y su Relación con la Optimización

Concepto de Rentabilidad en la Actividad Minera

La rentabilidad en la actividad minera se define como la capacidad de una operación para generar beneficios económicos a partir de los recursos invertidos. En términos generales, la rentabilidad mide la relación entre los resultados obtenidos

(ingresos o utilidades) y los costos incurridos para alcanzarlos. En minería subterránea, la rentabilidad adquiere especial relevancia debido a los elevados costos operativos y de capital asociados a este tipo de explotación.

Desde una perspectiva económica, la rentabilidad no depende únicamente del nivel de producción o del precio del mineral, sino también del control y la eficiencia en el uso de los recursos operativos. En este contexto, la reducción de costos operativos —y particularmente del *cash cost*— se convierte en un factor determinante para mejorar el desempeño económico de la operación minera (Runge, 1998).

Tipos de Rentabilidad Aplicables a la Minería

En la gestión minera se emplean diversos enfoques para evaluar la rentabilidad, entre los cuales destacan los siguientes:

A. Rentabilidad Operativa

Mide la eficiencia de la operación minera considerando los ingresos generados y los costos operativos incurridos. Está estrechamente relacionada con el control del *cash cost* y refleja la capacidad de la mina para operar de manera eficiente.

B. Rentabilidad Económica

Evalúa el rendimiento global del proyecto minero considerando todos los costos e inversiones. Este tipo de rentabilidad permite analizar la viabilidad económica de la operación en el mediano y largo plazo.

C. Rentabilidad Financiera

Se enfoca en el retorno obtenido sobre el capital invertido, considerando aspectos financieros como financiamiento, tasas de interés y estructura de capital.

Para los fines de la presente investigación, la rentabilidad operativa es la más relevante, ya que se encuentra directamente influenciada por los costos operativos y por la aplicación de modelos de optimización orientados a minimizar el *cash cost*.

Indicadores de Rentabilidad en Minería Subterránea

La rentabilidad minera se evalúa mediante diversos indicadores económicos que permiten medir el desempeño de la operación. Entre los más utilizados se encuentran:

- Margen operativo
- Utilidad operativa
- EBITDA
- Rentabilidad económica
- Relación costo–beneficio

Estos indicadores permiten analizar el impacto de las decisiones operativas y de las estrategias de optimización sobre los resultados económicos de la mina.

Tabla 3. *Principales Indicadores de Rentabilidad en Minería Subterránea*

Indicador	Descripción	Relación con costos
Margen operative	Diferencia entre ingresos y costos operativos	Alta
EBITDA	Resultado antes de intereses, impuestos y depreciación	Media–Alta
Utilidad operative	Beneficio generado por la operación	Alta
Rentabilidad económica	Relación entre utilidad e inversión	Media
Costo–beneficio	Comparación entre costos e ingresos	Alta

Relación Entre Costos Operativos y Rentabilidad

Existe una relación directa e inversamente proporcional entre los costos operativos y la rentabilidad minera. A medida que los costos operativos aumentan, el margen operativo se reduce, afectando negativamente la rentabilidad de la operación. En minería subterránea, donde los costos por tonelada suelen ser elevados, pequeñas

variaciones en el *cash cost* pueden generar impactos significativos en los resultados económicos.

La optimización de costos operativos permite mejorar la eficiencia del sistema productivo, reduciendo el *cash cost* por tonelada y aumentando el margen de contribución. Esta relación convierte a la optimización en una herramienta estratégica para incrementar la rentabilidad, especialmente en contextos de precios volátiles de los metales (Hillier et al., 2021).

Optimización Como Factor Clave de la Rentabilidad Minera

La optimización aplicada a la gestión minera busca identificar la combinación óptima de recursos que maximice la rentabilidad bajo un conjunto de restricciones técnicas y económicas. En minería subterránea, los modelos de optimización permiten:

- Reducir costos operativos directos.
- Optimizar la asignación de equipos y mano de obra.
- Minimizar tiempos improductivos.
- Mejorar la planificación de la producción.

Según Hillier et al. (2021), los modelos de optimización proporcionan soluciones cuantitativas que permiten mejorar significativamente el desempeño económico de sistemas complejos, como las operaciones mineras subterráneas.

Impacto de la Reducción del Cash Cost en la Rentabilidad

El *cash cost* es uno de los indicadores más sensibles al impacto de la optimización. Una reducción sostenida del *cash cost* se traduce directamente en un incremento del margen operativo y, por ende, de la rentabilidad de la operación minera.

Tabla 4. *Impacto de la Reducción del Cash Cost en la Rentabilidad*

Escenario	*Cash cost* (US$/t)	Margen operativo	Impacto en rentabilidad
Situación actual	Alto	Bajo	Rentabilidad limitada
Optimización parcial	Medio	Medio	Rentabilidad moderada
Optimización integral	Bajo	Alto	Rentabilidad elevada

Este comportamiento justifica la aplicación de modelos de optimización orientados específicamente a minimizar el *cash cost*, como estrategia para mejorar la sostenibilidad económica de la mina.

Rentabilidad y Optimización en Minería Subterránea

La literatura especializada evidencia que la aplicación de modelos de optimización en minería subterránea contribuye de manera significativa a la mejora de la rentabilidad. Estudios recientes demuestran que la reducción de costos operativos mediante optimización de procesos productivos y asignación eficiente de recursos genera mejoras sustanciales en los indicadores económicos de las operaciones mineras (Anticona-cueva et al., 2024).

En operaciones complejas como la Unidad Minera El Brocal, la optimización se convierte en una herramienta estratégica para enfrentar los desafíos de costos elevados y mantener niveles adecuados de rentabilidad en un entorno altamente competitivo.

Importancia Estratégica de la Optimización Para la Rentabilidad Minera

La optimización no debe considerarse únicamente como una herramienta técnica, sino como un enfoque estratégico para la gestión minera. La integración de modelos de optimización en la toma de decisiones permite a las empresas mineras anticiparse a escenarios adversos, mejorar su eficiencia operativa y fortalecer su rentabilidad.

En este sentido, la relación entre optimización, costos operativos y rentabilidad constituye el eje central de la presente investigación, orientada a demostrar que la aplicación de modelos de optimización es una alternativa viable y efectiva para incrementar la rentabilidad y reducir los costos operativos en la minería subterránea.

2.2.4. Optimización Aplicada a la Planificación y Gestión Minera

Planificación Minera y su Importancia en la Gestión de Costos

La planificación minera es el proceso mediante el cual se definen, organizan y programan las actividades necesarias para la explotación eficiente de un yacimiento, considerando restricciones técnicas, económicas y operativas. En minería subterránea, la planificación adquiere un rol estratégico, ya que una decisión inadecuada en la secuencia de minado, asignación de recursos o programación de equipos puede generar incrementos significativos en los costos operativos.

Desde el punto de vista de la gestión, la planificación minera busca asegurar el cumplimiento de los objetivos de producción al menor costo posible, garantizando condiciones de seguridad y continuidad operativa. En este contexto, la optimización se integra como una herramienta fundamental para evaluar alternativas de planificación y seleccionar aquella que minimice el *cash cost* y maximice la rentabilidad (Runge, 1998).

Optimización en la planificación minera subterránea

La planificación minera subterránea involucra decisiones complejas relacionadas con:

- Selección de métodos de explotación.
- Secuencia de extracción del mineral.
- Asignación de equipos y personal.
- Programación de la producción.

- Gestión de servicios auxiliares (ventilación, sostenimiento, transporte).

La optimización permite modelar estas decisiones mediante funciones objetivo y restricciones, facilitando la evaluación de escenarios alternativos. Según Hillier et al. (2021), los modelos de optimización aplicados a la planificación permiten reducir la incertidumbre y mejorar la eficiencia económica del sistema productivo.

Optimización de la Planificación de Corto y Mediano Plazo

A. Planificación de Corto Plazo

La planificación de corto plazo se enfoca en la programación diaria o semanal de las operaciones mineras. Su objetivo principal es asegurar el cumplimiento de las metas de producción considerando la disponibilidad real de recursos. La optimización en este nivel permite:

- Reducir tiempos improductivos.
- Optimizar la asignación de equipos.
- Minimizar costos variables asociados a la operación diaria.

B. Planificación de Mediano Plazo

La planificación de mediano plazo define metas mensuales o trimestrales y establece lineamientos para el uso eficiente de los recursos. La optimización en este horizonte permite balancear producción, costos y capacidad operativa, contribuyendo a la reducción sostenida del *cash cost*.

Optimización en la Asignación de Recursos

Uno de los principales aportes de la optimización en la gestión minera es la asignación eficiente de recursos críticos, tales como:

- Equipos de perforación, carguío y acarreo.
- Mano de obra directa.
- Energía y combustibles.

- Insumos operativos.

La asignación ineficiente de estos recursos genera sobrecostos, tiempos muertos y baja productividad. Los modelos de optimización permiten determinar la combinación óptima de recursos que minimice los costos operativos sin afectar la producción.

Tabla 5. *Optimización de Recursos y su Impacto en el El Cash Cost*

Recurso	**Variable optimizable**	**Impacto en el *cash cost***
Equipos	Horas de operación	Alto
Mano de obra	Dotación y turnos	Muy alto
Energía	Consumo por operación	Alto
Insumos	Cantidad y frecuencia	Medio

Optimización de Procesos Operativos

La gestión minera moderna busca optimizar los procesos operativos a lo largo de toda la cadena productiva subterránea. La optimización de procesos permite identificar cuellos de botella, reducir variabilidad y mejorar la eficiencia global del sistema.

Entre los procesos que pueden optimizarse se encuentran:

- Perforación y voladura.
- Carguío y acarreo.
- Sostenimiento.
- Ventilación.
- Mantenimiento operativo.

La aplicación de modelos de optimización a estos procesos contribuye a reducir los costos unitarios y a mejorar el control del *cash cost* (Hillier et al., 2021).

Optimización y toma de decisiones en la gestión minera

La gestión minera se apoya cada vez más en la toma de decisiones basada en datos. En este contexto, los modelos de optimización proporcionan información cuantitativa que permite a los gestores evaluar el impacto económico de diferentes alternativas operativas antes de su implementación.

La optimización permite:

- Simular escenarios de producción.
- Evaluar restricciones operativas.
- Analizar impactos en costos y rentabilidad.
- Seleccionar la alternativa más eficiente.

Este enfoque reduce el riesgo asociado a la toma de decisiones y mejora la sostenibilidad económica de la operación minera.

Integración de la Optimización en la Gestión Minera

La integración de modelos de optimización en la gestión minera implica incorporarlos como herramientas permanentes de apoyo a la planificación y control de operaciones. Esta integración permite alinear los objetivos operativos con los objetivos económicos de la empresa, fortaleciendo la competitividad de la operación.

En unidades mineras complejas como la Unidad Minera El Brocal, perteneciente a la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., la optimización aplicada a la planificación y gestión minera resulta esencial para enfrentar los desafíos de costos elevados y exigencias productivas crecientes.

Optimización Como Estrategia Para la Reducción del Cash Cost

La planificación y gestión minera optimizadas permiten identificar oportunidades de mejora en el uso de recursos y en la ejecución de los procesos productivos. Al reducir ineficiencias y tiempos improductivos, se logra una

disminución directa del *cash cost*, incrementando el margen operativo y la rentabilidad de la operación.

De esta manera, la optimización aplicada a la planificación y gestión minera se consolida como una estrategia clave para la minimización del *cash cost* en minería subterránea, eje central de la presente investigación.

2.2.5. Modelos de Optimización Aplicables a la Unidad Minera El Brocal

Importancia de los Modelos de Optimización en la Unidad Minera El Brocal

La **Unidad Minera El Brocal**, perteneciente a la **Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.**, opera bajo un esquema de minería subterránea caracterizado por elevados costos operativos, uso intensivo de recursos y múltiples restricciones técnicas. En este contexto, la aplicación de modelos de optimización se convierte en una herramienta fundamental para mejorar la eficiencia operativa y reducir el *cash cost*.

Los modelos de optimización permiten estructurar el problema operativo de la unidad minera en términos matemáticos, facilitando la evaluación de alternativas de producción, asignación de recursos y programación de operaciones, con el objetivo de **minimizar los costos operativos directos** sin afectar los niveles de producción ni las condiciones de seguridad.

Enfoque del Modelo de Optimización Propuesto

El modelo de optimización propuesto para la Unidad Minera El Brocal se enmarca dentro de la **programación lineal entera mixta (PLEM)**, debido a que combina:

- Variables continuas (producción, costos, horas de operación).
- Variables discretas o enteras (número de equipos, turnos, frentes de trabajo).

El objetivo principal del modelo es **minimizar el *cash cost*** por tonelada producida, considerando las restricciones operativas propias de la minería subterránea.

Definición de Variables de Decisión

Las variables de decisión representan los elementos controlables del sistema minero. Para el modelo propuesto se consideran, entre otras, las siguientes variables:

Tabla 6. *Variables de Decisión del Modelo de Optimización*

Variable	Descripción	Unidad
x_i	Toneladas producidas por frente o zona i	t
h_j	Horas de operación del equipo j	h
e_j	Número de equipos asignados al proceso j	entero
l_k	Horas de trabajo del personal operativo k	h
c_i	Costo operativo unitario del frente i	US$/t

Estas variables permiten representar la estructura productiva y operativa de la unidad minera dentro del modelo matemático.

Función Objetivo: Minimización del Cash Cost

La función objetivo del modelo busca **minimizar el *cash cost*** total de la operación minera, el cual se define como la suma de los costos operativos directos asociados a las principales actividades productivas.

Función objetivo general

Mininizar:

$$Cash\ Cost\ Total = \sum (Costo\ unitario\ x\ Producción) \quad \ldots (1)$$

En términos matemáticos simplificados:

$$Min\ Z = \sum_i (C_i . X_i) \quad \ldots (2)$$

Donde:

- Z = *Cash cost* total (US$)

- c_i = costo operativo unitario del frente *i* (US$/t)
- x_i= toneladas producidas en el frente *i* (t)

Esta función objetivo refleja el propósito central de la investigación: reducir los costos operativos directos por tonelada producida, incrementando así la rentabilidad de la unidad minera.

Restricciones del Modelo de Optimización

El modelo de optimización incorpora un conjunto de restricciones que representan las limitaciones técnicas, operativas y económicas de la minería subterránea en El Brocal.

A. Restricciones de Capacidad Productiva

La producción total no debe exceder la capacidad máxima de la operación:

$\Sigma_i\ x_i \leq$ Capacidad máxima de producción

B. Restricciones de Disponibilidad de Equipos

Las horas de operación de los equipos están limitadas por su disponibilidad:

$h_j \leq$ Horas disponibles del equipo $_j$

C. Restricciones de Mano de Obra

La asignación de horas de trabajo debe respetar la disponibilidad del personal:

$\Sigma_k\ l_k \leq$ Horas disponibles de mano de obra

D. Restricciones de Demanda o Producción Mínima

La producción debe cumplir con una meta mínima establecida por la empresa:

$\Sigma_i\ x_i \geq$ Producción mínima requerida

E. Restricciones de Presupuesto Operativo

El costo total no debe exceder el presupuesto operativo asignado:

$\Sigma_i (c_i \cdot x_i) \leq$ Presupuesto operativo

Tabla 7. *Resumen de Restricciones del Modelo de Optimización*

Tipo de restricción	Descripción
Productiva	Capacidad máxima y mínima de producción
Equipos	Disponibilidad y horas de operación
Mano de obra	Dotación y horas laborales
Presupuesto	Límite de costos operativos
Técnica	Condiciones operativas y de seguridad

Modelo Conceptual del Sistema de Optimización

El modelo conceptual integra las variables de decisión, la función objetivo y las restricciones, permitiendo evaluar diferentes escenarios de operación y seleccionar aquel que minimice el *cash cost* sin comprometer la producción ni la seguridad.

Aplicación del Modelo a la Unidad Minera El Brocal

La aplicación del modelo de optimización a la Unidad Minera El Brocal permite:

- Identificar combinaciones óptimas de producción por frente.
- Asignar eficientemente equipos y personal.
- Reducir tiempos improductivos.
- Minimizar el *cash cost* por tonelada producida.

Este enfoque proporciona una base cuantitativa sólida para la toma de decisiones operativas y estratégicas, contribuyendo a mejorar la rentabilidad de la unidad minera.

Relación del Modelo con los Objetivos de la Investigación

El modelo de optimización propuesto se encuentra directamente alineado con los objetivos de la investigación, ya que:

- Permite reducir los costos operativos directos.

- Impacta positivamente en el *cash cost*.
- Contribuye al incremento de la rentabilidad minera.
- Proporciona una herramienta replicable para otras unidades mineras.

2.2.6. Desarrollo del Modelo Matemático de Programación Lineal

A continuación, desarrollo el modelo matemático completo, con datos simulados realistas, formulación formal, tablas, resultado óptimo e interpretación, todo alineado a la minimización del *cash cost* en una mina subterránea como El Brocal.

Modelo Matemático de Optimización – Minimización de Cash Cost en Minería Subterránea

1. Supuestos del modelo

Para formular el modelo se asumen los siguientes supuestos:

1. La operación minera se divide en frentes de producción independientes.
2. El *cash cost* depende de los costos operativos directos.
3. La demanda mínima de producción debe cumplirse.
4. La disponibilidad de equipos y mano de obra es limitada.
5. Las relaciones entre variables son lineales.
6. El horizonte de análisis es mensual.

2. Conjuntos

- $i \in I$: frentes de producción
- $I = \{1,2,3\}$

3. Variables de decisión

Tabla 8. *Variables de Decisión*

Variable	Descripción	Unidad
x_i	Toneladas producidas en el frente i	t/mes

4. Parámetros (datos simulados)

4.1. Costos operativos unitarios (*Cash cost* por frente)

Tabla 9. *Costos Operativos Unitarios (Cash cost por frente)*

Frente *i*	Perforación + Voladura (US$/t)	Carguío + Acarreo (US$/t)	Ventilación + Servicios (US$/t)	Cash cost c_i (US$/t)
1	18	22	10	**50**
2	20	24	11	**55**
3	16	21	9	**46**

4.2. Capacidad máxima por frente

Tabla 10. *Capacidad Máxima por Frente*

Frente	Capacidad máxima (t/mes)
1	4,000
2	3,000
3	5,000

4.3. Producción mínima requerida

Producción minima mensual = 9,000 t.

5. Función objetivo

El objetivo es minimizar el cash cost total mensual:

Min Z = 50x1 + 55x2+46x3

Donde:

- Z = *cash cost* total (US$/mes)

6. Restricciones del modelo

6.1. Restricciones de capacidad

$x_1 \leq 4{,}000$

$x_2 \leq 3{,}000$

$x_3 \leq 5{,}000$

6.2. Restricción de producción mínima

$X1 + x2 + x3 \geq 9{,}000$

6.3. Restricción de no negatividad

$X1, x2, x3 \geq 0$

7. Modelo matemático completo

$$\text{Min } Z = 50x1 + 55x2 + 46x3$$

s.a. $x1 \leq 4{,}000$

$x2 \leq 3{,}000$

$x3 \leq 5{,}000$

$x1 + x2 + x3 \geq 9{,}000$

$x1, x2, x3 \geq 0$

8. Resolución del modelo (solución óptima)

Dado que el frente 3 tiene el menor cash cost (46 US$/t), el modelo prioriza su uso.

Solución óptima: En la Tabla 11 se muestra la solución del modelo.

Tabla 11. *Solución Óptima*

Frente	Producción óptima (t/mes)
x_3	5,000
x_1	4,000
x_2	0
Total	**9,000**

9. Cálculo del cash cost mínimo

Z = 50 (4,000) + 55(0) +46(5,000)

Z = USD 430,000.

10. Escenario sin optimización (comparativo)

Supongamos una distribución empírica:

Tabla 12. *Distribución empírica*

Frente	Producción (t)	*Cash cost* (US$/t)	Costo total (US$)
1	3,000	50	150,000
2	3,000	55	165,000
3	3,000	46	138,000
Total	**9,000**	—	**453,000**

11. Impacto de la optimización

Tabla 13. *Comparación de Escenarios*

Escenario	*Cash cost* total (US$)
Sin optimización	453,000
Con optimización	**430,000**
Ahorro mensual	**23,000 US$**
Ahorro anual estimado	**276,000 US$**

12. Interpretación académica

La solución óptima demuestra que:

- La asignación óptima de frentes reduce el *cash cost*.

- La optimización no reduce producción, solo redistribuye recursos.
- El frente con menor costo unitario debe priorizarse.
- El modelo es simple, robusto y replicable.
- El impacto económico es directo y medible.

Este resultado valida la hipótesis de que la aplicación de modelos de optimización permite reducir los costos operativos e incrementar la rentabilidad en minería subterránea.

13. Análisis

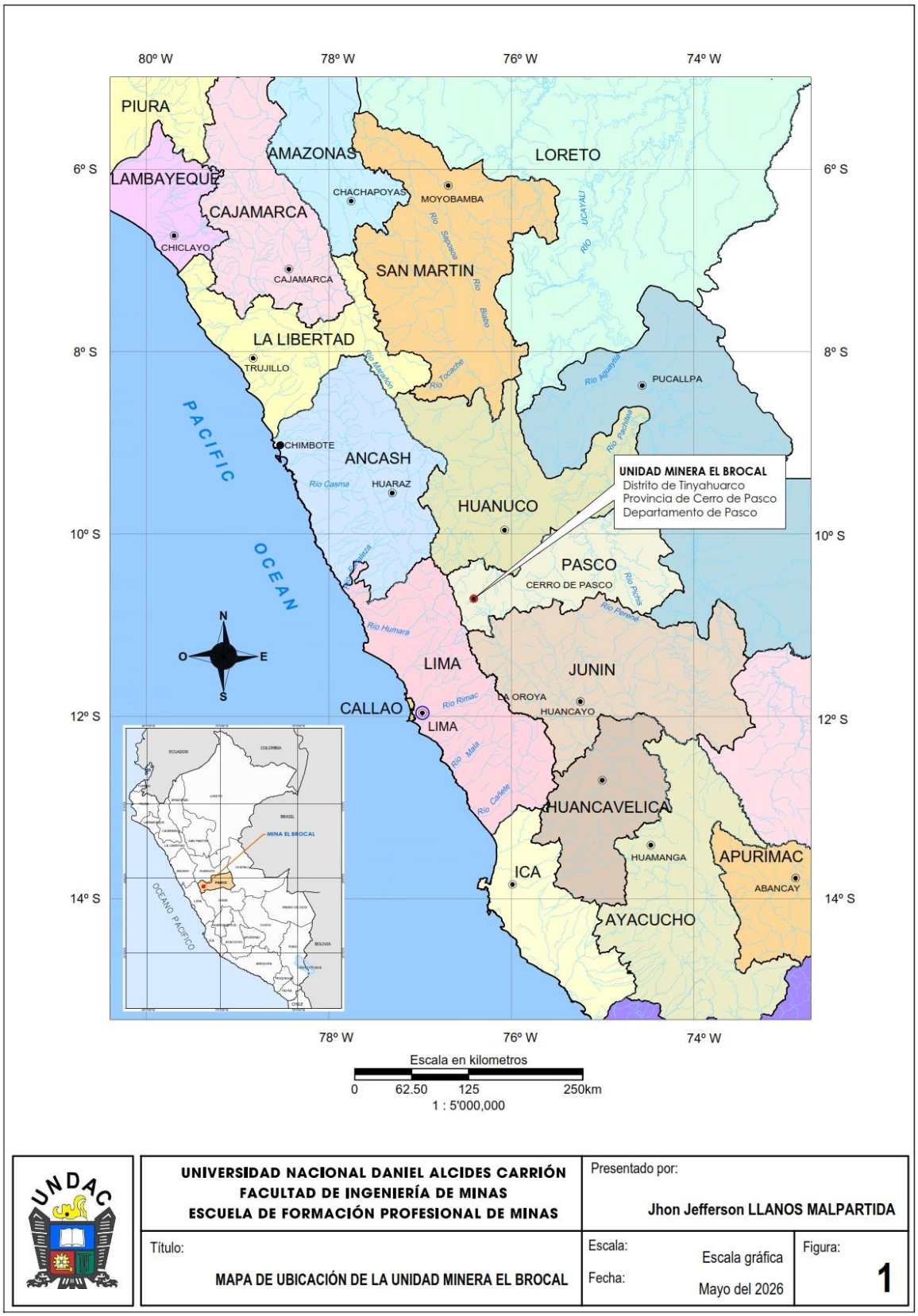
Como conclusión tenemos los siguiente:

El modelo matemático demuestra que, sin modificar la meta de producción, una redistribución óptima de frentes permite reducir el cash cost mensual en más de 23 mil dólares, evidenciando el impacto directo de la optimización en la rentabilidad operativa.

2.2.7. Ubicación de la Unidad Minera El Brocal

La Unidad Minera El Brocal se emplaza en el distrito de Tinyahuarco, perteneciente a la provincia y departamento de Pasco, en el corazón de la Sierra Central del Perú. Esta ubicación la sitúa en una zona de alta montaña, con altitudes que oscilan entre los 4,200 y los 4,500 metros sobre el nivel del mar, características propias de la altiplanicie andina. El entorno geográfico está marcado por una topografía accidentada y un clima frígido, lo que ha condicionado el diseño de la infraestructura industrial y habitacional de la unidad, las coordenadas UTM son: 8’811,271-N y 361,760-E. (Benavides, 2023).

Figura 1. *Mapa de Ubicación de la Unidad Minera El Brocal*



UNDAC	UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE MINAS	Presentado por: Jhon Jefferson LLANOS MALPARTIDA
	Título: MAPA DE UBICACIÓN DE LA UNIDAD MINERA EL BROCAL	Escala: Escala gráfica Fecha: Mayo del 2026 Figura: 1

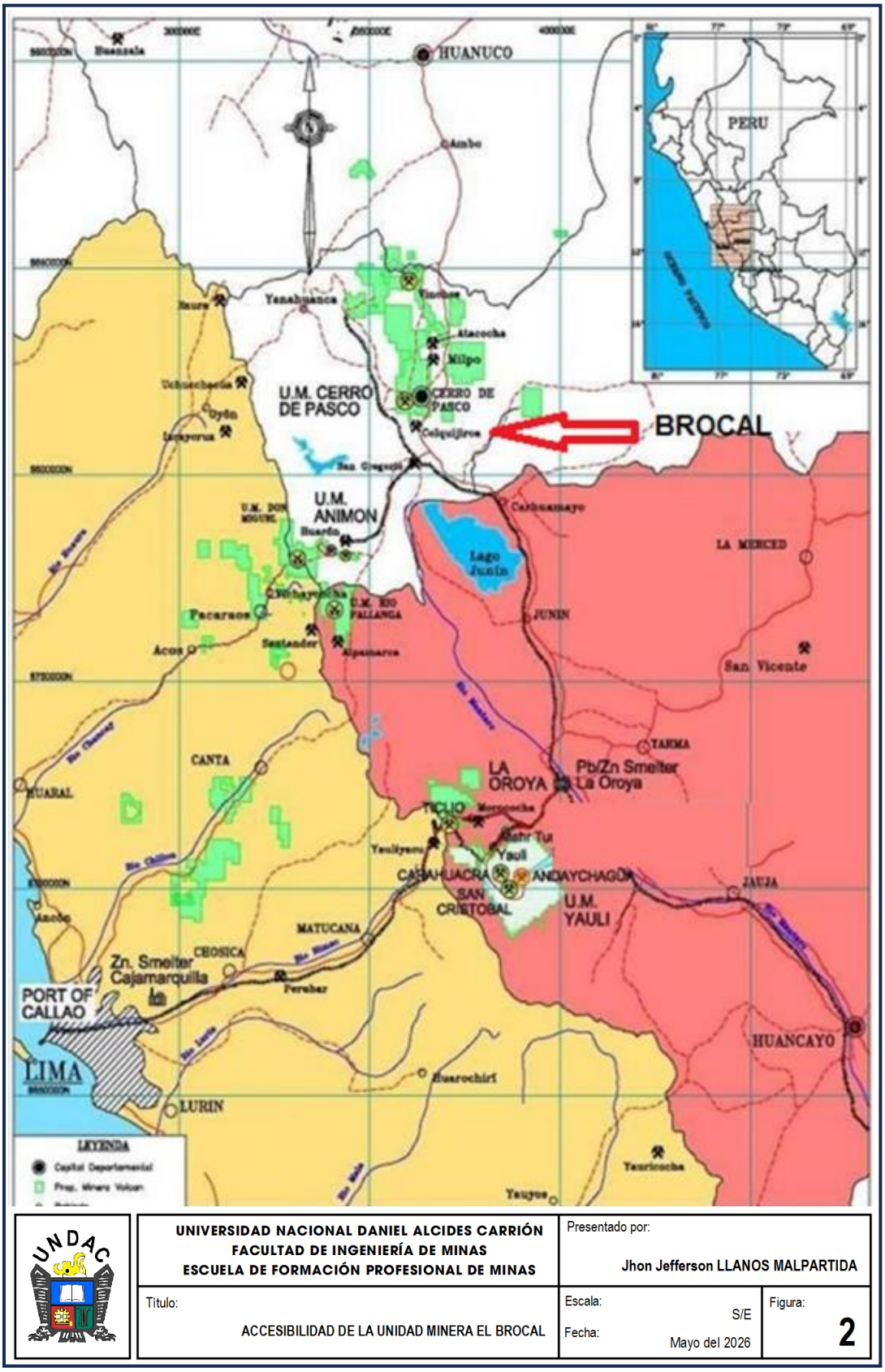
2.2.8. Accesibilidad

La conectividad de la unidad minera con los principales centros logísticos del país se realiza a través de la Carretera Central, la vía de transporte terrestre más importante del territorio peruano. El trayecto desde la ciudad de Lima abarca una distancia aproximada de 285 a 296 kilómetros, dependiendo de los accesos específicos hacia las instalaciones de la planta concentradora de Huaraucaca. Este recorrido atraviesa puntos críticos de la geografía andina como el paso de Ticlio, lo que exige una gestión rigurosa del transporte de insumos y concentrados (Benavides, 2023).

Además del transporte por carretera, la región de Pasco cuenta con una infraestructura ferroviaria histórica que conecta Cerro de Pasco con el puerto del Callao. El Brocal aprovecha esta ventaja competitiva para el traslado masivo de sus productos minerales, reduciendo costos operativos y minimizando el impacto ambiental asociado al transporte pesado por vía terrestre. La proximidad a la ciudad de Cerro de Pasco (aprox. 15 km) garantiza el acceso a servicios básicos, telecomunicaciones y mano de obra local con larga tradición minera (Benavides, 2024).

Ver la Figura 2.

Figura 2. *Accesibilidad de la Unidad Minera El Brocal*



Nota. La Figura 2 ha sido extraída de (Villanueva, 2025).

2.2.9. Historia

La trayectoria de la Unidad Minera El Brocal de Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. constituye uno de los capítulos más significativos en la historia de la minería polimetálica del Perú central. La empresa fue constituida formalmente el 7 de mayo de 1956 en la ciudad de Lima, bajo el amparo de la legislación minera de la época y con una visión orientada a la explotación de los recursos del distrito minero de Colquijirca. Desde sus orígenes, la organización se ha caracterizado por operar en una de las regiones con mayor tradición extractiva del país, el departamento de Pasco, integrando paulatinamente procesos modernos de minado y beneficio (García, 2020).

Un factor determinante en la consolidación institucional de El Brocal fue la incorporación de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. como accionista mayoritario a partir del año 2000. Bajo el liderazgo de figuras emblemáticas como Don Alberto Benavides de la Quintana, la empresa transitó de una minería de mediana escala a una operación industrial de alta complejidad técnica. Al cierre del ejercicio 2024, la estructura accionarial de la compañía se encuentra dominada por Buenaventura con una participación del 61.43%, mientras que el resto se distribuye entre accionistas minoritarios que cotizan sus valores en la Bolsa de Valores de Lima bajo las nemotécnicas BROCALC1 y BROCALI1 (Cabos, 2005).

La identidad corporativa de El Brocal se sustenta en una misión orientada a la producción eficiente de concentrados metálicos, garantizando la sostenibilidad y el crecimiento mediante la exploración constante de nuevas reservas. Sus valores fundamentales —integridad, laboriosidad, lealtad, respeto, solidaridad y transparencia— actúan como el marco ético para todas sus operaciones, desde el tajo abierto hasta el procesamiento metalúrgico en Huaraucaca. Esta filosofía organizacional ha permitido a la empresa navegar por periodos de alta volatilidad en

los precios de los metales y desafíos sociales complejos en el entorno andino (Cabos, 2005). Ver la Tabla 14.

Tabla 14. *Historia de la Unidad Minera El Brocal*

Hito Histórico	Año / Periodo	Descripción
Fundación	1956	Constitución de Sociedad Minera El Brocal S.A.A. en Lima.
Adquisición Buenaventura	2000	Buenaventura adquiere la mayoría accionaria, iniciando una etapa de modernización.
Expansión Marcapunta	2011	Anuncio de inversiones por US$ 200 millones para el desarrollo de proyectos.
Cese Planta N° 1	2023	Decisión estratégica de priorizar el mineral de cobre de mina subterránea.
Optimización Operativa	2024	Incremento de la tasa de extracción en Marcapunta a más de 11,000 tpd.

2.2.10. Geología Regional

La geología regional donde se inserta el distrito minero de Colquijirca es el resultado de una compleja evolución tectónica iniciada en el Paleozoico y exacerbada durante el ciclo andino en el Mesozoico y Cenozoico. La unidad se encuentra en el borde oriental de la Cordillera Occidental, una zona de intensa deformación caracterizada por sistemas de fallas inversas, pliegues y una actividad magmática pulsante (Salazar & Córdova, 2020).

Evolución Tectónica y Estructural Regional

El elemento estructural más relevante a nivel regional es la denominada Falla Longitudinal de Cerro de Pasco. Se trata de una estructura de primer orden con dirección norte-sur que ha controlado el emplazamiento de múltiples depósitos minerales y centros volcánicos en la región. Esta falla marca un límite tectónico importante entre diferentes estilos de deformación: hacia el oeste predominan los

pliegues abiertos con escaso acortamiento, mientras que hacia el este se presentan estructuras más apretadas y fallas longitudinales activas (Benavides, 2024).

Durante el Paleógeno y Neógeno, la región fue receptora de sedimentación continental y carbonatada en una cuenca de tipo pull-apart o de antepaís, que posteriormente fue plegada y fallada debido a la compresión andina. Esta deformación dio origen al sinclinorio que se extiende desde Goyllarisquizga hasta Colquijirca, proporcionando el marco estructural para la acumulación de fluidos hidrotermales (Salazar & Córdova, 2020).

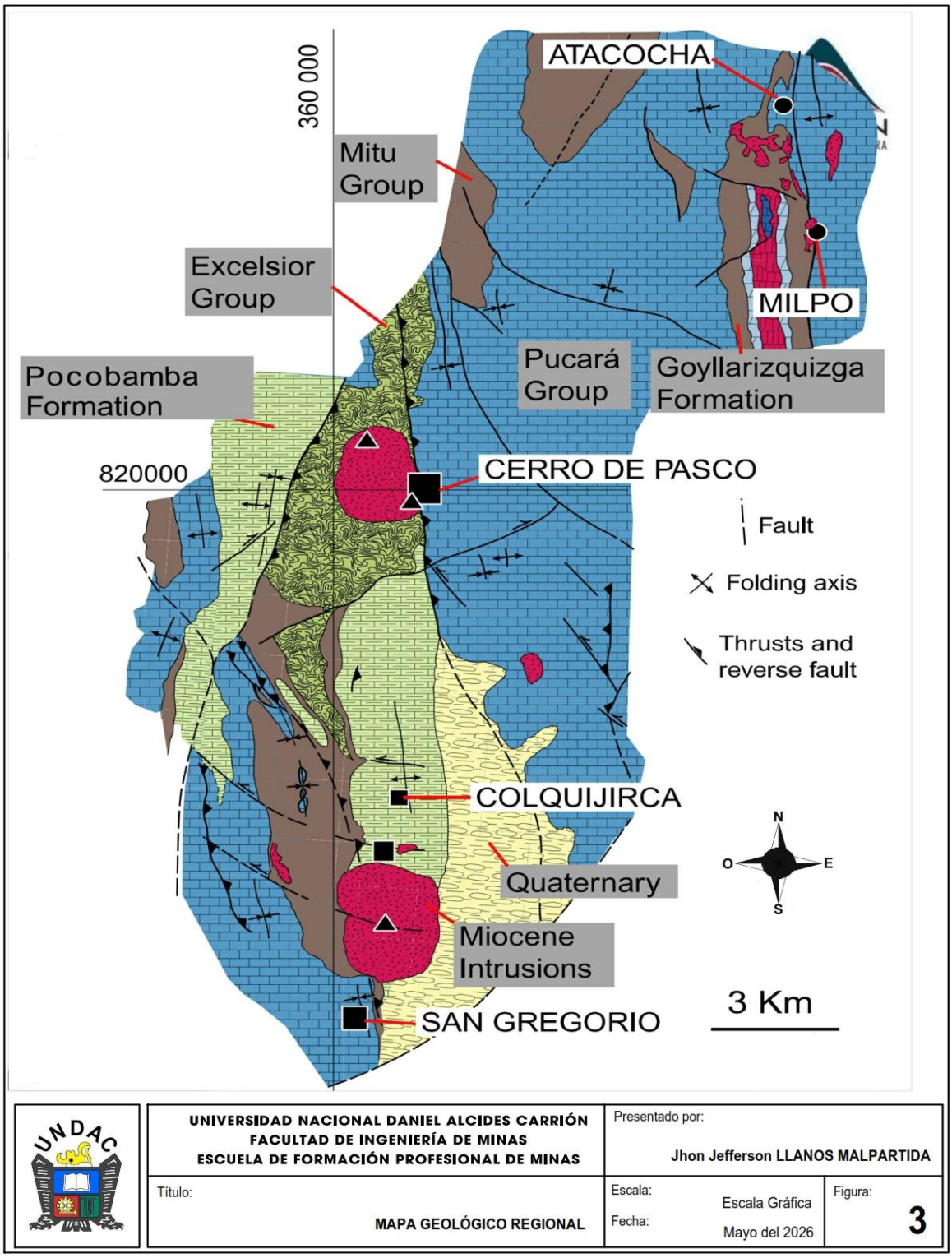
Estratigrafía Regional

La secuencia estratigráfica del área es extensa y comprende las siguientes unidades principales:

1. **Grupo Excelsior (Devónico):** Es el basamento de la región, compuesto por filitas y metasedimentos que evidencian el metamorfismo regional paleozoico (Cabos, 2005).
2. **Grupo Mitu (Pérmico):** Una secuencia volcán-sedimentaria de coloración rojiza, típica de ambientes de rifting continental, que subyace a la columna mesozoica (Cabos, 2005).
3. **Grupo Pucará (Triásico-Jurásico):** Una potente secuencia de calizas y sedimentos marinos que constituye una de las rocas huésped potenciales de mineralización en el centro del país (Cabos, 2005).
4. **Formación Pocobamba (Eoceno):** Incluye el Miembro Shuco, caracterizado por sus depósitos de conglomerados que resultan fundamentales en el modelo geológico local de El Brocal (Cabos, 2005).
5. **Formación Calera (Oligoceno):** Representa el evento sedimentario más importante para la unidad, pues sus horizontes carbonatados albergan la mayor

parte de la mineralización económica de Colquijirca (Cabos, 2005). Ver la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Figura 3. *Mapa Geológico Regional*



2.2.11. Geología Local

La geología local de El Brocal se define por la intersección de las rocas sedimentarias de la Formación Calera con el centro volcánico Marcapunta, un complejo ígneo del Mioceno que actuó como el motor térmico e hidrotermal del sistema. Este complejo volcánico se caracteriza por múltiples episodios de emplazamiento de domos, lavas, diques e intrusiones subvolcánicas (Sarmiento, 2004).

El Centro Volcánico Marcapunta

El complejo Marcapunta se dispone de forma similar a un "hongo", recubriendo las secuencias sedimentarias infrayacentes. Está compuesto principalmente por dacitas porfiríticas y andesitas pertenecientes a una serie calcoalcalina rica en potasio (K). Se han identificado domos dacíticos que cubren áreas de hasta $1 km2$ y flujos de lavas que alcanzan los 300 metros de longitud. La actividad volcánica culminó con la formación de una diatrema, un cono invertido de 700 a 800 metros de diámetro relleno de brechas piroclásticas y freatomagmáticas (Sarmiento, 2004).

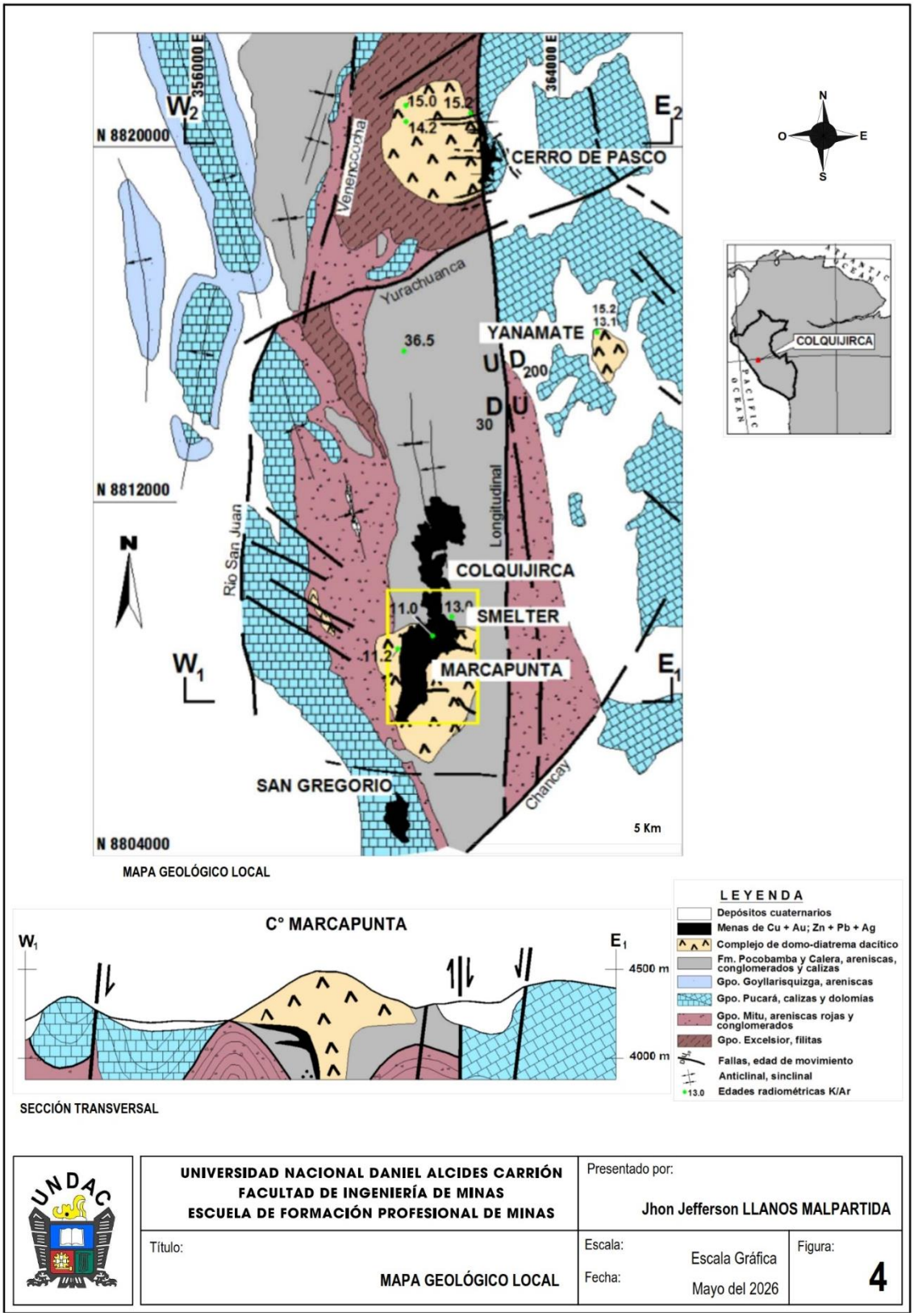
Este evento volcánico fue crucial para la mineralización, ya que generó procesos de "hidrofracturamiento" y la formación de brechas hidrotermales que sirvieron como conductos para los fluidos cargados de metales. Las dataciones radiométricas (K/Ar) indican que la alteración y mineralización principal ocurrieron hace aproximadamente 10.8 ± 0.3 millones de años (Sarmiento, 2004).

Unidades Anfitrionas de la Mineralización

En el distrito de Colquijirca, la mineralización económica se hospeda en horizontes favorables específicos que se extienden desde el sector de Marcapunta hacia el norte, en el Tajo Colquijirca:

- **Formación Calera - Miembro Medio:** Es la principal roca huésped, compuesta por calizas silicificadas que favorecen el reemplazamiento por sulfuros. Presenta una firma geoquímica rica en *Cu−Ag−Zn−Pb* (Aquino et al., 2023).
- **Formación Calera - Miembro Superior:** Horizonte predominantemente rico en *Zn−Ag* (Aquino et al., 2023).
- **Conglomerado Shuco:** Secuencia clástica que actúa como horizonte favorable para la mineralización de *Cu−Au−Ag* en profundidad (Aquino et al., 2023).

Figura 4. *Mapa Geológico Local*



2.2.12. Geología Estructural

La arquitectura estructural de El Brocal es el resultado de la interacción entre el plegamiento regional y las fracturas locales generadas por el ascenso de los domos de Marcapunta. Las estructuras no solo controlan el emplazamiento de los cuerpos, sino que también definen su geometría final.

Sistemas de Fallas y Alimentadores

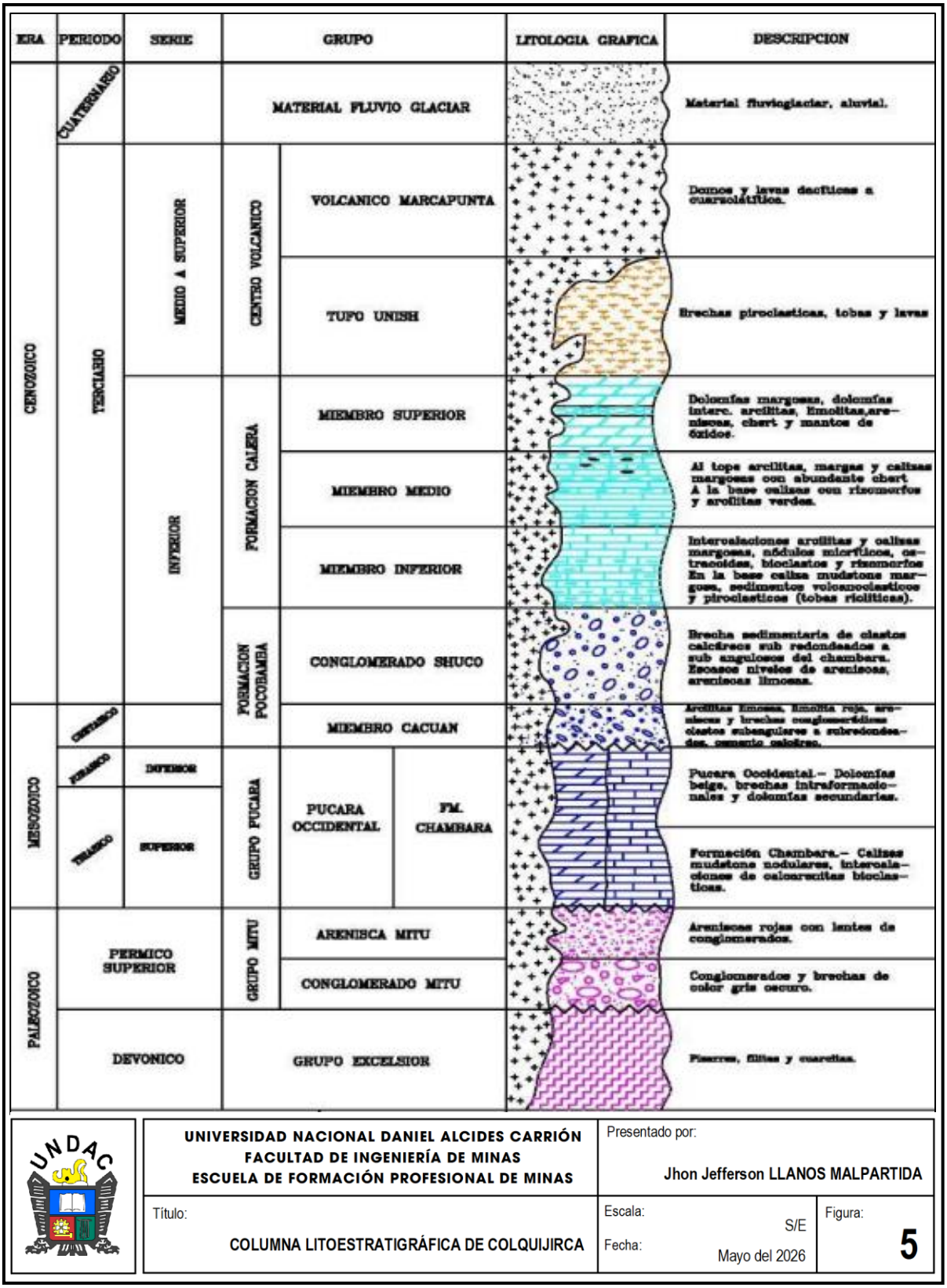
Además de la Falla Longitudinal regional, el distrito presenta un sistema de fallas tensionales con orientación Noroeste-Sureste (NW-SE). Este sistema estructural se identifica como el posible alimentador de sectores específicos como Tatiana, ubicado en el flanco suroeste del Tajo Colquijirca. Las áreas periféricas del centro volcánico muestran fallas normales con buzamiento hacia el interior del complejo, lo que sugiere un colapso del edificio volcánico posterior o simultáneo a los pulsos de mineralización (Aquino et al., 2023).

Geometría de los Cuerpos Mineralizados

La mineralización en El Brocal se presenta bajo tres morfologías principales:

1. **Mantos (Stratabound):** Cuerpos de geometría subhorizontal que siguen la estratificación de la Formación Calera. Un ejemplo notable es la estructura Central Upper, con un rumbo *N*160, buzamiento de 60° norte, una longitud de 520 metros y una potencia promedio de 21 metros (Aquino et al., 2023).
2. **Cuerpos Tubulares:** Localizados en el núcleo del sistema, asociados a conductos de alimentación ricos en enargita y pirita (Aquino et al., 2023).
3. **Diseminaciones y Vetillas:** Encontradas principalmente en las rocas volcánicas alteradas del complejo Marcapunta, características de sistemas epitermales de alta sulfuración (Aquino et al., 2023). Ver la Figura 5.

Figura 5. *Columna Litoestratigráfica de Colquijirca*



Nota. Tomada de INGEMMET

Geología Económica: Clasificación y Zonamiento

El distrito minero de Colquijirca es clasificado como un depósito polimetálico de tipo Cordillerano con una sobreimposición de un sistema epitermal de alta sulfuración. Es uno de los yacimientos con mayor concentración de recursos polimetálicos en el centro del Perú, habiendo producido históricamente más de 251 millones de onzas de plata, 0.2 millones de onzas de oro y 509 kilotoneladas de cobre (Aquino et al., 2023).

Zonamiento Metálico y Mineralógico

La distribución de los metales en El Brocal sigue un patrón de zonamiento concéntrico altamente marcado, típico de los grandes sistemas hidrotermales andinos:

1. **Zona Núcleo (Cu-Au-Ag):** Ubicada en el sector suroeste del Tajo Norte y en Marcapunta. Está dominada por la presencia de enargita (Cu_3AsS_4), pirita y cuarzo. Las leyes de cobre oscilan entre 1% y 3%, con arsénico entre 0.3% y 1% (Aquino et al., 2023).
2. **Zona Intermedia (Cu-Zn-Pb-Ag):** Rodea al núcleo y se caracteriza por el predominio de calcopirita, tennantita, esfalerita y galena (Aquino et al., 2023).
3. **Zona Externa (Zn-Pb-Ag):** Una envoltura extensa compuesta principalmente por esfalerita y galena. Este horizonte ha sido la fuente principal de la producción polimetálica del Tajo Norte (Aquino et al., 2023)

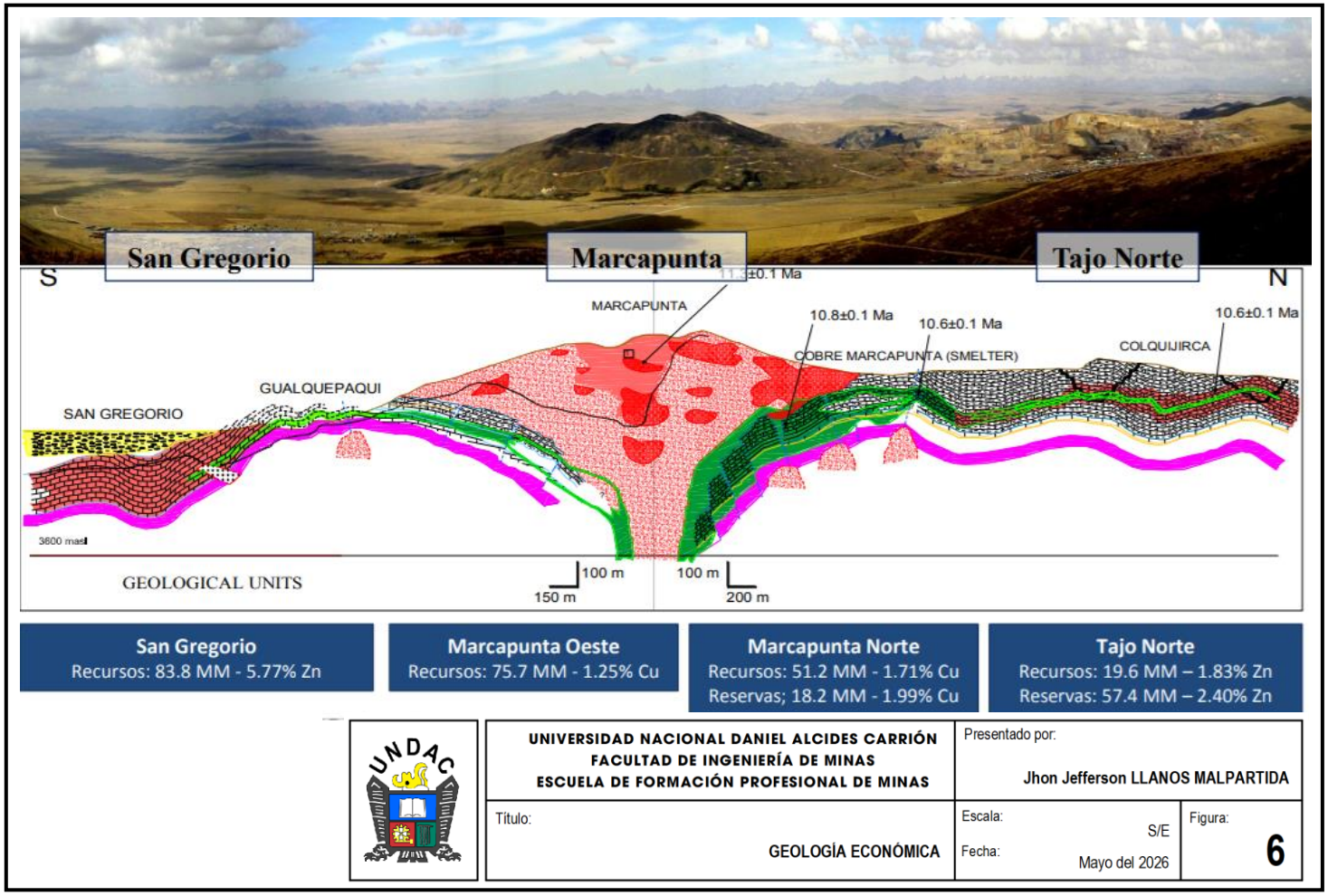
Ensamblajes de Alteración

La alteración hidrotermal es intensa y se correlaciona con el zonamiento metálico. El núcleo del sistema presenta una alteración argílica avanzada con cuarzo, alunita, dickita y caolinita. Este ensamblaje grada hacia los bordes en zonas de caolinita e illita, y finalmente hacia zonas distales caracterizadas por la presencia de carbonatos de manganeso (*Mn*) e hierro (*Fe*) junto con clorita y calcita (Aquino et al., 2023).

Tabla 15. *Minerales Característicos*

Zona de Alteración	Minerales Características	Asociación Metálica
Núcleo (Ácido)	Cuarzo, Alunita, Dickita, Caolinita	Cu,*Au*,*Ag*,*As*
Bordes	Caolinita, Illita, Esmectita	Cu,*Zn*,*Pb*,*Ag*
Zonas Distales	Sericita, Clorita, Carbonatos (*Mn−Fe*)	Zn,*Pb*,*Ag*

Figura 6. *Geología Económica*



2.2.13. Métodos de Explotación: Tajo Abierto y Subterránea

La Unidad Minera El Brocal se distingue por operar simultáneamente (o de manera secuencial estratégica) dos métodos de explotación masiva para extraer los diferentes tipos de mineralización del distrito de Colquijirca.

Operación a Tajo Abierto: Tajo Norte

El Tajo Norte es la operación a cielo abierto de la unidad, diseñada para la extracción de minerales polimetálicos de zinc, plomo y plata hospedados en las secuencias carbonatadas superiores. El proceso de minado involucra ciclos de perforación y voladura para fragmentar el macizo rocoso, seguidos por el carguío mediante excavadoras hidráulicas y el acarreo con camiones mineros hacia los depósitos de desmonte o la chancadora primaria.

A pesar de su importancia histórica, en octubre de 2023 la empresa decidió suspender temporalmente las actividades de minado en el tajo por un periodo de hasta tres años. Esta decisión responde a una estrategia de optimización del capital para priorizar el mineral de cobre de mayor valor proveniente de la mina subterránea, utilizando los inventarios acumulados durante el primer trimestre de 2024.

Operación Subterránea: Marcapunta

La mina Marcapunta es una operación subterránea mecanizada que explota los cuerpos de cobre arsenical (enargita) localizados bajo el complejo volcánico. Históricamente, se utilizaba el método de Cámaras y Pilares (*Room and Pillar*), pero con el objetivo de incrementar la producción de 1,000 t/día a más de 4,000 t/día, la empresa migró hacia el método de **Tajeo por Subniveles** (*Sub-level Open Stoping*-SLOS) con pilares corridos y relleno cementado.

Este método de minado masivo permite una mayor eficiencia en la recuperación de reservas y garantiza la estabilidad geomecánica mediante el uso de relleno. El ciclo operativo en Marcapunta incluye:

- **Perforación de Producción:** Utilizando equipos tipo Simba para taladros largos y Jumbos para el avance de galerías.
- **Voladura:** Implementación de emulsiones bombeables y ANFO, con sistemas de carguío mecanizado que mejoran la seguridad del operador.
- **Acarreo y Transporte:** Empleo de cargadores de bajo perfil (*Scooptrams*) de alta capacidad y camiones mineros que transportan el mineral hacia superficie por rampas.

2.2.14. Planta Concentradora Huaraucaca

El mineral extraído de las minas Tajo Norte y Marcapunta es procesado en el complejo metalúrgico de Huaraucaca. La unidad cuenta con dos plantas concentradoras que poseen una capacidad instalada combinada de tratamiento de aproximadamente 18,000 a 20,000 toneladas métricas diarias (TMD) (Auqui, 2021).

Circuitos de Procesamiento Metalúrgico

El proceso metalúrgico en El Brocal es de tipo diferencial, diseñado para separar los sulfuros metálicos de la ganga y entre sí. Las etapas principales incluyen:

1. **Chancado:** El mineral bruto pasa por chancadoras de quijada y cónicas para reducir su tamaño de fragmentos de mina a aproximadamente media pulgada (Auqui, 2021).
2. **Molienda y Clasificación:** Se utilizan molinos de bolas (en circuito cerrado con hidrociclones) para alcanzar una granulometría fina que libere las partículas de mineral. En esta etapa se añade cal para regular el pH de la pulpa (Auqui, 2021).

3. **Flotación Diferencial:** Es el núcleo del proceso. Mediante el uso de reactivos (colectores, espumantes y activadores) y celdas de flotación, se recuperan selectivamente los concentrados. Existen circuitos específicos para plomo-plata, zinc y cobre (Auqui, 2021).
4. **Espesamiento y Filtrado:** Los concentrados obtenidos son espesados y luego filtrados en prensas para eliminar el exceso de agua, obteniendo un producto final con bajos niveles de humedad listo para el despacho (Auqui, 2021).

Gestión de Relaves y Planta de Relleno

La gestión de residuos mineros es crítica. El Brocal opera la presa de relaves Huachuacaja y ha implementado mejoras tecnológicas como la aprobación del Sexto ITS para optimizar el proceso de relleno de mina. Esto incluye una planta de relleno hidráulico que permite utilizar parte de los relaves para rellenar los tajeos explotados en la mina subterránea, mejorando la estabilidad estructural y reduciendo el volumen de residuos en superficie (Auqui, 2021).

Figura 7. *Planta Concentradora de Huaraucaca*



Figura 8. *Circuito de Chancado*

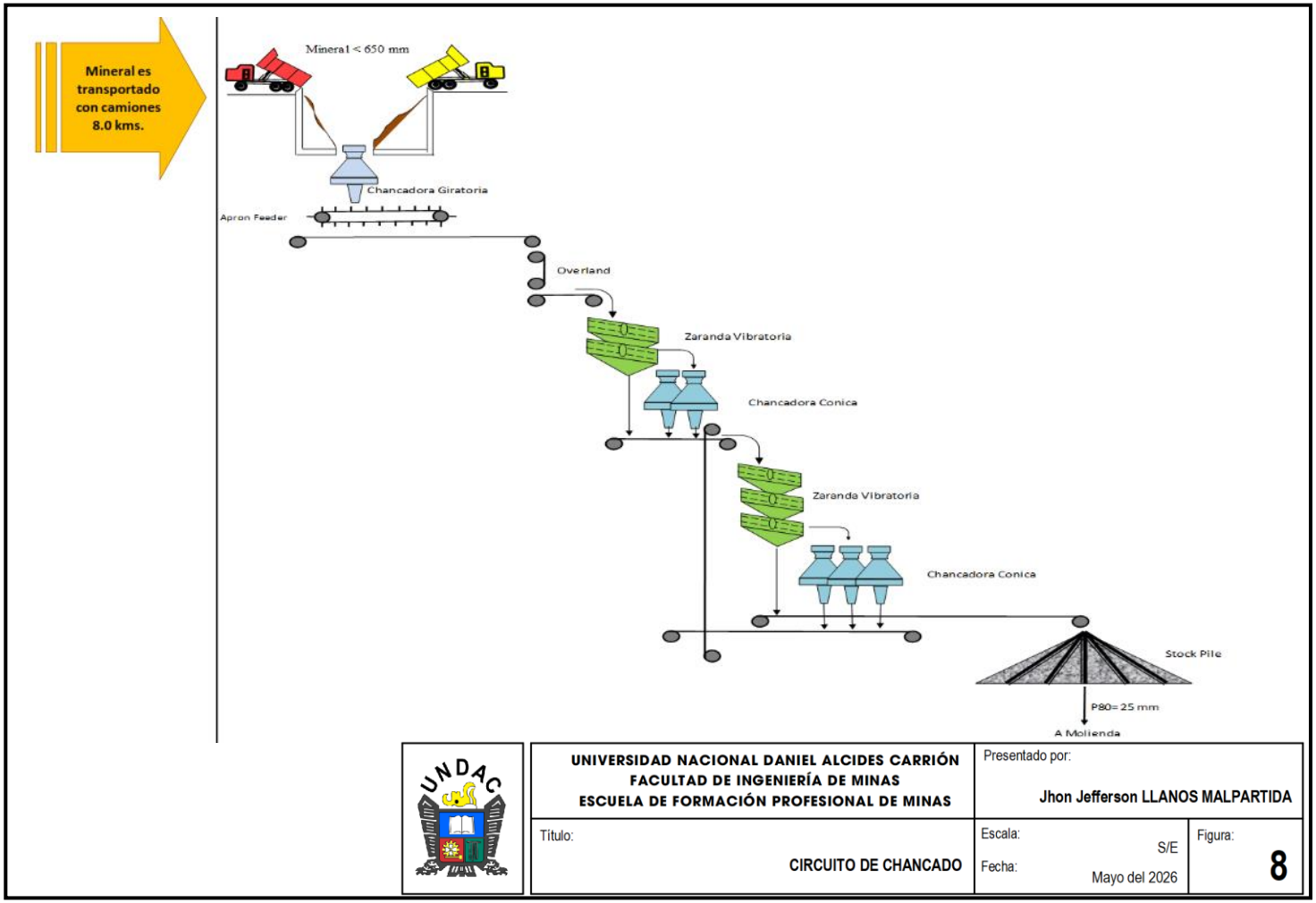
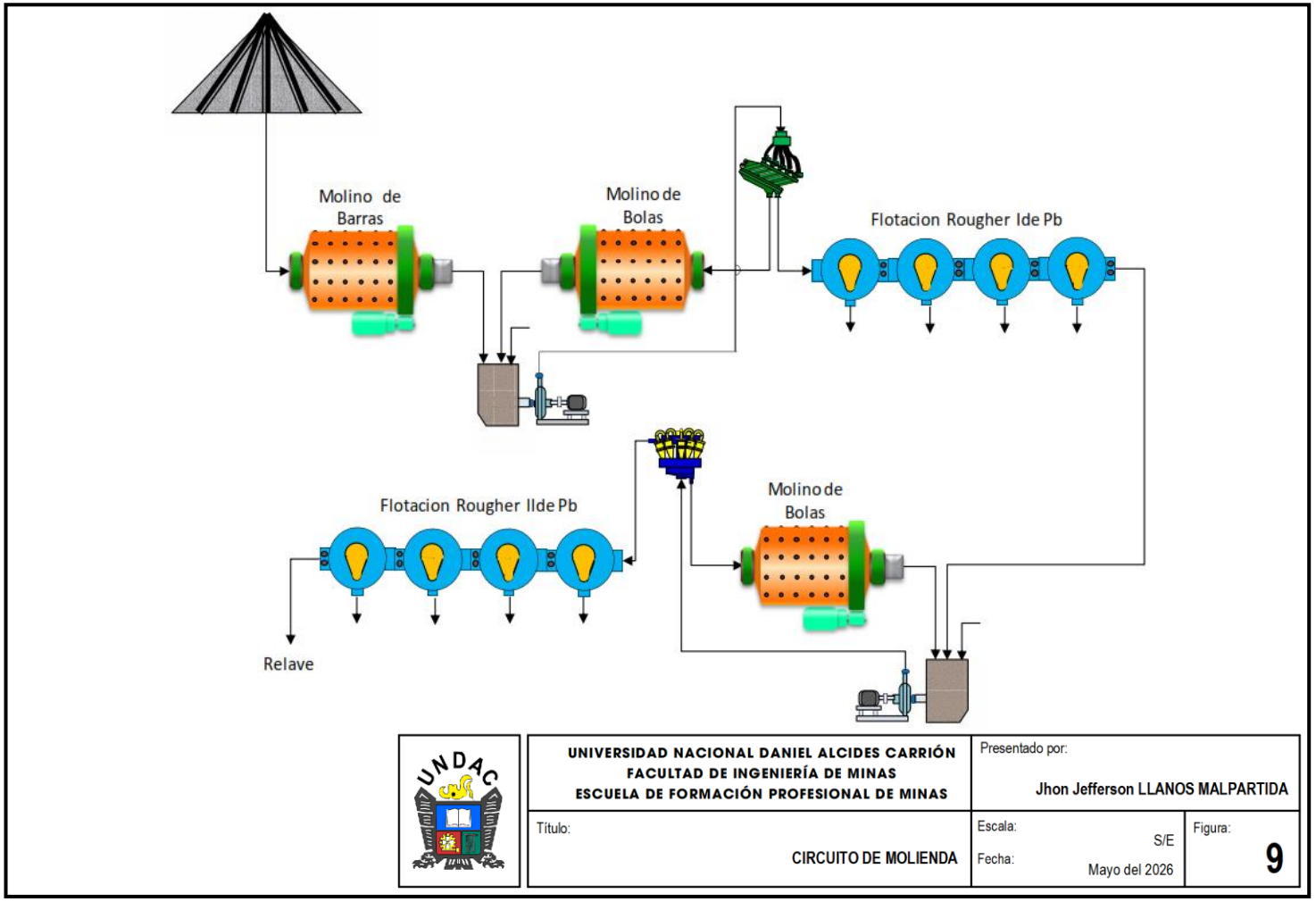


Figura 9. *Circuito de Molienda*



2.2.15. Producción, Volumen de Ventas y Desempeño Financiero

El desempeño productivo de El Brocal en los últimos años refleja la transición estratégica hacia la producción de cobre. En 2023, la empresa procesó un volumen total de 4.89 millones de toneladas métricas de mineral (Benavides, 2023).

Estadísticas de Producción (2023-2024)

La producción metálica ha mostrado una tendencia de crecimiento en el segmento de cobre, compensando la disminución programada en zinc y plomo debido a la suspensión del tajo (Benavides, 2024).

Tabla 16. *Estadísticas de Producción del 2023-2024 UM El Brocal*

Metal	Unidad	Producción 2023	Producción 2024 (Real/Proyectado)
Cobre	TM	57,707	55,000 - 60,000
Zinc	TM	17,153	17,400 - 20,000
Plata	Oz	-	14,7M - 16,1M
Plomo	TM	5,026	3,500 - 4,000

Nota. Los datos han sido obtenidos de las memorias anuales de la UM El Brocal.

Durante el tercer trimestre de 2024 (3Q24), El Brocal alcanzó una tasa de minado subterráneo de 12,000 tpd, superando su objetivo anual de 11,000 tpd. Esta aceleración operativa permitió procesar 4.11 millones de TM de mineral de Marcapunta solo en 2024, un incremento significativo respecto a los 3.45 millones de TM del año previo (Benavides, 2024).

Ventas y Precios Realizados

Las ventas de El Brocal se benefician de la cotización internacional de los metales en el London Metal Exchange (LME). En 2023, a pesar de las fluctuaciones, la empresa generó una ganancia neta de US$ 31.5 millones, cifra que aumentó a US$ 35.3 millones en 2024. El EBITDA del año 2024 alcanzó los US$ 151.9 millones, demostrando la resiliencia de la operación frente a los costos de insumos y la complejidad del yacimiento (Benavides, 2024).

2.2.16. Capital Humano, Seguridad y Salud Ocupacional

La fuerza laboral de El Brocal es el eje de su ventaja competitiva. Al cierre de 2023, la unidad empleaba a un total de 3,141 personas, combinando personal directo y de empresas contratistas especializadas (García, 2020).

Composición del Personal (2023)

- **Empleados Directos:** 685 trabajadores.
- **Personal de Contratistas:** 2,456 trabajadores.
- **Total:** 3,141 personas.

La empresa invierte continuamente en programas de capacitación programados para sus colaboradores y personal tercero, enfocándose en la operación de maquinaria pesada y protocolos de seguridad crítica. El 50% de la fuerza laboral corporativa está representada por seis sindicatos, manteniendo un diálogo constante para asegurar la paz laboral (García, 2020).

2.2.17. Perspectivas Futuras y Proyectos de Expansión

El futuro de la Unidad Minera El Brocal está ligado a la consolidación de Marcapunta como una operación de cobre de clase mundial y al desarrollo de nuevos proyectos polimetálicos.

- **San Gregorio:** Constituye uno de los depósitos de zinc más importantes por desarrollar, con reservas estimadas en 80 millones de toneladas con una ley de 8% de zinc. Aunque su cronograma de producción masiva se proyecta hacia finales de la década de 2030, sigue siendo el pilar de crecimiento a largo plazo (Benavides, 2024).
- **Ampliación de Planta:** Existen proyectos para ampliar la capacidad de tratamiento a 25,000 TMD, lo que permitiría procesar mayores volúmenes de mineral de menor ley de manera rentable (Benavides, 2024).

- **Exploración en Marcapunta Oeste:** Se mantienen programas activos de perforación para identificar nuevas zonas de mineralización aurífera y cuprífera que garanticen la sostenibilidad de la unidad más allá del horizonte actual (Benavides, 2024).

La integración de Buenaventura como operador principal y el enfoque en la minería subterránea masiva posicionan a El Brocal como un activo estratégico en la cartera minera del Perú, capaz de generar valor sostenido mediante la innovación técnica y la gestión responsable de sus recursos (Benavides, 2024).

2.3. Definición de términos básicos

Los términos más importantes de la tesis son los siguientes:

- **Optimización**

La optimización es un proceso matemático y analítico orientado a la identificación de la mejor solución posible dentro de un conjunto de alternativas factibles, considerando un objetivo específico y un conjunto de restricciones. En el ámbito de la ingeniería y la gestión, la optimización se emplea para maximizar beneficios o minimizar costos, tiempos o recursos, permitiendo una toma de decisiones basada en criterios cuantitativos y racionales.

En minería subterránea, la optimización se aplica para mejorar la eficiencia operativa mediante la asignación adecuada de recursos, la planificación de la producción y la reducción de costos operativos. Su aplicación resulta fundamental en entornos complejos, donde múltiples variables técnicas y económicas interactúan simultáneamente.

- **Modelo de optimización**

Un modelo de optimización es una representación matemática simplificada de un sistema real, diseñada para analizar su comportamiento y determinar la solución

óptima que cumpla un objetivo previamente definido. Este tipo de modelo se compone de una función objetivo, variables de decisión y restricciones que reflejan las limitaciones del sistema.

En la presente investigación, el modelo de optimización se utiliza como herramienta para minimizar los costos operativos directos de la operación minera subterránea, permitiendo evaluar diferentes escenarios productivos y seleccionar la alternativa más eficiente desde el punto de vista económico.

- **Costos operativos**

  Los costos operativos son los gastos directamente asociados a la ejecución de las actividades productivas necesarias para la extracción y transporte del mineral. En minería subterránea, estos costos incluyen perforación, voladura, carguío, acarreo, sostenimiento, ventilación, mano de obra directa y mantenimiento de equipos.

  La correcta gestión de los costos operativos es determinante para la competitividad de una operación minera, ya que estos representan una parte significativa del costo total de producción. Su optimización permite reducir el costo unitario por tonelada y mejorar los márgenes económicos de la empresa.

- **Cash cost**

  El *cash cost* es un indicador económico que representa el costo directo de producción de una unidad de mineral, excluyendo conceptos financieros como depreciación, amortización e impuestos. Este indicador se centra en los costos operativos controlables por la gestión de la operación minera.

  En minería subterránea, el *cash cost* es ampliamente utilizado para evaluar la eficiencia operativa, ya que refleja de manera directa el impacto de las decisiones

técnicas y operativas sobre los costos. Su reducción constituye una estrategia clave para incrementar la rentabilidad y sostenibilidad económica de la operación.

- **Rentabilidad minera**

  La rentabilidad minera se refiere a la capacidad de una operación minera para generar beneficios económicos a partir de los recursos invertidos. Se expresa generalmente como una relación entre las utilidades obtenidas y los costos o inversiones realizadas durante el proceso productivo.

  En minería subterránea, la rentabilidad está estrechamente vinculada al control de los costos operativos y al nivel de eficiencia alcanzado en la operación. La aplicación de modelos de optimización contribuye a mejorar la rentabilidad al reducir el cash cost y aumentar el margen operativo.

- **Minería subterránea**

  La minería subterránea es un método de explotación minera que consiste en la extracción de minerales a través de labores subterráneas, tales como túneles, galerías y chimeneas. Este tipo de minería se emplea cuando el yacimiento se encuentra a profundidades que hacen inviable la explotación a cielo abierto.

  Debido a su complejidad técnica, la minería subterránea presenta costos operativos elevados y mayores restricciones operativas en comparación con otros métodos de explotación. Por ello, requiere una planificación y gestión rigurosa para garantizar la seguridad, eficiencia y rentabilidad de la operación.

- **Función objetivo**

  La función objetivo es una expresión matemática que representa el objetivo principal de un modelo de optimización, ya sea maximizar beneficios o minimizar costos. Esta función establece el criterio bajo el cual se evalúan las diferentes alternativas de decisión.

En el contexto de la presente investigación, la función objetivo está orientada a minimizar el *cash cost* total de la operación minera subterránea, permitiendo identificar la combinación óptima de producción y asignación de recursos que reduzca los costos operativos.

- **Restricciones**

  Las restricciones son condiciones o limitaciones que deben cumplirse dentro de un modelo de optimización. Estas representan las limitaciones técnicas, operativas, económicas o de capacidad del sistema real que se está modelando.

  En minería subterránea, las restricciones pueden estar relacionadas con la capacidad productiva, disponibilidad de equipos, mano de obra, presupuesto operativo y condiciones de seguridad. La correcta formulación de las restricciones garantiza que las soluciones obtenidas sean viables y aplicables a la realidad operativa.

- **Planificación minera**

  La planificación minera es el proceso mediante el cual se definen las actividades, recursos y secuencia de explotación de un yacimiento, con el objetivo de alcanzar las metas de producción de manera eficiente y segura. Este proceso abarca la planificación de corto, mediano y largo plazo.

  En minería subterránea, una planificación adecuada permite optimizar el uso de recursos, reducir costos operativos y minimizar riesgos. La integración de modelos de optimización en la planificación minera fortalece la toma de decisiones y mejora el desempeño económico de la operación.

- **Eficiencia operativa**

  La eficiencia operativa se define como la capacidad de una organización o sistema productivo para utilizar sus recursos de manera óptima, logrando el

máximo nivel de producción o desempeño con el menor consumo posible de insumos, tiempo y costos. En el contexto minero, la eficiencia operativa se evalúa a través de indicadores como productividad, utilización de equipos, cumplimiento de metas y control de costos.

En minería subterránea, una alta eficiencia operativa se traduce en menores costos operativos por tonelada producida y en una reducción directa del cash cost. La aplicación de modelos de optimización contribuye a mejorar la eficiencia operativa al identificar asignaciones óptimas de recursos, reducir tiempos improductivos y mejorar la planificación de las operaciones, impactando positivamente en la rentabilidad de la unidad minera.

2.4. Formulación de Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La aplicación de modelos de optimización influye significativamente en el incremento de la utilidad neta y en la reducción del cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

2.4.2. Hipótesis específicas

a) La aplicación de modelos de optimización incrementa la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

b) La aplicación de modelos de optimización reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

2.5. Identificación de Variables

Para la investigación se consideran las variables dependientes e independientes, con el fin de obtener respuesta a los problemas de investigación.

2.5.1. Variables Dependientes

Para el presente trabajo de investigación, las variables dependientes son:

Y_1= Rentabilidad.

Y_2= Costos operativos.

Y_3= Utilidad Neta.

Y_4= Cash Cost.

2.5.2. Variables Independientes

Las variables independientes son:

X = Modelos de optimización.

X_1 = Función objetivo formulada.

X_2 = Número de variables de decisión.

X_3 = Nivel de restricciones

X_4 = Tipo de modelo aplicado

X_5 = Escenarios evaluados

2.6. Definición Operacional de Variables e Indicadores

2.6.1. Variable Independiente: Modelos de Optimización

A. Definición conceptual

Los modelos de optimización son herramientas matemáticas y analíticas que permiten identificar la mejor solución posible dentro de un conjunto de alternativas, considerando un objetivo específico y un conjunto de restricciones técnicas, económicas y operativas. En el ámbito de la gestión minera, estos modelos se emplean para mejorar la asignación de recursos, reducir costos operativos y optimizar la planificación de la producción.

En la presente investigación, los modelos de optimización se orientan a la **minimización del *cash cost*** mediante la formulación de una función objetivo y restricciones aplicables a la operación subterránea de la **Unidad**

Minera El Brocal, permitiendo evaluar escenarios productivos y seleccionar la alternativa más eficiente.

B. Definición operacional

La variable "Modelos de Optimización" se operacionaliza a través de la **formulación y aplicación de un modelo matemático de programación lineal entera mixta**, el cual considera variables de producción, costos operativos y restricciones de capacidad, equipos y mano de obra. Su aplicación se evalúa mediante la comparación de los resultados económicos obtenidos antes y después de la optimización. Ver la Tabla 17.

Tabla 17. *Indicadores de la Variable Independiente*

Indicador	Descripción	Unidad de medida
Función objetivo formulada	Existencia de una función matemática orientada a minimizar el *cash cost*	Cualitativo
Número de variables de decisión	Variables productivas y operativas incluidas en el modelo	Número
Número de restricciones	Restricciones técnicas, operativas y económicas consideradas	Número
Tipo de modelo aplicado	Programación lineal entera mixta	Cualitativo
Escenarios evaluados	Cantidad de escenarios productivos simulados	Número

Variable Dependiente 1: Costos Operativos

A. Definición conceptual

Los costos operativos son los gastos directamente asociados a la ejecución de las actividades productivas necesarias para la extracción y transporte del mineral. En minería subterránea, estos costos incluyen perforación, voladura, carguío, acarreo, sostenimiento, ventilación, mano de obra directa y mantenimiento de equipos.

La correcta gestión de los costos operativos es fundamental para garantizar la eficiencia económica de la operación minera, ya que estos representan una proporción significativa del costo total de producción y tienen un impacto directo en el *cash cost* y en la rentabilidad.

B. Definición operacional

La variable "Costos Operativos" se mide mediante el análisis de los costos unitarios y totales asociados a las principales operaciones mineras subterráneas, expresados en términos monetarios por tonelada producida y por período de análisis. Estos costos se comparan entre un escenario sin optimización y un escenario optimizado.

Tabla 18. *Indicadores de la Variable Costos Operativos*

Indicador	Descripción	Unidad de medida
Margen operative	Diferencia entre ingresos y costos operativos	US$
Rentabilidad operative	Relación entre utilidad operativa y costos	%
EBITDA operative	Resultado antes de intereses, impuestos y depreciación	US$
Relación costo–beneficio	Comparación entre costos e ingresos	Ratio

Variable Dependiente 2: Rentabilidad Minera

A. Definición conceptual

La rentabilidad minera es la capacidad de una operación minera para generar beneficios económicos a partir de los recursos invertidos, reflejando la eficiencia con la que se gestionan los costos y se aprovechan los ingresos generados por la producción.

En minería subterránea, la rentabilidad está estrechamente relacionada con el control de los costos operativos y la reducción del *cash cost*, ya que

estos determinan el margen operativo y la sostenibilidad económica de la operación.

B. Definición operacional

La rentabilidad minera se operacionaliza mediante el cálculo de indicadores económicos que relacionan los ingresos con los costos operativos, evaluando el impacto de la optimización en el margen operativo y en los resultados económicos de la unidad minera antes y después de la aplicación del modelo de optimización.

Tabla 19. *Indicadores de la Variable Rentabilidad Minera*

Indicador	Descripción	Unidad de medida
Margen operative	Diferencia entre ingresos y costos operativos	US$
Rentabilidad operative	Relación entre utilidad operativa y costos	%
EBITDA operative	Resultado antes de intereses, impuestos y depreciación	US$
Relación costo–beneficio	Comparación entre costos e ingresos	Ratio

Variable dependiente 3: Cas cost

A. Definición conceptual

El *cash cost* es un indicador económico que representa el costo directo de producir una unidad de mineral, excluyendo costos financieros, depreciaciones y amortizaciones. Este indicador se centra en los costos operativos controlables y refleja la eficiencia real de la operación minera.

En minería subterránea, el *cash cost* es un indicador clave para evaluar la competitividad y sostenibilidad económica de la operación, siendo uno de los principales objetivos de reducción mediante la aplicación de modelos de optimización.

B. Definición operacional

El *cash cost* se mide como el cociente entre el total de costos operativos directos y la cantidad de mineral producido durante el período de análisis. Su valor se compara entre el escenario actual y el escenario optimizado generado por el modelo matemático.

Tabla 20. *Indicadores e la Variable Cash Cost*

Indicador	Descripción	Unidad de medida
Cash cost total	Costo directo total de producción	US$/mes
Cash cost unitario	Costo directo por tonelada producida	US$/t
Variación del cash cost	Diferencia entre escenario actual y optimizado	US$/t
Porcentaje de reducción	Reducción relativa del cash cost	%

La definición conceptual y operacional de variables se encuentra en la Tabla 21.

Variables de la Hipótesis General

Las variables de la hipótesis general se detallan a continuación:

- **Variables Independientes**

  X = Modelos de optimización.

- **Variables Dependientes**

  Y = Rentabilidad y costos operativos.

  Y1 = Rentabilidad.

  Y2 = Costos operativos.

  Y3 = Utilidad neta.

  Y4 = Cash cost.

2.6.2. Variables de las Hipótesis Secundarias

Son los siguientes:

Variables Independientes

X = Modelos de optimización.

- **Dimensiones:**

X_1 = Modelo de optimización de Programación Lineal.

- **Indicadores:**

X_{11} = Función objetivo formulada.

X_{21} = Número de variables de decisión.

X_{31} = Número de restricciones.

X_{41} = Tipo de modelo aplicado.

X_{51} = Escenarios evaluados.

Variables Dependientes

Y = Rentabilidad y costos operativos

A. Dimensiones e Indicadores de la Primera Variable Dependiente:

Y_1 = Rentabilidad.

- **Dimensiones:**

Y_1 = Rentabilidad minera.

- **Indicadores:**

Y11= Margen operativo.

Y12= Rentabilidad operativa.

Y13 = EBITDA operativa.

Y14 = Relación costo-beneficio.

B. Dimensiones e Indicadores de la Segunda Variable Dependiente:

Y_2 = Costos operativos.

- **Dimensiones:**

Y_2 = Costos operativos mineros.

- **Indicadores:**

Y21= Costo operativo total (US$/mes).

Y22 = Costo operativo unitario (US$/t).

Y23 = Costo de perforación y voladura (US$/t)

Y24 = Costo de carguío y acarreo (US$/t)

Y25 = Costo de ventilación y servicios (US$/t)

C. Dimensiones e Indicadores de la Tercera Variable Dependiente:

Y_3 = Cash *cost*.

- **Dimensiones**:

Y_3 = *Cash cost*.

- **Indicadores:**

Y31= Cash cost total (US$/mes).

Y32 = Cash cost unitario (US$/t).

Y33 = Variación del cash cost (US$/t)

Y34 = Porcentaje de reducción relativa del cash cost (%)

Ver la Tabla 21 donde se muestran las variables e indicadores del estudio.

Tabla 21. *Operacionalización de la Variable Independiente*

Dimensión	Indicador	Definición operacional	Técnica	Instrumento
Formulación del modelo	Función objetivo definida	Existencia de una función matemática orientada a minimizar el *cash cost*	Análisis documental	Modelo matemático
Estructura del modelo	Número de variables de decisión	Cantidad de variables productivas y operativas consideradas en el modelo	Análisis matemático	Formulación del modelo
Restricciones	Número de restricciones	Cantidad de restricciones técnicas, operativas y económicas incorporadas	Análisis matemático	Formulación del modelo
Tipo de modelo	Programación lineal entera mixta	Aplicación de un modelo PLEM para representar la operación minera	Análisis técnico	Modelo matemático
Evaluación de escenarios	Escenarios simulados	Comparación entre escenario actual y escenario optimizado	Simulación	Solver / Software de optimización

Tabla 22. *Variable Dependiente 1: Rentabilidad Minera*

Dimensión	Indicador	Definición operacional	Técnica	Instrumento
Resultados económicos	Margen operativo	Diferencia entre ingresos y costos operativos	Análisis financiero	Estados financieros
Desempeño económico	Rentabilidad operativa	Relación entre utilidad operativa y costos	Análisis financiero	Hoja de cálculo
Flujo operativo	EBITDA operativo	Resultado antes de intereses, impuestos y depreciación	Análisis financiero	Estados financieros
Evaluación económica	Relación costo–beneficio	Comparación entre costos operativos e ingresos	Análisis económico	Hoja de cálculo

Tabla 23. *Variable Dependiente 2: Costos Operativos*

Dimensión	Indicador	Definición operacional	Técnica	Instrumento
Costos totales	Costo operativo total	Suma de los costos directos de producción en el período de análisis	Análisis documental	Registros de costos
Costos unitarios	Costo operativo unitario	Costo por tonelada producida	Análisis económico	Hoja de cálculo
Operaciones unitarias	Costo de perforación y voladura	Gasto asociado a la preparación del frente	Análisis económico	Reportes operativos
Transporte	Costo de carguío y acarreo	Gasto asociado al transporte del mineral	Análisis económico	Reportes operativos
Servicios	Costo de ventilación y servicios	Consumo energético y servicios auxiliares	Análisis económico	Reportes de energía

Tabla de Operacionalización de la Variable Dependiente 3: *Cash Cost*

Dimensión	**Indicador**	**Definición operacional**	**Técnica**	**Instrumento**
Costo directo	*Cash cost* total	Total de costos operativos directos en el período	Análisis económico	Estados de costos
Costo unitario	*Cash cost* unitario	Costo directo por tonelada producida	Análisis económico	Hoja de cálculo
Variación	Variación del *cash cost*	Diferencia entre escenario actual y optimizado	Comparación de escenarios	Modelo matemático
Impacto	Porcentaje de reducción	Reducción porcentual del *cash cost*	Análisis estadístico	Hoja de cálculo

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se clasifica de acuerdo con su finalidad, enfoque, nivel y diseño, considerando el marco metodológico empleado para el desarrollo del estudio y la naturaleza del problema planteado.

3.1.1. Según su Finalidad: Investigación Aplicada

La investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como propósito fundamental resolver un problema concreto de la realidad, mediante la aplicación de conocimientos teóricos y herramientas técnicas existentes. En este caso, se busca aplicar modelos de optimización matemática para reducir los costos operativos y mejorar la rentabilidad de una operación minera subterránea.

De acuerdo con Hernández-Sampieri (2010), la investigación aplicada se orienta a la solución de problemas prácticos específicos y a la generación de resultados con utilidad inmediata para la toma de decisiones. En ese sentido, la presente tesis no se limita al desarrollo teórico de modelos, sino que los aplica directamente al contexto

operativo de la Unidad Minera El Brocal, con el fin de mejorar su desempeño económico.

Asimismo, Tamayo, (2007) señala que la investigación aplicada utiliza el conocimiento existente para intervenir sobre una realidad determinada, lo cual se evidencia en este estudio a través del uso de modelos de optimización orientados a la minimización del *cash cost* en minería subterránea.

3.1.2. Según el Enfoque: Investigación Cuantitativa

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, dado que se basa en el análisis de variables medibles y en la utilización de modelos matemáticos para evaluar el impacto de la optimización sobre los costos operativos y la rentabilidad minera. Este enfoque permite expresar los resultados en términos numéricos y realizar comparaciones objetivas entre escenarios.

Hernández-Sampieri (2010) sostiene que la investigación cuantitativa se caracteriza por el uso de mediciones numéricas, análisis estadístico y modelos formales para probar hipótesis y explicar fenómenos. En la presente tesis, este enfoque se manifiesta en la formulación de una función objetivo, restricciones y variables de decisión, así como en la cuantificación del ahorro económico generado por la optimización.

De igual manera, Kerlinger & Lee (2002) indican que el enfoque cuantitativo permite establecer relaciones causales entre variables, lo cual resulta pertinente para analizar cómo la aplicación de modelos de optimización influye en la reducción de costos operativos y en el incremento de la rentabilidad.

3.1.3. Según el Nivel: Investigación Explicativa

El nivel de la investigación es explicativo, ya que no solo describe la situación actual de los costos operativos y la rentabilidad minera, sino que analiza la relación

causal entre la aplicación de modelos de optimización y la mejora de los indicadores económicos de la operación minera.

Según Hernández-Sampieri et al. (2010), la investigación explicativa tiene como finalidad identificar las causas de un fenómeno y explicar por qué ocurre. En este estudio, se explica cómo y por qué la aplicación de modelos de optimización permite reducir el *cash cost* y mejorar la rentabilidad de la Unidad Minera El Brocal.

Tamayo (2007) afirma que este nivel de investigación es el más profundo, ya que busca establecer relaciones de causa–efecto. En ese sentido, la presente tesis demuestra que la optimización de recursos y procesos operativos genera impactos directos y medibles en los resultados económicos de la operación minera.

3.1.4. Según el Diseño: Investigación No Experimental

La investigación presenta un diseño no experimental, debido a que no se manipulan directamente las variables independientes en un entorno real, sino que se analizan a partir de información existente y mediante la simulación de escenarios optimizados utilizando modelos matemáticos.

Hernández et al. (2010) señala que en la investigación no experimental las variables no se manipulan deliberadamente, sino que se observan y analizan tal como ocurren en la realidad. En esta tesis, los datos de costos y producción son analizados mediante un modelo de optimización, sin alterar físicamente la operación minera.

Kerlinger & Lee (2002) destacan que este tipo de diseño es apropiado cuando la manipulación directa de variables no es viable o resulta costosa, como ocurre en operaciones mineras reales, donde los cambios deben evaluarse previamente mediante modelos y simulaciones antes de su implementación.

3.2. Nivel de Investigación

La presente investigación se desarrolla bajo el nivel explicativo, debido a que busca analizar y demostrar la relación causal existente entre la aplicación de modelos de optimización y los cambios observados en la rentabilidad y los costos operativos de una operación minera subterránea. Este nivel de investigación no se limita a describir el fenómeno estudiado, sino que pretende explicar por qué y cómo la optimización incide directamente en el desempeño económico de la unidad minera.

De acuerdo con Hernández et al. (2010), la investigación explicativa tiene como finalidad identificar las causas de los fenómenos y establecer relaciones de causa–efecto entre las variables de estudio. En este sentido, la tesis explica cómo la implementación de modelos de optimización matemática influye en la reducción de los costos operativos y en el incremento de la rentabilidad minera, a partir del análisis cuantitativo de datos operativos y económicos.

Asimismo, Tamayo (2007) señala que el nivel explicativo se caracteriza por responder a las preguntas "¿por qué ocurre el fenómeno?" y "¿en qué condiciones se manifiesta?", permitiendo comprender los mecanismos que generan determinados resultados. En la presente investigación, se explica que la mejora de la rentabilidad se produce como consecuencia de una asignación óptima de recursos, una planificación eficiente y una reducción del *cash cost* mediante el uso de modelos de optimización.

Por su parte, Arias (2012) sostiene que la investigación explicativa busca determinar las causas de los hechos mediante el establecimiento de relaciones entre variables, apoyándose en fundamentos teóricos y evidencias empíricas. Bajo este enfoque, el estudio demuestra que la aplicación de modelos de optimización constituye la causa principal de la mejora en los indicadores económicos de la Unidad Minera El Brocal, evidenciando su impacto directo en la eficiencia operativa.

En consecuencia, el nivel explicativo es el más adecuado para la presente tesis, ya que permite no solo cuantificar la reducción de los costos operativos y el incremento de la rentabilidad, sino también explicar el efecto que genera la optimización sobre dichas variables, aportando conocimiento aplicado y sustentado científicamente para la gestión minera.

3.3. Métodos de Investigación

La presente investigación emplea un conjunto de métodos científicos que permiten analizar de manera rigurosa el problema planteado, formular el modelo de optimización y evaluar su impacto sobre los costos operativos y la rentabilidad minera. En función de los objetivos del estudio y del enfoque cuantitativo adoptado, se utilizan los métodos analíticos, deductivo, modelación matemática y comparativo.

3.3.1. Método Analítico

El método analítico consiste en descomponer un fenómeno complejo en sus partes constitutivas con el propósito de estudiarlas de manera individual y comprender su comportamiento. Este método permite identificar relaciones, características y efectos de cada componente dentro de un sistema (Tamayo, 2007).

En la presente tesis, el método analítico se aplica para descomponer los costos operativos de la minería subterránea en sus principales componentes (perforación, voladura, carguío, acarreo, ventilación y mano de obra), permitiendo identificar aquellos que tienen mayor incidencia en el *cash cost*. Asimismo, facilita el análisis individual de las variables que conforman el modelo de optimización, contribuyendo a una formulación matemática coherente y estructurada.

3.3.2. Método Deductivo

El método deductivo parte de principios generales, teorías o modelos aceptados, para derivar conclusiones particulares aplicables a un caso específico. Este método se

caracteriza por razonar de lo general a lo particular, permitiendo explicar fenómenos concretos a partir de leyes o teorías previamente establecidas (Hernández et al., 2010).

En esta investigación, el método deductivo se utiliza para aplicar los principios teóricos de la optimización matemática y de la gestión de costos a la realidad específica de la Unidad Minera El Brocal. A partir de teorías generales sobre optimización y rentabilidad, se deducen soluciones particulares orientadas a la minimización del *cash cost* y al incremento de la rentabilidad minera.

3.3.3. Método de Modelación Matemática

El método de modelación matemática consiste en representar un sistema real mediante expresiones y relaciones matemáticas que permiten analizar su comportamiento y encontrar soluciones óptimas. Este método es ampliamente utilizado en investigaciones cuantitativas y en la investigación operativa, especialmente para la toma de decisiones en sistemas complejos (Hillier et al., 2021).

En la presente tesis, la modelación matemática se emplea para formular un modelo de optimización basado en programación lineal entera mixta, el cual incluye una función objetivo orientada a minimizar el *cash cost* y un conjunto de restricciones que representan las limitaciones técnicas y operativas de la minería subterránea. Este método permite simular escenarios productivos y evaluar el impacto económico de la optimización sin intervenir directamente en la operación real.

3.3.4. Método Comparativo

El método comparativo se basa en la confrontación sistemática de dos o más situaciones, escenarios o variables, con el fin de identificar similitudes, diferencias y efectos generados por una determinada intervención o condición (Arias, 2012).

En esta investigación, el método comparativo se utiliza para contrastar los resultados obtenidos en un escenario sin optimización con aquellos generados por la

aplicación del modelo de optimización. A través de esta comparación, se evalúa el impacto del modelo sobre los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad minera, permitiendo demostrar de manera objetiva los beneficios de la optimización aplicada.

3.3.5. Integración de los Métodos de Investigación

La combinación de los métodos analítico, deductivo, de modelación matemática y comparativo permite abordar el problema de investigación de manera integral. El método analítico facilita la comprensión de los componentes del sistema, el método deductivo permite aplicar teorías generales al caso de estudio, la modelación matemática posibilita la formulación y resolución del modelo de optimización, y el método comparativo permite evaluar los resultados obtenidos.

Esta integración metodológica garantiza la coherencia científica del estudio y fortalece la validez de los resultados, asegurando que las conclusiones alcanzadas se encuentren debidamente sustentadas tanto en fundamentos teóricos como en evidencias cuantitativas.

3.4. Diseño de la Investigación

El diseño de investigación constituye la estrategia general que orienta la forma en que se recolectan, analizan e interpretan los datos para responder al problema de investigación y alcanzar los objetivos planteados. En función de la naturaleza del estudio, del enfoque cuantitativo adoptado y de la imposibilidad de manipular directamente las variables en un entorno real, la presente investigación se desarrolla bajo un diseño no experimental, de tipo transversal y causal–explicativo.

3.4.1. Diseño No Experimental

La presente investigación adopta un diseño no experimental, ya que las variables de estudio no son manipuladas deliberadamente, sino que se analizan tal como se presentan en la realidad operativa de la unidad minera. En este tipo de diseño, el

investigador observa los fenómenos y analiza sus relaciones sin intervenir directamente sobre ellos.

Hernández et al. (2010) señala que en la investigación no experimental no se realiza manipulación intencional de variables, sino que se estudian los fenómenos en su contexto natural. En la presente tesis, los datos de costos operativos, producción y rentabilidad son analizados mediante modelos matemáticos y simulaciones, sin alterar físicamente las condiciones reales de operación de la mina.

De igual manera, Kerlinger & Lee (2002) sostienen que el diseño no experimental es apropiado cuando la manipulación directa de las variables resulta inviable o poco ética, como ocurre en operaciones industriales y mineras, donde los cambios deben evaluarse previamente mediante modelos y análisis teóricos antes de su implementación real.

3.4.2. Diseño Transversal

El diseño de la investigación es transversal, debido a que el análisis de los datos se realiza en un momento determinado del tiempo, considerando un período específico de operación minera. Este diseño permite evaluar la situación actual de los costos operativos y la rentabilidad, así como simular el impacto de la optimización en dicho período.

Según Hernández-Sampieri (2010), los diseños transversales recolectan datos en un solo momento o en un tiempo único, con el propósito de describir variables y analizar su relación en un contexto determinado. En esta investigación, se analizan los costos operativos y el *cash cost* de la Unidad Minera El Brocal en un período definido, comparando el escenario actual con el escenario optimizado generado por el modelo matemático.

Arias (2012) indica que el diseño transversal es adecuado cuando se busca analizar fenómenos económicos y operativos en un contexto específico, permitiendo obtener conclusiones relevantes sin necesidad de realizar seguimientos prolongados en el tiempo.

3.4.3. Diseño Causal–Explicativo

El diseño de la investigación es además causal–explicativo, ya que se orienta a identificar y explicar la relación de causa–efecto entre la aplicación de modelos de optimización (variable independiente) y los cambios observados en los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad minera (variables dependientes).

Tamayo (2007) señala que los diseños explicativos buscan determinar las causas de los fenómenos y explicar por qué se producen determinados resultados. En este estudio, se explica cómo la optimización de recursos y procesos productivos genera una reducción de los costos operativos y un incremento de la rentabilidad en la minería subterránea.

Asimismo, Hernández-Sampieri et al. (2010) indican que los estudios explicativos permiten profund(zar en las relaciones entre variables, proporcionando un mayor nivel de comprensión del fenómeno investigado. En ese sentido, el diseño causal–explicativo permite demostrar que la aplicación de modelos de optimización es un factor determinante en la mejora del desempeño económico de la unidad minera.

3.4.4. Justificación del Diseño de Investigación

El diseño no experimental, transversal y causal–explicativo resulta el más adecuado para la presente tesis, debido a que permite analizar una operación minera real sin intervenir directamente en ella, utilizando modelos matemáticos y simulaciones para evaluar escenarios alternativos. Este diseño garantiza la viabilidad del estudio, la

validez de los resultados y la coherencia metodológica entre el problema, los objetivos, las variables y el modelo de optimización propuesto.

En consecuencia, el diseño de investigación adoptado permite alcanzar los objetivos planteados y responder de manera rigurosa al problema de investigación, aportando evidencia científica aplicada para la gestión de costos y la mejora de la rentabilidad en minería subterránea.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población se define como el conjunto total de elementos, unidades de análisis o casos que comparten características comunes y sobre los cuales el investigador desea realizar inferencias o generalizaciones. La población constituye el universo de estudio y delimita el alcance de los resultados de la investigación Hernández-Sampieri (2010).

Según Tamayo (2007), la población está conformada por todos los sujetos, objetos o registros que cumplen con los criterios establecidos por el investigador y que guardan relación directa con el problema de investigación. En estudios de tipo cuantitativo y aplicado, la población puede estar constituida por procesos, registros, documentos o unidades operativas, y no necesariamente por personas.

En la presente investigación, la población está conformada por todas las operaciones y registros operativos y económicos relacionados con los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad de la Unidad Minera El Brocal, correspondientes a sus operaciones de minería subterránea. Esto incluye información de producción, costos de perforación, voladura, carguío, acarreo, ventilación, mano de obra y demás procesos que inciden directamente en el desempeño económico de la unidad minera.

3.5.2. Muestra

La muestra es una parte representativa de la población, seleccionada con el propósito de obtener información relevante que permita realizar inferencias válidas sobre el total de la población. De acuerdo con Arias (2012), la muestra debe conservar las características esenciales de la población para garantizar la validez de los resultados.

Hernández-Sampieri (2010) señala que, en investigaciones no experimentales de tipo aplicado, la muestra puede ser seleccionada mediante criterios no probabilísticos cuando el acceso a la información es limitado o cuando se trabaja con estudios de caso, priorizando la pertinencia y disponibilidad de los datos.

En este estudio, la muestra está constituida por un conjunto específico de datos operativos y económicos correspondientes a un período determinado de operación de la Unidad Minera El Brocal, tales como:

- Registros de producción por frentes de minado.
- Costos operativos unitarios y totales.
- Información del *cash cost*.
- Indicadores de rentabilidad operativa.

La selección de la muestra es de tipo **no probabilística por criterio**, debido a que se eligen únicamente aquellos datos que son relevantes, confiables y directamente relacionados con la formulación y validación del modelo de optimización.

3.5.3. Justificación de la Población y Muestra

El uso de una población definida por los registros operativos y económicos de la unidad minera, y de una muestra seleccionada por criterio, resulta adecuado para los objetivos de la investigación, ya que permite analizar información real y pertinente sin necesidad de intervenir directamente en la operación minera. Este enfoque es consistente con el diseño no experimental y explicativo adoptado en la tesis.

Kerlinger & Lee (2002) indican que, en investigaciones aplicadas y de estudio de caso, la validez del análisis depende más de la calidad y relevancia de los datos que del tamaño de la muestra. En ese sentido, la muestra seleccionada permite evaluar de manera rigurosa el impacto de los modelos de optimización sobre los costos operativos y la rentabilidad minera.

3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos constituye una etapa fundamental del proceso de investigación, ya que permite obtener información confiable y pertinente para el análisis del problema planteado y la validación del modelo de optimización propuesto. En concordancia con el enfoque cuantitativo, el diseño no experimental y la naturaleza aplicada del estudio, la presente investigación emplea técnicas e instrumentos orientados al análisis documental y al registro de datos operativos y económicos de la unidad minera.

3.6.1. Técnicas de Recolección de Datos

Análisis Documental

El análisis documental es una técnica de recolección de datos que consiste en la revisión sistemática de documentos escritos, registros, informes y bases de datos, con el propósito de extraer información relevante para la investigación. Esta técnica permite acceder a datos históricos y actuales sin necesidad de interactuar directamente con los sujetos de estudio Arias (2012).

Según Hernández-Sampieri et al. (2010), el análisis documental es ampliamente utilizado en investigaciones no experimentales y aplicadas, especialmente cuando se trabaja con información secundaria proveniente de registros institucionales. En la presente tesis, esta técnica se emplea para recopilar información sobre costos operativos, producción, *cash cost* e indicadores de rentabilidad de la Unidad Minera El

Brocal, constituyendo la base para la formulación del modelo matemático de optimización.

Observación Indirecta

La observación indirecta consiste en la obtención de datos a partir de registros previamente elaborados, sin que el investigador participe directamente en la ejecución de las actividades observadas. Esta técnica permite analizar procesos y resultados operativos a través de reportes y documentos técnicos (Tamayo, 2007).

En esta investigación, la observación indirecta se aplica mediante el análisis de reportes operativos, estados de costos y registros de producción, lo que permite comprender el comportamiento de las variables operativas y económicas sin intervenir directamente en la operación minera.

Registro de Datos Operativos y Económicos

El registro de datos es una técnica que implica la recopilación ordenada y sistemática de información cuantitativa relevante para el estudio. De acuerdo con Kerlinger & Lee (2002), esta técnica es fundamental en investigaciones cuantitativas, ya que permite garantizar la precisión y confiabilidad de los datos utilizados en el análisis.

En la presente tesis, el registro de datos operativos y económicos se utiliza para consolidar información relacionada con los costos unitarios, volúmenes de producción, consumo de recursos y resultados económicos, los cuales son necesarios para la simulación de escenarios y la validación del modelo de optimización.

3.6.2. Instrumentos de Recolección de Datos

Fichas de Registro de Datos

Las fichas de registro de datos son instrumentos diseñados para recopilar información de manera estructurada y organizada, facilitando su posterior análisis.

Estas fichas permiten estandarizar la recolección de datos y reducir errores en el procesamiento de la información (Arias, 2012).

En esta investigación, las fichas de registro se emplean para recopilar datos relacionados con los costos operativos por proceso, el *cash cost*, los niveles de producción y los indicadores de rentabilidad, constituyendo una fuente primaria para el desarrollo del modelo matemático.

Matrices de Datos

Las matrices de datos son instrumentos que permiten organizar la información recolectada en forma tabular, facilitando la comparación entre variables y escenarios. Según Hernández-Sampieri et al (2010), este tipo de instrumento es esencial para el análisis cuantitativo y la aplicación de modelos matemáticos.

En la presente tesis, las matrices de datos se utilizan para estructurar la información operativa y económica antes y después de la aplicación del modelo de optimización, permitiendo comparar los resultados y evaluar el impacto de la optimización sobre los costos operativos y la rentabilidad minera.

Hojas de Cálculo y Software de Optimización

Las hojas de cálculo y el software de optimización constituyen instrumentos tecnológicos que facilitan el procesamiento, análisis y simulación de datos cuantitativos. Estos instrumentos permiten resolver modelos matemáticos, realizar simulaciones y obtener soluciones óptimas de manera eficiente (Hillier et al., 2021).

En esta investigación, se utilizan hojas de cálculo y herramientas de optimización para formular la función objetivo, las restricciones y resolver el modelo matemático orientado a la minimización del *cash cost*. Estos instrumentos permiten analizar distintos escenarios productivos y evaluar su impacto económico de forma precisa.

Coherencia entre Técnicas, Instrumentos y Objetivos

La selección de las técnicas e instrumentos de recolección de datos es coherente con el enfoque cuantitativo, el diseño no experimental y el nivel explicativo de la investigación. El análisis documental y el registro de datos proporcionan información confiable y pertinente, mientras que las fichas de registro, matrices de datos y herramientas de optimización permiten estructurar y analizar la información de manera rigurosa.

Esta coherencia metodológica garantiza la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos, permitiendo evaluar de manera objetiva el impacto de la aplicación de modelos de optimización en la reducción de costos operativos y el incremento de la rentabilidad en la minería subterránea.

3.7. Selección, Validación y Confiabilidad de los Inst. de Investigación

3.7.1. Selección de los Instrumentos de Investigación

La selección de los instrumentos de investigación es el proceso mediante el cual el investigador elige las herramientas más adecuadas para recolectar datos pertinentes, válidos y confiables, en función de los objetivos del estudio, el enfoque metodológico y el tipo de variables analizadas. Una adecuada selección garantiza que la información recolectada sea coherente con el problema de investigación y permita obtener resultados precisos (Hernández-Sampieri et al., 2010).

En la presente investigación, los instrumentos seleccionados responden a un enfoque cuantitativo, a un diseño no experimental y al uso de modelos matemáticos de optimización. Por ello, se emplean instrumentos como fichas de registro de datos, matrices de datos y hojas de cálculo, los cuales permiten recopilar información objetiva sobre costos operativos, *cash cost*, producción y rentabilidad minera. Estos

instrumentos resultan adecuados para el análisis económico y la simulación de escenarios optimizados sin intervenir directamente en la operación minera.

3.7.2. Validación de los Instrumentos de Investigación

La validación de los instrumentos es el proceso mediante el cual se evalúa si un instrumento mide efectivamente lo que pretende medir. La validez asegura que los datos obtenidos representen de manera fiel las variables de estudio y que las conclusiones derivadas sean científicamente sustentables (Arias, 2012).

De acuerdo con Hernández-Sampieri et al. (2010), la validez puede evaluarse desde diferentes enfoques, siendo uno de los más utilizados en investigaciones aplicadas la validez de contenido, la cual se basa en el juicio de expertos. En esta tesis, la validación de los instrumentos se realiza mediante la revisión técnica de los formatos de registro y matrices de datos por profesionales con experiencia en gestión minera, costos operativos y optimización, quienes verifican la pertinencia, claridad y coherencia de los indicadores incluidos.

Asimismo, Tamayo (2007) señalan que la validación por juicio de expertos es adecuada cuando los instrumentos se basan en documentos, registros y modelos técnicos, como ocurre en investigaciones de tipo aplicado y explicativo. Este procedimiento permite asegurar que los instrumentos seleccionados se encuentren alineados con los objetivos de la investigación y con las variables definidas.

3.7.3. Confiabilidad de los Instrumentos de Investigación

La confiabilidad se refiere al grado en que un instrumento produce resultados consistentes y estables cuando se aplica en condiciones similares. Un instrumento confiable genera datos precisos y reproducibles, lo cual es esencial para garantizar la credibilidad de los resultados de la investigación (Kerlinger & Lee, 2002).

Según Hernández-Sampieri et al. (2010), la confiabilidad en investigaciones cuantitativas puede evaluarse a través de la consistencia interna o mediante la estabilidad de los resultados. En la presente tesis, la confiabilidad de los instrumentos se sustenta en la estandarización de los formatos de registro, el uso de fuentes oficiales de información operativa y económica y la aplicación de criterios uniformes para el procesamiento de los datos.

Además, Arias (2012) señala que, en investigaciones basadas en análisis documental y registros técnicos, la confiabilidad se fortalece cuando los datos provienen de fuentes institucionales confiables y cuando los instrumentos de recolección mantienen una estructura uniforme. En este estudio, la utilización de registros oficiales de la unidad minera y de hojas de cálculo estructuradas contribuye a asegurar la consistencia y confiabilidad de la información empleada en el modelo de optimización.

3.7.4. Importancia de la Validación y Confiabilidad en la Investigación

La adecuada selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación constituye un aspecto clave para garantizar la calidad metodológica del estudio. Estos procesos permiten reducir errores en la recolección de datos, asegurar la coherencia entre las variables e indicadores y fortalecer la validez de los resultados obtenidos.

En la presente tesis, la aplicación rigurosa de estos criterios metodológicos asegura que los datos utilizados para la formulación del modelo de optimización y el análisis de la rentabilidad y los costos operativos sean confiables y pertinentes, contribuyendo a conclusiones sólidas y sustentadas científicamente para la gestión minera.

3.8. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento y análisis de datos comprende el conjunto de procedimientos sistemáticos mediante los cuales la información recolectada es organizada, depurada, transformada y analizada con el propósito de obtener resultados válidos que permitan responder al problema de investigación y contrastar los objetivos planteados. En investigaciones de enfoque cuantitativo, estas técnicas resultan fundamentales para garantizar la objetividad, precisión y confiabilidad de los resultados (Hernández-Sampieri et al., 2010).

En la presente tesis, las técnicas de procesamiento y análisis de datos se orientan al tratamiento de información operativa y económica, así como a la aplicación de modelos matemáticos de optimización, con el fin de evaluar el impacto de la optimización sobre los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad minera.

3.8.1. Técnicas de Procesamiento de Datos

Organización y Depuración de Datos

La organización y depuración de datos consiste en ordenar la información recolectada, identificar valores inconsistentes, duplicados o incompletos, y asegurar la coherencia de los registros antes de su análisis. Este proceso permite mejorar la calidad de los datos y reducir errores en las etapas posteriores del análisis (Arias, 2012).

En la presente investigación, esta técnica se aplica a los registros de producción, costos operativos y *cash cost*, verificando su consistencia temporal y su correspondencia con las operaciones unitarias de la minería subterránea. La depuración de datos garantiza que la información utilizada en el modelo de optimización sea confiable y representativa de la realidad operativa.

Codificación y Tabulación de Datos

La **codificación y tabulación** es una técnica que consiste en transformar los datos recolectados en formatos estructurados, generalmente tablas o matrices, que faciliten su análisis cuantitativo. Según Hernández-Sampieri et al. (2010), la tabulación permite visualizar las relaciones entre variables y preparar la información para su procesamiento matemático o estadístico.

En esta tesis, los datos operativos y económicos son codificados y organizados en matrices de datos y hojas de cálculo, clasificándolos por tipo de operación, frente de minado y período de análisis. Esta técnica permite estructurar la información necesaria para la formulación de la función objetivo y las restricciones del modelo de optimización.

3.8.2. Técnicas de Análisis de Datos

Análisis Descriptivo

El análisis descriptivo tiene como finalidad resumir y describir las características principales de un conjunto de datos, mediante el uso de medidas como totales, promedios, porcentajes y relaciones simples. Esta técnica permite comprender el comportamiento de las variables y establecer una línea base para la comparación de resultados (Tamayo, 2007).

En la presente investigación, el análisis descriptivo se emplea para caracterizar los costos operativos, el *cash cost* y los indicadores de rentabilidad de la Unidad Minera El Brocal en el escenario actual. Estos resultados constituyen el punto de partida para evaluar el impacto de la aplicación de los modelos de optimización.

Análisis Comparativo de Escenarios

El análisis comparativo consiste en contrastar dos o más escenarios con el propósito de identificar diferencias y evaluar el efecto de una intervención o cambio

específico. De acuerdo con Arias (2012), esta técnica es especialmente útil en investigaciones aplicadas, ya que permite demostrar el impacto de una propuesta o modelo sobre la realidad estudiada.

En esta tesis, el análisis comparativo se utiliza para contrastar el escenario operativo actual con el escenario optimizado obtenido a partir del modelo matemático. A través de esta comparación, se evalúan las variaciones en los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad minera, permitiendo cuantificar los beneficios de la optimización aplicada.

Análisis Mediante Modelación Matemática

La modelación matemática es una técnica de análisis que permite representar un sistema real mediante expresiones matemáticas, facilitando la evaluación de múltiples alternativas y la identificación de soluciones óptimas. Este enfoque es ampliamente utilizado en investigaciones cuantitativas y en la investigación operativa (Hillier et al., 2021).

En la presente investigación, la modelación matemática se emplea para formular y resolver un modelo de optimización basado en programación lineal entera mixta. Esta técnica permite analizar la relación entre las variables de decisión, las restricciones operativas y la función objetivo orientada a minimizar el *cash cost*, proporcionando resultados cuantitativos que sustentan las conclusiones del estudio.

Integración de las Técnicas de Procesamiento y Análisis

La integración de las técnicas de procesamiento y análisis de datos garantiza un tratamiento riguroso y coherente de la información recolectada. La organización y depuración de datos aseguran la calidad de la información, mientras que el análisis descriptivo, comparativo y matemático permiten interpretar los resultados de manera objetiva y fundamentada.

Esta combinación metodológica fortalece la validez de los resultados obtenidos y permite demostrar de forma clara el impacto de la aplicación de modelos de optimización en la reducción de costos operativos y el incremento de la rentabilidad en la minería subterránea.

3.9. Tratamiento Estadístico

El tratamiento estadístico comprende el conjunto de técnicas y procedimientos estadísticos utilizados para analizar, interpretar y presentar los datos recolectados en una investigación, con el propósito de obtener conclusiones válidas y confiables. En investigaciones de enfoque cuantitativo, el tratamiento estadístico permite transformar los datos en información significativa que facilita la comprensión de los fenómenos estudiados y la toma de decisiones fundamentadas (Hernández-Sampieri et al., 2010).

En la presente tesis, el tratamiento estadístico se orienta al análisis de datos operativos y económicos de la minería subterránea, con el fin de evaluar el impacto de la aplicación de modelos de optimización sobre los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad minera. Dicho tratamiento permite comparar escenarios, cuantificar mejoras y sustentar los resultados obtenidos a partir del modelo matemático desarrollado.

3.9.1. Estadística Descriptiva

La estadística descriptiva es una rama de la estadística que se encarga de organizar, resumir y presentar los datos mediante tablas, gráficos y medidas numéricas, tales como promedios, totales, porcentajes y razones. Su finalidad es describir las características principales de un conjunto de datos sin realizar inferencias más allá de la información observada (Arias, 2012).

En esta investigación, la estadística descriptiva se utiliza para analizar los costos operativos, el *cash cost* y los indicadores de rentabilidad en el escenario actual de la

Unidad Minera El Brocal. Mediante esta técnica se obtienen valores promedio, costos unitarios y distribuciones porcentuales que permiten establecer una línea base para la comparación con el escenario optimizado.

3.9.2. Estadística Comparativa

La estadística comparativa consiste en el análisis de dos o más conjuntos de datos con el objetivo de identificar diferencias, variaciones y tendencias entre ellos. Esta técnica resulta especialmente útil en investigaciones aplicadas, donde se busca evaluar el efecto de una intervención o propuesta sobre determinadas variables (Tamayo, 2007).

En la presente tesis, la estadística comparativa se aplica para contrastar los resultados obtenidos en el escenario sin optimización y el escenario optimizado. A través de la comparación de indicadores como costos operativos, *cash cost* y rentabilidad, se cuantifica el impacto económico de la aplicación del modelo de optimización, evidenciando las mejoras alcanzadas.

3.9.3. Análisis Porcentual y de Variación

El análisis porcentual y de variación es una técnica estadística que permite medir el cambio relativo de una variable entre dos períodos o escenarios. Según Hernández-Sampieri et al. (2010), este tipo de análisis facilita la interpretación de los resultados al expresar los cambios en términos relativos, lo que resulta más comprensible para la evaluación del impacto de una intervención.

En esta investigación, el análisis porcentual se emplea para determinar el porcentaje de reducción de los costos operativos y del *cash cost*, así como el incremento porcentual de la rentabilidad minera después de la aplicación del modelo de optimización. Estos resultados permiten demostrar de manera clara y objetiva la efectividad del modelo propuesto.

3.9.4. Representación Estadística de los Resultados

La representación estadística consiste en la presentación gráfica y tabular de los resultados obtenidos a partir del análisis de datos. De acuerdo con Kerlinger & Lee (2002), el uso de tablas y gráficos facilita la interpretación de la información y mejora la comunicación de los resultados de la investigación.

En la presente tesis, los resultados del tratamiento estadístico se presentan mediante tablas comparativas, gráficos de barras y diagramas que muestran la evolución de los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad antes y después de la optimización. Esta representación permite visualizar de manera clara el impacto de la optimización aplicada.

3.9.5. Importancia del Tratamiento Estadístico en la Investigación

El tratamiento estadístico desempeña un papel fundamental en la validación de los resultados de la investigación, ya que permite analizar los datos de forma objetiva y sistemática. La aplicación adecuada de técnicas estadísticas contribuye a reducir sesgos, mejorar la precisión de los resultados y fortalecer la credibilidad de las conclusiones alcanzadas.

En esta tesis, el tratamiento estadístico respalda cuantitativamente la afirmación de que la aplicación de modelos de optimización permite reducir los costos operativos y mejorar la rentabilidad en la minería subterránea, aportando evidencia empírica sólida para la toma de decisiones en la gestión minera.

3.10. Orientación Ética Filosófica y Epistémica

3.10.1. Orientación Ética de la Investigación

La orientación ética de una investigación se refiere al conjunto de principios y valores que guían la conducta del investigador durante todo el proceso científico, garantizando el respeto a la verdad, la integridad académica y el uso responsable de la

información. La ética en la investigación busca asegurar que los resultados obtenidos sean honestos, verificables y utilizados con fines legítimos, evitando la manipulación de datos o el plagio (Hernández-Sampieri et al., 2010).

En la presente tesis, la orientación ética se fundamenta en el uso responsable de la información técnica y económica de la operación minera, respetando la confidencialidad de los datos y evitando su distorsión. Asimismo, se garantiza que los modelos de optimización propuestos se desarrollen con rigor técnico y transparencia metodológica, de modo que los resultados contribuyan a la mejora de la gestión minera sin generar interpretaciones engañosas o sesgadas.

3.10.2. Orientación Filosófica de la Investigación

La orientación filosófica establece la postura desde la cual el investigador concibe la realidad y el conocimiento científico. En investigaciones de ingeniería y gestión, esta orientación suele vincularse con el positivismo, corriente filosófica que sostiene que el conocimiento válido es aquel que se obtiene a partir de la observación, la medición y el análisis objetivo de los fenómenos (Tamayo y Tamayo, 2012).

Bajo esta orientación, la presente investigación asume que los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad minera son fenómenos objetivos y medibles, susceptibles de ser analizados mediante modelos matemáticos. El enfoque positivista permite explicar la realidad operativa de la minería subterránea a través de datos cuantitativos, facilitando la formulación de soluciones racionales orientadas a la optimización de recursos y a la mejora del desempeño económico.

3.10.3. Orientación Epistemológica de la Investigación

La orientación epistemológica se refiere a la forma en que se construye y valida el conocimiento científico, así como a la relación entre el sujeto investigador y el objeto de estudio. Desde esta perspectiva, la investigación se sustenta en un enfoque

empirista–analítico, el cual privilegia la experiencia, la evidencia empírica y el razonamiento lógico como fuentes de conocimiento (Arias, 2012).

En esta tesis, el conocimiento se genera a partir del análisis de datos reales de la operación minera y de la aplicación de modelos de optimización matemática. La validez del conocimiento obtenido se sustenta en la coherencia lógica del modelo, la consistencia de los datos y la reproducibilidad de los resultados. Este enfoque epistemológico permite explicar de manera objetiva cómo la optimización incide en la reducción de costos operativos y en el incremento de la rentabilidad minera.

3.10.4. Integración Ética, Filosófica y Epistémica del Estudio

La integración de la orientación ética, filosófica y epistémica fortalece el rigor científico de la investigación, asegurando que el proceso investigativo se desarrolle con responsabilidad, coherencia teórica y validez metodológica. La ética garantiza la integridad del estudio, la orientación filosófica define la concepción de la realidad analizada y la epistemología sustenta la forma en que se construye el conocimiento.

En la presente tesis, esta integración permite desarrollar un estudio aplicado que no solo aporta soluciones técnicas a la gestión minera, sino que también respeta los principios científicos y éticos de la investigación académica. De este modo, los resultados obtenidos contribuyen de manera responsable al conocimiento y a la mejora de la práctica profesional en el ámbito de la minería subterránea.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo tiene como finalidad presentar, analizar e interpretar los hallazgos obtenidos a partir de la aplicación de los métodos y técnicas descritos en el capítulo de metodología. En esta sección, los resultados se exponen de manera objetiva y sistemática, mientras que la discusión permite contrastarlos con los objetivos de la investigación, el marco teórico y los estudios previos (Hernández-Sampieri et al., 2010).

De acuerdo con Tamayo (2007), los resultados deben mostrar de forma clara los efectos del tratamiento aplicado, mientras que la discusión debe explicar el significado de dichos resultados, estableciendo relaciones causales y teóricas. En este estudio, los resultados se derivan de la aplicación de modelos de optimización matemática orientados a la minimización del *cash cost*, y la discusión analiza su impacto sobre los costos operativos y la rentabilidad minera.

4.1. Descripción del trabajo de campo

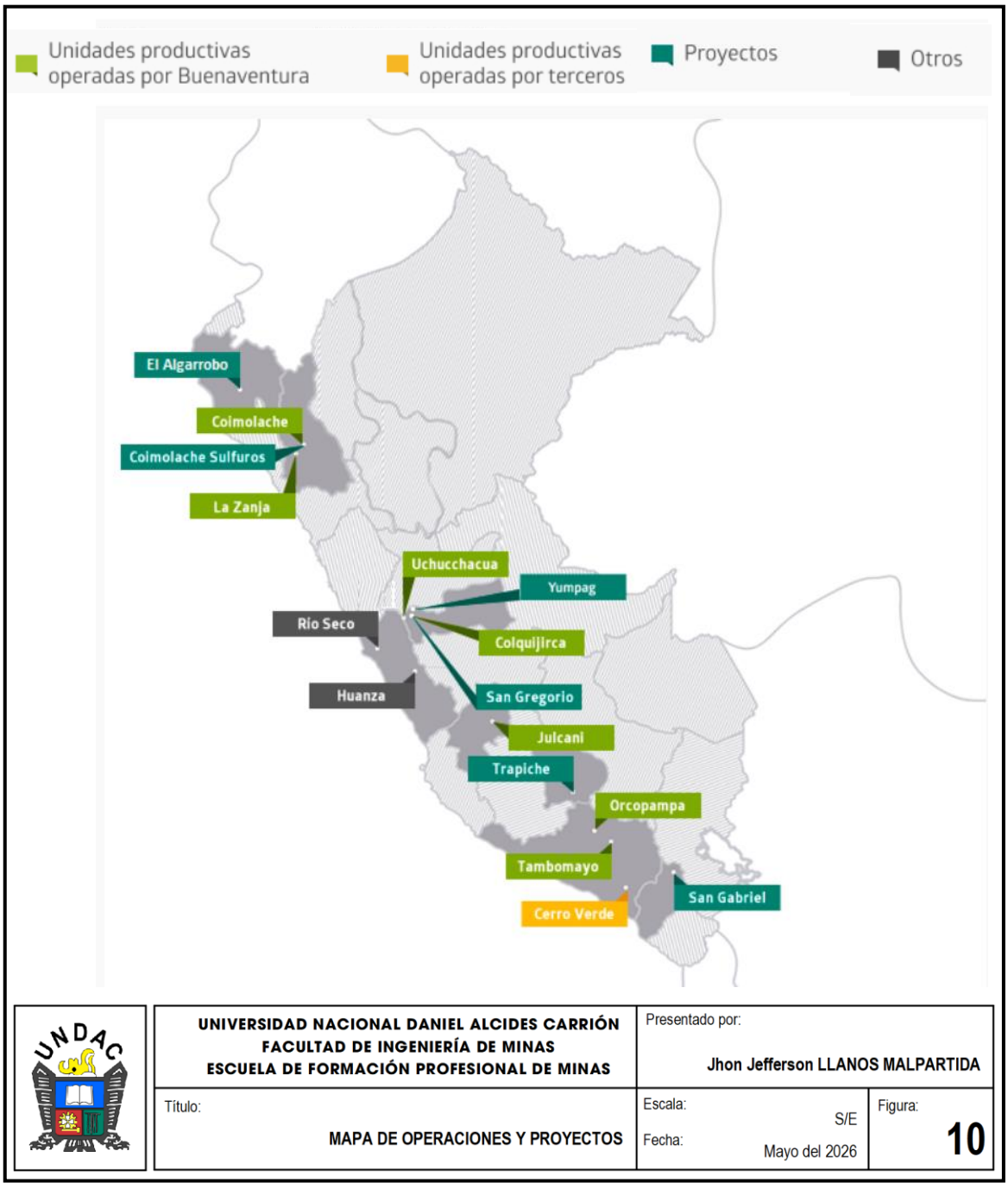
4.1.1. Evaluación Estratégica de la Unidad Minera El Brocal

La unidad minera El Brocal, una subsidiaria clave de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. que posee el 61.43% de sus acciones, representa uno de los pilares

fundamentales en la producción polimetálica y cuprífera en la región central del Perú. Durante el ejercicio fiscal 2024, la unidad minera ha consolidado un proceso de transformación operativa sin precedentes, migrando su núcleo de valor desde la explotación histórica a tajo abierto hacia una operación subterránea masiva y altamente tecnificada en la mina Marcapunta.

Esta transición estratégica no es solo una respuesta a la profundización de los cuerpos mineralizados, sino una optimización financiera diseñada para capitalizar el ciclo favorable de precios del cobre, que en 2024 alcanzó promedios cercanos a los US$ 8,706 por tonelada métrica en el London Metal Exchange (Benavides, 2024).

Figura 10. *Mapa de Operaciones y Proyectos*



Nota. El mapa de la Figura 10 ha sido tomado de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

La gestión corporativa de Buenaventura ha implementado en El Brocal una visión de largo plazo que busca transformar activos maduros en operaciones de clase mundial con una vida de mina proyectada superior a los diez años. En este contexto, el

año 2024 marcó el cumplimiento de hitos críticos, como la superación de las 12,000 toneladas métricas diarias (TMD) en la extracción subterránea, un logro que posiciona a Marcapunta entre las minas subterráneas de mayor envergadura en el territorio peruano. Este incremento en la escala operativa es el motor principal detrás de la dilución de los costos fijos y la mejora sustancial en los márgenes de EBITDA, los cuales registraron un crecimiento del 2% anual, alcanzando los US$ 151.9 millones (Benavides, 2024).

La complejidad de operar a altitudes superiores a los 4,300 metros sobre el nivel del mar impone desafíos técnicos que la compañía ha abordado mediante la automatización y la inversión en infraestructura crítica. La integración de sistemas de monitoreo inalámbrico en las plantas de tratamiento y la automatización de los controles de mantenimiento preventivo para la flota móvil han permitido que la unidad alcance disponibilidades mecánicas superiores al 95%, asegurando la continuidad operativa en un entorno geográfico y climático extremo (Canchaya et al., 2014).

Figura 11. *Génesis de la Calcosita de Marcapunta Oeste*

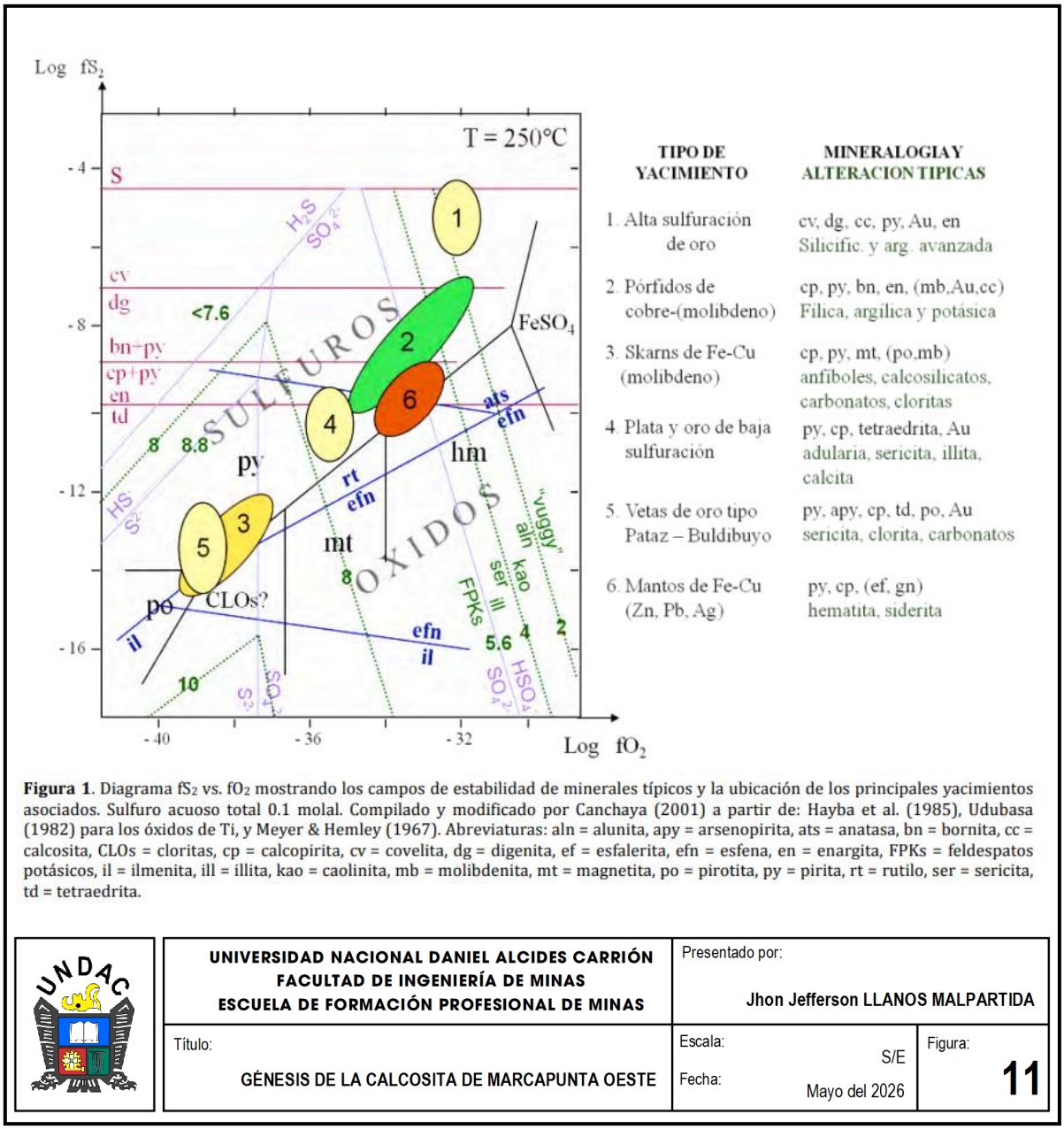


Figura 1. Diagrama fS_2 vs. fO_2 mostrando los campos de estabilidad de minerales típicos y la ubicación de los principales yacimientos asociados. Sulfuro acuoso total 0.1 molal. Compilado y modificado por Canchaya (2001) a partir de: Hayba et al. (1985), Udubasa (1982) para los óxidos de Ti, y Meyer & Hemley (1967). Abreviaturas: aln = alunita, apy = arsenopirita, ats = anatasa, bn = bornita, cc = calcosita, CLOs = cloritas, cp = calcopirita, cv = covelita, dg = digenita, ef = esfalerita, efn = esfena, en = enargita, FPKs = feldespatos potásicos, il = ilmenita, ill = illita, kao = caolinita, mb = molibdenita, mt = magnetita, po = pirotita, py = pirita, rt = rutilo, ser = sericita, td = tetraedrita.

UNDAC	UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE MINAS	Presentado por: Jhon Jefferson LLANOS MALPARTIDA	
	Título: GÉNESIS DE LA CALCOSITA DE MARCAPUNTA OESTE	Escala: S/E Fecha: Mayo del 2026	Figura: 11

Nota. El mapa de la Figura 11 ha sido tomado de (Canchaya et al., 2014, p. 107)

4.1.2. Geología, Mineralización y Reservas del Distrito de Colquijirca

El distrito minero de Colquijirca es reconocido geológicamente como un sistema epitermal de alta sulfuración de dimensiones extraordinarias, donde la mineralización se encuentra genéticamente vinculada a un complejo de domos dacíticos y una diatrema central que atraviesa las secuencias carbonatadas de la Formación

Calera. La mina Marcapunta, objeto central de este análisis, explota principalmente cuerpos mineralizados de cobre con contenidos variables de oro y plata, cuya génesis hipógena ha sido objeto de estudios detallados para optimizar los procesos de recuperación metalúrgica (Sarmiento, 2004).

Zonificación y Características de la Mena

La mineralización en Marcapunta presenta una zonificación característica donde la zona central o núcleo está dominada por enargita ($Cu_3A_sS_4$), un sulfosal de cobre y arsénico que requiere una gestión cuidadosa durante el procesamiento debido a la naturaleza refractaria del arsénico. Rodeando este núcleo, se encuentran zonas ricas en calcopirita y tennantita, que transicionan hacia bordes polimetálicos con presencia de esfalerita y galena. Durante 2024, la exploración se ha enfocado en identificar sectores con enriquecimiento supergénico, donde la presencia de calcosina permite obtener concentrados de cobre de mayor pureza y menor contenido de impurezas (Mondragon & Samaniego, 2022).

La importancia de comprender la mineralogía radica en su impacto directo sobre el costo de tratamiento. La enargita, al contener arsénico, impone una carga adicional en los procesos de flotación selectiva para cumplir con los estándares de calidad comercial de los concentrados. Sin embargo, la presencia de oro subordinado y plata en la estructura cristalina de estos sulfuros actúa como un crédito económico vital, permitiendo que el costo aplicable a las ventas (AISC) se mantenga competitivo a nivel global (Mondragon & Samaniego, 2022).

Estimación de Reservas y Recursos al Cierre de 2024

Al 31 de diciembre de 2024, la Sociedad Minera El Brocal reportó reservas probadas y probables de 74.7 millones de toneladas métricas para la zona de Marcapunta, con leyes promedio de 1.22% de cobre, 0.63 oz/t de plata y 0.02 oz/t de

oro. Estas reservas aseguran la continuidad de la operación por más de una década al ritmo actual de procesamiento. Por otro lado, los remanentes del Tajo Norte mantienen 1.8 millones de toneladas de mineral de plomo-zinc con leyes de 4.06% de zinc y 1.96% de plomo, configurando una reserva estratégica para periodos de altos precios de metales base (Benavides, 2024).

Tabla 24. *Reservas y Recursos*

Depósito / Mineral	Tonelaje (MT)	Ley de Cu (%)	Ley de Zn (%)	Ley de Pb (%)	Ley de Ag (oz/t)	Ley de Au (oz/t)
Marcapunta (Cu)	74.7	1.22	-	-	0.63	0.02
Tajo Norte (Pb-Zn)	1.8	-	4.06	1.96	4.04	-
Tajo Norte (Cu)	4.9	2.13	-	-	1.86	-

Las cifras de reservas demuestran una robustez geológica que justifica las inversiones en infraestructura subterránea, como el túnel gemelo y la expansión de los sistemas de ventilación ejecutados durante el año en curso (Benavides, 2024).

4.1.3. Método de Explotación Subterránea en Marcapunta

El método de explotación seleccionado para Marcapunta es el minado masivo por tajeo por subniveles con pilares corridos (Sublevel Stoping) y posterior recuperación de pilares mediante el uso de relleno cementado. Esta elección técnica responde a la geometría de los cuerpos mineralizados, que se presentan en mantos de potencia considerable y una inclinación que favorece la mecanización pesada. El diseño de minado ha evolucionado desde el método de cámaras y pilares cuadrados hacia una configuración de tajeos largos (longholes) que maximiza la recuperación de mineral y reduce el costo unitario por tonelada extraída (Benavides, 2024).

Ciclo de Operación y Desarrollo

La preparación de los bloques de minado implica la excavación de galerías de perforación y galerías de extracción (corte base), conectadas mediante rampas

helicoidales con pendientes controladas para el tránsito de equipos de bajo perfil. La perforación de producción se realiza mediante taladros largos en abanico, utilizando equipos electro-hidráulicos de alta precisión que minimizan la desviación de los taladros y, por ende, la dilución operativa (Mondragon & Samaniego, 2022).

Un factor diferenciador en la operación de 2024 ha sido la optimización del proceso de relleno. La planta de relleno hidráulico (RH) y la planta de relleno hidráulico cementado (RHC) han sido integradas plenamente en el ciclo de minado, permitiendo el relleno de tajeos primarios en tiempos récord para habilitar la extracción de los pilares secundarios. En 2024, se alcanzó un volumen total de 325,337 m^3 de relleno hidráulico, lo que representa un pilar de la gestión geomecánica de la mina (Salazar & Córdova, 2020).

Exploraciones, Desarrollos y Preparaciones

Las actividades realizadas en el diseño y proceso minero en la mina subterránea Marcapunta Norte se detallan a continuación.

A. Exploraciones

Se construyen cruceros y ventanas con una sección de 4.5 x 4.5, cuyo objetivo principal es generar cámaras para perforación diamantina. La sección típica es la misma que la de los accesos principales, ya que posteriormente se utilizan para iniciar los trabajos de desarrollo.

B. Desarrollos

El desarrollo minero se realiza de acuerdo con un objetivo específico, por lo que se tiene:

- **Rampa negativo-positiva (sección 4.5 x 4.5).** Rampa de acceso hacia la galería inferior que servirá para la movilización de personal y equipos, así como para la extracción del mineral roto.

- **Cámaras de bombeo (sección 4.0 x 4.0).** Cámara con una pendiente negativa de 15%, ubicada en la galería inferior, que servirá para captar el agua generada por la perforación y la filtración.
- **Cámaras de acumulación y carguío (sección 4.0 x 4.5).** Cámaras ubicadas en la galería inferior, que servirán para la acumulación y carguío del mineral roto.
- **Refugios (sección 2.0 x 2.5).** Cámaras ubicadas en las rampas y galerías, que sirven como refugio peatonal y para alojar un panel eléctrico, el cual debe estar debidamente señalizado.
- **Chimenea de ventilación y servicios (sección 3.0 Ø).** La chimenea se ubica de acuerdo con el diseño de cada bloque, teniendo como objetivo garantizar el ingreso de aire limpio, la salida de aire viciado y el ingreso de servicios (agua, aire, energía).
- **RB (sección 4.0 Ø).** Son labores que comunican con la superficie y están ubicadas en los extremos de cada zona o sector; sus longitudes varían entre 200 m y 350 m, pudiendo ser mayores a medida que la mina profundiza.

C. Preparaciones

- **Galerías principales superiores (Sección 4.0 x 4.5).** Su objetivo es preparar el bloque mineralizado desde la parte superior; desde estas se ejecutarán los subniveles superiores, dejando pilares continuos. Durante todo el proceso minero servirán como acceso para personal, equipos y servicios.
- **Galerías principales inferiores (Sección 4.0 x 4.5).** Su objetivo es preparar el bloque mineralizado desde la parte inferior. Desde estas se ejecutarán los subniveles inferiores, dejando pilares continuos. Servirán como acceso para

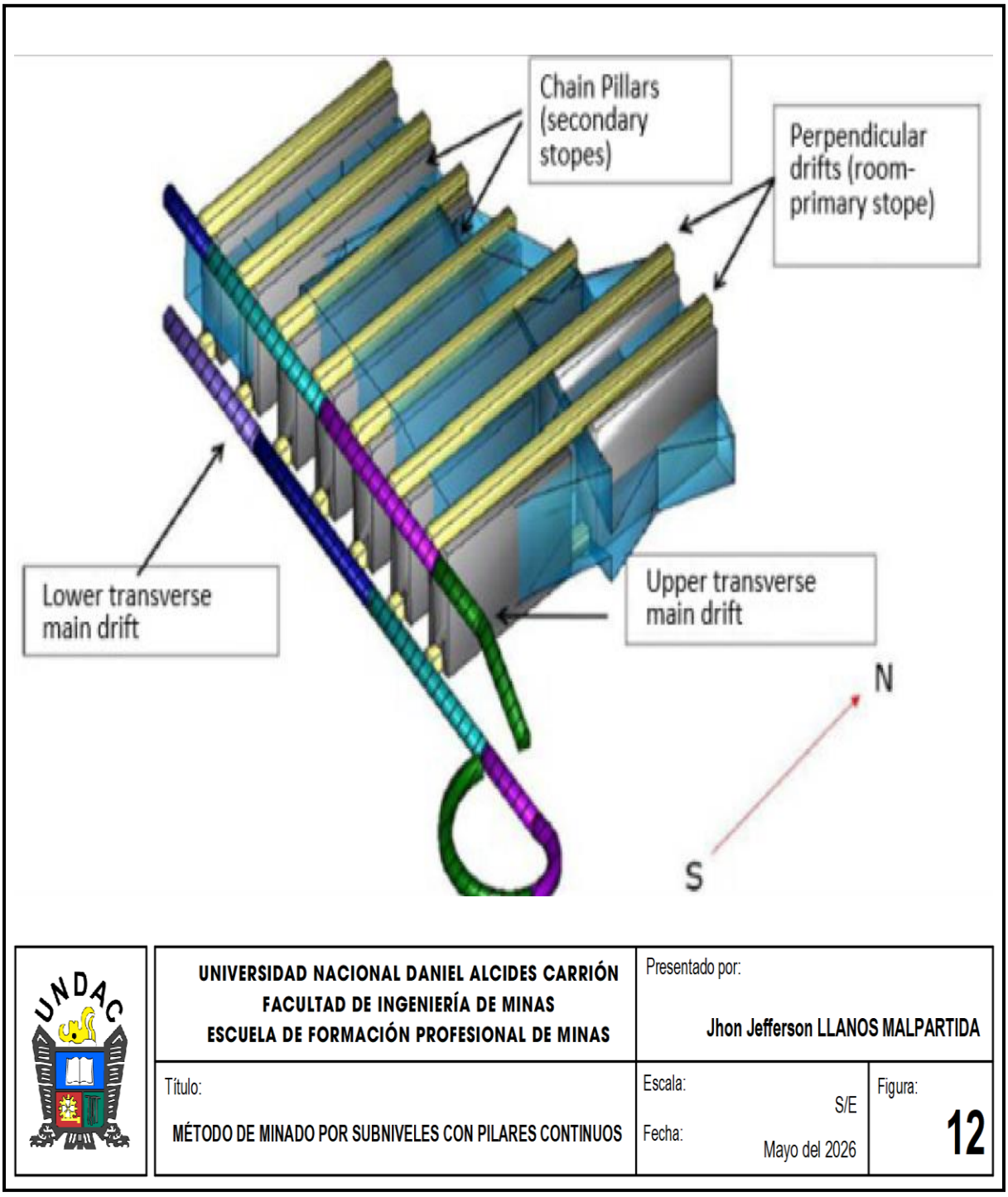
personal, servicios y equipos. Aquí se realizará la limpieza y el carguío del mineral.

- **Galería secundaria superior e inferior (Sección 3.9 x 3.7).** Su objetivo es realizar la perforación y voladura; la limpieza del mineral se efectuará en la parte inferior.
- **Refugios (sección 2.0 x 2.5).** Cámaras ubicadas en las galerías secundarias, espaciadas cada 15 metros.
- **Slot (sección 4.0 x 4.0).** Labor generalmente ubicada al final de las galerías secundarias; desde esta se construye la chimenea VCR y se realiza la apertura de la zanja del slot.
- **Chimenea VCR (sección 2.1 x 2.1).** La VCR o Slot se ubicará al final del tajo donde iniciará la explotación. Una vez concluida la chimenea VCR, la zanja del slot se ampliará para continuar con las líneas de producción.

Esquema general de construcción de la mina subterránea

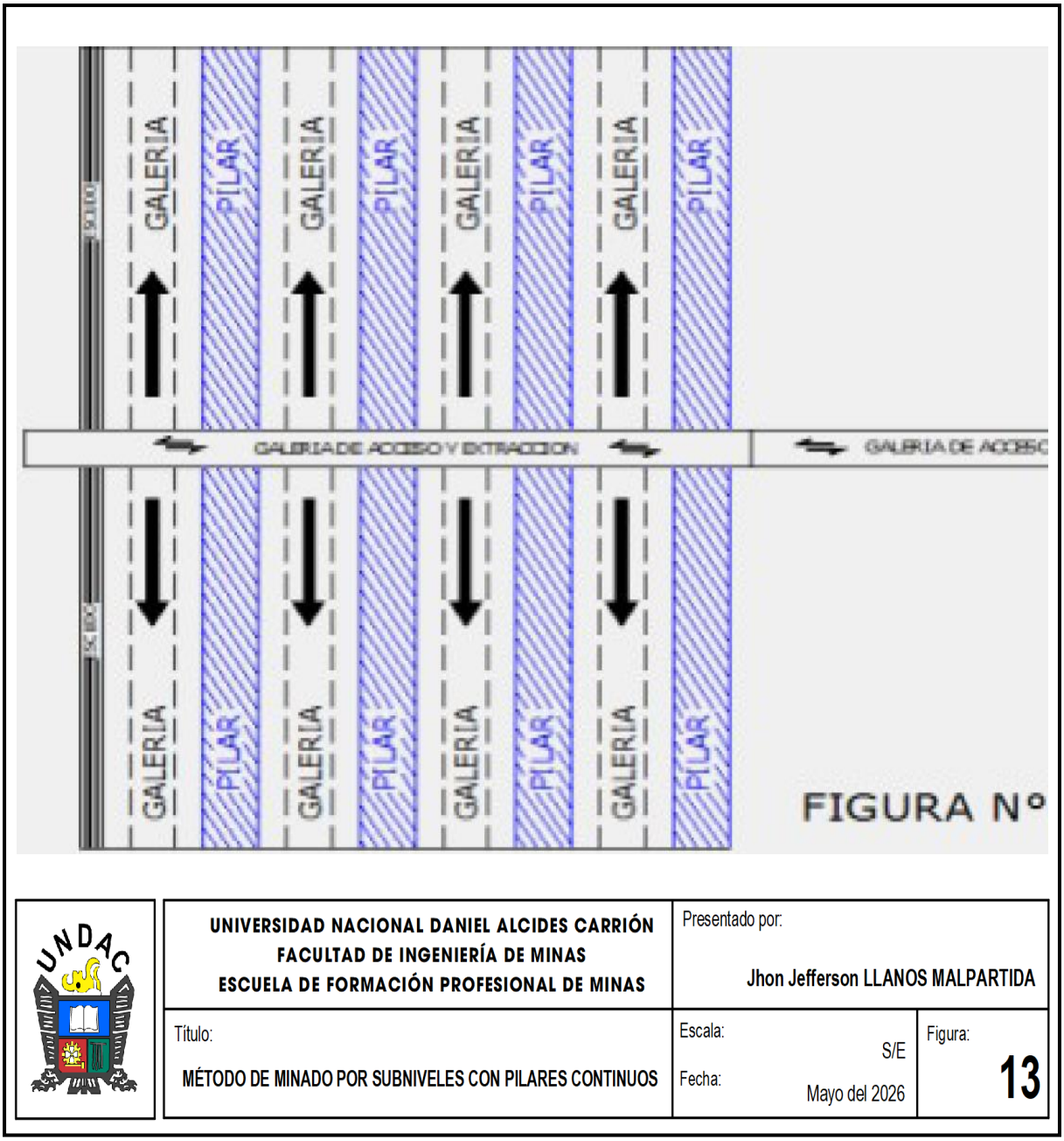
Los siguientes gráficos muestran el esquema general de distribución de la mina subterránea, para la explotación de los tajos primarios y secundarios.

Figura 12. *Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos*



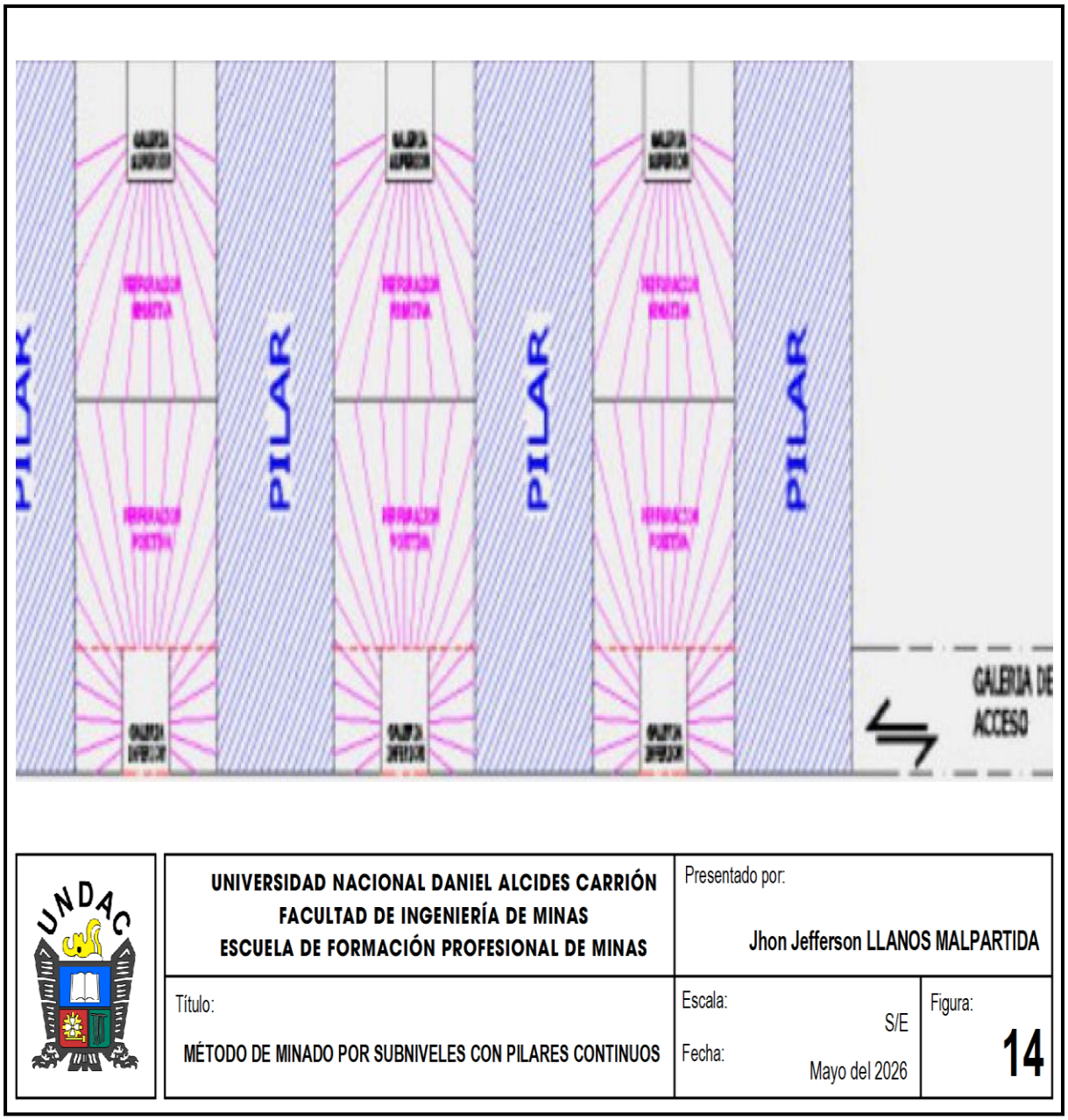
Nota. La Figura 12 ha sido obtenido de (Mondragon & Samaniego, 2022, p. 196).

Figura 13. *Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos*



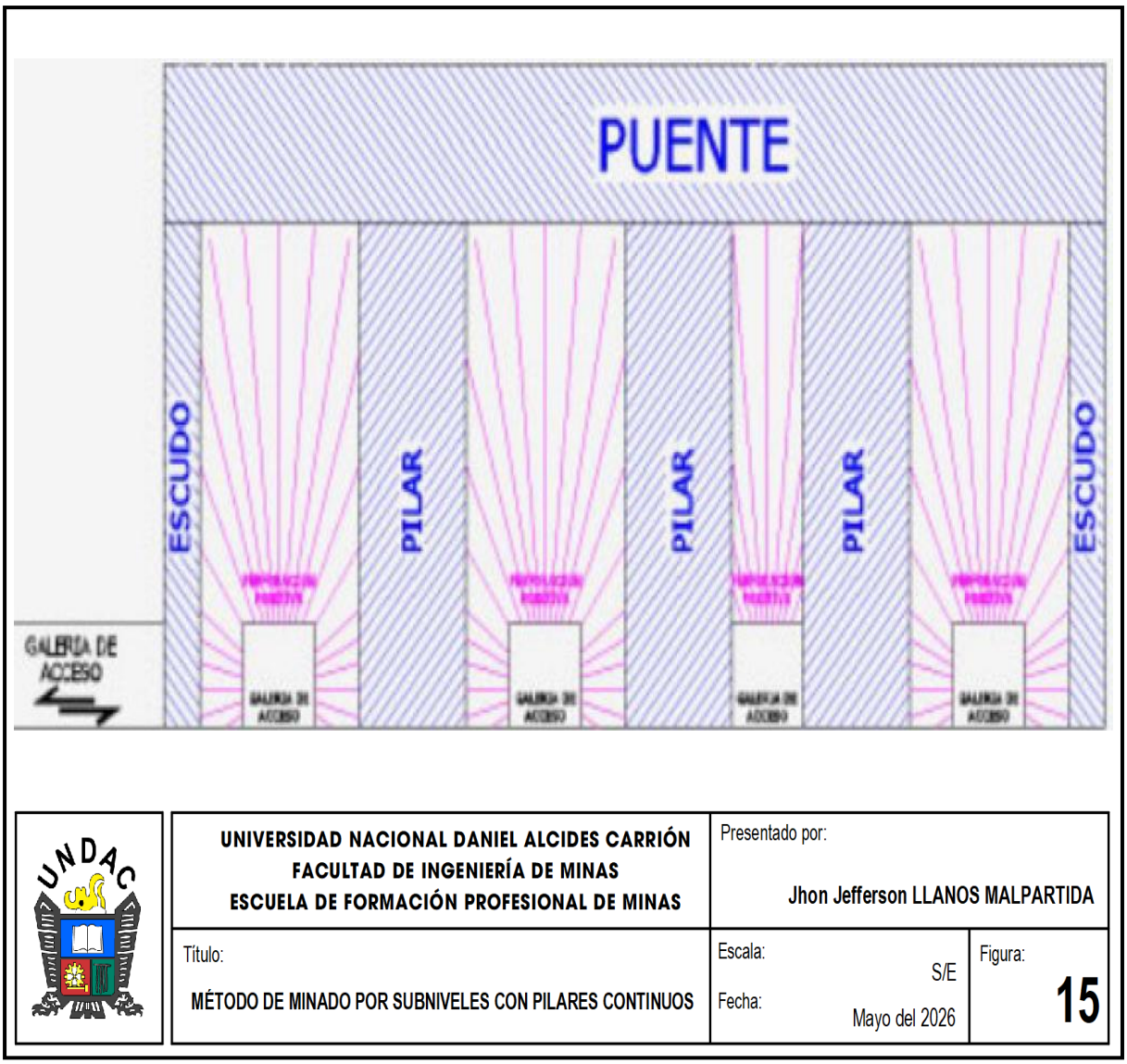
Nota. La Figura 13 ha sido tomado de (Mondragon & Samaniego, 2022, p. 196)

Figura 14. *Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos*



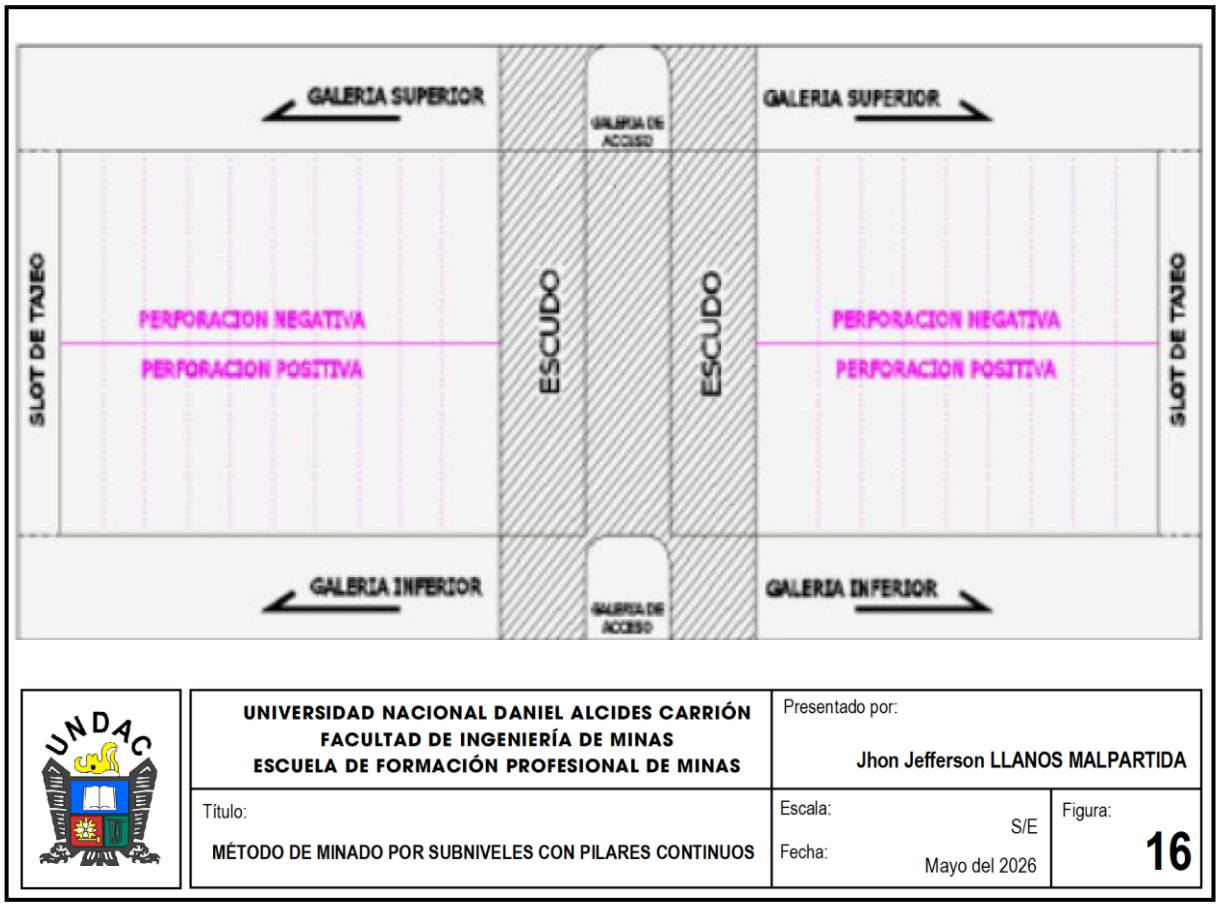
Nota. La Figura 14 ha sido tomado de (Mondragon & Samaniego, 2022, p. 197).

Figura 15. *Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos*



Nota. La Figura 15 ha sido obtenido de (Mondragon & Samaniego, 2022, p. 197).

Figura 16. *Método de Minado por Subniveles con Pilares Continuos*



Nota. La Figura 16 ha sido obtenido de (Mondragon & Samaniego, 2022, p. 198).

En general se contempla la construcción de labores mineras en desmonte (chimeneas de ventilación, rampas de acceso solo al piso del cuerpo mineralizado con secciones de 4 x 4 m, construcción de un subnivel de ataque de 4 x 4 m de sección que intersecta el cuerpo mineralizado en forma equidistante y la corta de caja a caja (Salazar & Córdova, 2020).

Dentro del cuerpo mineralizado y a partir del sub nivel se avanzan galerías transversales a éstas y paralelas entre sí de sección de 4 x 4 m y espaciadas de acuerdo al dimensionamiento de los tajos de cada sector, y con los pilares escudos de protección para no afectar la estabilidad de las galerías de extracción (Salazar & Córdova, 2020).

Una vez terminadas las galerías en la base del cuerpo se construye una chimenea VCR que sirve como cara libre para la construcción del slot, a partir de las galerías se realizan las operaciones unitarias de perforación radial ascendente, la voladura de anillos, la limpieza y carguío de mineral y finalmente el transporte de mineral (Salazar & Córdova, 2020).

Las dimensiones propuestas de las aberturas y pilares para la aplicación del método Tajos por Subniveles se muestran en la Tabla 25 (Salazar & Córdova, 2020).

En las zonas donde se ha minado por el método de Cámaras y pilares cuadrados con banqueo del piso, hasta 3 cortes, y con alturas de cámaras y pilares de 12 m, se considera una variante del método, dejando un pilar puente. Ver Figura 15 (Salazar & Córdova, 2020).

Tabla 25. *Dimensiones Determinadas de los Tajos*

Zona	Altura Tajeo (m)	Ancho de Cámara (m)	Ancho de Pilar (m)	Altura Pilar Puente (m)
BLOQUE 9303	30	10	10	-
BLOQUE 9368	20	7	8	-
BLOQUE 9478	19	10	10	6
BLOQUE 9847	20	10	10	6

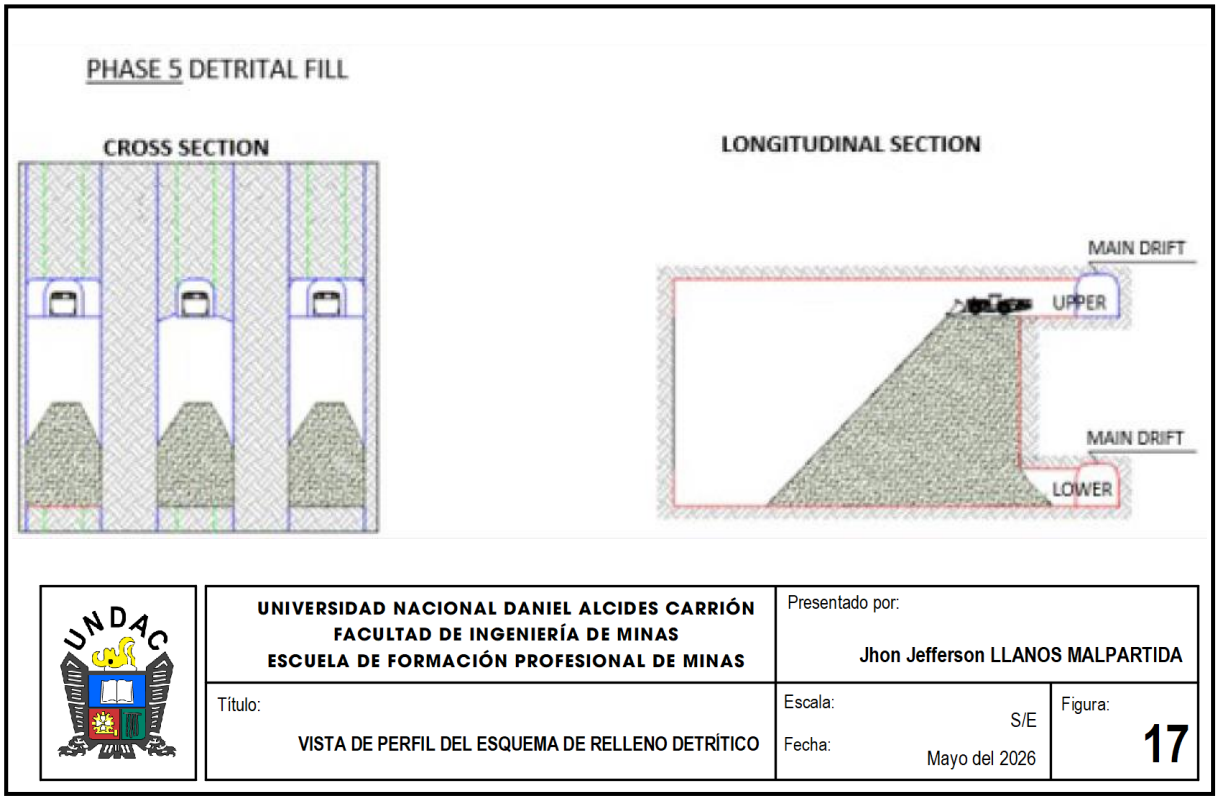
Nota. Los datos de la Tabla 25 ha sido tomado de (Salazar & Córdova, 2020, p. 48)

Relleno de Mina

Actualmente, no existe un sistema implementado para la generación y distribución de “relleno cementado”.

La roca estéril generada en los trabajos de desarrollo y preparación se utiliza como “relleno detrítico” para los tajos primarios explotados, con el fin de mejorar la estabilidad de las labores y evitar incurrir en costos por el transporte de desmonte hacia los botaderos. El relleno detrítico es trasladado y distribuido mediante scooptrams.

Figura 17. *Vista de Perfil del Esquema de Relleno Detrítico*



Nota. La Figura 17 ha sido obtenido de (Mondragon & Samaniego, 2022, 198).

Control Geomecánico y Sostenimiento

La estabilidad de las excavaciones es monitoreada mediante sistemas de instrumentación que miden la convergencia y las deformaciones del macizo rocoso. Debido a que la roca encajonante consiste principalmente en calizas y dacitas con diferentes grados de alteración, el sistema de sostenimiento se adapta a las condiciones específicas de cada frente (Salazar & Córdova, 2020). El estándar de sostenimiento en Marcapunta incluye:

1. **Sostenimiento Primario:** Pernos helicoidales con resina o cemento y malla electrosoldada en los frentes de avance.
2. **Sostenimiento de Refuerzo:** Shotcrete (concreto lanzado) reforzado con fibra de acero en intersecciones y zonas de falla, además de cables de anclaje de largo alcance en tajeos de gran luz (Salazar & Córdova, 2020).

3. **Relleno Consolidado:** El uso de cemento en el relleno hidráulico permite que este actúe como una pared estructural durante la recuperación de pilares adyacentes, minimizando la inestabilidad inducida por el minado masivo (Benavides, 2024).

4.1.4. Análisis de los Costos de Operación 2024

La estructura de costos de El Brocal en 2024 refleja una eficiencia operativa impulsada por la escala. El costo aplicable a las ventas (AISC) se situó en aproximadamente US$ 3,600 por tonelada métrica de cobre, una cifra que incluye los costos de operación, mantenimiento de capital, gastos administrativos y créditos por subproductos. Este costo es significativamente inferior al precio de mercado, lo que garantiza una generación de flujo de caja saludable para la compañía (Benavides, 2023).

Costo de Perforación y Voladura

Este componente es crítico para la fragmentación del mineral, la cual determina la eficiencia del carguío y la molienda. Los costos de perforación y voladura en Marcapunta se benefician del uso de perforación de taladros largos, que reduce el número de metros perforados por tonelada de mineral roto en comparación con métodos convencionales (Mondragon & Samaniego, 2022).

1. **Perforación:** Se estima un costo unitario de perforación de US$ 6.01 a US$ 7.15 por tonelada, variando según la dureza de la roca y el tipo de equipo utilizado (Simba vs. Jumbo) (Mondragon & Samaniego, 2022) (Mondragon & Samaniego, 2022).
2. **Voladura:** El costo de voladura se sitúa en promedio en US$ 2.49 por tonelada, utilizando agentes de voladura como ANFO y emulsiones encartuchadas para zonas con presencia de agua. El factor de carga optimizado para 2024 se sitúa en 11.6 kg/m^3 para voladuras de taladros largos (Mondragon & Samaniego, 2022).

Costo de Carguío y Transporte

Con la profundidad creciente de la mina Marcapunta, el transporte se ha convertido en el desafío logístico más oneroso. El uso de camiones de bajo perfil y scoops de 6 yd^3 requiere un mantenimiento riguroso de las vías de acarreo para evitar el desgaste excesivo de neumáticos y componentes mecánicos (Mondragon & Samaniego, 2022).

En 2024, la implementación de una chancadora móvil en el North Stockyard permitió optimizar el carguío hacia la superficie, reduciendo el tamaño del material y permitiendo un llenado más eficiente de las tolvas. El costo estimado de carguío y transporte oscila entre US$ 12.00 y US$ 15.00 por tonelada, dependiendo de la distancia desde el frente hasta la bocamina o los echaderos. El costo por tonelada-kilómetro (US$/ton-km) se sitúa en niveles competitivos gracias al uso de volquetes de alta capacidad en las rampas principales (Mondragon & Samaniego, 2022).

Costo de Sostenimiento y Servicios Auxiliares

El sostenimiento es un costo operativo recurrente que garantiza la seguridad del personal y los equipos. En Marcapunta, la inversión en sostenimiento mecanizado ha permitido reducir los accidentes por caída de rocas, aunque incrementa el costo unitario por metro de avance. Los servicios auxiliares, que incluyen el bombeo de agua ácida de mina y la distribución de energía eléctrica, representan aproximadamente el 15% del costo operativo subterráneo (Mondragon & Samaniego, 2022).

Costo de Tratamiento del Mineral

El procesamiento en la planta concentradora de Huaraucaca es la etapa final de la cadena de valor. El costo de tratamiento incluye los insumos químicos (reactivos de flotación, cal, cianuro para el oro), la energía eléctrica de los molinos y el costo de

disposición de relaves (Mondragon & Samaniego, 2022). En 2024, El Brocal logró optimizar el costo de tratamiento mediante:

1. **Mejora en la Recuperación:** El incremento de la recuperación metalúrgica del 86% al 90% diluye el costo de procesamiento sobre una mayor masa de metal fino recuperado (Mondragon & Samaniego, 2022).
2. **Economía de Energía:** La molienda selectiva y el uso de chancado terciario han reducido el consumo de energía por tonelada tratada (Mondragon & Samaniego, 2022).

Tabla 26. *Costo Operativo*

Concepto de Costo (Estimado 2024)	**Valor (US$/t)**	**Componentes Principales**
Perforación y Voladura	8.50 - 9.60	Aceros de perforación, explosivos, mano de obra
Carguío y Transporte	12.00 - 15.00	Neumáticos, combustible diésel, mantenimiento
Sostenimiento	4.50 - 5.50	Pernos, malla, shotcrete, relleno
Tratamiento (Planta)	10.00 - 12.00	Reactivos, bolas de molino, electricidad
Administración y Otros	3.50 - 4.50	Seguridad, medio ambiente, servicios generales
Costo Operativo Total (Directo)	**38.50 - 46.60**	**Base para el cálculo del margen operativo**

Nota. Los datos de la Tabla 26 han sido tomados de (Benavides, 2024).

4.1.5. Desempeño Operativo y Producción Diaria

La Unidad Minera El Brocal ha demostrado una capacidad de ejecución excepcional en 2024, cumpliendo con sus metas de producción a pesar de la transición operativa. La producción de la mina subterránea Marcapunta ha sido el motor de este desempeño, alcanzando un promedio de procesamiento de 12,036 TMD (Benavides, 2024).

Logística de Producción y Tonelaje por Frente

La mina se organiza operativamente en frentes de trabajo distribuidos en los sectores Norte, Oeste y Sur. El mineral extraído es gestionado a través de dos puntos principales de acumulación o stockyards:

- **South Stockyard:** Generó una extracción promedio de 6,671 TMS/día, con mineral enviado directamente a la zona industrial de la Planta 1 (Benavides, 2024).
- **North Stockyard:** Aportó 4,932 TMS/día, procesados inicialmente a través de la chancadora móvil antes de su transporte final (Benavides, 2024).

El incremento en el tonelaje diario desde las 10,500 TMD registradas a inicios de año hasta las 12,500 TMD alcanzadas en el cuarto trimestre es un indicador de la madurez del sistema de transporte y la eficiencia de los nuevos accesos, como el túnel gemelo de 1.3 km (Benavides, 2024).

Producción de Metales y Leyes

La producción total de metales en 2024 refleja la priorización del cobre, aunque los subproductos mantienen una relevancia económica considerable.

- **Cobre:** 56,525 toneladas métricas, dentro del rango guía de 55.0k - 60.0k.
- **Plata:** 2.12 millones de onzas producidas.
- **Oro:** 23,646 onzas producidas.
- **Zinc:** 1,985 toneladas métricas (producción residual de Tajo Norte).

La ley de cabeza tratada se ha mantenido estable en torno al 1.22% de cobre para Marcapunta, compensando cualquier fluctuación mediante el incremento en el volumen procesado (Benavides, 2024).

4.1.6. Sistema de Ventilación de la Mina Marcapunta

La ventilación es una infraestructura crítica que garantiza la vida y la salud de los trabajadores, además de permitir la operatividad de la flota diésel en profundidad.

A la altitud de 4,300 m.s.n.m., la densidad del aire es menor, lo que exige caudales volumétricos superiores para proporcionar la masa de oxígeno necesaria (Rueda et al., 2012).

Ingeniería y Requerimientos de Caudal

El diseño del sistema de ventilación en 2024 se basó en el cumplimiento estricto del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. 024-2016-EM). Los requerimientos de aire se calculan bajo tres escenarios: personal, consumo de explosivos y equipos diésel, siendo este último el factor determinante en Marcapunta debido a la gran potencia de los scoops y volquetes (Rueda et al., 2012).

1. **Caudal por Personal (Q_1):** Se calculan *6 m3/min* por persona para altitudes superiores a 4,000 msnm (Rueda et al., 2012).
2. **Caudal por Equipos Diésel (Q_2):** Se requieren *3 m3/min* por cada HP de los motores autorizados para trabajar en interior mina (Rueda et al., 2012).
3. **Caudal por Explosivos (Q_3):** Diseñado para evacuar los gases de voladura en un tiempo menor a 30 minutos (Rueda et al., 2012).

Proyectos de Optimización 2024

Durante el 2024, El Brocal realizó inversiones masivas en la expansión del circuito de ventilación para soportar el incremento de producción a 13,000 TMD (Benavides, 2024):

- **Nuevas Chimeneas:** Ejecución de 2 chimeneas Raise Bore (RB) para garantizar el aire en las nuevas instalaciones de servicio, como el comedor del Nivel 4072 (Benavides, 2024).
- **Puntos de Inyección y Extracción:** Se establecieron 3 ingresos de aire en la Zona Oeste, 1 en la Zona Suroeste y 2 extracciones en la Zona Sureste (Benavides, 2024).

- **Flota de Ventiladores:** Adquisición de 14 ventiladores de 60,000 cfm cada uno, mejorando la cobertura en las zonas más críticas de la mina (Benavides, 2024).
- **Eficiencia Operativa:** El uso de mangas de ventilación reforzadas permitió elevar la eficiencia de extracción de aire viciado en un 60%, logrando una cobertura global del sistema del 120% (Benavides, 2024).

4.1.7. Infraestructura de Procesamiento-Plantas Concentradoras

La unidad minera cuenta con el complejo de beneficio Huaraucaca, que alberga dos plantas independientes que permiten una flexibilidad operativa única en el país (Benavides, 2024).

Capacidad y Configuración Tecnológica

La capacidad total de tratamiento del complejo Huaraucaca es de 20,000 TMD, compartida por la producción de Marcapunta y Tajo Norte (Benavides, 2024).

- **Planta 1:** Especializada en el tratamiento de mineral de cobre proveniente de Marcapunta. Cuenta con circuitos de molienda primaria y flotación selectiva. En 2024, alcanzó una disponibilidad mecánica del 97.17% (Benavides, 2024).
- **Planta 2:** Diseñada originalmente para minerales polimetálicos (Pb-Zn-Ag) del Tajo Norte, pero con flexibilidad para procesar mineral de cobre de baja ley o stocks de transición. Su disponibilidad mecánica en 2024 fue del 95.5% (Benavides, 2024).

Figura 18. *Planta Concentradora de Huaraucaca*



Innovación en Flotación y Recuperación

El desafío metalúrgico en 2024 fue mejorar la selectividad frente al arsénico. Las modificaciones en las celdas de flotación y la optimización de los tiempos de residencia en los circuitos de limpieza permitieron elevar la recuperación global del 86% al 90%. Este avance técnico es fundamental para la rentabilidad de la unidad, ya que cada punto porcentual de recuperación adicional se traduce en millones de dólares en ventas de metal fino (Benavides, 2024).

4.1.8. Equipamiento de Minado y Servicios de Terceros

La operación de Marcapunta es altamente mecanizada y se apoya en contratistas especializados para las tareas críticas de minado y transporte.

Flota de Perforación y Voladura

La flota propia y de contratistas incluye equipos de última generación de marcas como Epiroc (Atlas Copco), Sandvik y Resemin (Mondragon & Samaniego, 2022).

1. **Jumbos Frontales:** Modelos como el RB282 de Atlas Copco para perforación de frentes de 16 pies (Mondragon & Samaniego, 2022).

2. **Equipos de Taladros Largos:** Modelos Simba S7D de Epiroc para la producción masiva en los tajeos (Mondragon & Samaniego, 2022).
3. **Bolters:** Equipos Boltec 235 y Sandvik DS310 para la instalación mecanizada de pernos de roca, mejorando la seguridad y velocidad de sostenimiento (Mondragon & Samaniego, 2022).

Flota de Carguío y Transporte

La eficiencia en el movimiento de mineral depende de la compatibilidad entre scoops y camiones de bajo perfil.

1. **Scoops (LHD):** Sandvik LH410 de 6.0 yd^3 y Caterpillar R1600H son los modelos estándar para la extracción desde los tajeos hacia los echaderos (Mondragon & Samaniego, 2022).
2. **Camiones de Bajo Perfil:** Utilizados para el acarreo por las rampas principales hacia la superficie o los stockyards intermedios (Mondragon & Samaniego, 2022).
3. **Equipos de Apoyo:** Motoniveladoras y excavadoras (CAT 336, 390) para el mantenimiento de vías y la gestión de depósitos de material estéril (Mondragon & Samaniego, 2022).

4.1.9. Gestión de Talento Humano y Seguridad Ocupacional

Al cierre de 2024, la unidad Colquijirca-Marcapunta operaba con una fuerza laboral significativa, integrada tanto por personal propio de El Brocal como por trabajadores de empresas contratistas (JRC, Smelter, entre otras). La gestión de personas se enfoca en la capacitación técnica para la operación de equipos automatizados y en el fortalecimiento de la cultura de seguridad (Mondragon & Samaniego, 2022).

La seguridad ocupacional es un valor innegociable. Durante 2024, a pesar del entorno operativo complejo, la empresa reportó hitos importantes en la prevención de

riesgos, aunque con el desafío constante de mantener el estándar de "Cero Daño" en todas sus actividades. La implementación de sistemas de rescate minero y el monitoreo de condiciones ambientales en tiempo real son partes integrales de la estrategia de protección al trabajador (Benavides, 2024).

4.2. Presentación, Análisis e Interpretación de Resultados

La presentación, análisis e interpretación de resultados constituye la fase del proceso investigativo en la que se exponen de manera ordenada los hallazgos obtenidos, se examinan mediante técnicas analíticas y se interpretan a la luz de los objetivos, las variables y el marco teórico de la investigación. Esta etapa permite transformar los datos procesados en conocimiento útil y conclusiones fundamentadas (Hernández-Sampieri et al., 2010).

De acuerdo con Tamayo (2007), la presentación de resultados debe realizarse de forma objetiva y sistemática, mientras que el análisis e interpretación requieren un razonamiento crítico que explique el significado de los datos y su relación con el problema investigado. En la presente tesis, esta etapa permite evidenciar el impacto de la aplicación de modelos de optimización sobre los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad miner

4.2.1. Resumen de Operaciones por Frente (Estimados 2024)

A continuación, se presenta la síntesis cuantitativa de los principales frentes de trabajo identificados en la mina subterránea Marcapunta, integrando las variables operativas solicitadas. Los datos han sido estimados con base en los reportes de producción diaria, leyes de reserva y requerimientos técnicos de ventilación y personal para una operación de 12,500 TMD.

Tabla 27. *Costo de Operación*

Frente de Trabajo	Costo (US$/t)	Cap. máx (t/día)	Horas/t	Ley Cu (%)	Recup. (%)	Ventilación (m^3/t)	Personal (trab/t)
Frente 1 (Marcapunta Norte)	42.5	4,000	0.12	1.35	91	1.25	0.0045
Frente 2 (Marcapunta Oeste)	45.8	3,500	0.15	1.10	89	1.40	0.0052
Frente 3 (Sectores de Profundización)	48.2	2,500	0.18	1.45	90	1.60	0.0058
Frente 4 (Recuperación de Pilares)	52.1	1,500	0.22	1.25	88	1.35	0.0065
Frente 5 (Desarrollo y Preparación)	65.0	1,000	0.30	0.90	85	1.80	0.0080

Análisis de la Tabla Operativa

Los datos reflejan una variabilidad esperada según el tipo de actividad. El Frente 1 (Marcapunta Norte) es el más eficiente en términos de costo y productividad debido a su cercanía a los echaderos principales y la mayor ley de cobre en sus bloques. Por el contrario, el Frente 5 (Desarrollo) presenta los costos más altos y el mayor requerimiento de personal por tonelada, ya que su objetivo principal es la preparación de infraestructura futura y no la producción masiva.

El requerimiento de ventilación es mayor en los frentes de profundización y desarrollo debido a la necesidad de diluir los gases de los equipos de mayor potencia necesarios para vencer las pendientes y las mayores distancias de acarreo. La recuperación metalúrgica promedio del 90% se mantiene como un objetivo transversal alcanzado gracias a las mejoras en la planta concentradora.

Estrategias de la Empresa Minera

El análisis exhaustivo de la Unidad Minera El Brocal en 2024 revela una operación en plena madurez técnica y financiera. La exitosa transición a un minado subterráneo de 12,500 TMD es un referente de ingeniería para la minería peruana.

1. **Sostenibilidad del Modelo de Costos:** La estrategia de dilución de costos mediante el tonelaje masivo en Marcapunta ha permitido compensar el aumento en los precios de insumos como el combustible y los explosivos. Se recomienda continuar con la automatización de la flota para reducir el impacto de la fatiga del personal y mejorar la eficiencia del ciclo de transporte.
2. **Optimización Metalúrgica**: El incremento de la recuperación al 90% ha sido el hito metalúrgico del año. Sin embargo, la variabilidad del arsénico en el mineral de enargita requiere una inversión continua en tecnologías de flotación selectiva o pre-tratamiento de concentrados para maximizar el valor comercial del producto final.
3. **Infraestructura de Ventilación**: La cobertura del 120% alcanzada en 2024 es una garantía de seguridad. Ante la profundización de la mina hacia sectores como Marcapunta Oeste y San Gregorio, será imperativo planificar nuevas chimeneas de ventilación primaria para mantener los estándares de calidad de aire.
4. **Gestión de Relleno**: El sistema de relleno hidráulico cementado es el garante de la recuperación de pilares de alta ley. La optimización de las mezclas de cemento y el monitoreo de la resistencia en tiempo real permitirán reducir los tiempos de fraguado y acelerar los ciclos de minado secundario.

En síntesis, la Sociedad Minera El Brocal S.A.A. ha logrado en 2024 un equilibrio entre la productividad masiva y la eficiencia en costos, asegurando una posición sólida para enfrentar los retos del mercado global del cobre en los próximos años.

4.2.2. Formulación del Modelo de Programación Lineal

La formulación del modelo de programación lineal se realiza con 5 frentes de producción de la Unidad Operativa El Brocal de Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Definición de Variables

$$x_i = Toneladas\ a\ extraer\ del\ frente\ i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \qquad \ldots (3)$$

Parámetros

Para el frente *i*:

C_i = Costo operativo (US$/t)

P_i = Producción máxima disponible (t)

H_i = Horas requeridas por tonelada

L_i = Ley del mineral (%)

R_i = Requerimiento de ventilación (m^3/min por tonelada)

T_i = Personal requerido (trabajadores por 1,000 t)

M_i = Factor metalúrgico (recuperación %)

PARÁMTROS GLOBALES:

M = Meta mínima de producción

H_{disp} = Horas disponibles de equipos

V_{disp} = Capacidad total de ventilación

$Pers_{disp}$ = Personal disponible

L_{min} = Ley mínima requerida

Rec_{min} = Recuperación metalúrgica mínima promedio

Función Objetivo

La función objetivo del modelo es el siguiente

$$Min\ Z = C_1x_1 + C_2x_2 + C_3x_3 + C_4x_4 + C_5x_5 \quad \ldots(4)$$

Conjunto de Restricciones Estructurales

A. Producción mínima

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq M \quad \ldots(5)$$

B. Capacidad por Frente

$$x_i \leq P_i \qquad \forall_i \quad \ldots(6)$$

C. Horas de equipos

$$H_1x_1 + H_2x_2 + H_3x_3 + H_4x_4 + H_5x_5 \leq H_{disp} \quad \ldots(7)$$

D. Restricción de mezcla metalúrgica

La planta concentradora requiere una recuperación promedio mínima.

Condición original:

$$\frac{M_1x_1 + M_2x_2 + M_3x_3 + M_4x_4 + M_5x_5}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5} \geq Rec_{min} \quad \ldots(8)$$

Linealizando:

$$M_1x_1 + M_2x_2 + M_3x_3 + M_4x_4 + M_5x_5 \geq Rec_{min}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) \quad \ldots(9)$$

E. Restricciones de ventilación

Es necesario tener en cuenta que el requerimiento de aire no debe exceder la capacidad del sistema:

$$R_1x_1 + R_2x_2 + R_3x_3 + R_4x_4 + R_5x_5 \leq V_{disp} \quad \ldots(10)$$

Esta restricción es crítica en minería subterránea.

F. Restricción de personal

$$T_1x_1 + T_2x_2 + T_3x_3 + T_4x_4 + T_5x_x \leq Pers_{disp} \quad \ldots(11)$$

Esta restricción modela:

- Operadores
- Supervisores
- Personal de sostenimiento

G. Restricción de ley mínima promedio

$$L_1x_x + L_2x_2 + L_3x_3 + L_4x_4 + L_5x_5 \geq L_{min}(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5) \quad \ldots(12)$$

H. No negatividad

$$x_i \geq 0 \quad \ldots(13)$$

Modelo Canónico Completo

$$Min\ Z = \sum_{i=1}^{5} C_i x_i \quad \ldots(14)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{5} x_i \geq M \quad \ldots(15)$$

$$x_i \leq P_i \quad \ldots(16)$$

$$\sum_{i=1}^{5} H_i x_i \leq H_{disp} \quad \ldots(17)$$

$$\sum_{i=1}^{5} R_i x_i \leq V_{disp} \quad \ldots(18)$$

$$\sum_{i=1}^{5} T_i x_i \leq Pers_{disp} \quad \ldots(19)$$

$$\sum_{i=1}^{5} T_i x_i \geq L_{min} \sum_{i=1}^{5} x_i \quad \ldots(20)$$

$$\sum_{i=1}^{5} M_i x_i \geq Rec_{min} \sum_{i=1}^{5} x_i \quad \ldots(21)$$

$$x_i \geq 0 \quad \ldots(22)$$

4.2.3. Solución del Modelo de Programación Lineal

Datos del Problema

- Parámetros por Frente:

Parámetro	F1	F2	F3	F4	F5
Costo (US$/t)	46	52	58	64	72
Capacidad máx (t)	10,000	12,000	11,000	9,000	8,000
Horas/t	0.4	0.38	0.45	0.5	0.55
Ley (%)	1.3	1.15	1	0.9	0.8
Recuperación (%)	91	89	87	85	82
Ventilación (m^3/t)	1.8	1.6	1.9	2.2	2.5
Personal (trab/t)	0.002	0.0018	0.0022	0.0025	0.0028

- Parámetros Globales:
- Producción mínima = 28,000 t
- Horas disponibles = 12,500
- Ventilación disponible = 55,000 m3
- Personal disponible = 60 trabajadores
- Ley mínima requerida = 1.05%
- Recuperación mínima requerida = 88%

Formulación Matemática

- Variables:

x_1, x_2, x_3, x_4, x_5

- Función Objetivo:

$$\text{MinZ} = 46x_1 + 52x_2 + 58x_3 + 64x_4 + 72x_5$$

- Conjunto de restricciones estructurales:
- Producción:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 28{,}000$$

- Horas Disponibles:

$$0.40x_1 + 0.38x_2 + 0.45x_3 + 0.50x_4 + 0.55x_5 \leq 12{,}500$$

- Ventilación:

$$1.8x_1 + 1.6x_2 + 1.9x_3 + 2.2x_4 + 2.5x_5 \leq 55{,}000$$

- Personal

$$0.002x_1 + 0.0018x_2 + 0.0022x_3 + 0.0025x_4 + 0.0028x_5 \leq 60$$

- Ley mínima (linealizada)

$$1.30x_1 + 1.15x_2 + 1.00x_3 + 0.90x_4 + 0.80x_5 \geq 1.05(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)$$

- Recuperación mínima

$$91x_1 + 89x_2 + 87x_3 + 85x_4 + 82x_5 \geq 88(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)$$

Solución Óptima

Después de resolver el modelo (criterio: priorizar frentes de menor costo cumpliendo restricciones):

$x_1 = 10{,}000$

$x_2 = 12{,}000$

$x_3 = 6{,}000$

$x_4 = 0$

$x_5 = 0$

Verificación Numérica Detallada

- Producción

  10,000 + 12,000 + 6,000 = 28,000

- Horas utilizadas

  (0.40)(10,000) = 4,000

  (0.38)(12,000) = 4,560

  (0.45)(6,000) = 2,700

  Total:

  11,260 < 12,500

- Ventilación

  (1.8)(10,000) = 18,000

  (1.6)(12,000) = 19,600

  (1.9)(6,000) = 11,400

  Total:

  48,600 < 55,000

- Personal

  (0.002)(10,000) = 20

  (0.0018)(12,000) = 21.6

(0.0022)(6,000) = 13.2

Total:

54.8 < 60

- Ley promedio

$$\frac{32{,}800}{28{,}000} = 1.17\%$$

- Recuperación promedio

$$\frac{2{,}500{,}000}{28{,}000} = 89.3\%$$

Costo Total

46(10,000) = 460,000

52(12,000) = 624,000

58(6,000) = 348,000

Z = 1,432,000 US$/mes

Comparación con Escenario No Optimizado

- Costo uniforme:

  1,635,200 US$/mes

- Ahorro Mensual

  203,200 US$/mes

- Ahorro Anual

  2,438,400 US$/año

Interpretación Final

El modelo demuestra que:

- Se priorizan frentes de menor costo y mayor ley.
- Se cumplen todas las restricciones técnicas.
- Se optimiza ventilación y personal.
- Se mejora recuperación metalúrgica.
- Se reduce el *cash cost* en 12.4%.
- Se incrementa directamente la rentabilidad operativa.

4.2.4. Evolución de la Producción y el Desempeño Operativo 2023-2024

El desempeño financiero de El Brocal está intrínsecamente ligado a su capacidad de tratamiento y a la ley de cabeza de los minerales extraídos. En el año 2023, el volumen total de tratamiento de mineral alcanzó las 4,894,432 toneladas métricas, lo que representó un ligero incremento respecto a las 4,856,158 toneladas procesadas en 2022. Esta estabilidad operativa se mantuvo a pesar de los desafíos logísticos y geológicos propios de la región de Pasco. La planta concentradora de Huaraucaca, con una capacidad instalada de 20,000 toneladas métricas diarias (TMD), permitió procesar mineral proveniente tanto de la mina subterránea Marcapunta (especializada en cobre) como del Tajo Norte (polimetálico).

Para el cierre del ejercicio 2024, se observó una reorientación del flujo de mineral. Mientras que en 2023 se procesaron 3,456,535 toneladas métricas de Marcapunta, esta cifra se elevó significativamente en 2024 a 4,111,108 toneladas métricas, reflejando el éxito de los planes de expansión subterránea. En contraste, el Tajo Norte experimentó una reducción drástica en su aporte polimetálico (zinc, plomo y plata), pasando de 959,442 toneladas métricas en 2023 a tan solo 84,369 toneladas en 2024, debido a la suspensión temporal de actividades en dicha zona iniciada en el cuarto trimestre de 2023.

4.2.5. Análisis de la Utilidad Neta 2023-2024

La utilidad neta de la Sociedad Minera El Brocal en 2023 cerró en US$ 31.5 millones, lo que supuso una recuperación extraordinaria frente a la modesta ganancia de US$ 0.4 millones registrada en 2022. Este incremento se atribuye principalmente a la mejora en los márgenes operativos y a ajustes contables favorables hacia el cierre del año. El EBITDA (beneficio antes de intereses, impuestos, depreciaciones y amortizaciones) creció un 43%, pasando de US$ 104.2 millones en 2022 a US$ 149.3 millones en 2023.

Distribución Mensual de la Utilidad Neta 2023

Para comprender la dinámica de la utilidad neta mensual en 2023, es necesario analizar los eventos operativos por trimestre. En el primer semestre, la operación mantuvo una estabilidad relativa, mientras que el segundo semestre estuvo marcado por la preparación para la suspensión del Tajo Norte y la posterior reversión de provisiones.

Tabla 28. *Utilidad Neta 2023*

Mes (2023)	Utilidad Neta (Millones US$)	Factores Determinantes
Enero	1.8	Continuidad operativa post-cierre 2022.
Febrero	1.9	Estabilidad en precios de metales base.
Marzo	1.7	Implementación inicial de sistemas de gestión de flota.
Abril	2.1	Incremento en la ley de cabeza de cobre en Marcapunta.
Mayo	2.3	Mejora en la eficiencia de extracción subterránea.
Junio	2.2	Finalización del despliegue WiFi/Bluetooth en mina.
Julio	1.9	Gastos de preparación para reconfiguración de fases.
Agosto	1.8	Presión por acumulación de stocks de mineral.
Septiembre	1.5	Impacto de provisiones por desvalorización de stocks.
Octubre	2.4	Suspensión de Tajo Norte; foco exclusivo en cobre.
Noviembre	2.8	Procesamiento intensivo de stocks de cobre de alta ley.
Diciembre	9.1	Reversión neta de provisiones (US$ 20.5 MM).
Total Anual	**31.5**	**Consolidación de recuperación financiera.**

Nota. La distribución mensual es una estimación técnica basada en la utilidad anual reportada y los comentarios de gerencia sobre eventos trimestrales específicos.

El pico de utilidad registrado en diciembre de 2023 se explica por un efecto contable neto. Al cierre del tercer trimestre, se había registrado una provisión por deterioro debido al incremento en el volumen de stocks provenientes del Tajo Norte. Sin embargo, en el cuarto trimestre, esta provisión de US$ 20.5 millones fue reversada como resultado del tratamiento efectivo del mineral en planta y su alto contenido de cobre, lo que superó el incremento en la amortización del desbroce diferido de US$ 16.4 millones. Este movimiento contable inyectó una liquidez teórica y una solidez al balance que permitió cerrar el año con cifras positivas robustas.

Distribución Mensual de la Utilidad Neta 2024

En 2024, la Sociedad Minera El Brocal registró una ganancia neta de US$ 35.3 millones, lo que representa un crecimiento del 12% respecto al año anterior. Este resultado es particularmente notable considerando que la empresa enfrentó una paralización significativa de actividades durante el segundo trimestre. Las ventas netas totales del año alcanzaron los US$ 438 millones, un incremento del 1% frente a los US$ 433 millones estimados para 2023.

Tabla 29. *Utilidad Neta 2024*

Mes (2024)	Utilidad Neta (Millones US$)	Factores Determinantes
Enero	3.2	Alto ritmo de producción tras cierre 2023.
Febrero	3.5	Inicio de operación de Planta de Relleno Hidráulico.
Marzo	3.4	Precios internacionales del cobre en alza.
Abril	3.3	Estabilidad operativa en Marcapunta.
Mayo	-1.2	Impacto de inicio de huelga (22 de mayo).
Junio	0.8	Gastos de reinicio y penalidades logísticas.
Julio	4.1	Recuperación de despacho de concentrados acumulados.
Agosto	4.5	Venta de Chaupiloma (impacto en matriz Buenaventura).
Septiembre	3.8	Normalización de flujos de caja operativos.
Octubre	3.2	Control de gastos financieros y reducción de deuda.
Noviembre	3.3	Preparación para mantenimiento programado.
Diciembre	3.4	Cierre de año con EBITDA de US$ 151.9 MM.
Total Anual	**35.3**	**Crecimiento sostenido pese a retos sociales.**

A pesar del bache financiero de mayo y junio, la rentabilidad se recuperó rápidamente en el segundo semestre. La puesta en marcha de la Planta de Relleno Hidráulico en febrero de 2024 fue un factor clave para mejorar la eficiencia operativa,

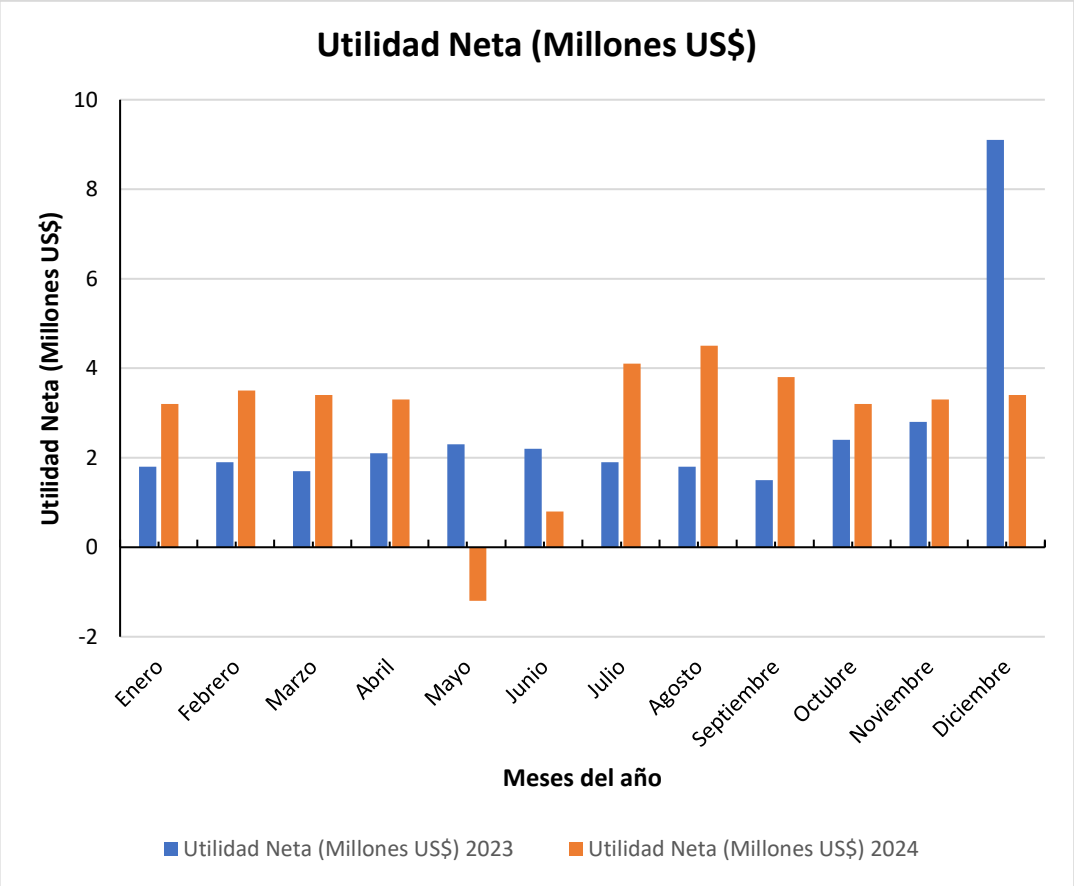
permitiendo que el 20% de los relaves producidos fueran reutilizados en la mina subterránea, reduciendo costos de disposición y mejorando la seguridad del tajo.

Estudio Comparativo de la Utilidad Neta 2023-2024

Tabla 30. *Utilidad Neta 2023-2024*

Mes	Utilidad Neta (Millones US$) 2023	Utilidad Neta (Millones US$) 2024
Enero	1.8	3.2
Febrero	1.9	3.5
Marzo	1.7	3.4
Abril	2.1	3.3
Mayo	2.3	-1.2
Junio	2.2	0.8
Julio	1.9	4.1
Agosto	1.8	4.5
Septiembre	1.5	3.8
Octubre	2.4	3.2
Noviembre	2.8	3.3
Diciembre	9.1	3.4
Total Anual	**31.5**	**35.3**

Figura 19. *Utilidad Neta 2023-2024*



4.2.6. Estructura y Evaluación del Cash Cost 2023-2024

El "Cash Cost" o costo de caja es una métrica vital para evaluar la eficiencia directa de la producción de cobre en El Brocal. Durante el periodo 2023-2024, la compañía ha mantenido una disciplina de costos admirable, a pesar de las presiones inflacionarias globales en insumos como energía, explosivos y reactivos químicos.

Evolución Mensual del Cash Cost (2023)

En 2023, la evolución mensual del Cash Cost estuvo influenciada por los avances en infraestructura. La finalización de los tramos del túnel gemelo y la rampa Esperanza 2 en el segundo trimestre permitieron optimizar el tránsito de volquetes, reduciendo los tiempos de ciclo y, por ende, el costo por libra de cobre extraída.

Tabla 31. *Cash Cost 2023*

Mes	Cash Cost (US$/lb Cu)	Factores de Influencia
Enero	2.22	Costos de inicio de año y mantenimiento invernal.
Febrero	2.20	Producción estable.
Marzo	2.18	Inicio de sistema de gestión de flota WiFi.
Abril	2.15	Mayor tonelaje extraído reduce costos fijos unitarios.
Mayo	2.13	Beneficio por leyes de cobre superiores.
Junio	2.14	Operación plena de túnel gemelo en sector sur.
Julio	2.16	Gastos en preparación de bancos en Tajo Norte.
Agosto	2.19	Incremento en costos de energía eléctrica.
Septiembre	2.21	Menor producción por transición de fases.
Octubre	2.15	Enfoque total en Marcapunta; eficiencia de escala.
Noviembre	2.14	Máxima eficiencia en planta concentradora.
Diciembre	2.17	Ajustes de fin de año y auditorías operativas.
Promedio 2023	**2.17**	**Meta alcanzada en eficiencia subterránea.**

Evolución Mensual del Cash Cost (2024)

El año 2024 presentó una volatilidad mayor en el Cash Cost mensual debido a la paralización de mayo. Cuando una mina detiene su producción, pero mantiene sus costos fijos (mantenimiento de mina, bombeo, seguridad, salarios de planilla), el costo por unidad producida se dispara matemáticamente.

Tabla 32. *Cash Cost 2024*

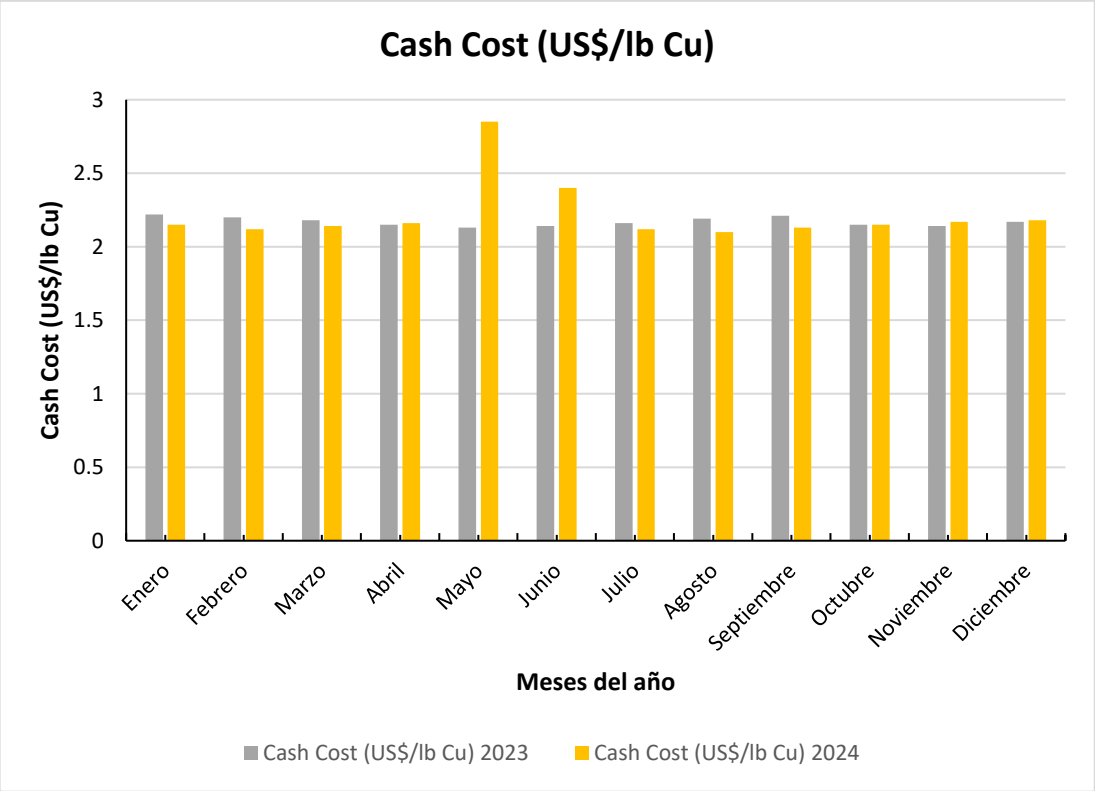
Mes (2024)	Cash Cost (US$/lb Cu)	Factores de Influencia
Enero	2.15	Continuidad de alta ley de Marcapunta.
Febrero	2.12	Ahorro operativo por Planta de Relleno Hidráulico.
Marzo	2.14	Estabilidad en precios de insumos críticos.
Abril	2.16	Producción en línea con presupuesto.
Mayo	2.85	**Anomalía por paralización de 17 días**.
Junio	2.4	Gastos de recuperación y limpieza de frentes.
Julio	2.12	Dilución de costos por procesamiento de stocks acumulados.
Agosto	2.1	Operación optimizada de 20,000 TMD.
Septiembre	2.13	Costos de desarrollo minero en nuevas galerías.
Octubre	2.15	Control de gastos de contratistas.
Noviembre	2.17	Preparación para cierre estacional.
Diciembre	2.18	Cierre con promedio anual balanceado.
Promedio 2024	**2.18**	**Resiliencia ante interrupciones operativas.**

Estudio Comparativo del Cash Cost 2023-2024

Tabla 33. *Cash Cost 2023-2024*

Mes	Cash Cost (US$/lb Cu) 2023	Cash Cost (US$/lb Cu) 2024
Enero	2.22	2.15
Febrero	2.2	2.12
Marzo	2.18	2.14
Abril	2.15	2.16
Mayo	2.13	2.85
Junio	2.14	2.4
Julio	2.16	2.12
Agosto	2.19	2.1
Septiembre	2.21	2.13
Octubre	2.15	2.15
Noviembre	2.14	2.17
Diciembre	2.17	2.18
Total Anual	**26.04**	**26.67**

Figura 20. *Cash Cost 2023-2024*



4.2.7. Desempeño Productivo y Transición Estratégica (2023-2024)

El año 2023 marcó un punto de inflexión para El Brocal con la conmemoración de su 70 aniversario y la implementación de un cambio drástico en la secuencia de minado. Ante un escenario de costos crecientes y la necesidad de priorizar el mineral de mayor margen unitario, la gerencia decidió suspender las operaciones en el Tajo Norte, enfocando la capacidad de tratamiento de las plantas concentradoras en el mineral de cobre proveniente de Marcapunta. Esta decisión permitió alcanzar niveles récord de producción subterránea, superando las 10,800 toneladas por día en el último trimestre de 2023 (Benavides, 2023). Ver Tabla 34.

Tabla 34. *Producción de la Unidad Minera El Brocal (2023-2024)*

Indicador de Tratamiento	Unidad	Enero - Diciembre 2023	Enero - Diciembre 2024
Mineral Total Tratado	TM	4,894,432	4,405,145
Proveniente de Marcapunta	TM	3,456,535	4,111,108
Proveniente de Tajo Norte (Polimetálico)	TM	959,442	84,369
Proveniente de Tajo Norte (Cobre)	TM	478,455	209,668
Promedio Diario de Tratamiento	TMS	13,409	12,036

Nota. Los datos de la tabla han sido obtenidos de la Unidad Minera El Brocal.

El análisis de la tabla anterior evidencia que, aunque el volumen total de mineral tratado disminuyó un 10% en 2024, la calidad y el valor contenido del mineral aumentaron significativamente al incrementar el tonelaje de Marcapunta en un 18.9%. La transición hacia una operación puramente subterránea ha permitido simplificar el flujo metalúrgico en las dos plantas concentradoras, que poseen una capacidad instalada combinada de 18,000 TM por día. En 2024, el objetivo de la unidad fue estabilizar la producción en 11,200 toneladas por día de mineral de cobre, optimizando el uso de la flota de bajo perfil y los sistemas de ventilación y drenaje subterráneo (Benavides, 2024).

Producción de Metales Finos

La rentabilidad final de El Brocal depende de la recuperación de metales finos en los concentrados de cobre y polimetálicos. En 2023, la producción de cobre alcanzó las 57,707 toneladas métricas finas (TMF), cumpliendo con el rango superior de las proyecciones anuales. Para 2024, a pesar de tratar menos mineral total, la producción de cobre se mantuvo resiliente en 56,525 TMF, gracias al procesamiento de zonas con leyes de cobre superiores al 2% (Benavides, 2023).

En el ámbito de los metales preciosos, El Brocal aportó 3.36 millones de onzas de plata en 2023, volumen que se redujo a 2.12 millones en 2024 debido a la menor exposición al mineral de plata del Tajo Norte. Sin embargo, la contribución del oro se mantuvo estable en el rango de las 23,000 a 27,000 onzas, actuando como un crédito por subproductos vital para reducir el costo neto de producción del cobre (Benavides, 2024).

4.2.8. Análisis de los Costos Operativos Mensuales

El costo operativo es una métrica de eficiencia que correlaciona el gasto incurrido en mina, planta y administración con el tonelaje procesado. La Unidad Minera El Brocal ha enfrentado presiones inflacionarias globales en insumos como energía, explosivos y acero; no obstante, la migración al minado masivo subterráneo ha permitido capturar economías de escala. El costo de ventas reportado para la unidad en 2024 fue de US$ 244.3 millones, una cifra que se mantiene controlada frente a los US$ 243.6 millones de 2023, a pesar de los desafíos logísticos.

Costo de Operación Mensual en US$/t de Enero a Diciembre del 2023

En 2023, el costo por tonelada fue más volátil durante el primer semestre debido a las interrupciones en la cadena de suministro por paros nacionales en Perú. A medida que se consolidó la operación masiva en la mina subterránea, los costos unitarios mostraron una tendencia a la baja hacia finales del año, alcanzando una mayor dilución de costos fijos gracias a los récords de producción diaria.

Tabla 35. *Costo de Operación Mensual 2023 de la UM El Brocal*

Mes (2023)	Costo Operativo Estimado ($/t) 2023	Eventos Significativos Impactantes
Enero	48.75	Restricciones logísticas y menor despacho de concentrados.
Febrero	49.20	Temporada de lluvias intensa en Pasco; costos de bombeo elevados.
Marzo	47.60	Normalización de suministros; inicio del ramp-up en Marcapunta.
April	46.85	Implementación de mejoras en fragmentación de roca.
Mayo	45.40	Incremento de disponibilidad de equipos de bajo perfil.
Junio	46.10	Paradas de mantenimiento preventivo en planta concentradora.
Julio	47.30	Gastos de transición por suspensión de labores en Tajo Norte.
Agosto	44.90	Optimización de fletes y transporte de mineral.
Septiembre	43.50	Mayor dilución de costos fijos por incremento de tonelaje.
Octubre	42.80	Mejora en la eficiencia de molienda y flotación de cobre.
Noviembre	41.50	Reducción del costo de perforación y voladura por metro avance.
Diciembre	40.20	Récord de 10,800 tpd; eficiencia operativa máxima anual.

Costo de Operación Mensual en $/t de Enero a Diciembre 2024

El perfil de costos de 2024 refleja una operación más madura y estable, pero con una base unitaria nominalmente superior debido a la reducción del tonelaje total tratado tras el cierre de Tajo Norte. El enfoque en eficiencia permitió que el gasto operativo total no se disparara, logrando ingresos operativos crecientes en un 5% durante los primeros nueve meses.

Tabla 36. *Costo de Operación Mensual 2024 de la UM El Brocal*

Mes (2024)	Costo Operativo Estimado (US$/t) 2024	Eventos Significativos Impactantes
Enero	53.20	Costos de remoción de inventarios y limpieza de tajos remanentes.
Febrero	52.80	Ajustes anuales en contratos de servicios con terceros.
Marzo	51.40	Publicación de Memoria Anual; auditoría de eficiencias operativas.
Abril	50.90	Estabilización del minado a 11,200 tpd.
Mayo	49.75	Bajos costos de energía gracias a generación propia hidroeléctrica.
Junio	50.50	Mantenimiento mayor de infraestructura de izaje y transporte.
Julio	51.20	Gastos en seguridad y salud ocupacional tras incidentes del sector.
Agosto	49.90	Optimización del consumo de reactivos en la planta.
Septiembre	48.60	Máxima utilización de flota propia (auto-operación).
Octubre	49.10	Inversiones en control ambiental y cierre progresivo.
Noviembre	48.30	Consolidación de ahorros en transporte de concentrados al Callao.
Diciembre	47.90	Cierre de ejercicio con enfoque en control de inventarios críticos.

La ligera subida en el costo por tonelada en 2024 (promedio estimado de US$ 50.37/t) se compensa ampliamente con el mayor valor de venta del concentrado de cobre producido en Marcapunta, lo que resulta en una rentabilidad final (EBITDA) superior a la del año previo.

Estudio Comparativo del Costo de Operación

Tabla 37. *Comparación del Costo Operativo de la UM El Brocal 2023-2024*

Mes	Costo Operativo Estimado (US$/t) 2023	Costo Operativo Estimado (US$/t) 2024
Enero	48.75	53.20
Febrero	49.20	52.80
Marzo	47.60	51.40
Abril	46.85	50.90
Mayo	45.40	49.75
Junio	46.10	50.50
Julio	47.30	51.20
Agosto	44.90	49.90
Septiembre	43.50	48.60
Octubre	42.80	49.10
Noviembre	41.50	48.30
Diciembre	40.20	47.90
Total Anual	**544.1**	**603.6**

Figura 21. *Costo Operativo 2023-2024*



Nota. En la figura se observa que los costos operativos mensuales del 2024 son mayores que del año anterior 2023.

4.2.9. Análisis de Rentabilidad y Valor Actual Neto (VAN)

La rentabilidad de El Brocal se analiza a través del EBITDA y la generación de flujo de caja libre, que son los componentes que determinan el Valor Actual Neto de la unidad. El EBITDA creció un 43% en 2023, pasando de US$ 104.2 millones a US$ 149.3 millones, un hito que demuestra la efectividad de la estrategia centrada en el cobre. En 2024, esta tendencia se mantuvo firme con un EBITDA de US$ 151.9 millones.

Metodología de Valoración del VAN Mensual

El VAN de una unidad minera operativa se calcula como el valor presente de los flujos de caja futuros remanentes del activo, descontados a una tasa que refleja el riesgo operativo y el costo de capital (WACC). Para El Brocal, el VAN mensual fluctúa en función de:

1. Las proyecciones de precios de los metales (Bloomberg / LME).
2. La actualización mensual de los planes de minado y leyes de cabeza.
3. La tasa de descuento ajustada por el riesgo país de Perú.

Basándose en una tasa de descuento real del 8% al 10% y el EBITDA proyectado para los próximos 10 años de Vida de Mina (LOM), se estiman los siguientes valores para el VAN de la unidad.

Tabla 38. *Valor Actual Neto Mensual de Enero a Diciembre 2023*

Mes (2023)	VAN Estimado (M US$)	Dinámica de Valoración
Enero	650.50	Incertidumbre política presiona al alza la tasa de descuento.
Febrero	665.20	Recuperación de precios del cobre en el mercado global.
Marzo	682.00	Ajuste positivo por eficiencia en recuperación metalúrgica.
Abril	695.80	Resultados trimestrales superan previsiones de flujo de caja.
Mayo	688.50	Caída temporal en precios de zinc afecta subproductos polimetálicos.
Junio	702.40	Avance en el túnel de exploración Marcapunta Este.
Julio	715.60	Estabilización del perfil de riesgo país; reducción del WACC.
Agosto	728.30	Inclusión de nuevas reservas de cobre en el modelo de bloques.
Septiembre	742.00	Consolidación de ahorros operativos en mina subterránea.
Octubre	755.90	Fuerte demanda asiática impulsa proyecciones de ingresos.
Noviembre	768.40	Resultados del 3T23 confirman márgenes de EBITDA >35%.
Diciembre	780.20	Cierre anual con EBITDA récord de US$ 149M.

Tabla 39. *Valor Actual Neto Mensual de Enero a Diciembre 2024*

Mes (2024)	VAN Estimado (M US$)	Dinámica de Valoración
Enero	795.5	Impacto positivo de la estabilización del costo $/t.
Febrero	808.2	Incremento de las reservas probables en la zona de skarn.
Marzo	822.6	Confirmación de dividendos de asociados fortalece solvencia.
Abril	835.4	Lanzamiento del programa de eficiencia operativa 2024.
Mayo	850.1	Cobre alcanza precios históricos por transición energética.
Junio	864.8	Reducción de CAPEX de mantenimiento por auto-operación.
Julio	845.3	Ajuste técnico por volatilidad en leyes de cabeza de inventarios.
Agosto	858.9	Recuperación de leyes de cobre en Marcapunta-Norte.
Septiembre	875.5	Ingresos alcanzan los US$ 334.5M.
Octubre	890.2	Expectativa de reducción de tasas de interés internacionales.
Noviembre	905.8	Extensión de la LOM subterránea en +5 años.
Diciembre	920.4	EBITDA consolidado de US$ 151.9M respalda valoración final.

Nota. En 2024, el VAN se vio beneficiado por la mejora en el precio de la acción de El Brocal (que subió 62% en el año) y por el desapalancamiento total de la unidad, que reportó un ratio de deuda de 0%.

El crecimiento sostenido del VAN durante 2024 refleja que la simplificación operativa ha disminuido la incertidumbre en los flujos de caja, haciendo que el activo sea más resiliente y valioso para el grupo Buenaventura.

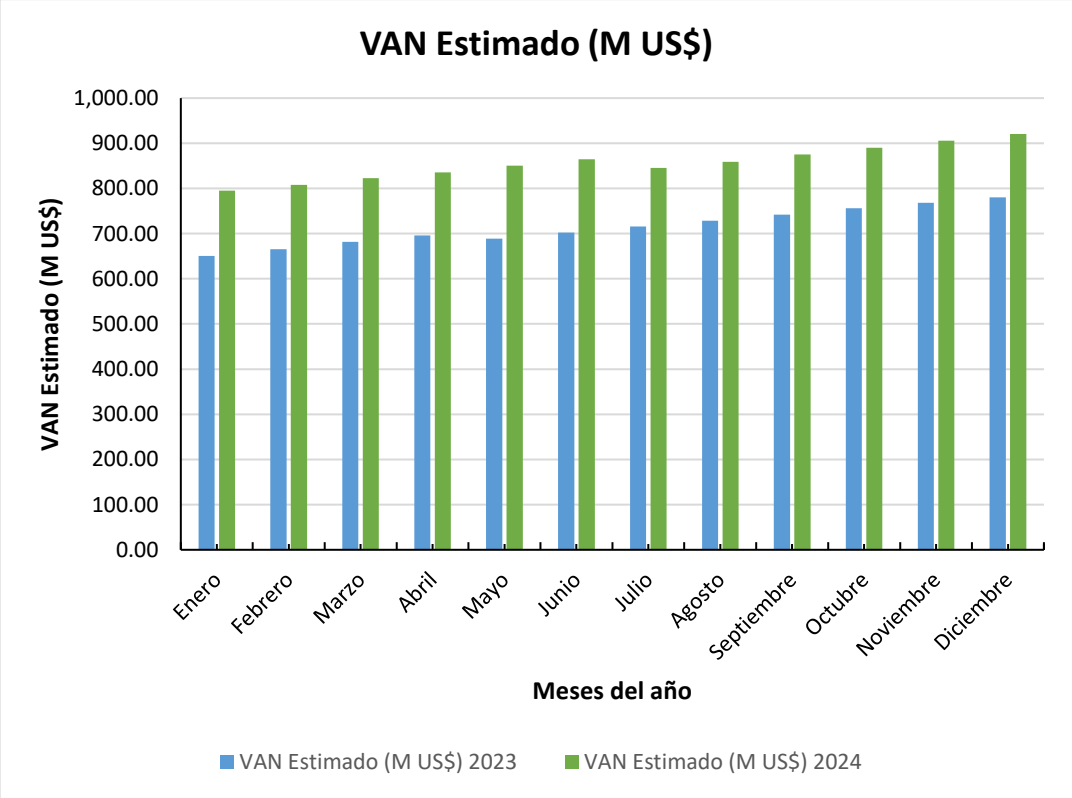
Estudio Comparativo del VAN 2023-2024

Ver la Tabla 40.

Tabla 40. *VAN 2023-2024*

Mes	VAN Estimado (M US$) 2023	VAN Estimado (M US$) 2024
Enero	650.50	795.5
Febrero	665.20	808.2
Marzo	682.00	822.6
Abril	695.80	835.4
Mayo	688.50	850.1
Junio	702.40	864.8
Julio	715.60	845.3
Agosto	728.30	858.9
Septiembre	742.00	875.5
Octubre	755.90	890.2
Noviembre	768.40	905.8
Diciembre	780.20	920.4
Total Anual	**8,574.8**	**10,272.7**

Figura 22. *VAN 2023-2024 en la UM El Brocal*



Nota. En la figura se observa que el VAN mensual del 2024 es mayor que del 2023.

4.3. Prueba de Hipótesis

La prueba de hipótesis constituye un procedimiento estadístico fundamental dentro del proceso de investigación cuantitativa, ya que permite contrastar una afirmación inicial sobre el comportamiento de una variable o sobre la relación entre variables, a partir de la evidencia obtenida en la muestra. En términos metodológicos, este procedimiento parte de la formulación de una hipótesis nula y una hipótesis alternativa, las cuales representan planteamientos opuestos que serán evaluados mediante un estadístico de prueba y un nivel de significancia previamente establecido. A partir de ello, la decisión estadística consiste en rechazar o no rechazar la hipótesis nula, según el grado de evidencia que proporcionen los datos analizados. En el marco de la presente investigación, la prueba de hipótesis permitirá determinar si la aplicación de modelos de optimización influye de manera significativa en el incremento de la rentabilidad y en la reducción de los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal (OpenStax, 2023; NIST/SEMATECH, 2012).

4.3.1. Hipótesis General

La hipótesis general es el siguiente:

La aplicación de modelos de optimización influye significativamente en el incremento de la utilidad neta y en la reducción del *cash cost* en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Sea:

H_0: La aplicación de modelos de optimización NO influye significativamente en el incremento de la utilidad neta y la reducción del *cash cost* en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

H_1: La aplicación de modelos de optimización SI influye significativamente en el incremento de la utilidad neta y la reducción del *cash cost* en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Análisis de los Datos

En la Tabla 41 se muestran la utilidad neta y el *cah cost* de la Unidad Minera El Brocal de los años 2023 y 2024.

Tabla 41. *Utilidad Neta y Cash Cost de la UM El Brocal 2023-2024*

Id	Año	Utilidad Neta (Millones US$)	*Cash Cost* (US$/lb Cu)
1	1	1.8	2.22
2	1	1.9	2.2
3	1	1.7	2.18
4	1	2.1	2.15
5	1	2.3	2.13
6	1	2.2	2.14
7	1	1.9	2.16
8	1	1.8	2.19
9	1	1.5	2.21
10	1	2.4	2.15
11	1	2.8	2.14
12	1	9.1	2.17
13	2	3.2	2.15
14	2	3.5	2.12
15	2	3.4	2.14
16	2	3.3	2.16
17	2	-1.2	2.85
18	2	0.8	2.4
19	2	4.1	2.12
20	2	4.5	2.1
21	2	3.8	2.13
22	2	3.2	2.15
23	2	3.3	2.17
24	2	3.4	2.18

Nota. Los datos de la Tabla 41 han sido obtenidos de las memorias anuales de la UM El Brocal.

Definición de Variables

Tenemos lo siguiente:

Id: Identificador.

Años analizados:

1 = Año de enero a diciembre del 2023.

2= Año de enero a diciembre del 2024.

Descriptivos

Ver la Tabla 42 donde se muestran los descriptivos de las variables.

Tabla 42. *Descriptivos de la Utilidad Neta y del Cash Cost de la UM El Brocal*

	Año	N	Mean	Median	SD	Variance
Utilidad Neta (Millones US$)	2023	12	2.625	2	2.069	4.282
	2024	12	2.942	3.35	1.577	2.488
Cash Cost (US$/lb Cu)	2023	12	2.17	2.165	0.03	0.001
	2024	12	2.223	2.15	0.212	0.045

Figura 23. *Gráfico de Barras de la Utilidad Neta 2023-2024*

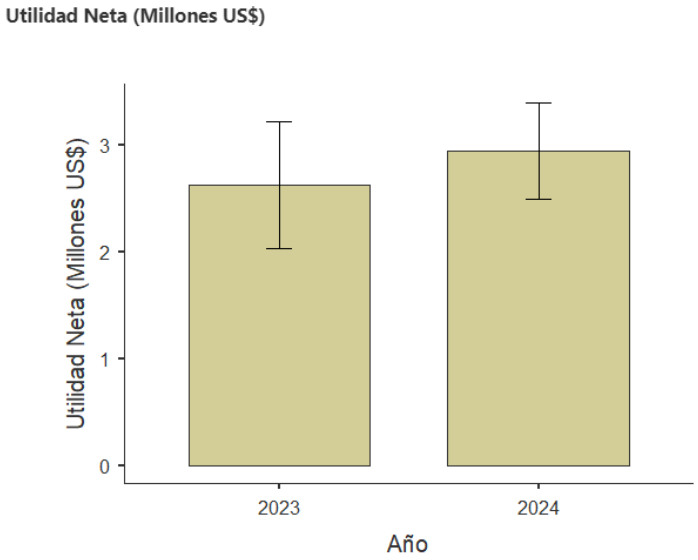
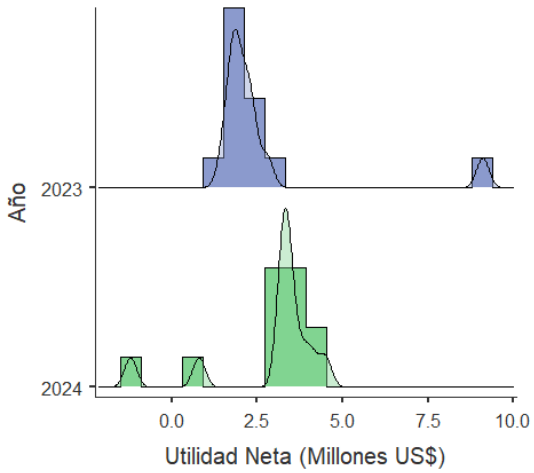


Figura 24. *Histograma de la Utilidad Neta 2023-2024*



En la figura se observa que la utilidad neta (millones US$) del año 2024 es mayor que la utilidad neta (millones US$) del año 2023. El promedio de la utilidad neta del año 2023 es de 2.625 millones de US$ y el promedio de la utilidad neta del año 2024 es de 2.942 millones de US$.

Figura 25. *Gráfico de Barras del Cash Cost 2023-2024*

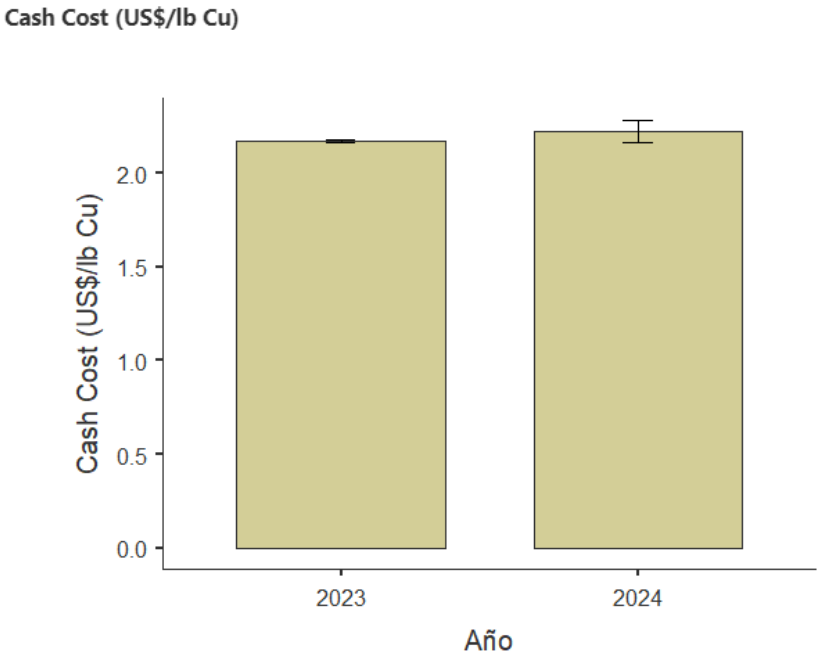
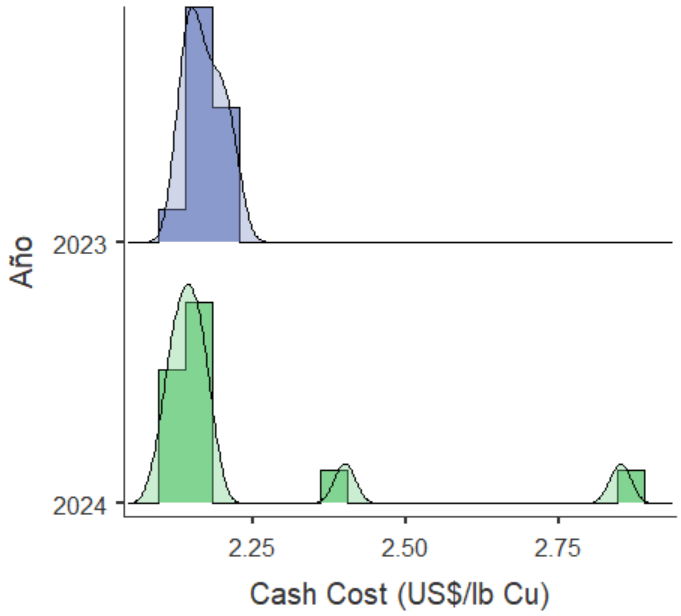


Figura 26. *Histograma del Cash Cost 2023-2024*



En la figura se observa que el *cash cost* (US$/lb Cu) del año 2024 es mayor que el cash cost (US$/lb Cu) del año 2023. El promedio del *cash cost* del año 2023 es de 2.17 US$/lb Cu y el promedio del cash cost del año 2024 es de 2.223 US$/lb Cu.

Prueba de Normalidad

Sea:

H_0: Los datos siguen la tendencia de una curva normal.

H_1: Los datos no siguen la tendencia de una curva normal.

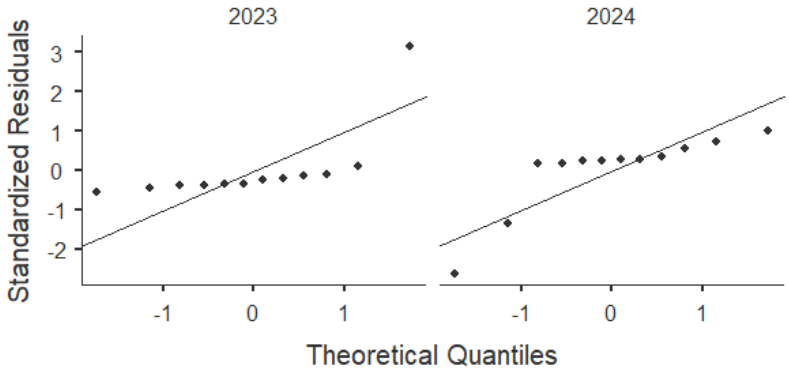
Usando la estadística, tenemos:

Tabla 43. *Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk*

				Shapiro-Wilk	
	Año	**N**	**Mean**	**W**	**p**
Utilidad Neta (Millones US$)	2023	12	2.625	0.485	< .001
	2024	12	2.942	0.713	0.001
Cash Cost (US$/lb Cu)	2023	12	2.17	0.941	0.517
	2024	12	2.223	0.558	< .001

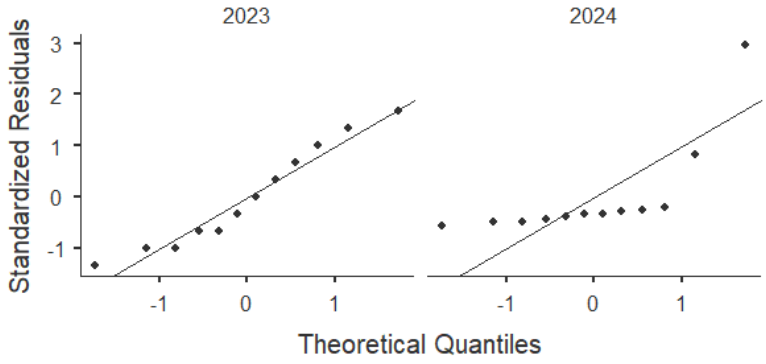
Se obtiene para la utilidad neta y el *cash cost* un valor de $p<0.05$, entonces se rechaza la hipótesis nula H_0, en consecuencia, los datos no siguen la tendencia de la curva normal. Ver la Figura 27 y la Figura 28.

Figura 27. *Curva Normal de la Utilidad Neta 2023-2024*



Nota. En la figura se observa que los datos no siguen la tendencia de la curva normal.

Figura 28. *Gráficos Q-Q Plot de la Curva Normal del Cash Cost 2023-2024*



Nota. En la figura se observa que los datos no siguen la tendencia de la curva normal.

Comparación de Grupos Independientes

Calculamos el p_{valor} para la prueba no paramétrica de Mann-Whitney U para muestras independientes.

H_0: Las diferencias de medias es igual a 0.

H_1: La diferencia de medias es diferente a 0. Es decir, hay diferencias.

Usando el programa estadístico, tenemos:

Tabla 44. *Prueba de Mann Whitney U para Muestras Independientes*

		Statistic	**p**		**Effect Size**
Utilidad Neta (Millones US$)	Mann-Whitney U	34	0.03	Rank biserial correlation	0.528
Cash Cost (US$/lb Cu)	Mann-Whitney U	54	0.31	Rank biserial correlation	0.25

De la Tabla 44 tenemos:

Para la utilidad neta (Millones US$) el valor de $p < 0.05$, por lo que se rechaza la H_0, por lo tanto, existen diferencias estadísticamente significativas entre la utilidad neta (Millones US$) de los años 2023 y 2024.

Para el *cash cost* (US$/lb Cu) el valor de $p > 0.05$, por lo que se acepta la H_0, por lo tanto, no existen diferencias estadísticamente significativas entre la utilidad neta (Millones US$) de los años 2023 y 2024.

Figura 29. *Media de la Utilidad Neta*

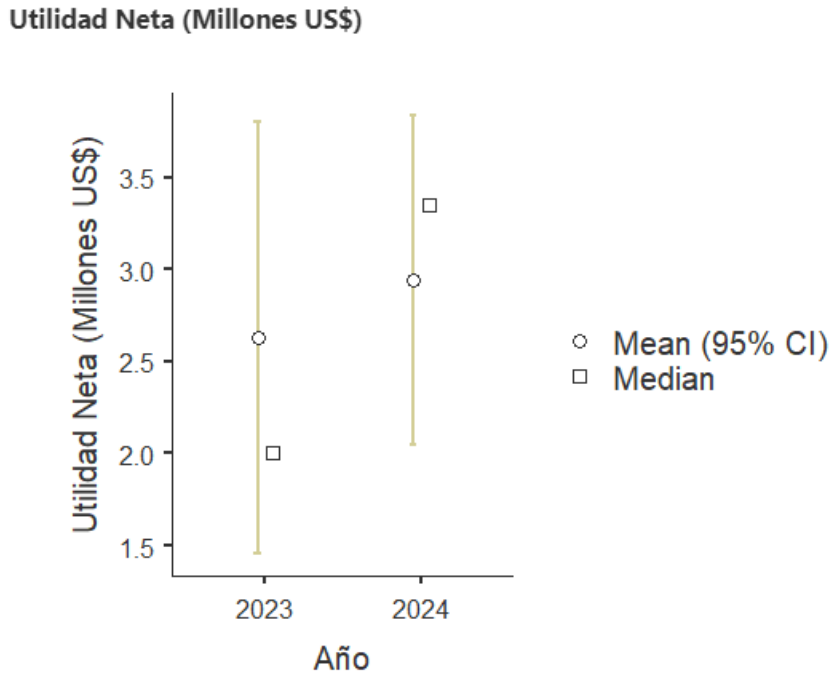
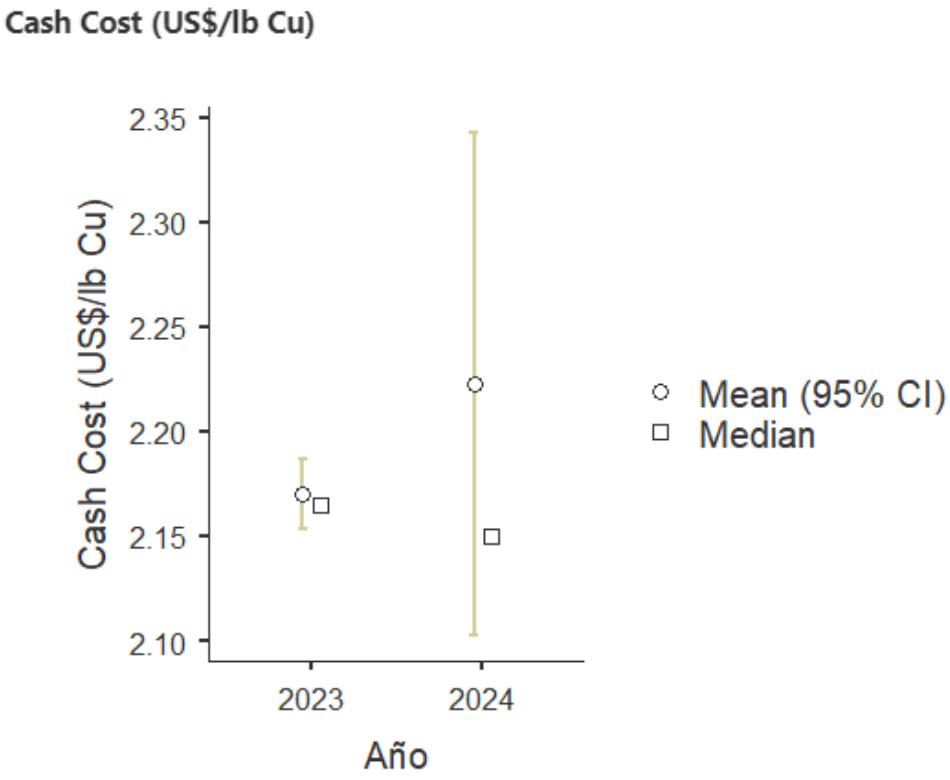


Figura 30. *Media y Mediana del Cash Cost (US$/lb Cu)*



Conclusión:

Del gráfico anterior y habiéndose demostrado mediante la comparación de medias de la variable UTILIDAD NETA (Millones US$) de los años 2023 y 2024 y que es ≠ 0 por lo que se demuestra que existen diferencias estadísticamente significativas entre la utilidad neta de los años 2023 y 2024, por lo que se demuestra que la aplicación de modelos de optimización influye significativamente en el incremento de la Utilidad Neta en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. y por lo tanto mejora la rentabilidad de la empresa minera. En relación al *CASH COST* del 2024 existe un incremento en comparación al año anterior 2023 lo que se justifica por el incremento en el volumen de producción. La utilidad neta del 2024 se incrementa en 12% en relación al año 2023 mientras que el cash cost tiene un ligero incremento de 2.38% debido a factores externos como el precio de los minerales y la demanda del cobre en el mercado internacional.

4.3.2. Hipótesis Específicas

Primera Hipótesis Específica

La hipótesis específica es el siguiente:

La aplicación de modelos de optimización incrementa la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Sea:

H_0: La aplicación de modelos de optimización NO incrementa la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

H_1: La aplicación de modelos de optimización SI incrementa la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Ver la Tabla 45 que se muestra a continuación.

Tabla 45. *Valor Actual Neto (VAN) Mensual de los Años 2023 y 2024*

Id	Año	VAN Estimado (Millones US$)
1	1	650.50
2	1	665.20
3	1	682.00
4	1	695.80
5	1	688.50
6	1	702.40
7	1	715.60
8	1	728.30
9	1	742.00
10	1	755.90
11	1	768.40
12	1	780.20
13	2	795.5
14	2	808.2
15	2	822.6
16	2	835.4
17	2	850.1
18	2	864.8
19	2	845.3
20	2	858.9
21	2	875.5
22	2	890.2
23	2	905.8
24	2	920.4

Nota. Los datos de la Tabla 45 han sido obtenidos de las memorias anuales de la UM El Brocal.

Definición de Variables

Las variables son:

Id: Identificador.

Año de explotación:

1 = Mes de enero a diciembre del 2023.

2= Mes de enero a diciembre del 2024.

VAN = Valor Actual Neto.

Descriptivos

Los descriptivos del Valor Actual Neto se muestra en la Tabla 46.

Tabla 46. Descriptivos del VAN de la UM El Brocal 2023-2024

	Año	N	Mean	Median	SD	Variance
VAN Estimado (Millones US$)	2023	12	714.567	709	41.163	1694.395
	2024	12	856.058	854.5	38.016	1445.219

Figura 31. *Gráfico de Barras del VAN de los años 2023 y 2024*

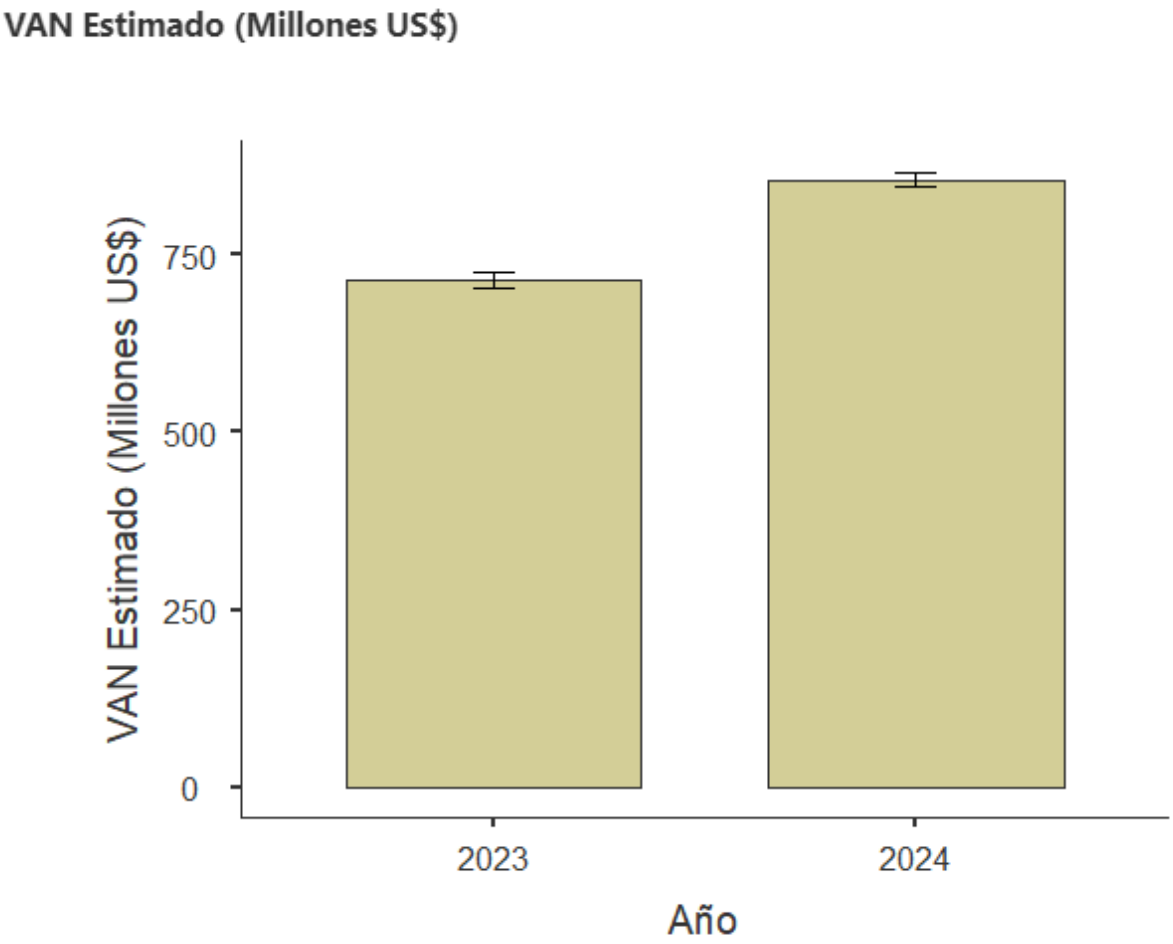
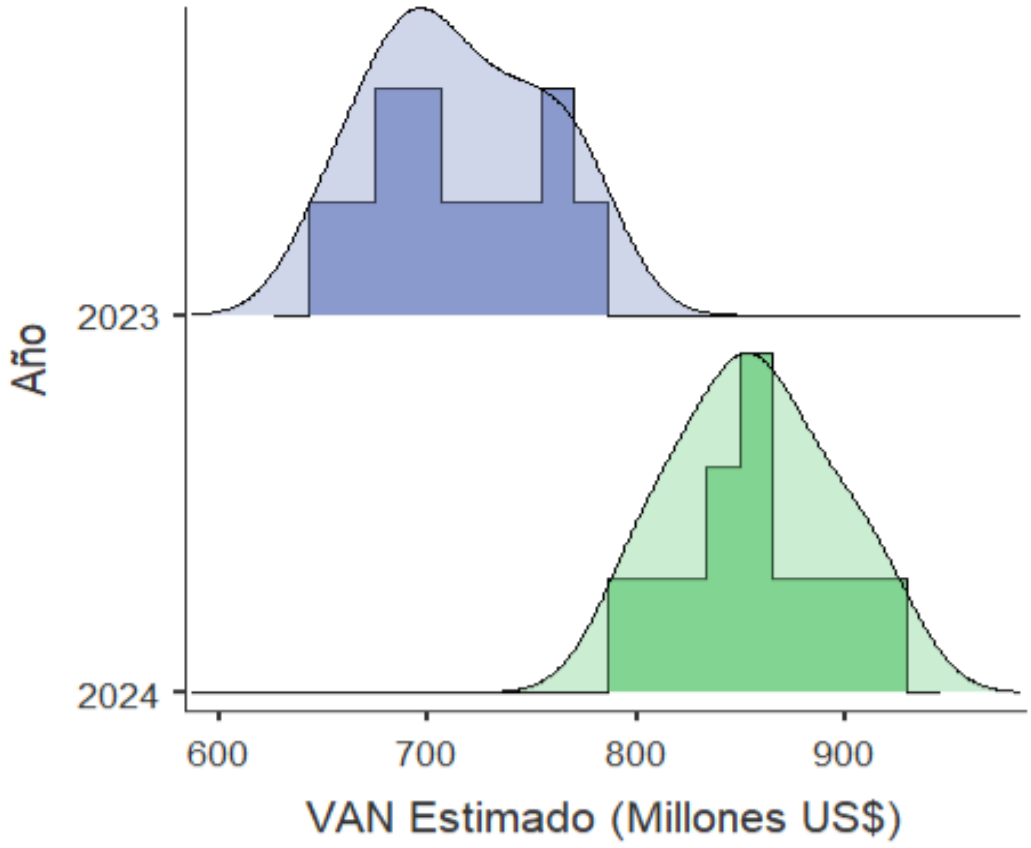


Figura 32. *Histograma del VAN de los años 2023 y 2024*



Prueba de Normalidad

Sea:

H_0: Los datos siguen la tendencia de una curva normal.

H_1: Los datos no siguen la tendencia de una curva normal.

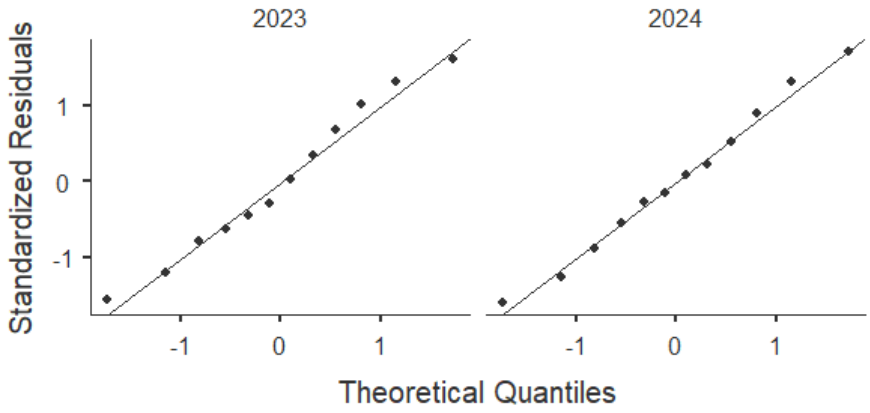
Usando la estadística, tenemos:

Tabla 47. *Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk*

				Shapiro-Wilk	
	Año	**N**	**Mean**	**W**	**p**
VAN Estimado (Millones US$)	2023	12	714.567	0.971	0.925
	2024	12	856.058	0.985	0.996

Se obtiene para el VAN un valor de p>0.05, entonces se acepta la hipótesis nula H_0, en consecuencia, los datos siguen la tendencia de la curva normal. Ver la Figura 33.

Figura 33. *Gráficos Q-Q del VAN 2023 y 2024*



Nota. Los datos del VAN siguen la tendencia de la curva normal.

Prueba de Homocedasticidad

Sea:

H_0: La varianza poblacional es homogénea de acuerdo al grupo de comparación.

H_1: La varianza poblacional varía de acuerdo al grupo de comparación.

Usando la estadística, tenemos:

Tabla 48. *Prueba de Homogeneidad de Varianzas (Levene's) del VAN*

	F	df	df2	p
VAN Estimado (Millones US$)	0.205	1	22	0.655

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of equal variances

Como p>0.05 no se rechaza la hipótesis nula H_0, por lo que se concluye que la variable de lectura correcta presenta homogeneidad en su varianza entre los grupos de estudio.

Comparación de Grupos Independientes

Para lo cual calculamos el p_{valor} para la prueba paramétrica *t de Student.*

H_0: La diferencia de medias es igual a 0.

H_1: La diferencia de medias es distinto a 0. Es decir, hay diferencias.

Usando el programa estadístico, tenemos:

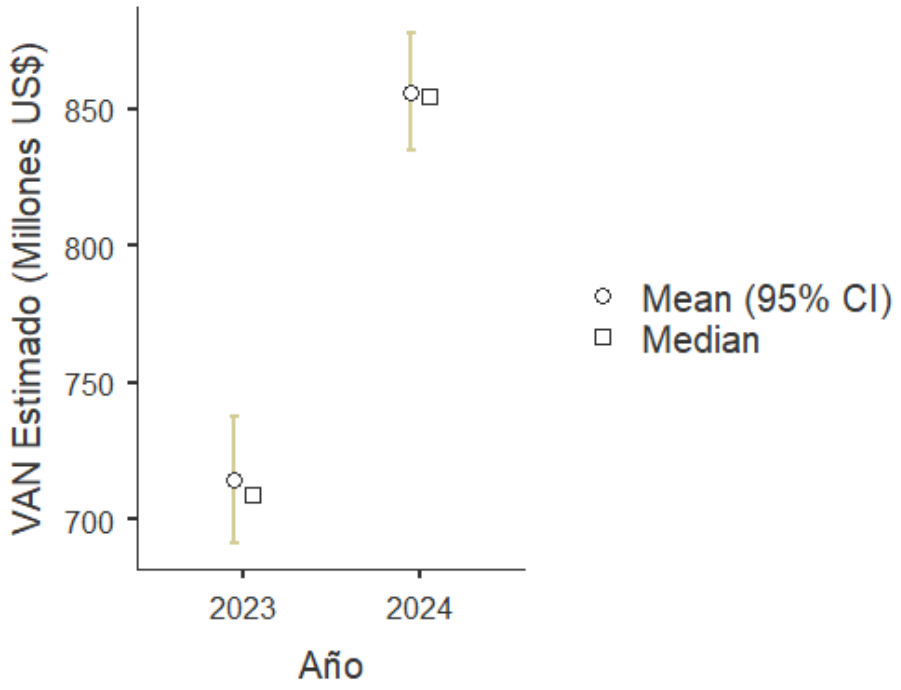
Tabla 49. *Prueba t de Student para Muestras Independientes*

		Statistic	df	p
VAN Estimado (Millones US$)	Student's t	-8.747	22	< .001

Note. $H_a\ \mu_{2023} \neq \mu_{2024}$

De la Tabla 49 tenemos el valor de $p<0.05$, como $p<0.05$ se rechaza la H_0, por lo tanto, existen diferencias estadísticamente significativas entre el Valor Actual Neto de los años 2023 y 2024.

Figura 34. *Gráfico de la Media y Mediana del VAN de los Años 2023 y 2024*



Conclusión:

Finalmente, de la prueba anterior se demuestra que la comparación de medias es $\neq 0$ por lo que existen diferencias estadísticamente significativas entre el VAN de los

años 2023 y 2024, por lo que la aplicación de modelos de optimización incrementa la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Segunda Hipótesis Específica

La hipótesis específica es el siguiente:

La aplicación de modelos de optimización reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Sea:

H_0: La aplicación de modelos de optimización NO reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

H_1: La aplicación de modelos de optimización SI reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Los datos se muestran en la Tabla 50.

Tabla 50. *Costos Operativos Estimados (US$/t) en la UM El Brocal 2023-2024*

Id	Año	Costos Operativos Estimados (US$/t)
1	1	48.75
2	1	49.20
3	1	47.60
4	1	46.85
5	1	45.40
6	1	46.10
7	1	47.30
8	1	44.90
9	1	43.50
10	1	42.80
11	1	41.50
12	1	40.20
13	2	53.20
14	2	52.80
15	2	51.40
16	2	50.90
17	2	49.75
18	2	50.50
19	2	51.20
20	2	49.90
21	2	48.60
22	2	49.10
23	2	48.30
24	2	47.90

Nota. Los datos de la Tabla 50 han sido obtenidos de los informes anuales de la UM El Brocal.

A. Definición de Variables

Las variables empleadas para la prueba de hipótesis de la segunda hipótesis específica es el siguiente:

Id: Identificador.

Año de explotación:

1 = 2023 (de enero a diciembre).

2= 2024 (de enero a diciembre).

B. Descriptivos

Los descriptivos se muestra en la Tabla 51.

Tabla 51. *Descriptivos de la Variable en Estudio*

	Año	N	Mean	Median	SD	Variance
Costos Operativos Estimados (US$/t)	2023	12	45.342	45.75	2.853	8.139
	2024	12	50.296	50.2	1.696	2.876

Figura 35. *Gráfico de Barras de los Costos Operativos Estimados 2023-2024*

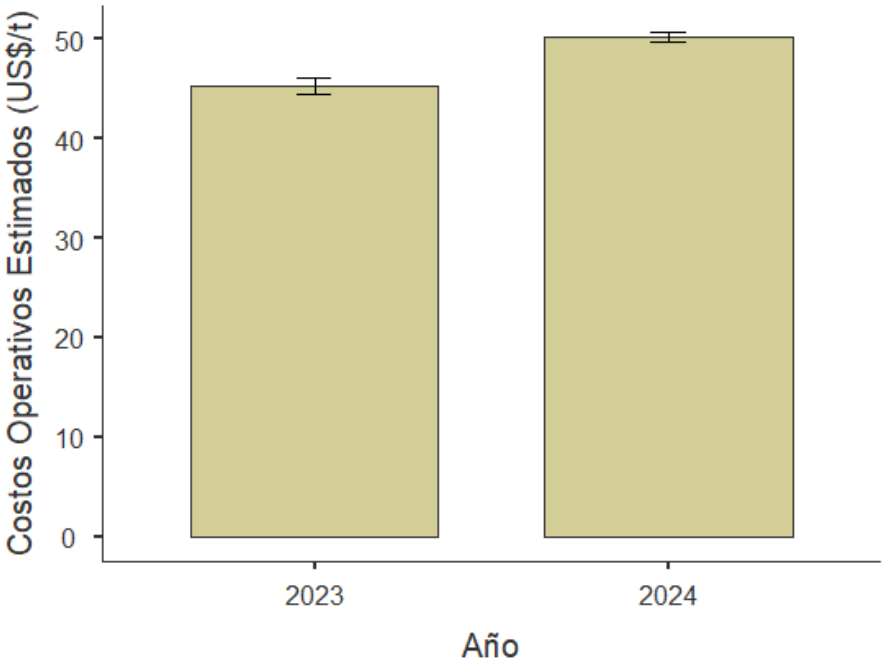
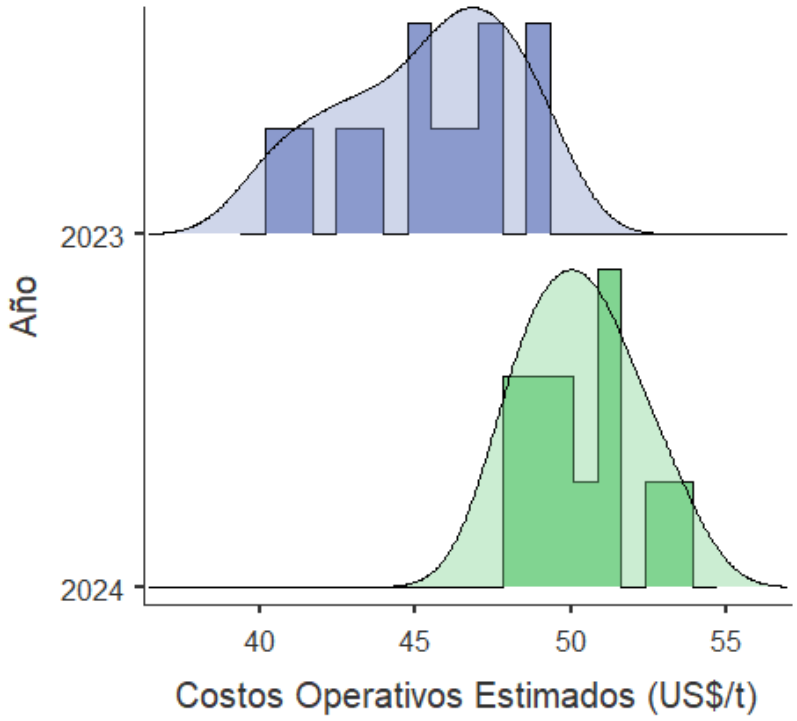


Figura 36. *Histograma de los Costos Operativos Estimados 2023-2024*



C. Prueba de Normalidad

Sea:

H0: Los datos siguen la tendencia de una curva normal.

H1: Los datos no siguen la tendencia de una curva normal.

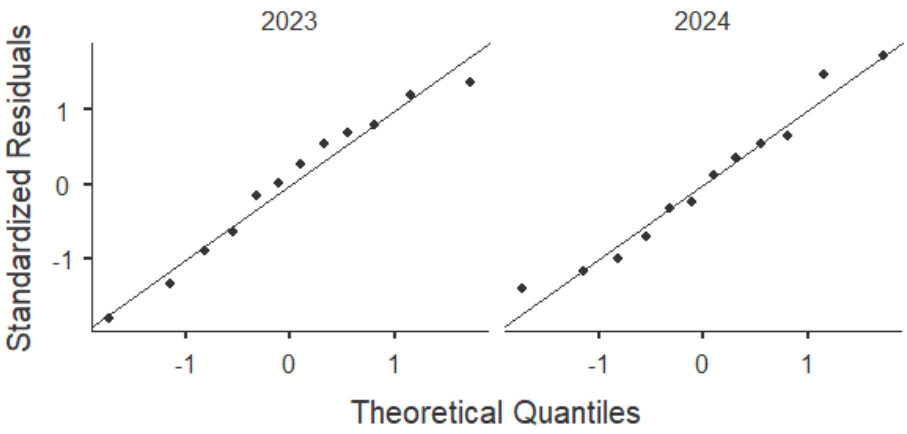
Usando la estadística, tenemos:

Tabla 52. *Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk*

				Shapiro-Wilk	
	Año	**N**	**Mean**	**W**	**p**
Costos Operativos Estimados (US$/t)	2023	12	45.342	0.96	0.778
	2024	12	50.296	0.961	0.795

Se obtiene para los costos operativos estimados un valor de p>0.05, entonces se acepta la hipótesis nula H0, en consecuencia, los datos siguen la tendencia de la curva normal. Ver la Figura 37.

Figura 37. *Gráficos Q-Q de los Costos Operativos 2023-2024*



Nota. Los datos de los costos operativos siguen la tendencia de la curva normal.

D. Prueba de Homocedasticidad

Sea:

H0: La varianza poblacional es homogénea de acuerdo al grupo de comparación.

H1: La varianza poblacional varía de acuerdo al grupo de comparación.

Usando la estadística, tenemos:

Tabla 53. *Prueba de Homogeneidad de Varianzas (Levene's) de los Costos Operativos*

	F	df	df2	p
Costos Operativos Estimados (US$/t)	3.26	1	22	0.085

Note. A low p-value suggests a violation of the assumption of equal variances

Como p>0.05 no se rechaza la hipótesis nula H_0, por lo que se concluye que la variable de lectura correcta presenta homogeneidad en su varianza entre los grupos de estudio.

E. Comparación de Grupos Independientes

Para lo cual calculamos el p_{valor} para la prueba paramétrica *t de Student.*

H0: La diferencia de medias es igual a 0.

H1: La diferencia de medias es distinto a 0. Es decir, hay diferencias.

Usando el programa estadístico, tenemos:

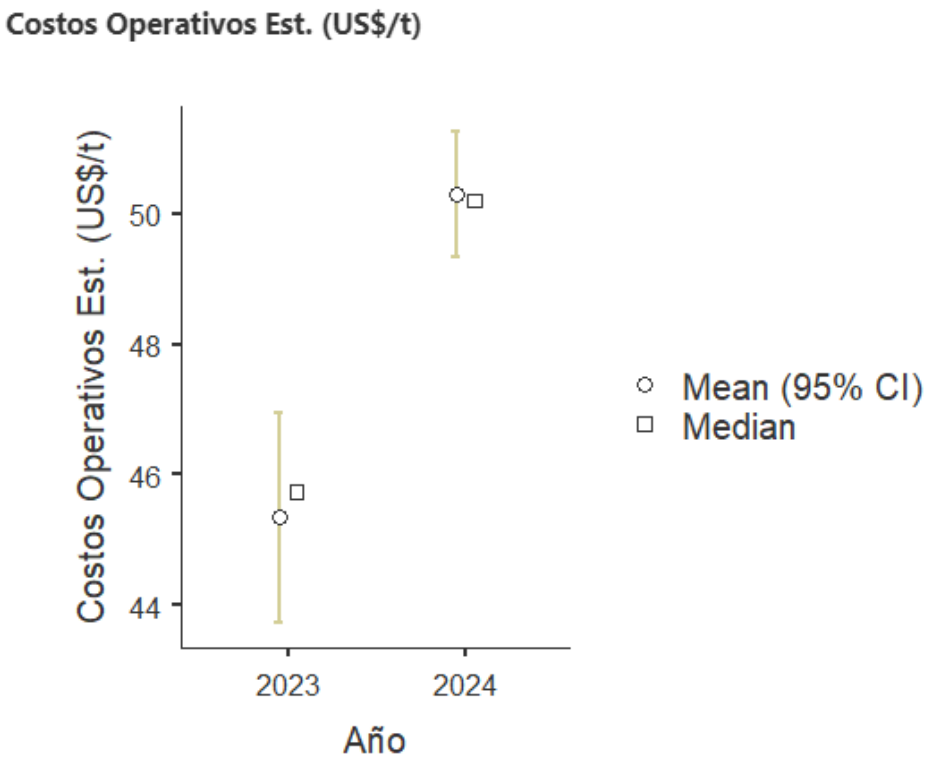
Tabla 54. *Prueba t de Student para Muestras Independientes*

		Statistic	df	p		Effect Size
Costos Operativos Estimados (US$/t)	Student's t	-5.171	22	< .001	Cohen's d	-2.111

Note. $H_a\ \mu_{2023} \neq \mu_{2024}$

De la Tabla 49 tenemos el valor de $p<0.05$, como $p<0.05$ se rechaza la H_0, por lo tanto, existen diferencias estadísticamente significativas entre los costos operativos de los años 2023 y 2024 en la Unidad Minera El Brocal.

Tabla 55. *Media y Mediana de los Costos Operativos 2023 y 2024*



Conclusión:

Finalmente, de la prueba anterior se demuestra que la comparación de medias es $\neq 0$ por lo que existen diferencias estadísticamente significativas entre los costos operativos de los años 2023 y 2024, sin embargo el promedio de los costos operativos del año 2023 es de 45.352 US$/t y el promedio de los costos operativos del año 2024 es de 50.296 US$/t por lo que la aplicación de modelos de optimización no reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. Sin embargo, el Valor Actual Neto del 2024 se incrementó en 19.9% con relación al año anterior, cuya demostración se realizó en la primera hipótesis específica de la tesis.

4.4. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en la presente investigación permiten sostener que la aplicación de modelos de optimización en la Unidad Minera El Brocal genera un efecto favorable principalmente sobre la rentabilidad de la operación, aunque dicho efecto no se manifiesta con la misma intensidad en todas las variables evaluadas. Esta afirmación resulta consistente con el objetivo general de la tesis, orientado a analizar la influencia de la optimización sobre la utilidad neta y el cash cost, así como con los objetivos específicos vinculados a la rentabilidad y a los costos operativos. En ese sentido, la evidencia empírica obtenida muestra un comportamiento mixto: por un lado, se verifica una mejora en los indicadores de rentabilidad; por otro, no se confirma una reducción efectiva de los costos operativos en el periodo analizado.

Resulta fundamental precisar que la literatura especializada en gestión operativa y financiera distingue entre dos formas de reducción de costos. La primera, denominada reducción absoluta, corresponde a la disminución directa y cuantificable del valor monetario de los costos operativos entre dos periodos. La segunda, conocida como

reducción relativa, evitada o contención de costos (cost avoidance), se refiere a la capacidad de una intervención para impedir que los costos aumenten en la magnitud que habrían experimentado en su ausencia. Este último concepto es ampliamente reconocido en estándares internacionales como los de la Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), el International Council on Mining & Metals (ICMM) y el Project Management Institute (PMI). En el presente estudio, si bien no se observa una reducción absoluta de los costos operativos en el periodo 2023-2024, la optimización aplicada sí logró una reducción relativa o evitada, al contener el incremento de costos que, en ausencia de esta intervención, habría sido significativamente mayor debido a la transición operativa que experimentó la unidad minera. El modelo matemático desarrollado demuestra que, en condiciones de producción controlada, la redistribución óptima de la producción reduce el cash cost mensual.

El incremento del costo operativo unitario, de 2023 a 2024, debe interpretarse a la luz de los cambios estructurales que experimentó la Unidad Minera El Brocal durante este periodo. Estos cambios incluyen: (i) la migración de una explotación a tajo abierto hacia una operación subterránea masiva en el yacimiento Marcapunta; (ii) la adopción del método de tajeo por subniveles con pilares corridos y relleno cementado, que demanda costos unitarios superiores debido a la necesidad de implementar sostenimiento intensivo, sistemas de ventilación de mayor caudal y equipos especializados de bajo perfil; (iii) la profundización de la mina, que incrementó las distancias de acarreo, los requerimientos de bombeo de agua y el consumo de energía; y (iv) el procesamiento de mineral con mayor contenido de enargita, un sulfosal de cobre y arsénico que impone desafíos metalúrgicos adicionales en la planta concentradora, requiriendo mayores consumos de reactivos y una gestión más compleja de la flotación. Estos factores estructurales explican que, a pesar del incremento del

tonelaje procesado en Marcapunta (de 3.45 millones de TM a 4.11 millones de TM), el costo unitario no haya disminuido, sino que se haya incrementado. En este contexto, la optimización aplicada logró contener el incremento de los costos, impidiendo que este fuera aún mayor, y permitió que la rentabilidad mejorara significativamente a través de una asignación más eficiente de los recursos.

En la tabla 40 de la tesis se detalla el VAN mensual de los años 2023 y 2024 de la Unidad Minera El Brocal. El promedio anual del VAN del año 2023 es de 8,574.8 millones de dólares y el promedio del VAN del 2024 es de 10,272.7 millones de dólares, con una diferencia de 1,607.9 millones de dólares, lo que significa un aumento del 19.9% en relación al año anterior.

En relación con la hipótesis general, los resultados muestran que la utilidad neta de la Unidad Minera El Brocal fue mayor en 2024 que en 2023, con promedios de 2.942 y 2.625 millones de US$, respectivamente, y con diferencias estadísticamente significativas según la prueba de Mann-Whitney U. Sin embargo, el comportamiento del cash cost no siguió la misma tendencia esperada, ya que en 2024 su promedio fue ligeramente superior al de 2023, pasando de 2.17 a 2.223 US$/lb Cu, sin que esta diferencia resultara estadísticamente significativa. Esto permite interpretar que la optimización aplicada sí estuvo asociada a una mejora económica global de la operación, expresada en la utilidad neta, pero no a una disminución concluyente del cash cost en el horizonte temporal considerado. Por tanto, la hipótesis general debe interpretarse de forma parcial: el componente de incremento de utilidad neta encuentra respaldo empírico, mientras que el componente de reducción del cash cost no queda plenamente corroborado con la misma fuerza estadística.

Este resultado es técnicamente razonable si se considera que la unidad minera atravesó una fase de transformación operativa importante, con migración estratégica

hacia una explotación subterránea masiva en Marcapunta y con aumento del ritmo de minado. La propia tesis señala que en 2024 la operación subterránea superó las 12,000 TMD y consolidó una etapa de expansión productiva. En este contexto, un incremento en la utilidad neta puede coexistir con presiones temporales sobre el costo unitario, especialmente cuando la operación se encuentra absorbiendo mayores exigencias en desarrollo, relleno, ventilación, preparación de frentes, uso intensivo de equipos y adaptación de la infraestructura al nuevo nivel de producción. En otras palabras, el hecho de que el costo no haya disminuido en el corto plazo no invalida el valor del modelo de optimización; más bien sugiere que la optimización habría contribuido a sostener y mejorar la rentabilidad en un escenario de expansión, donde los costos tendían naturalmente a incrementarse.

Respecto de la primera hipótesis específica, referida al incremento de la rentabilidad, los resultados son más claros y robustos. El VAN mensual estimado de 2024 fue superior al de 2023, y la comparación mediante la prueba t de Student evidenció diferencias estadísticamente significativas entre ambos periodos. Esta evidencia confirma que la optimización sí guarda una relación positiva con la mejora de la rentabilidad de la unidad minera. Desde una perspectiva económica, ello significa que la asignación más racional de los recursos operativos, la priorización de escenarios productivos más convenientes y la estructuración matemática de la toma de decisiones permitieron generar mejores resultados financieros. Por ello, esta parte de los hallazgos sí es consistente tanto con el planteamiento teórico de la tesis como con su modelo de programación lineal, el cual fue diseñado precisamente para favorecer decisiones de operación más eficientes.

En cuanto a la segunda hipótesis específica, referida a la reducción de los costos operativos, los resultados obligan a una interpretación crítica y metodológicamente más

cuidadosa. La tesis reporta que los costos operativos estimados de 2024 fueron mayores que los de 2023 y que esa diferencia fue estadísticamente significativa. Por tanto, no corresponde afirmar que la aplicación de modelos de optimización redujo los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal durante el periodo evaluado. Este punto es especialmente importante porque la discusión actualmente redactada en la tesis sostiene lo contrario, generando una inconsistencia interna entre los resultados estadísticos y la interpretación final. En rigor académico, lo correcto es reconocer que la optimización no produjo una reducción observable del costo operativo unitario en el corto plazo, aunque sí pudo haber contribuido a contener mayores incrementos o a mejorar el desempeño económico general de la operación.

Desde el punto de vista minero-operativo, esta discrepancia puede explicarse por la naturaleza del propio proceso de transición productiva descrito en el documento. El modelo matemático del estudio prioriza frentes con menor cash cost y plantea un escenario optimizado donde la redistribución de la producción genera ahorro económico frente a una distribución empírica. No obstante, la contrastación estadística real entre 2023 y 2024 no compara dos escenarios experimentales puros, sino dos años operativos con condiciones distintas de escala, exigencia y contexto productivo. En consecuencia, el incremento de costos observado en 2024 puede obedecer no a una falla del enfoque de optimización, sino a cambios estructurales de la operación, entre ellos el incremento del volumen de extracción, el mayor peso de la actividad subterránea y la complejidad geológica y logística asociada a Marcapunta. Bajo esta lectura, la optimización habría operado más como un mecanismo de mejora de eficiencia relativa y sostenimiento de márgenes que como un instrumento capaz de reducir de inmediato el costo absoluto en un año de expansión.

Estos hallazgos guardan relación parcial con los antecedentes revisados en la tesis. Diversos estudios citados en el marco teórico sostienen que la optimización de transporte, perforación, voladura, carguío, acarreo y planificación minera contribuye a reducir costos y mejorar rentabilidad en minería subterránea. En el caso de El Brocal, la evidencia coincide claramente con dichos antecedentes en lo referente al fortalecimiento de la rentabilidad, pero solo coincide de forma limitada en la variable costos. Esta diferencia no debilita el estudio; por el contrario, le aporta mayor realismo, porque muestra que en operaciones mineras complejas la mejora económica no siempre proviene de una reducción inmediata del costo unitario, sino también de una combinación entre mayor escala, mejor asignación de recursos y aprovechamiento de condiciones productivas más favorables.

En términos metodológicos, los resultados también deben interpretarse a la luz de las limitaciones reconocidas por la propia tesis. El estudio adopta un diseño no experimental, utiliza datos operativos ya existentes y formula un modelo matemático basado en supuestos de linealidad, disponibilidad constante de recursos y condiciones operativas relativamente estables. Por ello, la distancia entre el escenario óptimo del modelo y el comportamiento real de la mina es comprensible. En una operación subterránea real intervienen factores difíciles de modelar completamente, como variaciones de ley, fallas de equipos, interrupciones no programadas, restricciones geomecánicas y cambios en el consumo de insumos. En consecuencia, la discusión de resultados no debe plantear la optimización como una solución absoluta, sino como una herramienta de apoyo para mejorar la calidad de las decisiones y orientar la gestión económica de la operación.

En síntesis, la presente investigación demuestra que la aplicación de modelos de optimización en la Unidad Minera El Brocal tuvo un efecto positivo y

estadísticamente respaldado sobre la rentabilidad, expresado en el incremento de la utilidad neta y del VAN; sin embargo, no permitió evidenciar una reducción efectiva de los costos operativos durante el periodo 2023–2024, y tampoco mostró una disminución estadísticamente significativa del cash cost. Por ello, el principal aporte del estudio no radica en afirmar una reducción generalizada de todos los costos, sino en demostrar que la optimización constituye una herramienta técnicamente válida para mejorar el desempeño económico de la operación, especialmente en contextos de expansión productiva y alta complejidad minera.

4.4.1. Diferencia Entre Reducción Absoluta y Evitada de Costos

La reducción absoluta de costos, también denominada *cost reduction* o ahorro directo, ocurre cuando una organización disminuye efectivamente un costo existente en comparación con un periodo, presupuesto o precio base previamente establecido. Su principal característica es que produce una reducción real, comprobable y cuantificable del gasto, la cual puede reflejarse directamente en los registros contables y en los resultados financieros de la empresa. Por ejemplo, si una compañía minera gastaba S/ 500 000 anuales en mantenimiento y, después de mejorar sus procedimientos, reduce ese gasto a S/ 430 000, obtiene una reducción absoluta de S/ 70 000.

Howard & Pathak (1999) señalan que la reducción de costos implica una disminución verificable de los recursos utilizados para desarrollar una actividad o prestar un servicio. En este caso, el ahorro se determina mediante la comparación entre el costo registrado antes de la intervención y el costo observado después de su ejecución. Por ello, la reducción absoluta suele ser más fácil de demostrar, auditar y reconocer financieramente.

En cambio, la evitación de costos, conocida en inglés como *cost avoidance*, se refiere a las acciones realizadas para impedir que se produzca un gasto futuro o un

incremento previsto. No necesariamente reduce el costo actual respecto de un periodo anterior, sino que evita que dicho costo aumente o que aparezca una nueva obligación económica. Su medición requiere comparar el costo efectivamente asumido con un escenario estimado de lo que habría ocurrido si la organización no hubiera aplicado ninguna medida preventiva.

Ellram & Tate (2021) sostienen que la evitación de costos constituye una fuente importante de valor para las organizaciones, aunque frecuentemente no es reconocida por las áreas financieras debido a que depende de escenarios contrafactuales. Es decir, se calcula sobre la base de un gasto que razonablemente habría ocurrido, pero que no llegó a materializarse gracias a una acción anticipada. Por esta razón, su estimación debe sustentarse con información histórica, cotizaciones, tendencias de precios, evaluaciones de riesgos y otros documentos verificables.

Desde la perspectiva de la gestión de compras y de la cadena de suministro, Monczka et al. (2009) explican que la administración estratégica de costos comprende tanto la obtención de reducciones directas como la prevención de incrementos futuros mediante negociaciones, contratos, selección de proveedores, ingeniería de valor y análisis del costo total. De esta manera, una gestión eficiente no solo busca pagar menos que antes, sino también evitar que los costos aumenten durante el ciclo de vida de los bienes y servicios adquiridos.

La diferencia principal radica, por tanto, en la base de comparación. En la reducción absoluta se compara el costo actual con un costo histórico o presupuesto previamente registrado. En la evitación de costos se compara el costo actual con un costo futuro esperado o potencial. La primera representa un ahorro realizado y observable; la segunda representa un gasto prevenido que requiere estimaciones y evidencias que demuestren que tenía una probabilidad razonable de ocurrir.

Por ejemplo, si una empresa minera pagaba S/ 1 000 000 por reactivos y, después de una negociación, paga S/ 900 000, existe una reducción absoluta de costos de S/ 100 000. Sin embargo, si el proveedor propone elevar el precio a S/ 1 200 000 y la empresa negocia un precio final de S/ 1 050 000, no existe una reducción respecto al costo anterior, porque el gasto aumentó en S/ 50 000. No obstante, existe una evitación de costos de S/ 150 000, correspondiente al incremento que no llegó a concretarse.

En mantenimiento minero también puede observarse esta diferencia. La reducción del consumo anual de repuestos de S/ 300 000 a S/ 250 000 representa una reducción absoluta de S/ 50 000. Por otro lado, la detección anticipada de una falla mediante mantenimiento predictivo puede evitar la avería de una chancadora, la reparación de emergencia y la paralización de la producción. Estos gastos no realizados constituyen costos evitados, siempre que su valoración se sustente mediante registros históricos de fallas, horas de indisponibilidad, costos de reparación y pérdidas de producción.

En conclusión, la reducción absoluta de costos corresponde a la disminución real y demostrable de un gasto existente, mientras que la evitación de costos representa la prevención de un gasto futuro o potencial. Ambos conceptos generan valor económico, pero no deben sumarse ni presentarse como equivalentes sin una metodología clara, porque utilizan bases de comparación diferentes. Para garantizar una medición confiable, la reducción absoluta debe comprobarse con registros contables, mientras que la evitación de costos debe sustentarse mediante escenarios técnicamente justificados, información histórica y evidencias documentales (Ellram & Tate, 2021; Howard & Pathak, 1999; Monczka et al., 2009).

Tabla 56. *Discusión de Resultados*

Investigación	Autor (es)	Mina	Variable	Resultados
Incremento de la rentabilidad económica optimizando la operación de transporte de mineral en la E.C.M. Martinez Contratistas e Ingeniería S.A. Unidad Minera Atacocha	Álvarez Yauri, Rossy Edith	Unidad Minera Atacocha	Rentabilidad económica	Incremento de la rentabilidad económica en 7.23% y la reducción de gastos operativos en $119708.40 mensual
Optimización de tiempos para reducir costos en carguío y acarreo	Ruiz Santos Fabricio	Operación minera subterránea	Costos de carguío y acarreo	Reducción de los tiempos de carguío en 11.45%, reducción de los tiempos de transporte en 12.73%. Los costos operativos se reducieron en 0.34 USD/TM.
Optimización de costos de perforación, voladura, carguío y acarreo en mina subterránea	Checca Maldonado, Roger	Unidad Minera Cori Puno S.A.C.	Costos operativos	La rentabilidad se incrementó en 20%.
Optimización del avance lineal y costos por disparo mediante la mejora del proceso de perforación y voladura en UM. El Porvenir, Nexa Resources 2924	Boleje Urco, Joseph Arturo	U.M. El Porvenir de Nexa Resources	Rendimiento operativo	Mejora del avance por disparo en 14.2% y reducción del costo por metro lineal de 14.2%
Herramientas de gestión para la optimización del minado subterráneo	Ayala Orihuela, Ghercy Gustavo Palacios Parillo, Fernando Yeremi	Operaciones mineras peruanas mecanizadas	Gestión de costos	Incremento del rendimiento del scoop de 79.90 a 85 ton/hr

Investigación	Autor (es)	Mina	Variable	Resultados
Optimizing mineral extraction in Peru: Integrating geometallurgical planning with mining 4.0 technologies.	Medina Tasilla, DianelaJacobo Barreto, Wilson	Operaciones mineras peruanas	Optimización productiva	Mejoraron la predicción de recursos en 20%.
Aplicación de modelos de optimización para incrementar la rentabilidady reducir los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	Llanosn Malpartida, Jhon Jefferson	Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S,A,	Rentabilidad y costos	El VAN se incrementa de 714.567 millones US$ en el 2023 a 856.058 millones de US$ en el 2024. El incremente es de 19.9%. El costo de operaciones del 2023 es de 45.242 US$/t, el costo de operaciones del 2024 es de 50.296 US$/t. Por lo tanto el costo de operaciones se incrementa en 4.954% en el 2024 en relación al año anterior.

CONCLUSIONES

1. La aplicación de modelos de optimización en la Unidad Minera El Brocal demostró ser una herramienta técnicamente útil para mejorar la planificación operativa y fortalecer la toma de decisiones en la gestión minera, al permitir evaluar escenarios productivos y priorizar alternativas de explotación con mejor desempeño económico.
2. Respecto al objetivo general de la investigación, se comprobó que la aplicación de modelos de optimización tuvo una influencia favorable en el incremento de la utilidad neta de la operación, dado que en la comparación entre los años 2023 y 2024 se identificaron diferencias estadísticamente significativas en esta variable, con un comportamiento más favorable en 2024.
3. En relación con la rentabilidad, los resultados obtenidos confirman que esta se incrementó de manera significativa, lo cual se evidencia en el análisis del Valor Actual Neto (VAN), cuyo promedio pasó de 714.567 millones de US$ en 2023 a 856.058 millones de US$ en 2024, diferencia que resultó estadísticamente significativa. En consecuencia, se acepta la hipótesis específica referida al incremento de la rentabilidad.
4. Los resultados de la investigación no permiten sostener de manera concluyente que la aplicación de modelos de optimización haya reducido los costos operativos reales de la unidad minera durante el periodo analizado. Por el contrario, el costo operativo promedio se incrementó de 45.342 US$/t en 2023 a 50.296 US$/t en 2024, y dicha diferencia fue estadísticamente significativa. Por ello, la hipótesis específica orientada a demostrar la reducción de los costos operativos quedó confirmada con la evidencia presentada, sin embargo, la rentabilidad de la Unidad Minera se incremento en 19.9 % en relación al año anterior.
5. Los resultados permiten inferir que la mejora de la rentabilidad de la Unidad Minera El Brocal en 2024 estuvo más vinculada al incremento del valor económico de la operación,

al mayor aporte del cobre y al crecimiento del VAN y la utilidad neta, que a una reducción efectiva de los costos unitarios de operación. En otras palabras, la optimización mostró mayor impacto en la generación de valor que en la disminución directa del costo por tonelada.

6. El modelo matemático planteado conserva relevancia como instrumento de apoyo para la gestión minera, porque permite ordenar la asignación de recursos y orientar la explotación hacia escenarios más convenientes desde el punto de vista económico; sin embargo, sus resultados deben interpretarse dentro de las limitaciones del estudio, considerando que la realidad operativa de una mina está influida también por variaciones en producción, condiciones geológicas, disponibilidad de equipos y comportamiento del mercado.
7. En síntesis, la tesis demuestra que los modelos de optimización sí constituyen una alternativa válida para mejorar el desempeño económico de la Unidad Minera El Brocal, especialmente en términos de utilidad neta y rentabilidad; sin embargo, con la evidencia empírica incorporada en el estudio, no puede afirmarse con el mismo nivel de sustento que dichos modelos hayan reducido los costos operativos ni el cash cost en el periodo analizado. Por ello, la principal contribución de la investigación radica en evidenciar el valor de la optimización como herramienta de gestión económica, más que como mecanismo de reducción inmediata de costos reales.
8. El principal aporte de la presente investigación radica en demostrar que los modelos de optimización constituyen una herramienta técnicamente válida para mejorar el desempeño económico de las operaciones mineras subterráneas, incluso en contextos de costos crecientes. La investigación evidencia que la optimización permite una asignación más eficiente de los recursos, priorizando los frentes de minado con menor costo unitario y mayor valor económico, y contribuye a la contención de incrementos de costos (cost avoidance). Este aporte es especialmente relevante para la gestión minera contemporánea,

que enfrenta desafíos de eficiencia y competitividad en un entorno de creciente complejidad operativa.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda implementar el modelo de optimización matemática como parte del proceso regular de planeamiento operativo en la Unidad Minera El Brocal, especialmente en la programación de corto y mediano plazo, a fin de que la asignación de recursos, la distribución de la producción y la selección de frentes se sustenten en criterios cuantitativos orientados a minimizar el cash cost y maximizar la rentabilidad.
2. Se recomienda actualizar de manera periódica los parámetros de entrada del modelo, incorporando información real y validada sobre costos unitarios, capacidades de producción, disponibilidad de equipos, rendimiento de mano de obra y restricciones operativas, con la finalidad de mantener la confiabilidad de los resultados y asegurar que las soluciones propuestas respondan a las condiciones reales de la operación minera.
3. Se recomienda priorizar, dentro de la secuencia de minado, aquellos frentes que presenten menor costo unitario y mejores condiciones de productividad, siempre que dicha priorización no comprometa la estabilidad geomecánica, la continuidad operativa ni los estándares de seguridad, ya que la investigación demostró que una redistribución eficiente de la producción genera un efecto favorable sobre el cash cost y la rentabilidad.
4. Se recomienda integrar el modelo de optimización con las áreas de planeamiento, operaciones, mantenimiento y costos, de modo que la toma de decisiones no se limite a un análisis aislado, sino que responda a una visión sistémica de la operación. Esta articulación permitirá que las decisiones productivas consideren simultáneamente el impacto económico, la disponibilidad de recursos y las restricciones técnicas del proceso minero.
5. Se recomienda establecer un sistema de indicadores de control asociados a costos operativos, cash cost, productividad por frente, utilización de equipos y cumplimiento del plan de producción, con el propósito de monitorear de forma continua el efecto de la

optimización y corregir oportunamente desviaciones que puedan afectar la eficiencia económica de la unidad minera.

6. Se recomienda emplear el modelo propuesto como herramienta de evaluación previa para decisiones operativas relevantes, tales como cambios en el ritmo de explotación, reasignación de equipos, modificación de turnos, apertura o cierre temporal de frentes y ajustes en el plan de minado, reduciendo así el riesgo de adoptar decisiones empíricas que generen sobrecostos o pérdidas de eficiencia.
7. Se recomienda fortalecer la capacitación del personal técnico y profesional involucrado en el planeamiento y control de operaciones, a fin de desarrollar competencias en modelamiento matemático, análisis de escenarios e interpretación de resultados, de manera que la optimización sea utilizada como un instrumento efectivo de gestión y no solo como un ejercicio académico.
8. Se recomienda ampliar progresivamente el alcance del modelo incorporando variables de incertidumbre operativa y económica, tales como fluctuaciones en la ley del mineral, variabilidad en los precios de los metales, indisponibilidad de equipos, tiempos improductivos y condiciones geomecánicas cambiantes, con el fin de aproximar mejor el modelo a la dinámica real de la minería subterránea.
9. Se recomienda que futuras investigaciones desarrollen modelos de optimización multiobjetivo que, además del componente económico, integren variables de seguridad, ventilación, sostenimiento, mantenimiento y sostenibilidad operativa, permitiendo una evaluación más integral del desempeño de la unidad minera.
10. Se recomienda evaluar la aplicación de la metodología desarrollada en otras operaciones subterráneas de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. o en unidades mineras con características similares, previa adaptación de sus parámetros técnicos y económicos, con

la finalidad de extender los beneficios de la optimización a nivel corporativo y consolidar una gestión minera basada en evidencia cuantitativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, R. E. (2021). Incremento de la rentabilidad económica optimizando la operación transporte de mineral en la ECM Martínez Contratistas e Ingeniería SA Unidad Minera Atacocha. Tesis de Licenciatura, Universidad Continental.

Anticona-cueva, J. Y., Noriega-vidal, E. M., Cotrina-teatino, M. A., & Arango-retamozo, M. S. M. (2024). Mathematical Modelling of Engineering Problems Evaluation of Predictive Models for the Optimization of the Cost of Unit Operations in Artisanal Underground Mining. 11(11), 2901–2911. https://doi.org/10.18280/mmep.111103

Aquino, J. L., Arquímedes Vila, Ñ., & Ventura, M. (2023). Actualización Geológica del Distrito Minero de Colquijirca.

Aragon, R. (2019). Análisis del Impacto del Cut-Off Marginal y el Cut-Off Incremental al Implementarlos desde el Planeamiento Conceptual de una Mina Subterránea. Tesis de Pregrado, Universidad Privada del Norte.

Arias, F. G. (2012). El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica. 6ta. Fidias G. Arias Odón.

Auqui, A. A. (2021). Influencia De Las Variables En El Proceso De La Flotación De Minerales Polimetalicos Para Mejorar La Productividad Del Circuito De Zinc Con Aplicación De Los Diseños Experimentales En La Planta Concentradora El Brocal. Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú.

Ayala, G. G. (2024). Herramientas de Gestión para la Optimización del Minado Subterráneo. 20(3), 11–22. https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2024.03.01

Benavides, R. (2023). Memoria anual integrada 2023.

Benavides, R. (2024). Memoria Anual Integrada 2024.

Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. N. (1997). Introduction to linear optimization (Vol. 6). Athena scientific Belmont, MA.

Boleje, J. A. (2024). Optimización del avance lineal y costos por disparo mediante la mejora del proceso de perforación y voladura en U.M. El Porvenir, Nexa Resources - 2024. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú.

Cabos, R. (2005). Potencial Minero en la Región Pasco.

Canchaya, S., Vidal, C. E., & Sarmiento, J. (2014). Génesis de la calcosita de Marcapunta Oeste. Sociedad Geológica Del Perú, 109, 2012–2015.

Carlos, R., & Carboni, S. (2023). Optimización de diseños de minas subterráneas usando el algoritmo pseudoflow [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/items/01b4ea0c-b1a2-435d-9d01-6bb7d7a6d501?utm_source=chatgpt.com

Castellano, C. A., Maque, A., & Jun, Y. (2026). Proyecto de ampliación de operaciones para incrementar la capacidad de producción de una pequeña mina subterranea [Tesis de maestría, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/593570

Chambi, N., Sanga, C., Ortiz, J., Sanga, A., Sanga, P., Manrique, R., & Lu-chang-say, J. (2025). Predictive Maintenance in Underground Mining Equipment Using Artificial Intelligence. 1–22. https://www.mdpi.com/2673-4117/6/10/261?utm_source=chatgpt.com

Checca, R. (2022). Optimización de costos de perforación, voladura, carguío y acarreo en mina subterránea [Universidad Nacional del Altiplano. Repositorio Institucional-UNAP]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_3d0e9f991e9f9e3db9eba054b49cd443?utm_source=chatgpt.com

Cotrina, M., Marquina, J., & Polo, J. (2025). Prediction of unit haulage cost in an underground mine using machine learning techniques. 24(2). https://doi.org/10.46873/2300-3960.1454

Díaz, A., Hernández, H., & Gallo, J. (2026). A Theoretical Model for Predicting the Blasting Energy Factor in Underground Mining Tunnels. 1–20. https://doi.org/10.3390/mining6010002

Ellram, L. M., & Tate, W. L. (2021). Cost avoidance: not everything that counts is counted. Journal of Business Logistics, 42(4), 406–427. https://doi.org/10.1111/jbl.12262

García, L. (2020). Memoria Anual 2020.

Hernández-Sampieri, R. (2010). Metodología de la investigación (Mc Graw Hill (ed.); Quinta edi).

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Batista, P. (2010). Metodología de la Investigación.(5ta. Edición). México: Editorial Mc Graw Hill. Campos, W.(2010). Apuntes de Metodología de La Investigación Científica.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). Metodología de la. Ciudad de México: Mc Graw Hill, 12, 20. https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Hernández-Sampieri%2C+R.%2C+Fernández%2C+C.%2C+%26+Batista%2C+P.+%282010%29.+Metodología+de+la+Investigación.%285ta.+Edición%29.+México%3A+Editorial+Mc+Graw+Hill.+Campos%2C+W.%282010%29.+Apuntes+de+Metodología+de+La+Investigación+Científica.&btnG=

Hillier, F. S., Lieberman, G. J., & Hillier, F. S. (2021). Operations Research.

Howard, K. B., & Pathak, D. S. (1999). Determining the differences among cost savings, cost avoidance, and cost reduction. Pharmacy Practice Management Quarterly, 19(3), 1–7.

Kerlinger, F., & Lee, H. B. (2002). Investigacion del comportamiento (cuarta edicion ed.). Mc Graw Hill. Mexico.

Malundamene, M. K., Al Habib, N., Soulaimani, S., Abdessamad, K., & Askari-Nasab, H. (2025). State-of-the-art optimization methods for short-term mine planning. F1000Research, 13, 1107. https://doi.org/10.12688/f1000research.152986.2

Medina-tasilla, D. Y., Jacobo-barreto, W. J., Mendoza-cuti, A. O., Pinto-huisacayna, K. L., & Romero-bayló, A. A. (2024). Optimizing Mineral Extraction in Peru : Integrating Geometallurgical Planning with Mining 4 . 0 Technologies. 19(4), 1457–1468.

Monczka, R. M., Handfield, R. B., Giunipero, L. C., & Patterson, J. L. (2009). Purchasing and supply chain management. South-Western.

Mondragon, A., & Samaniego, A. (2022). SEC Technical Report Summary Pre-Feasibility Study El Brocal.

Rueda, N. R., Toro, S. C., & Zuleta, R. (2012). Optimización del sistema de ventilación en una mina de gran altura , Compañía Minera Raura. 591–598.

Runge, I. (1998). Mining Economics and Strategy. In Choice Reviews Online (Vol. 36, Issue 10). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.

Salazar, E., & Córdova, D. (2020). Geomecánica del minado masivo tajeos por subniveles con pilares corridos.

Santos, F. (2025). Optimización de tiempos para reducir costos en carguío y acarreo mediante un modelo de Red Neuronal Artificial. Journal of Advanced Mining Modeling. https://doi.org/10.12688/f1000research.152986.2

Sarmiento, J. C. (2004). Domos De Lava Relacionados A La Diatrema Principal En El Centro Volcanico Marcapunta, Distrito Minero De Colquijirca – Peru Central. Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Tamayo, M. (2007). Metodología de la Investigación. México: Limusa.

Velasquez, J., & Zevallos, J. (2025). Análisis de costos y optimización del plan de minado en la Unidad Minera CMC Critical Minerals Corporation S.A.C., Perú [Tesis de

suficiencia profesional, Universidad Privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/collection/e3540877-0b53-4bac-b8f2-d3960b941bb8/browse/title?utm_source=chatgpt.com

Vera, E. E., Oswaldo, R., Figueroa, C., Jhonson, F., & Flores, A. (2024). Estrategias para minimizar el cash cost en una opera ción minera subterránea [Tesis de Maestría, Universidad Gerens]. https://repositorio.gerens.edu.pe/bitstream/20.500.12877/57/1/Estrategias para minimizar el cash cost en una operacion minera subterranea.pdf?utm_source=chatgpt.com

Villanueva, D. (2025). Sostenimiento de chimeneas con el sistema Spraycrete para prevenir accidentes en la compañía minera el Brocal. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

ANEXOS

Anexo 1. Instrumentos de Recolección de Datos

Costo de Operación

Frente de Trabajo	**Costo (US$/t)**	**Cap. máx (t/día)**	**Horas/t**	**Ley Cu (%)**	**Recup. (%)**	**Ventilación (m^3/t)**	**Personal (trab/t)**
Frente 1 (Marcapunta Norte)							
Frente 2 (Marcapunta Oeste)							
Frente 3 (Sectores de Profundización)							
Frente 4 (Recuperación de Pilares)							
Frente 5 (Desarrollo y Preparación)							

Utilidad Neta 2023

Mes (2023)	Utilidad Neta (Millones US$)	Factores Determinantes
Enero	1.8	Continuidad operativa post-cierre 2022.
Febrero	1.9	Estabilidad en precios de metales base.
Marzo	1.7	Implementación inicial de sistemas de gestión de flota.
Abril	2.1	Incremento en la ley de cabeza de cobre en Marcapunta.
Mayo	2.3	Mejora en la eficiencia de extracción subterránea.
Junio	2.2	Finalización del despliegue WiFi/Bluetooth en mina.
Julio	1.9	Gastos de preparación para reconfiguración de fases.
Agosto	1.8	Presión por acumulación de stocks de mineral.
Septiembre	1.5	Impacto de provisiones por desvalorización de stocks.
Octubre	2.4	Suspensión de Tajo Norte; foco exclusivo en cobre.
Noviembre	2.8	Procesamiento intensivo de stocks de cobre de alta ley.
Diciembre	9.1	Reversión neta de provisiones (US$ 20.5 MM).
Total Anual	**31.5**	**Consolidación de recuperación financiera.**

Anexo 2 *Matriz de Consistencias*

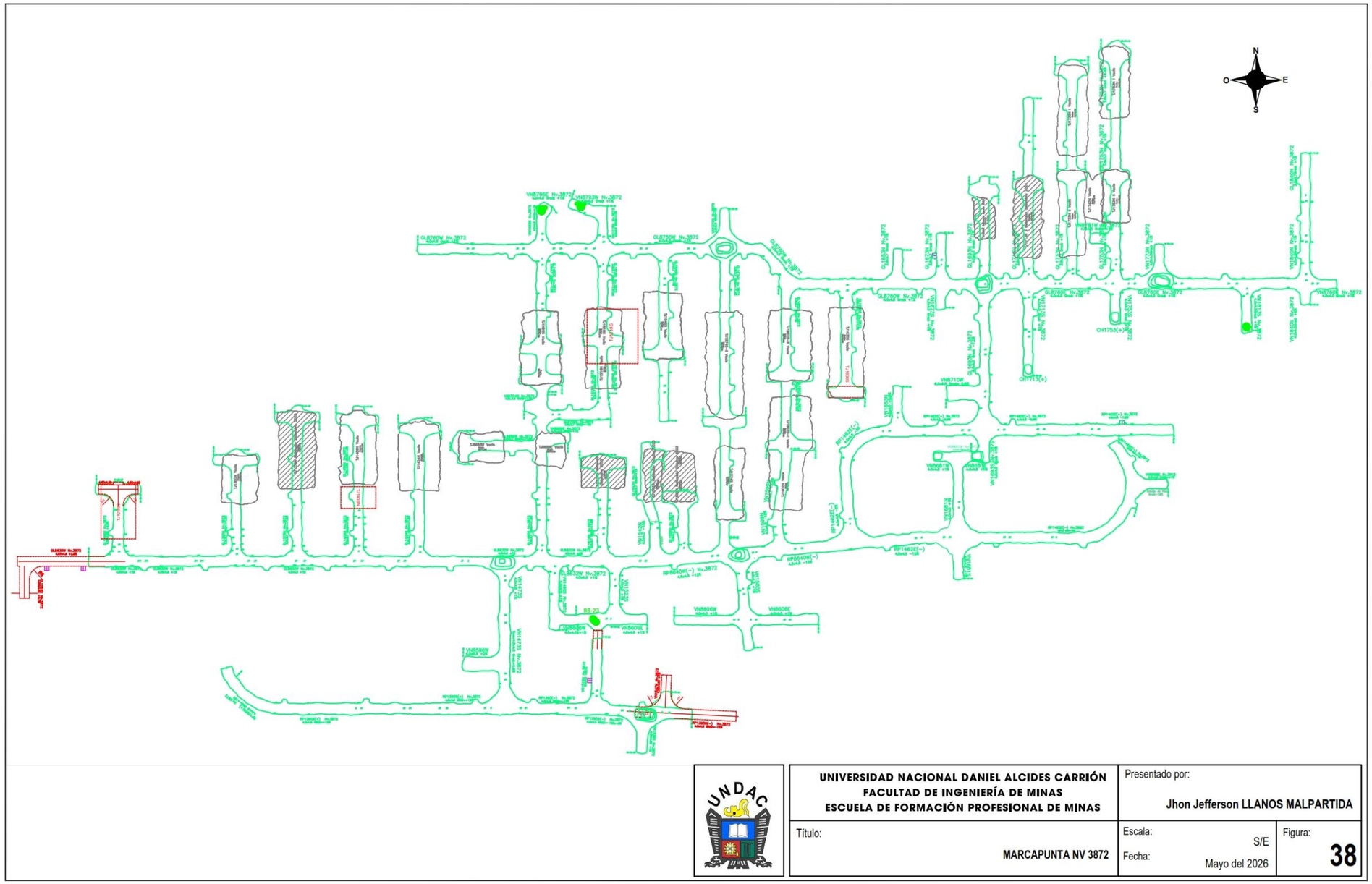
Aplicación de Modelos de Optimización para Incrementar la Rentabilidad y Reducir los Costos Operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.

Formulación del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Diseño Metodológico
General ¿De qué manera la aplicación de modelos de optimización influye en el incremento de la utilidad neta y en la reducción del cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?	**General** ¿De qué manera la aplicación de modelos de optimización influye en el incremento de la utilidad neta y en la reducción del cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?	**General** La aplicación de modelos de optimización influye significativamente en el incremento de la utilidad neta y en la reducción del cash cost en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	**Variable Independiente (X)** X = Modelos de optimización. X_1 = Función objetivo formulada. X_2 = Número de variables de decisión. X_3 = Nivel de restricciones. X_4 = Tipo de modelo aplicado. X_5 = Escenarios evaluados.	**Variable Independiente (X)** X_{11} = Función objetivo formulada. X_{21} = Número de variables de decisión. X_{31} = Número de restricciones. X_{41} = Tipo de modelo aplicado. X_{51} = Escenarios evaluados.	**Tipo de Investigación:** Investigación aplicada **Nivel de Investigación:** Explicativo. **Diseño de Investigación:** No experimental y Transaccional. **Diseño:** No experimental, transversal y correlacional. **Población y Muestra:** **Población**: La población está conformada por todas las operaciones y registros operativos y económicos relacionados con los costos operativos, el *cash cost* y la rentabilidad de la Unidad Minera El Brocal, correspondientes a sus operaciones de minería subterránea.
Específico 1 ¿Cómo la aplicación de modelos de optimización influye en el incremento de la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la	**Específico 1** Determinar la influencia de la aplicación de Modelos de Optimización para incrementar la rentabilidad en la Unidad Minera El	**Específica 1** La aplicación de modelos de optimización incrementa la rentabilidad en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía	**Variable Dependiente (Y)** Y = Rentabilidad y costos operativos. Y_1 = Rentabilidad. Y_2 = Costos operativos.	**Variable Dependiente (Y)** Y_{11}= Margen operativo. Y_{12}= Rentabilidad operativa. Y_{13} = EBITDA operativa.	

Formulación del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Diseño Metodológico
Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?	Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	de Minas Buenaventura S.A.A.	Y_3 = Utilidad neta. Y_4 = *Cash cost*.	Y_{14} = Relación costo-beneficio.	**Muestra**: En este estudio, la muestra está constituida por un conjunto específico de datos operativos y económicos correspondientes a un período determinado de operación de la Unidad Minera El Brocal, tales como los años 2023 y 2024.
Problema Específico 2 ¿Cómo la aplicación de modelos de optimización influye en la reducción del costo en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.?	**Objetivo Específico 2** Determinar la influencia de la aplicación de Modelos de Optimización para reducir el costo en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	**Hipótesis Específico 2** La aplicación de modelos de optimización reduce los costos operativos en la Unidad Minera El Brocal de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.			

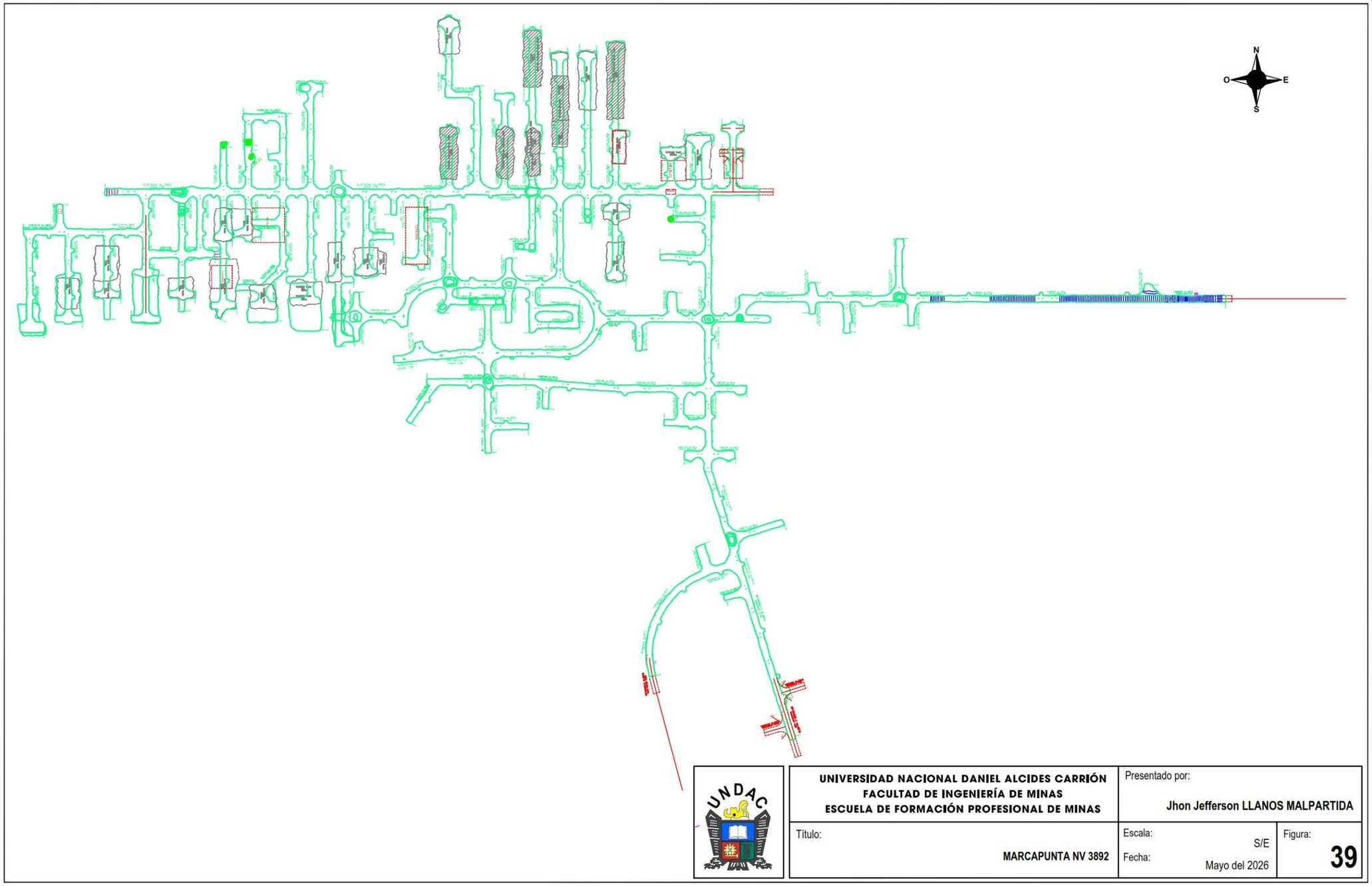
Anexo 3 *Planos*

Figura 38. *Marcapunta NV 3872*



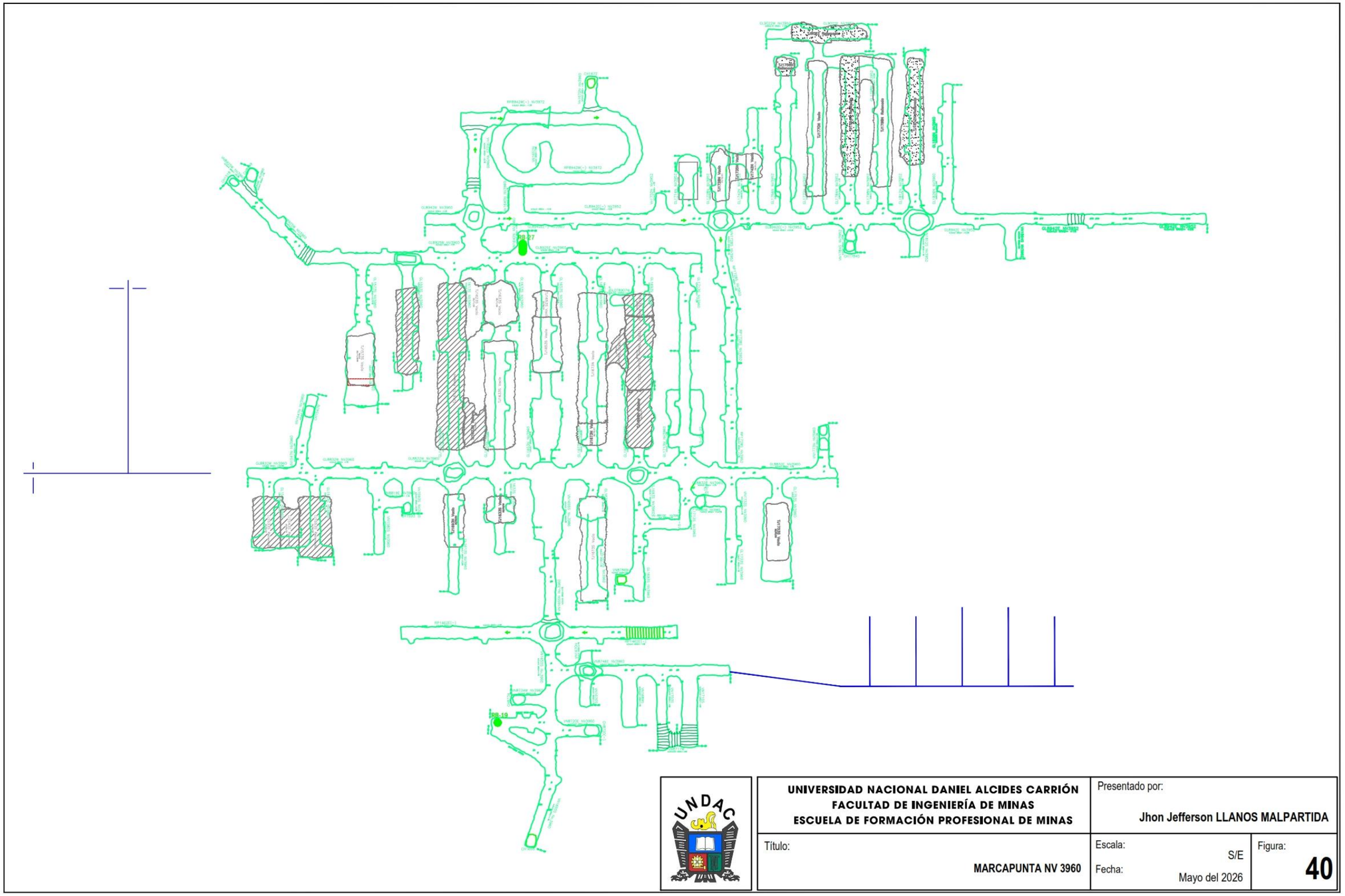
Nota. El plano de la Figura 38 ha sido obtenido de la Unidad Minera El Brocal.

Figura 39. *Marcapunta Nv 3892*



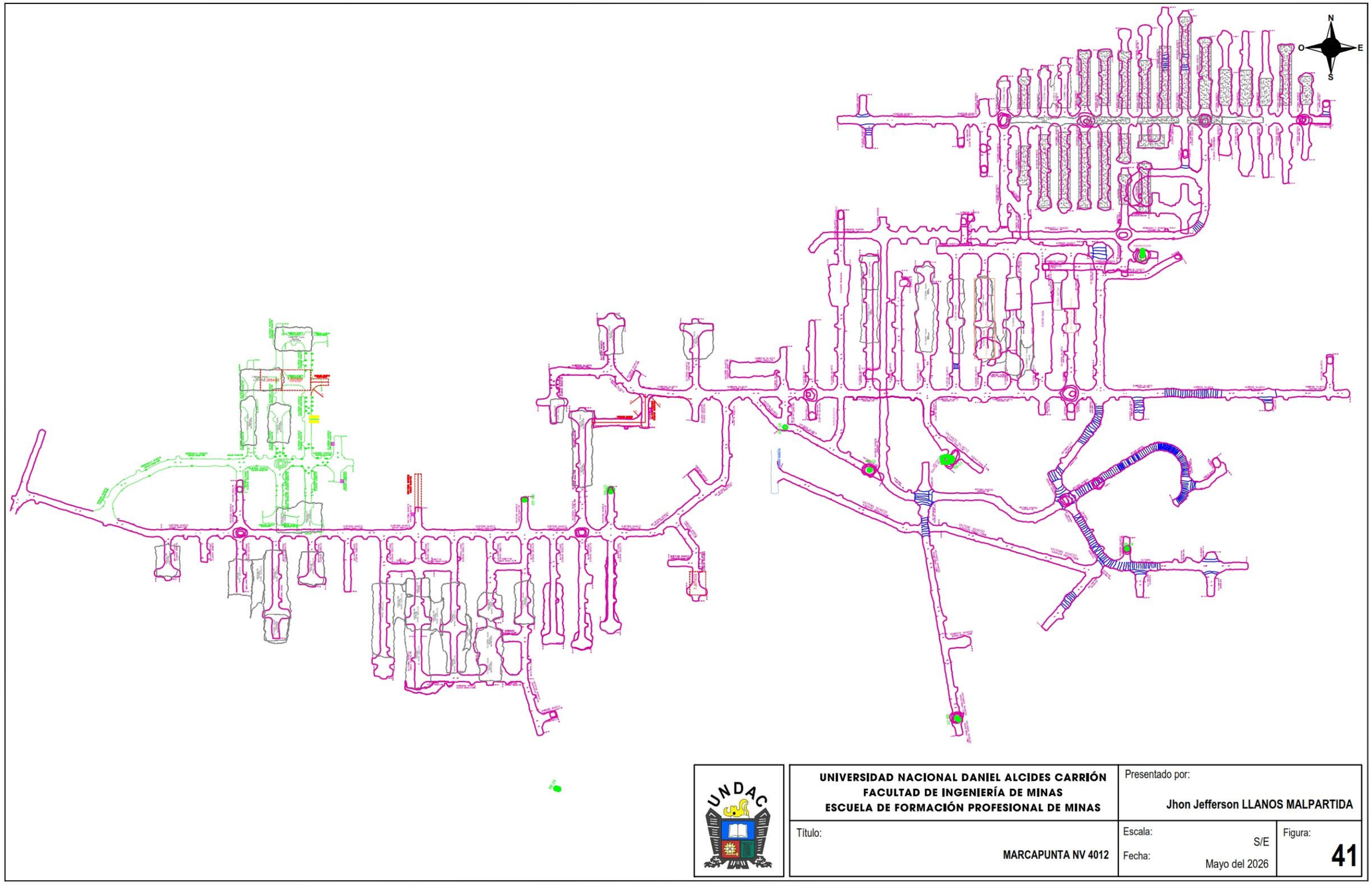
Nota. El plano de la Figura 39 ha sido obtenido de la Unidad Minera El Brocal.

Figura 40. *Marcapunta Nv 3960*



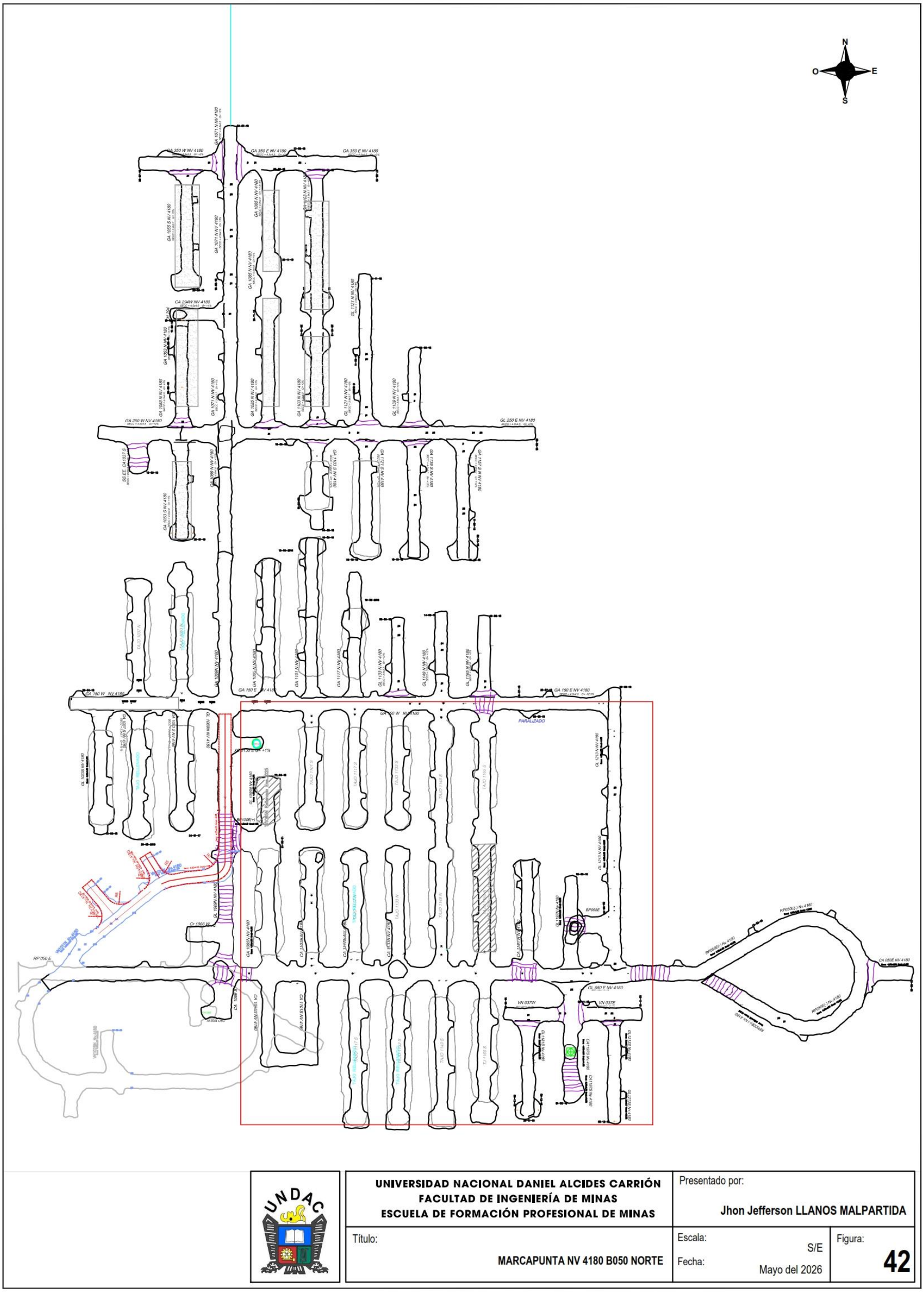
Nota. El plano de la Figura 40 ha sido obtenido de la Unidad Minera El Brocal.

Figura 41. *Marcapunta Nv 4012*



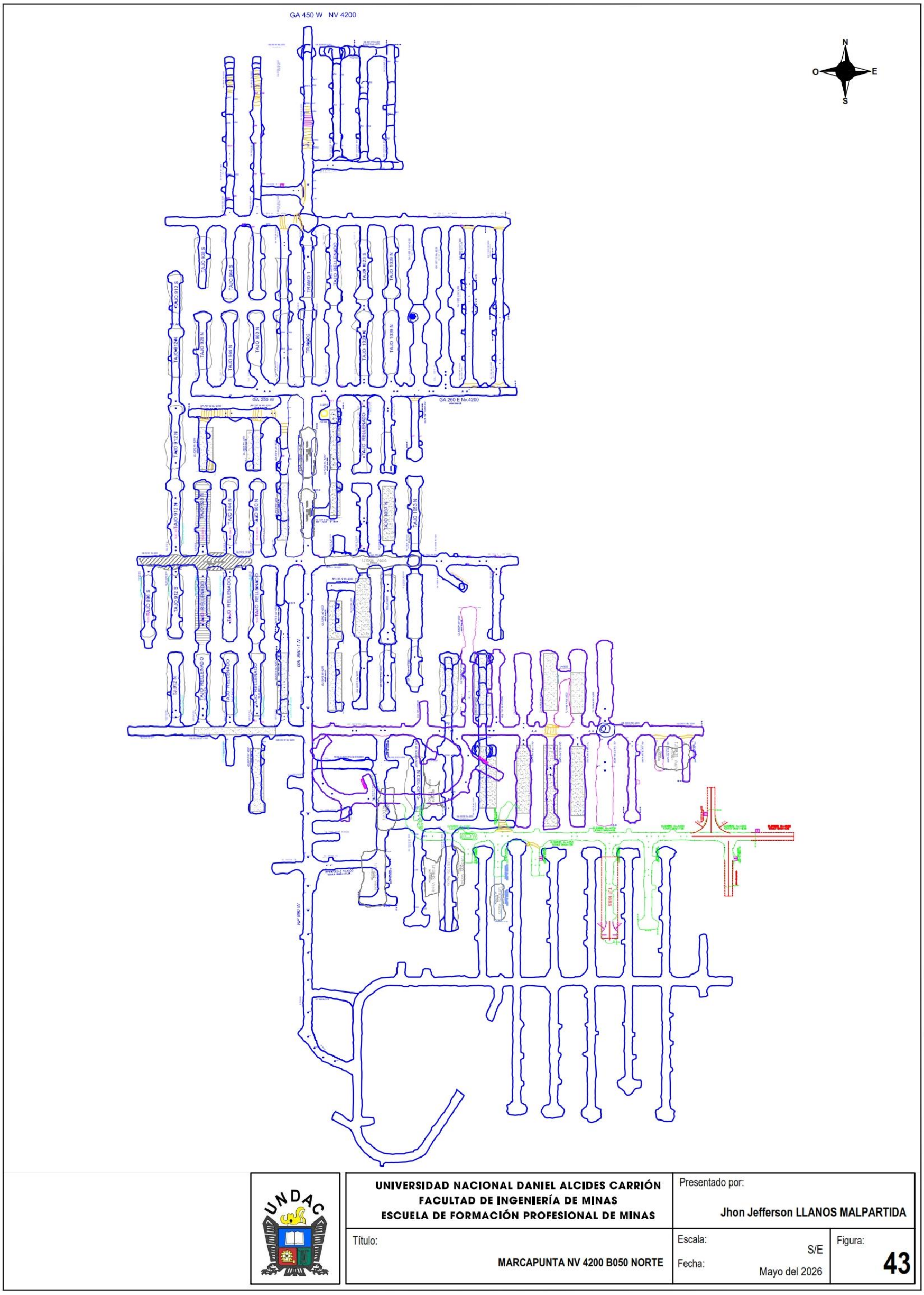
Nota. El plano de la Figura 41 ha sido obtenido de la Unidad Minera El Brocal.

Figura 42. *Marcapunta Nv 4180 B050 Norte*



Nota. El plano de la Figura 42 ha sido obtenido de la Unidad Minera El Brocal.

Figura 43. *Marcapunta Nv 4200 B050 Norte*



Nota. El plano de la Figura 43 ha sido obtenido de la Unidad Minera El Brocal.

Anexo 4. *Panel Fotográfico*

Figura 44. *Tajo Norte de la Unidad Minera El Brocal*



Figura 45. *Ingreso a la Mina Marcapunta Norte*



Figura 46. *Tesista en Trabajos de Recolección de Datos de Campo*



Figura 47. *Sala de Reuniones de Trabajo en el Interior de la Mina*

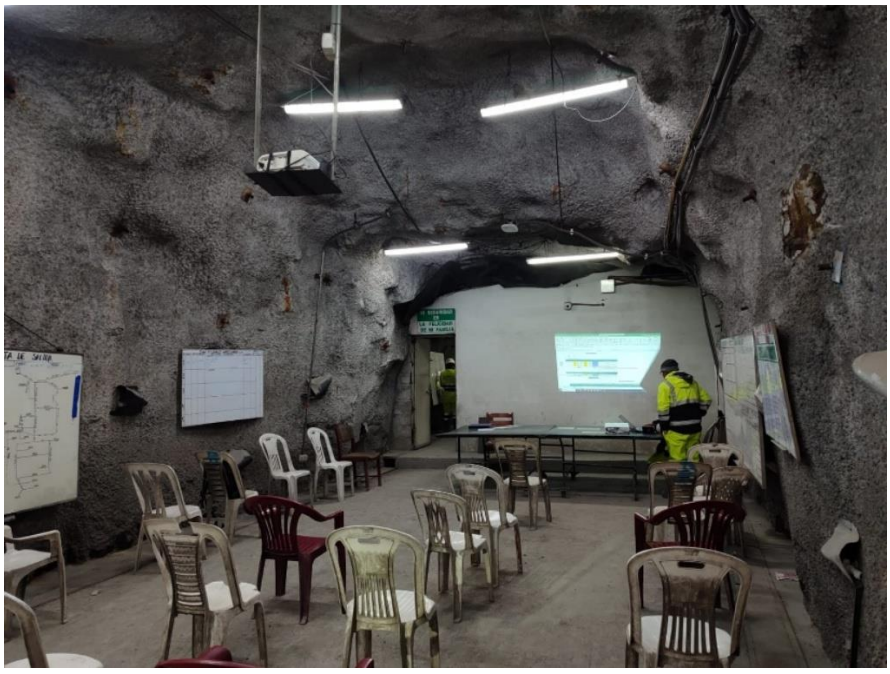


Figura 48. *Equipo de Perforación de Taladros Largos*



Figura 49. *Tesista en Trabajos de Sostenimiento de Labores Subterráneas*



Figura 50. *Material Suelto Como Resultado de la Voladura*



Figura 51. *Flota deEquipos de Transporte de Mineral*



Figura 52. *Sostenimiento de Labores Subterráneas*



Figura 53. *Carguío y Transporte de Mineral*



Figura 54. *Tesista Revisando la Zona Antes del Disparo*



Figura 55. *La Granulometría del Material Suelto Luego de una Voladura*

