UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

MEJORA DEL SISTEMA DE ACARREO SUBTERRÁNEO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS CON SIMPY EN LA UNIDAD MINERA SOTRAMI- AYACUCHO

PRESENTADO POR:

Br. JORGE VIVANCO GÓMEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

Dr. MIGUEL VERA MIRANDA

CUSCO - PERÚ

2025

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

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

El que suscribe, el **Asesor** Dr. Miguel Vera Miranda quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesistitulada: Mejora del Sistema de Acarreo Subterráneo Mediante Simulación de Eventos Discretos con Simpy en la Unidad Minera Sotrami - Ayacucho

Presentado por: Bach. Jorge Virunco Gómez DNI N° 72882468;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero de Minas

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6 **%.**

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

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

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

Cusco, 29 de Marzo de 20 26

Firma
Post firma Miguel Vera Miranda
Nro. de DNI 23976027
ORCID del Asesor 0000-0002-9349-8463

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:570817661

MEJORA DEL SISTEMA DE ACARREO SUBTERRÁNEO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS CON SIMP...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:570817661

Fecha de entrega
24 mar 2026, 1:04 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
24 mar 2026, 1:19 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
MEJORA DEL SISTEMA DE ACARREO SUBTERRÁNEO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRET....pdf

Tamaño del archivo
4.0 MB

147 páginas

27.517 palabras

159.072 caracteres

6% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- N.° de coincidencias excluidas

Fuentes principales

5% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
4% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alerta de integridad para revisión

Texto oculto
12 caracteres sospechosos en N.° de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

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

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres, Jorge Vivanco Chipana y Olga Gómez Choque, A mis hermanos y abuelitos por su amor incondicional, su sacrificio y por enseñarme que, con esfuerzo y perseverancia, cualquier meta es alcanzable. Este logro es tan suyo como mío.

AGRADECIMIENTOS

Primero, agradecemos a nuestro creador; por ser guía principal en nuestras vidas, además a nuestra Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por acobijarnos durante cinco años de formación profesional, al personal directivo, jerárquico, docentes de formación general y sobre todo a los de formación de especialidad; a nuestros compañeros de la promoción por compartir vivencias, experiencias inolvidables, como también a compañeros de estudio de diferentes carreras profesionales, al personal administrativo y jerárquico. Del mismo modo nuestro agradecimiento infinito a todo el personal de la Minera SOTRAMI lo cual me brindo su apoyo incondicional durante todo en el proceso de la aplicación de mi trabajo de investigación.

INTRODUCCIÓN

La minería subterránea representa un sector estratégico para la economía peruana, tanto por su aporte en divisas como por la generación de empleo directo e indirecto. Sin embargo, las operaciones subterráneas enfrentan múltiples retos técnicos y económicos vinculados a la eficiencia de los procesos de acarreo, los cuales constituyen una de las fases más críticas dentro de la cadena productiva. En este contexto, la Unidad Minera SOTRAMI desarrolla sus actividades en zonas de complejidad operativa, donde los tiempos de ciclo, la disponibilidad de equipos y la continuidad del flujo de mineral influyen directamente en la productividad y en la sostenibilidad de la operación.

Actualmente, el sistema de acarreo de la U.M. SOTRAMI presenta deficiencias que se manifiestan en tiempos prolongados de ciclo, baja frecuencia de viajes por guardia, incremento de tiempos improductivos y sub utilización de equipos de transporte. Esta situación compromete el cumplimiento de los volúmenes planificados de mineral y genera un aumento progresivo en los costos operativos. El desafío se intensifica debido a la creciente demanda de producción, que obliga a la operación a maximizar su rendimiento sin contar con herramientas modernas que permitan modelar, simular y optimizar el proceso de acarreo bajo distintos escenarios.

En este escenario, la simulación de eventos discretos emerge como una alternativa innovadora y eficiente para analizar sistemas dinámicos donde múltiples variables interactúan de manera secuencial. La biblioteca SimPy de Python se presenta como una herramienta adecuada para modelar el comportamiento del acarreo subterráneo, permitiendo representar los ciclos de transporte, identificar cuellos de botella, medir la utilización de recursos y proponer estrategias de optimización basadas en resultados cuantitativos. La integración de este enfoque computacional al

ámbito minero abre la posibilidad de diseñar procesos predictivos y adaptativos que anticipen problemas y planteen soluciones antes de su ejecución en campo.

La presente investigación tiene como propósito aplicar la simulación de eventos discretos con SimPy para mejorar el sistema de acarreo subterráneo en la Unidad Minera SOTRAMI. El estudio busca diagnosticar la situación actual del proceso de transporte, evaluar el desempeño mediante simulación computacional y analizar el impacto de las mejoras propuestas en la productividad y en los costos operativos. De esta manera, la tesis no solo ofrece una solución a una problemática operativa específica, sino que también constituye un aporte metodológico replicable en otras operaciones mineras subterráneas que afrontan desafíos similares en la gestión del acarreo.

RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo optimizar el sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI (Zona 23) mediante la aplicación de simulación de eventos discretos con la librería SimPy. Metodológicamente, el estudio se estructuró en tres fases: primero, un diagnóstico situacional de campo con cronometraje exhaustivo de ciclos y levantamiento de restricciones operativas (carga, transporte, descarga y retorno), identificando cuellos de botella en colas y demoras. Segundo, se procedió con la construcción y calibración de un **gemelo digital** robusto, utilizando distribuciones empíricas (promedio, p50, p90) y validando el modelo mediante indicadores clave de desempeño como viajes por guardia, TM/h y tiempos de espera. Finalmente, se evaluaron escenarios de mejora mediante reglas de despacho, gestión eficiente de colas y el establecimiento de sentido único en tramos críticos, aplicando réplicas múltiples e intervalos de confianza para garantizar la validez estadística de los datos.

Los resultados evidencian una reducción del tiempo de ciclo de 42,5 a 37,1 min (**−12,7 %**), un aumento de viajes por guardia a 10,7 (+14,6 **%**) y un incremento de productividad de 36,9 a 42,5 TM/h (+13,7 %). En términos financieros, el costo unitario disminuyó de S/ 16,2 a S/ 13,7 por TM (−15,4 **%**), debido a la optimización de la secuencia operativa y la dilución de costos fijos Se concluye que la integración de herramientas de simulación avanzada con la medición directa en campo fortalece la toma de decisiones técnicas y económicas, permitiendo una planificación minera más predictiva y eficiente.

Palabras clave: Acarreo subterráneo, Simulación de eventos discretos, SimPy, Tiempos de ciclo, Costos operativos.

ABSTRACT

This research aims to optimize the underground haulage system at the SOTRAMI Mining Unit (Zone 23) by applying discrete event simulation with the SimPy library. Methodologically, the study was structured in three phases: first, a situational field diagnosis with exhaustive cycle timing and identification of operational constraints (loading, transport, unloading, and return), identifying bottlenecks in queues and delays. Second, a robust digital twin was constructed and calibrated using empirical distributions (average, p50, p90) and the model was validated using key performance indicators such as trips per shift, metric tons per hour, and waiting times. Finally, improvement scenarios were evaluated using dispatch rules, efficient queue management, and the establishment of one-way traffic in critical sections, applying multiple replications and confidence intervals to ensure the statistical validity of the data.

The results show a reduction in cycle time from 42.5 to 37.1 min (−12.7%), an increase in trips per shift to 10.7 (+14.6%), and an increase in productivity from 36.9 to 42.5 TM/h (+13.7%). In financial terms, the unit cost decreased from S/ 16.2 to S/ 13.7 per TM (−15.4%), due to the optimization of the operational sequence and the dilution of fixed costs. It is concluded that the integration of advanced simulation tools with direct field measurements strengthens technical and economic decision-making, enabling more predictive and efficient mine planning.

Keywords: Underground haulage, Discrete event simulation, SimPy, Cycle times, productivity, Operating costs.

ÍNDICE

DEDICATORIA II

AGRADECIMIENTOS III

INTRODUCCIÓN IV

RESUMEN VI

ABSTRACT VII

1. CAPÍTULO I 1

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN 1

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.2.1. PROBLEMA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN 2

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.3.1. OBJETIVO GENERAL 3

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

1.4. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.4.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA. 3

1.4.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL. 3

2. CAPÍTULO II 4

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN 4

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN 4

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES 4
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES 6
2.2. BASES TEÓRICAS 9
2.2.1. OPERACIONES DEL PROCESO MINERO 9
2.2.2. SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MINERAL 11
2.2.3. DEFINICIÓN DE TIEMPOS 11
2.2.4. TIEMPOS DE CICLO 13
2.2.5. SIMULACIÓN 15
2.2.6. PYTHON 20
2.3. DEFINICIÓN DE TERMINOS 23
2.4. HIPÓTESIS 26
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL 26
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS 26
2.4.3. VARIABLES E INDICADORES 27
3. CAPÍTULO III 28
METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN 28
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN 28
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN 28
3.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 29
3.4. Unidad de análisis 29

3.5. Población y muestra 29
3.6. Técnica de selección de muestreo 30
3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN 31
3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN 31
4. CAPÍTULO IV 32
PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 32
4.1. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ACARREO 33
4.1.1. CICLO DE OPERACIÓN, RUTAS Y DISTANCIAS 48
4.1.2. TIEMPOS DEL CICLO Y CLASIFICACIÓN DE DEMORAS (OPERATIVAS / NO OPERATIVAS) 53
4.2. SIMULACIÓN CON SIMPY Y VALIDACIÓN 60
4.2.1. ENTIDADES, RECURSOS Y LÓGICA DEL MODELO 61
4.2.2. CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN CONTRA LA LÍNEA BASE (VIAJES, TM/H, ESPERAS) 63
4.3. RESULTADOS POR ESCENARIOS 65
4.3.1. Disponibilidad mecánica y programa de mantenimiento del tren de acarreo 66
4.3.2. KPIS: TIEMPOS DE CICLO, COLAS/ESPERAS, UTILIZACIÓN, TM/H 67
4.3.3. COMPARATIVO VS. SITUACIÓN ACTUAL Y RESOLUCIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA 68

4.4. IMPACTO ECONÓMICO Y SENSIBILIDAD 70

4.4.1. COSTOS DE ACARREO ($/TM) Y AHORROS 71

4.4.2. SENSIBILIDAD (DISTANCIAS, DISPONIBILIDAD, DEMORAS CRÍTICAS) 72

4.5. SELECCIÓN DEL ESCENARIO Y PLAN PILOTO DE IMPLEMENTACIÓN 73

4.6. Ejecución y evidencia de la simulación en SimPy 73

4.6.1. Descripción del modelo de simulación 74

4.6.2. Ejecución del modelo y resultados esperados 76

4.7. Sustentación de valores calculados 85

4.7.1. Datos de entrada y supuestos operativos 85

4.7.2. Tiempo de ciclo por viaje (método directo) 86

4.7.3. Ventana efectiva de operación por turno 87

4.7.4. Viajes por guardia 87

4.7.5. Productividad (TM/h) y TM/guardia 88

4.7.6. Utilización y disponibilidad 89

4.7.7. Costo unitario de acarreo (S/ TM) 90

4.7.8. Validación estadística (bandas e IC) 91

4.7.9. Sensibilidad “a mano” de los tiempos de transporte 91

4.7.10. Criterios de redondeo, unidades y consistencia 92

4.7.11. Plantilla de cálculo replicable (para pegar en hoja de trabajo) 93

4.7.12. Lectura y trazabilidad 93

5. CAPÍTULO V ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 94

5.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 94

5.1.1. Comparativo general de indicadores de desempeño 94

5.1.2. Desglose del tiempo de ciclo por componente 95

5.1.3. Análisis de distribución de tiempos operativos y no operativos 96

5.1.4. Validación estadística de los resultados simulados 97

5.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 100

5.2.1. Diagnosticar el estado actual del sistema de acarreo 100

5.2.2. Aplicar simulación con SimPy para mejorar el desempeño 101

5.2.3. Analizar el impacto en costos operativos 102

5.2.4. Proponer la mejora del sistema de acarreo subterráneo mediante simulación de eventos discretos 103

CONCLUSIONES 105

RECOMENDACIONES 107

BIBLIOGRAFÍA 108

6. ANEXOS 110

ANEXO 1 110

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD MINERA SOTRAMI 110

6.2. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN: CORTE Y RELLENO ASCENDENTE . 110

6.3. CLASIFICACIÓN DEL CICLO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA..... 112

6.4. MAQUINARIAS Y TRANSPORTE 112

6.5. UBICACIÓN GEOGRÁFICA. 112

6.6. ACCESIBILIDAD..... 113

6.6.1. CLIMA Y METEOROLOGÍA 113

6.7. RECURSOS..... 114

6.7.1. FLORA Y FAUNA. 114

6.8. GEOLOGÍA..... 114

6.8.1. GEOLOGÍA REGIONAL..... 114

6.8.2. SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA 116

6.8.3. GEOLOGÍA LOCAL..... 118

6.8.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL..... 121

6.8.5. GEOLOGÍA ECONÓMICA Y MINERALIZACIÓN 123

ANEXO 2..... 124

ANEXO 3..... 128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Operaciones del proceso minero 10

Figura 2 Simulación de eventos discretos 15

Figura 3 Inspección operativa del tren antes de la salida – vr1 37

Figura 4 Sistema de acarreo subterráneo actual – Zona 23 (vista en planta) 38

Figura 5 Perfil longitudinal del sistema de acarreo subterráneo en la Zona 23 39

Figura 6 Vinculación entre geometría del sistema de acarreo y modelo DES en SimPy para la Zona 23 40

Figura 7 Inspección operativa del tren antes de la salida 41

Figura 8 Carros mineros cargados en tránsito – Punto BC-1745 42

Figura 9 Locomotora eléctrica a baterías – SERMInsa (pack VOLTA) 43

Figura 10 Tren de carros en rampa/galería inclinada 44

Figura 11 Jumbo electrohidráulico en preparación del frente 45

Figura 12 Infraestructura superficial y LHD en parqueo operativo 46

Figura 13 Frente de avance con sostenimiento y jumbo en interior mina 47

Figura 14 Modelo de simulación del sistema de acarreo en Python–SimPy (Primera Parte) . 80

Figura 15 Modelo de simulación del sistema de acarreo en Python–SimPy (Segunda Parte) 82

Figura 16 Código de análisis y visualización de resultados de la simulación. 84

Figura 17 Comparativo general de KPIs – Escenario Base vs. Escenario Simulado. 95

Figura 18 Tiempos de ciclo por componente – Escenario Base vs. Escenario Simulado. 96

Figura 19 Distribución de tiempos operativos y no operativos del sistema de acarreo. 97

Figura 20 Intervalo de confianza (IC 95 %) del tiempo de ciclo – Escenario Base vs. Simulado. 98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables 27

Tabla 2 Programa de mantenimiento considerado en la simulación 66

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Empresa Minera Sociedad de Trabajadores Mineros – SOTRAMI S.A. se dedica a la explotación, extracción y beneficio de minerales metálicos, operando principalmente en dos zonas: la Zona 23, que abarca 14 niveles con labores de tajeo activas entre los niveles 8 y 13, y la Zona Santa Rosa, con 6 niveles y tajeos de explotación en los niveles 4, 5 y 6. Estas áreas han sido desarrolladas con un diseño de gradientes adecuados para el transporte mediante carros mineros tipo U-35, pero a pesar de la infraestructura minera existente y la experiencia operativa acumulada, el sistema de acarreo subterráneo enfrenta una serie de desafíos que comprometen su eficiencia y su productividad a largo plazo.

La operación presenta actualmente deficiencias en la gestión dinámica del acarreo, lo que se traduce en tiempos de ciclo prolongados, baja cantidad de viajes por guardia, sub utilización de

los equipos de transporte y un incumplimiento parcial de los volúmenes planificados de mineral transportado por turno. Esta situación se vuelve más compleja por el método de explotación adoptado, corte y relleno ascendente que afecta la continuidad del flujo de mineral.

Además, el incremento en el plan anual de producción —de 24,950 a 26,550 TMH. Como resultado, el número de viajes por turno ha disminuido, los tiempos improductivos aumentan, y las pérdidas económicas derivadas de estos retrasos se acumulan progresivamente. Este incremento fue asumido especialmente por la Zona 23, que en los últimos cinco meses del año debía aportar un adicional de 320 TMH/mes.

Sin embargo, este esfuerzo por elevar la producción no ha sido acompañado por un proceso sistemático de análisis del sistema de acarreo, ya que la falta de herramientas tecnológicas que permitan simular, medir y optimizar el flujo de mineral ha dificultado la toma de decisiones estratégicas. En consecuencia, los costos operativos han aumentado, el tiempo ocioso de los equipos es considerable y la posibilidad de prevenir cuellos de botella es limitada. En este escenario, la ausencia de una visión integral y predictiva del proceso de acarreo compromete tanto el cumplimiento de metas productivas como la sostenibilidad de la operación en el mediano plazo.

1.2.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

- ¿Cómo mejorar el sistema de acarreo subterráneo mediante simulación de eventos discretos en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es el estado actual del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho?

- ¿Cómo influye la simulación con SimPy en el desempeño del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho?
- ¿Qué impacto tiene la mejora del sistema de acarreo subterráneo en los costos operativos en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho?

1.3.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Proponer la mejora del sistema de acarreo subterráneo mediante simulación de eventos discretos en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el estado actual del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho.
- Aplicar simulación con SimPy para mejorar el desempeño del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho.
- Analizar el impacto de la mejora del sistema del acarreo subterráneo en los costos operativos en la U.M. SOTRAMI, Ayacucho.

1.4.DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. DELIMITACIÓN GEOGRÁFICA.

El proyecto de investigación está delimitado a la Zona 23 en la U.M. SOTRAMI

1.4.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL.

La investigación se dará en los meses de enero a setiembre del 2025

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Soto, Anani y Córdova (2022), en su articulo "A discrete event simulation approach for mine development planning at Codelco's New Mine Level" articulo publicado en *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* - Pontificia Universidad Católica de Chile.

Se desarrollo un modelo de simulación de eventos discretos con el propósito de optimizar la planificación del desarrollo de túneles, un proceso que enfrenta múltiples restricciones operativas y estructurales. Ante la dificultad de alcanzar las metas de desarrollo lineal propuestas bajo el sistema actual, la investigación propuso una descomposición detallada del proceso en actividades individuales (perforación, voladura, carguío, transporte, ventilación, entre otras), integrando parámetros como disponibilidad de equipos, interferencias operativas y acceso a puntos de vaciado (orepasses).

El modelo, ejecutado con más de 1,000 réplicas, permitió identificar que el cumplimiento de metas de desarrollo requería no solo mayor disponibilidad de equipos, sino también una secuencia operativa optimizada, incluyendo el rediseño de la logística subterránea. Entre los escenarios evaluados, se logró incrementar el desarrollo acumulado de 1,165 m a 1,598 m en seis años, mediante una planificación basada en restricciones reales y decisiones proactivas.

El estudio demostró que la simulación de eventos discretos es una herramienta efectiva para representar entornos subterráneos complejos, donde múltiples actividades y recursos interactúan de forma dinámica y secuencial. Los autores concluyen que este enfoque permite reducir significativamente los riesgos de incumplimiento en la planificación minera y proponen su integración con software especializado como Datamine Studio UG para potenciar su aplicabilidad. Esta experiencia marca un precedente metodológico valioso para procesos como el acarreo subterráneo, donde las decisiones de asignación de flota, secuencia operativa y gestión de cuellos de botella pueden ser optimizadas usando lógica discreta y modelos dinámicos.

Xu, Ye, Lu y Zhang (2011) "Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System" artículo presentado en *Conference on Engineering Simulation and Modeling Springer* - China University of Mining and Technology.

Se desarrollo un modelo de simulación de eventos discretos aplicado al sistema de acarreo horizontal de la mina de carbón Datun, ubicada en el distrito de Xuzhou, China. El objetivo principal fue realizar una evaluación científica de la eficiencia del sistema de transporte de ganga, identificando cuellos de botella operativos y proponiendo mejoras estructurales mediante simulación. Para ello, se tomó como referencia un sistema real operado bajo control PLC,

modelando digitalmente los distintos elementos del proceso: trenes, estaciones de carga y descarga, puntos de espera y rutas principales.

El trabajo definió como entidades móviles a los trenes, asignándoles lógica de circulación cíclica bajo reglas de cola tipo FIFO. Las rutas 2 a 5 fueron identificadas como zonas críticas debido a su alta congestión, al ser compartidas por múltiples pozos de acarreo. A través del ajuste de parámetros como número de unidades y frecuencias de carga, se simuló el flujo completo de transporte, evaluando el rendimiento del sistema bajo distintos escenarios dinámicos.

El modelo permitió identificar que una adecuada planificación del flujo y reasignación de recursos podía incrementar significativamente la capacidad operativa del sistema. Además, se demostró que la simulación discreta constituye una herramienta efectiva para anticipar fallas logísticas y validar estrategias de mejora sin interrumpir las operaciones reales.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Pinedo y Grados (2023) en su tesis "Modelo predictivo de planificación operativa bajo el enfoque de machine learning para gestionar los tiempos de ciclo del volquete en una mina subterránea" para obtener el título de Ingeniero de Minas - Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Se planteo una propuesta basada en aprendizaje automático con el fin de optimizar el ciclo de acarreo en operaciones subterráneas. Reconociendo que el acarreo representa una proporción significativa del costo operativo total, los autores utilizaron datos históricos reales del sistema de gestión de flota, abarcando más de 590,000 registros que incluían información como tiempo de carga, descarga, distancia, equipos involucrados y locaciones.

La metodología implementada consistió en entrenar una red neuronal de tipo backpropagation, programada en Python y ejecutada en el entorno Orange. Esta red se estructuró

con 17 entradas, una capa oculta de 100 neuronas y una salida para predecir el tiempo de ciclo del volquete. El modelo fue validado con métricas de precisión y error, logrando altos niveles de exactitud. Además, se compararon diferentes algoritmos de aprendizaje (SVM, KNN, RF), concluyendo que la red neuronal ofrecía los mejores resultados para la predicción dinámica de tiempos de acarreo. Como resultado, se obtuvo una herramienta que permite tomar decisiones informadas y eficientes en la planificación operativa minera, contribuyendo significativamente a la mejora del rendimiento del sistema de transporte subterráneo.

Vásquez (2024), en su tesis "Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023" para obtener el título de Ingeniero de Minas - Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Se propuso optimizar el sistema de acarreo en minería subterránea mediante simulación de eventos discretos, considerando distintos escenarios de operación con Scooptram y volquetes. La investigación partió de un problema real: la disminución de la eficiencia operativa en el transporte de mineral debido a las largas distancias entre los puntos de extracción y los centros de acopio.

Utilizando el software Arena, se construyó un modelo de simulación que replicaba el proceso de carga, transporte y descarga, con énfasis en los tiempos improductivos del sistema. Para ello, se trabajó con datos reales de campo y se programaron escenarios con distintas configuraciones de flota para evaluar el número óptimo de equipos requeridos. Se consideraron distancias de 3800, 4700 y 5300 metros, y se analizó el impacto de estas sobre la cantidad de ciclos diarios posibles y la producción total estimada.

Los resultados evidenciaron que a mayor distancia, la cantidad de ciclos disminuye, lo que afecta directamente la producción, y que una adecuada configuración de flota mejora

significativamente los indicadores operativos. El modelo permitió identificar los cuellos de botella, especialmente en la disponibilidad de Scooptram en relación a la llegada de los volquetes. En conclusión, la simulación por eventos discretos resultó una herramienta eficaz para mejorar el diseño operativo del acarreo subterráneo, optimizando el uso de recursos y reduciendo tiempos muertos, lo cual puede ser replicado en otras unidades mineras con características similares.

Bujaico y Huayanca (2022), en su tesis "Aplicación de simulación discreta en la estimación del número de camiones en una mina de cobre a tajo abierto" para obtener el titulo de Ingeniero de Minas – Pontificia Universidad Católica del Perú.

Se desarrollo un modelo basado en simulación de eventos discretos con el objetivo de mejorar el cálculo de flota de camiones necesario para cumplir con el plan anual de producción de una mina a tajo abierto. El estudio identificó que las metodologías tradicionales de dimensionamiento de flota no consideran adecuadamente la variabilidad inherente al ciclo de transporte, lo cual puede afectar directamente el cumplimiento de las metas productivas. A través del uso de simulaciones estocásticas y herramientas como el software Arena, los autores lograron estimar con mayor precisión la cantidad de camiones requeridos bajo distintos escenarios operativos, lo cual permitió optimizar los tiempos del ciclo y reducir los cuellos de botella generados por la asignación ineficiente de recursos.

En su análisis, se destacó que el uso de modelos probabilísticos permite incorporar variables aleatorias clave como los tiempos de carga, descarga, viaje y espera, generando una representación más realista de las condiciones de operación. Esto es especialmente útil en contextos de crecimiento o expansión, donde los márgenes de error en planificación logística pueden repercutir significativamente en los costos. Asimismo, se evidenció que una correcta

calibración de estos modelos puede llevar a decisiones operativas más eficientes, reduciendo el número de simulaciones necesarias y facilitando el análisis de sensibilidad en función de la flota, la geografía y el throughput del sistema.

2.2.BASES TEÓRICAS

2.2.1. OPERACIONES DEL PROCESO MINERO

Gonzales (2018) describe las operaciones involucradas en el proceso minero, enfocándose en la fase de extracción, la cual se compone de las siguientes etapas:

- Perforación: Esta etapa inicia con la planificación de una malla de perforación adecuada, seguida por la ejecución de taladros con equipos específicos. Una vez perforada la roca, se introducen explosivos en las cavidades generadas, preparándolas para la fragmentación. Esta operación exige precisión técnica, tanto en la alineación como en la profundidad, para garantizar una voladura eficiente y segura.
- Voladura: Consiste en la detonación controlada de los explosivos introducidos durante la perforación. Esta voladura debe garantizar una granulometría adecuada para facilitar las etapas posteriores de carguío y transporte. La eficiencia de la voladura impacta directamente en el rendimiento del carguío, la estabilidad de las labores y la seguridad operativa.
- Carguío: El material fragmentado es recogido por equipos LHD, como los scooptrams, y posteriormente transferido a volquetes u otros vehículos destinados al transporte subterráneo. En este punto, es importante considerar el diseño del

frente de carguío, el acceso, la visibilidad y la maniobrabilidad del equipo, ya que afectan los tiempos del ciclo.

- Acarreo: Finalmente, el material es desplazado desde el frente de explotación hacia su destino final, que es la zona de descarga de mienral. Dependiendo de su ley, el mineral puede ser dirigido a botaderos (baja ley), a stocks (ley intermedia) o al área de chancado (alta ley). Esta etapa requiere coordinación con el sistema de despacho y planificación, para evitar acumulaciones o retrasos en los puntos de vaciado.

Figura 1

Operaciones del proceso minero

Fuente: slideshare

2.2.2. SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MINERAL

Los sistemas de transporte de mineral son componentes esenciales en las operaciones mineras subterráneas, ya que su diseño y eficiencia tienen un impacto directo en la productividad global del yacimiento. Mutmansky y Ramani (2011) subrayan la importancia de implementar sistemas que minimicen tiempos muertos y maximicen la capacidad de carga.

La planificación de rutas, el mantenimiento adecuado de equipos, la asignación eficiente de recursos y la reducción de interferencias operativas son factores críticos que deben ser gestionados de forma integrada. Además, el control del tránsito en labores estrechas, el cruce de equipos y la señalización también juegan un papel crucial en entornos subterráneos.

Una gestión eficiente del transporte no solo mejora los indicadores de producción, sino que también contribuye a la sostenibilidad económica de la mina. En el contexto de minas polimetálicas y auríferas, donde los márgenes operativos son ajustados, cada tonelada correctamente transportada impacta directamente en el valor neto del negocio.

2.2.3. DEFINICIÓN DE TIEMPOS

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.), adaptada al contexto operativo por CODELCO (2005), clasifica los tiempos operacionales del equipo minero en distintas categorías:

Nominal: Se refiere al intervalo total de tiempo en que se realiza la medición de la disponibilidad de un equipo. Este periodo está definido por la programación de actividades operativas y productivas, y depende directamente de la duración efectiva de la jornada o faena en la que el equipo debería estar operativo. En otras palabras, es el tiempo base sobre el cual se comparan las demás categorías de uso del equipo.

Fuera de Servicio: Es el tiempo durante el cual el equipo no está disponible para operar debido a una condición de indisponibilidad técnica. Esto puede deberse a mantenimiento programado (preventivo o correctivo) o a fallas inesperadas de origen mecánico, eléctrico o electrónico. En esta categoría se incluye cualquier situación que imposibilite el uso del equipo por causas técnicas, independientemente de la demanda operativa.

Disponible: Representa el tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente apto y sin restricciones técnicas para operar. Es decir, está en condiciones físicas y funcionales para cumplir su función según diseño. Sin embargo, que esté disponible no implica necesariamente que esté en uso.

Reserva: Es el periodo en el que el equipo, pese a estar técnicamente en condiciones óptimas para operar, no está siendo utilizado. Esto puede ocurrir por falta de operador asignado, exceso de flota en espera o condiciones específicas de la operación que limitan su uso. La categoría "reserva" permite identificar posibles ineficiencias relacionadas a la gestión de personal o a la programación de equipos excedentes.

Operativo: Se refiere al tiempo en que el equipo se encuentra tanto disponible mecánicamente como en operación efectiva. Esto implica que cuenta con un operador asignado y está ejecutando actividades que aportan directamente a los objetivos productivos de la operación minera. Este es el tiempo que se busca maximizar en toda operación.

Demoras Programadas: Comprende los tiempos en que el equipo no realiza su función de diseño debido a interrupciones planificadas por normativas laborales o por la programación de faenas. Entre estas se incluyen pausas legales obligatorias como descanso, almuerzo (colación), reuniones de seguridad, y los cambios de turno. Si bien no representan fallas ni omisiones, deben ser considerados para medir correctamente la eficiencia real del equipo.

Demoras No Programadas: Tiempos en los que el equipo está inactivo debido a fallos o condiciones operativas imprevistas. Estas pueden incluir desperfectos mecánicos, bloqueos de vía o ausencia de operadores.

Efectivo: Tiempo en el que el equipo realiza su función principal conforme a su diseño. Aquí se mide la verdadera productividad del recurso.

Pérdidas Operacionales: Tiempos de espera generados por la falta de disponibilidad de equipos complementarios. Es decir, cuando un equipo está listo para operar pero depende de otro (por ejemplo, un volquete esperando que el scooptram termine de cargar).

2.2.4. TIEMPOS DE CICLO

Según Lineberry (1985), el concepto de ciclo operativo se define como el tiempo que requiere cualquier equipo para completar un ciclo de operación. En el caso de un camión, este tiempo abarca desde el aculatamiento y la carga en el equipo de carguío, el viaje cargado al sitio de descarga, el aculatamiento y la descarga en el botadero, hasta el retorno vacío al equipo de carguío. Además, se contemplan las demoras tanto programadas como no programadas, así como los tiempos de espera durante el ciclo operativo.

En la formula se muestran los componentes típicos de un ciclo de carguío y transporte en una mina subterránea.

$$Tciclo\ transporte = Tciclo\ carguío\ scooptram(LHD) + Tciclo\ volquete$$

Donde:

$$Tciclo\ carguío\ \ scooptram(LHD) = Tc + Td + Tm + Tvc + tvv$$

- Tc : Tiempo de carga; es el tiempo que el scooptram demora en promedio en cargar la cuchara en el punto de extracción.

- Td : Tiempo de descarga; es el tiempo que el scooptram demora en promedio en vaciar la cuchara en el punto de vaciado.
- Tm : Tiempo maniobra; es el tiempo que el operador del equipo scooptram demora en promedio para realizar las maniobras de un ciclo
- Tvc : Tiempo de viaje balde lleno; es el tiempo que el scooptram demora en promedio en viajar desde el punto de extracción hasta el punto de vaciado con la cuchara llena.
- Tvv : Tiempo de viaje balde vacío; es el tiempo que el scooptram demora en promedio en viajar desde el punto de vaciado hasta el punto de extracción con la cuchara vacía.

$$Tciclo\ volquete = Tc + Tt + Td + Tr$$

- Tc : Tiempo de carga.
- Tt : Tiempo de transporte.
- Td: Tiempo de descarga.
- Tr : Tiempo de retorno o regreso.

En la industria minera, la forma más habitual de estimar el tiempo de ciclo de los Volquetes es mediante la velocidad que estos pueden alcanzar, la cual se obtiene a través de guías de desempeño proporcionadas por el fabricante. Estas guías son el resultado de simulaciones que consideran diversos factores, como la potencia del motor, la eficiencia en la transmisión de la energía, el peso del camión, su capacidad, velocidad rimpull, pendientes y las condiciones del camino. Asimismo, también se pueden emplear modelos de regresión para calcular estimados de los tiempos de ciclo de los Volquetes. (González, 2018)

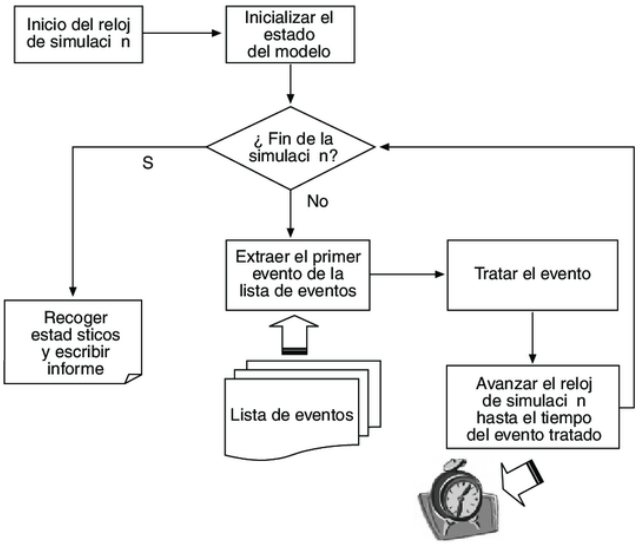
2.2.5. SIMULACIÓN

2.2.5.1. SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

La simulación por eventos discretos (Discrete Event Simulation, DES) es aplicada en el estudio de sistemas que pueden ser representados mediante modelos lógico matemáticos discretos. En los mismos las variables de interés cambian de manera instantánea, sólo en un determinado número contable de instantes precisos, dado un intervalo determinado de tiempo. Se define como evento (v), al conjunto atómico de modificaciones sobre las variables de estado del sistema en un instante determinado. (Paez et. ol. 2011).

Figura 2

Simulación de eventos discretos



Fuente: Monleon (2008)

2.2.5.2. SIMULACIÓN, SISTEMA Y MODELO

Según Medina y Vasquez (2018), la simulación se define como una técnica que posibilita la representación y recreación del funcionamiento de un sistema del mundo real a medida que transcurre el tiempo. El propósito principal de esta técnica es proponer diversas alternativas que

contribuyan a mejorar el sistema. El sistema que se desea estudiar se conoce como el proceso o caso de estudio.

Para llevar a cabo la simulación de un sistema, es imperativo contar con un modelo previo del mismo. Un modelo se concibe como la representación de un sistema real diseñada para ser examinada y manipulada con el objetivo de tomar decisiones respecto a alternativas de desarrollo a implementar en dicho sistema (Medina y Vasquez, 2018).

Es esencial que el modelo posea un nivel de detalle considerable para permitir al modelador evaluar con un alto grado de confianza las conclusiones que se aplicarán al sistema real. Además, debe ser de fácil comprensión, manipulación y control por parte del modelador.

2.2.5.3. COMPONENTES DE LA SIMULACIÓN

"Para estudiar un modelo de simulación, es necesario identificar cada uno de los elementos que componen un sistema. Los elementos que lo componen son":

2.2.5.3.1. ENTIDADES

Un componente de interés en la simulación es aquel que representa un objeto en movimiento, experimentando cambios de estado e interactuando con otras entidades. Este componente es fundamental para comprender el comportamiento dentro del sistema real y proponer alternativas de mejora que contribuyan a la eficiencia del sistema (Medina y Vasques, 2018).

En algunos casos, la entidad representada puede ser ficticia, utilizada con el propósito de modelar "artificios" que son necesarios en la construcción del modelo. Este enfoque permite abordar aspectos específicos del sistema y evaluar posibles mejoras de manera más completa y precisa.

2.2.5.3.2. ATRIBUTOS

En el contexto de la simulación, los atributos son características que pertenecen a una entidad y son asignados por el modelador. Estos atributos desempeñan un papel crucial al permitir la distinción entre diferentes entidades. Cada entidad posee atributos específicos, que son variables locales propias y únicas para esa entidad en particular (Medina y Vasques, 2018). Estos atributos son esenciales para la representación detallada y la manipulación precisa de cada entidad en el modelo.

2.2.5.3.3. ACTIVIDADES

De acuerdo con Medina y Vasques (2018), un módulo de actividad en la simulación es donde una entidad participa en una actividad o proceso específico. Para que la entidad atraviese este proceso, se requiere que tome un tiempo previamente conocido para ejecutarlo. Este módulo se divide en dos categorías:

- Sin recurso: “Todas las entidades pueden ingresar a la actividad o proceso, toman su tiempo de demora especificado y salen. Por ejemplo, caminar, donde todas las personas (entidades) caminan en una zona específica y les tomará un tiempo conocido”.
- Con recursos: “La entidad ingresa a la actividad, adquiere un recurso, realiza la actividad en un tiempo conocido y se retira. Si no hay más recursos disponibles, otras entidades no podrán ingresar a la actividad hasta que se libere uno, formando una fila o cola".

La duración de una actividad puede ser constante, empírica o estocástica, y también se puede asignar una duración ficticia igual a cero. Este enfoque permite modelar diversos escenarios y condiciones dentro del sistema simulado.

2.2.5.3.4. EVENTOS

Según Medina y Vasques (2018), un evento en la simulación se define como el cambio de estado del sistema y sus propiedades, generado por el ingreso o salida de un atributo. Los eventos pueden clasificarse en exógenos y endógenos. En el contexto de este proyecto, un evento exógeno sería la llegada de los volquetes con carga a la trituradora primaria, mientras que un evento endógeno sería la descarga del material en dicha trituradora. Estos eventos son fundamentales para modelar las dinámicas del sistema y capturar los cambios relevantes en su estado.

2.2.5.3.5. VARIABLES DEL ESTADO DEL SISTEMA

En el contexto de la simulación, las variables de estado son características globales que son necesarias para definir en detalle los eventos del sistema en un tiempo específico (Medina y Vasques, 2018). Algunos ejemplos de variables de estado incluyen:

- El estado de la trituradora donde se descarga el mineral proveniente del frente: Activo, inactivo, ocupado o desocupado.
- Número de Volquetes en el sistema.

Estas variables de estado son fundamentales para capturar y representar la situación actual del sistema en un momento dado, permitiendo una evaluación completa y detallada de su funcionamiento.

2.2.5.3.6. FILAS

"La cola, comúnmente conocida como fila, es el lugar en el sistema donde las entidades se detienen. Por lo general, las filas se generan al inicio de una actividad cuando los recursos están siendo utilizados por una entidad" (Medina y Vasques, 2018).

El comportamiento de un atributo se refiere a la manera en que actúa frente a una fila. Las situaciones relacionadas con el comportamiento incluyen la posibilidad de saltar la fila, moverse

entre filas o simplemente abandonarla, evitando así la actividad. Estos comportamientos son cruciales para modelar las interacciones dinámicas y las decisiones de las entidades dentro del sistema simulado.

2.2.5.4. SIMULACIÓN PARA MINERÍA

La aplicación del modelo de simulación en la industria minera se ha convertido en una técnica ampliamente utilizada gracias al avance tecnológico-informático. Los estudios de simulación pueden llevarse a cabo utilizando modelos del tipo continuo o discreto, siendo la mayoría de las operaciones mineras ejemplos de sistemas de eventos discretos (Bedón, 2005).

Uno de los primeros proyectos de modelo de simulación en minería fue desarrollado por Karsten Rist en 1961. Este modelo se utilizó para optimizar el número de vagones necesarios en un sistema de acarreo en una mina subterránea de molibdeno en los Estados Unidos (Meza, 2011).

En etapas posteriores, Madge (1964) logró simular el transporte en una mina a cielo abierto en Canadá. Un año después, Sanford (1964) construyó un modelo para simular un sistema de cintas transportadoras como parte de su tesis en la Universidad de Pensilvania. Morgan y colaboradores (1969) también contribuyeron al campo al mostrar cómo realizar una simulación estocástica de una operación minera a cielo abierto (Meza, 2011). Estos primeros proyectos sentaron las bases para la aplicación generalizada de la simulación en la industria minera.

Los modelos de simulación se destacan como herramientas eficaces para abordar y resolver diversos problemas dentro de las operaciones mineras. Algunos de los problemas clave que pueden ser tratados mediante modelos de simulación incluyen:

- Modelado de Cintas Transportadoras: La simulación se utiliza para representar y optimizar el funcionamiento de sistemas de cintas transportadoras en entornos mineros.

- Carguío y Transporte de Material en Operaciones a Cielo Abierto: La simulación se aplica para analizar y mejorar los procesos de carguío y transporte de material en operaciones a cielo abierto, permitiendo una planificación más eficiente.
- Operaciones con el Método de Cámaras y Pilares: Los modelos de simulación son útiles para comprender y optimizar las operaciones mineras que emplean el método de cámaras y pilares.

Actualmente, dos de los lenguajes de simulación más ampliamente utilizados en operaciones mineras son GPSS/H (con la galería PROOF para la animación) y el software Arena (Meza, 2011). Estas herramientas proporcionan a los profesionales mineros las capacidades necesarias para modelar y analizar complejos escenarios operativos, facilitando la toma de decisiones informadas y la mejora continua de los procesos.

2.2.6. PYTHON

Python es un lenguaje de programación de alto nivel que ha ganado gran popularidad en el ámbito académico, profesional e industrial debido a su enfoque en la simplicidad, versatilidad y potencia. Su sintaxis clara y su estructura intuitiva lo convierten en una herramienta ideal tanto para programadores novatos como experimentados. Python permite abordar una amplia gama de problemas, desde automatización de tareas hasta análisis de datos, desarrollo web y simulación de sistemas.

Según Sweigart (2015), uno de los mayores aportes de Python es su capacidad para simplificar tareas repetitivas mediante scripts fáciles de desarrollar y mantener. Esto ha convertido a Python en una pieza clave para optimizar procesos operativos, mejorar la eficiencia y reducir el tiempo dedicado a labores rutinarias.

2.2.11. VENTAJAS DE PYTHON

Python se distingue por su sintaxis limpia y su diseño centrado en la legibilidad del código. Como sostiene McKinney (2017), esta cualidad permite a los desarrolladores entender, mantener y compartir fácilmente sus programas, lo cual es crucial en entornos colaborativos o cuando se trabaja en proyectos a largo plazo. Esta accesibilidad contribuye también a la disminución de errores y acelera el tiempo de desarrollo.

Otra de sus fortalezas es su extensa biblioteca estándar, la cual incluye módulos preconfigurados para realizar tareas como procesamiento de texto, gestión de archivos, conexión a redes y automatización de sistemas. Gracias a ello, los usuarios pueden construir soluciones complejas sin necesidad de recurrir a herramientas externas. La documentación oficial de Python (2023) resalta la capacidad de estas bibliotecas para resolver problemas prácticos sin escribir líneas de código desde cero.

Además, Python es un lenguaje multiplataforma, lo que significa que los programas desarrollados pueden ejecutarse sin modificaciones en sistemas operativos como Windows, Linux o macOS. Esta portabilidad, indica McKinney (2017), es especialmente valiosa en proyectos empresariales que requieren consistencia operativa en múltiples entornos tecnológicos.

2.2.6.1. LIBRERÍAS DE PYTHON

Las librerías de Python consisten en colecciones de módulos y funciones ya programadas que permiten ejecutar una gran variedad de tareas sin necesidad de desarrollar el código desde cero. Estas herramientas están diseñadas para simplificar la implementación de procesos complejos dentro del entorno de programación Python, agilizando el desarrollo y aumentando la eficiencia. A continuación, se describen las principales librerías empleadas en la presente investigación:

- **Pandas**

  Esta biblioteca es ampliamente utilizada en el análisis de datos debido a su capacidad para importar, leer y manipular archivos en diversos formatos como CSV, Excel (XLSX), SQL, HDF5, entre otros. Pandas permite ejecutar operaciones complejas sobre estructuras de datos como series y dataframes, facilitando tareas de limpieza, transformación, filtrado y visualización básica de datos. Su uso es esencial para gestionar grandes volúmenes de información de manera organizada y eficiente (Castillo, 2022).

- **NumPy**

  NumPy es una librería fundamental para el cálculo numérico en Python. Su principal fortaleza radica en la implementación de estructuras de datos eficientes como arrays unidimensionales y multidimensionales. Además, proporciona un conjunto de funciones matemáticas que permiten realizar operaciones algebraicas, estadísticas y científicas de manera optimizada, siendo la base para muchas otras librerías científicas.

- **Matplotlib**

  Esta librería permite la creación de gráficos bidimensionales (2D) a partir de datos contenidos en listas, arrays o estructuras tabulares. Matplotlib es ideal para representar visualmente patrones, tendencias y distribuciones, mediante gráficos de líneas, barras, histogramas, dispersión, entre otros. Es una herramienta clave para el análisis exploratorio de datos y la presentación de resultados visuales comprensibles.

- **Scikit-learn (sklearn)**

  Scikit-learn es una de las bibliotecas más utilizadas en el ámbito del aprendizaje automático (machine learning). De código abierto, ofrece una amplia variedad de

algoritmos para clasificación, regresión, agrupamiento (clustering) y reducción de dimensionalidad. Asimismo, incluye funciones para la evaluación de modelos, particionado de conjuntos de datos y ajuste de hiperparámetros, lo que la convierte en una herramienta integral para proyectos de inteligencia artificial y análisis predictivo (Castillo, 2022).

- **SimPy**

  Es una biblioteca de simulación de eventos discretos escrita en Python que permite modelar sistemas dinámicos complejos donde los cambios de estado ocurren en momentos específicos en el tiempo.

  Su principal fortaleza radica en que permite simular procesos basados en lógica secuencial, utilizando una sintaxis clara y orientada a procesos (procesos como generadores). SimPy es ideal para representar sistemas como líneas de producción, redes de transporte, operaciones logísticas o, en el caso de la minería, ciclos de acarreo y carguío. Gracias a su estructura basada en eventos, permite medir tiempos de espera, uso de recursos, tiempos de cola y cuellos de botella, proporcionando una visión detallada del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

2.3.DEFINICIÓN DE TERMINOS

- **Simulación de Eventos Discretos (SED):** La Simulación de Eventos Discretos es una técnica de modelado que representa el funcionamiento de un sistema real o hipotético mediante una secuencia de eventos que cambian el estado del sistema en puntos discretos del tiempo. Cada evento representa una acción o transición, como el inicio o final de una tarea, la asignación de un recurso o la llegada de una entidad. Esta técnica permite estudiar el comportamiento dinámico del sistema, medir tiempos de espera, utilización de recursos

y evaluar el impacto de decisiones operativas antes de su implementación en el campo. En minería subterránea, la SED es ideal para modelar operaciones de acarreo, programación de flotas y análisis de cuellos de botella.

- **Evento:** En el contexto de la simulación, un evento es una unidad de cambio que altera el estado del sistema. Puede ser endógeno (generado internamente por las condiciones del sistema, como el fin de una carga) o exógeno (provocado por factores externos, como la llegada de un nuevo equipo). Los eventos marcan el ritmo de evolución del modelo y permiten representar la lógica operacional de manera secuencial y controlada.
- **Proceso:** Un proceso es una serie de acciones que se ejecutan en una secuencia lógica en el tiempo, comúnmente asociadas a una entidad dentro del sistema simulado. En SimPy, los procesos son programados como funciones generadoras, lo que permite simular la ejecución parcial, las pausas y las reanudaciones de una operación. Esto es útil para representar operaciones como el ciclo completo de un volquete o scooptram, desde su inicio hasta el retorno al punto de origen.
- **Recurso:** Un recurso en simulación es cualquier elemento limitado que puede ser solicitado y utilizado por procesos para completar una tarea. En minería, los recursos pueden ser equipos móviles, operadores, vías de acarreo, puntos de descarga o zonas de carga. En SimPy, los recursos son modelados como objetos que pueden ser reservados, liberados y monitoreados, permitiendo analizar su nivel de utilización y su impacto en los tiempos de espera del sistema.

Tiempo de Ciclo: El tiempo de ciclo es la duración total que toma a un equipo completar una ronda completa de operación, incluyendo todas sus fases: carga, traslado, descarga y retorno.

Su análisis permite identificar la eficiencia operativa de los equipos y constituye un indicador clave para evaluar la productividad de un sistema de acarreo.

2.4.HIPÓTESIS

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

- Aplicando simulación de eventos discretos con SimPy se logrará mejorar el sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- Evaluando el estado actual del sistema de acarreo se identificarán sus principales limitaciones en la U.M. SOTRAMI.
- Aplicando simulación con SimPy se mejorará el desempeño del sistema de acarreo en la U.M. SOTRAMI.
- Mejorando el sistema de acarreo se reducirán los costos operativos en la U.M. SOTRAMI.

2.4.3. VARIABLES E INDICADORES

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Tipo	Definición	Dimensión	Indicadores (Unidad de medida)
V1: Simulación de eventos discretos con SimPy	Independiente	Es la modelación computacional del proceso de acarreo subterráneo mediante la biblioteca SimPy de Python, donde se representan eventos y recursos para analizar el comportamiento dinámico del sistema.	Modelado de procesos	- Tiempo de ciclo simulado (minutos) - Utilización del equipo en el modelo (%) - Número de iteraciones
V2: Mejora del sistema de acarreo	Dependiente	Se refiere al conjunto de mejoras observadas en el desempeño del sistema de acarreo subterráneo como resultado de la simulación, evaluadas en términos de eficiencia, productividad y costos operativos.	Eficiencia del sistema de acarreo	- Tiempo total de acarreo (minutos) - Cantidad de viajes por guardia (viajes/guardia) - Toneladas transportadas por guardia (TM/guardia)
			Productividad del acarreo	- Tonelaje por hora (TM/hora) - Tiempo promedio por ciclo de acarreo (minutos) - % de cumplimiento del plan diario (%)
			Costos operativos del acarreo	- Costo por tonelada transportada (S/TM) - Consumo de combustible (galones/guardia) - Tiempo ocioso del equipo (horas/guardia)

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo aplicada y cuantitativa, ya que busca implementar la simulación de eventos discretos con SimPy, para mejorar el sistema de acarreo subterráneo basada en el análisis y procesamiento de datos numéricos relacionados con la eficiencia, productividad y costos operativos del acarreo. Es una investigación aplicada porque busca resolver un problema operativo real dentro de una unidad minera en funcionamiento. (Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista, 2014)

3.2.NIVEL DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con los objetivos y alcance planteado, el nivel de la presente investigación es correlacional**,** ya que busca determinar la relación entre simulación con SimPy y los cambios generados en la eficiencia del acarreo, la productividad y los costos operativos (Hernández-

Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014). Será propositiva**,** ya que además de analizar, se plantea una propuesta de optimización del sistema mediante la implementación de un modelo de simulación.

3.3.DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según la naturaleza y el periodo de recolección de información, la investigación tiene un diseño longitudinal**,** ya que los datos serán recolectados de manera sistemática a lo largo de un periodo de tiempo determinado, abarcando información operativa comprendida entre enero y septiembre del año 2025 (Hernández-Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

3.4.UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis de la presente investigación está constituida por el sistema de acarreo subterráneo de la Zona 23 de la Unidad Minera SOTRAMI, entendido como el conjunto de ciclos de operación de los carros U–35 (carguío–transporte–descarga–retorno) entre los frentes de explotación y los puntos de descarga (tolvas y buzones), con sus respectivas rutas, distancias, tiempos de ciclo y demoras operativas y no operativas, durante el periodo comprendido entre enero y setiembre de 2025. Sobre esta unidad de análisis se evalúan los cambios en eficiencia, productividad y costos operativos derivados de la aplicación de la simulación de eventos discretos con SimPy.

3.5.POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de estudio está conformada por todos los registros operativos de acarreo generados en la Zona 23 de la U.M. SOTRAMI en el periodo enero–setiembre de 2025, incluyendo partes de guardia, reportes diarios de producción, hojas de control de viajes, toneladas transportadas, tiempos de ciclo y demoras asociadas al carguío, transporte, descarga y retorno. Esta

población representa el comportamiento real del sistema de acarreo en las condiciones habituales de operación de la unidad minera.

La muestra está constituida por el conjunto de guardias y ciclos de acarreo que cuentan con información completa, consistente y verificable para el análisis estadístico y la calibración del modelo de simulación. En particular, se consideran las guardias con registro íntegro de viajes por turno, toneladas por guardia, tiempos por etapa del ciclo y clasificación de demoras, excluyendo aquellas jornadas con paradas extraordinarias o información incompleta que pudieran distorsionar la representación del comportamiento típico del sistema. La selección de esta muestra se realiza mediante un muestreo no probabilístico, orientado a disponer de datos de alta calidad para el diagnóstico de la línea base y la validación del modelo en SimPy.

3.6.TÉCNICA DE SELECCIÓN DE MUESTREO

La técnica de muestreo empleada en la investigación es no probabilística, de tipo intencional o por conveniencia, dado que las unidades muestrales (guardias y registros de acarreo) no se eligen al azar, sino de manera deliberada según su pertinencia y calidad de información. En este sentido, se seleccionan únicamente aquellos registros que: (i) presentan datos completos y detallados de tiempos de ciclo y demoras, (ii) registran de forma confiable las toneladas transportadas y el número de viajes por guardia, y (iii) corresponden a condiciones operativas habituales, sin eventos extraordinarios que alteren significativamente el desempeño del sistema (paradas mayores, emergencias, cierres, etc.). Esta estrategia de muestreo no probabilístico permite conformar una base de datos robusta y representativa del comportamiento operativo típico, adecuada para el análisis cuantitativo y la construcción y calibración del modelo de simulación de eventos discretos.

3.7.TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE CAPTURA DE INFORMACIÓN

Para la presente investigación se empleará:

- Técnica documental: Se utilizará la ficha documental como instrumento para registrar información relevante proveniente informes técnicos y documentos relacionados con el sistema de acarreo y la simulación en minería.
- Técnica de entrevista: se aplicará mediante una guía de entrevista, dirigida a operarios, supervisores y responsables del área de acarreo subterráneo, con el fin de conocer la operatividad actual, limitaciones y posibles mejoras.
- Técnica de observación: se realizará en campo utilizando como instrumento la libreta de campo, donde se registrarán observaciones sobre el funcionamiento del sistema de acarreo, tiempos operativos, distribución de equipos y condiciones reales de trabajo.

3.8.TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Para el procesamiento y análisis de la información recopilada, se utilizarán:

- Office: se emplearán programas como Excel, Word y PowerPoint para el ordenamiento de datos, elaboración de gráficos, redacción del informe y presentación de resultados.
- Software Python: se utilizará el lenguaje de programación Python, específicamente la biblioteca SimPy, para el desarrollo del modelo de simulación de eventos discretos, así como para la ejecución de los escenarios evaluativos.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Aquí se presenta el procedimiento de la investigación mediante el cual se operacionaliza la respuesta a las preguntas planteadas sobre la mejora del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI (Ayacucho) utilizando simulación de eventos discretos. Este capítulo integra, en una secuencia lógica y verificable, el diagnóstico técnico de la situación actual, la formulación y validación de un modelo de simulación en SimPy, la experimentación con escenarios de mejora y la evaluación del impacto operativo–económico de las alternativas. El enfoque es eminentemente aplicado: cada decisión metodológica —desde la caracterización de rutas, pendientes y distancias, hasta la definición de recursos y reglas operativas— se orienta a medir con precisión los indicadores clave de desempeño (KPIs) del acarreo (viajes por guardia, toneladas por hora, utilización, tiempos de espera y tiempos de ciclo), compararlos contra una línea base representativa y determinar, con sustento cuantitativo, el escenario de mayor conveniencia técnica y económica para su implementación progresiva en la operación.

4.1.DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ACARREO

El punto de partida es un diagnóstico del sistema de acarreo que describe el ciclo de operación (carguío–transporte–descarga–retorno), la configuración de la flota (LHD, carros/volquetes, capacidades y asignaciones), las rutas efectivas con sus restricciones geométricas (radios de giro, puntos de cruce, zonas de sobrepaso) y las demoras más incidentes (operativas y no operativas). Con base en registros operativos y partes de guardia, se establece la línea base de desempeño y costos, identificando cuellos de botella recurrentes —por ejemplo, esperas en despacho, interferencias en la rampa o desbalances de "match factor" entre equipos de carguío y transporte— que condicionan la productividad. Este levantamiento permite cuantificar las pérdidas de tiempo y su contribución al tiempo de ciclo total, proporcionando los parámetros de referencia para el modelado.

En el presente estudio se consideran específicamente los tajos de explotación de la Zona 23 que alimentan de manera directa al tren de acarreo, agrupados por nivel operativo. En el Nivel 7 se ubican los tajos superiores de la Zona 23, en el Nivel 8 los tajos centrales que constituyen el frente principal de carguío del tren, y en el Nivel 9 los tajos inferiores que complementan la producción del bloque 23. En todos los casos, el mineral fragmentado de estos tajos es recogido por el LHD y trasladado hasta el punto de carguío del tren en el Nivel 8, desde donde se inicia el ciclo de transporte hacia la tolva de los piques Base 4–5.

Sobre esa caracterización se construye un modelo de simulación de eventos discretos en SimPy que representa las entidades (material, equipos), recursos (LHD, camiones, frentes), colas y reglas de atención (prioridades, asignación y despacho). La dinámica del sistema se captura a través de procesos que reproducen los eventos críticos del ciclo (arribo, servicio, espera, liberación y traslado), incorporando la variabilidad operativa observada. El modelo se calibra y valida

comparando KPIs simulados contra la línea base, con criterios explícitos de aceptación (p.ej., diferencias relativas máximas admisibles en TM/h, tiempos de espera y utilización). Esta etapa asegura que el gemelo digital reproduzca, dentro de tolerancias razonables, el comportamiento real del acarreo y pueda emplearse con confianza para evaluar cambios.

Con el modelo validado, se ejecuta un diseño de escenarios que explora palancas de mejora factibles en SOTRAMI: (i) configuración de flota y asignación (variación del número de equipos, reglas de despacho, emparejamiento LHD–transporte); (ii) gestión de circulación (sentidos únicos en tramos críticos, ventanas de mantenimiento para reducir interferencias, puntos de sobrepaso); y (iii) reglas operativas (priorización por frente, límites de cola, estrategias para reducir o absorber demoras). Para cada escenario se corren múltiples réplicas, se consolidan los resultados y se comparan, en términos de KPIs, contra la situación actual, destacando la resolución de cuellos de botella y la robustez del desempeño bajo condiciones normales de variabilidad.

Finalmente, se cuantifica el impacto económico mediante la traducción de mejoras operativas a ahorros en $ / TM y costos mensuales/anuales, y se realiza un análisis de sensibilidad frente a factores críticos de la mina (distancias efectivas, pendientes, disponibilidad mecánica, incidencia de demoras). Con estos insumos se selecciona el escenario óptimo mediante criterios multicriterio (desempeño, costo, riesgo e implementabilidad) y se propone un plan piloto de implementación con actividades, responsables, plazos y controles para asegurar que los beneficios estimados en simulación se materialicen en campo. En conjunto, el capítulo establece una ruta trazable desde la realidad operativa observada hasta la decisión técnica y económica, de modo que el lector pueda verificar cómo cada paso del procedimiento aporta evidencia directa para responder: (a) cuál es el estado actual del acarreo, (b) cómo influye la simulación con SimPy en su desempeño y (c) cuál es el impacto esperado en los costos operativos de la U.M. SOTRAMI.

A partir de los planos longitudinales de la Zona 23 se aprecia que los frentes de explotación (puntos de carguío) ubicados entre los niveles 7 y 10 descargan su producción hacia las tolvas asociadas a los piques Base 4 y 5 (puntos de descarga), a través de galerías de acarreo largas, sinuosas y con cambios de nivel. La distancia efectiva entre carguío y descarga supera en varios casos los 600–800 m, con tramos de sección reducida y múltiples intersecciones donde se cruzan equipos y servicios; esta configuración geométrica incrementa el tiempo de recorrido del tren tanto cargado como vacío y obliga a frecuentes detenciones para dar pase, generando tiempos de ciclo elevados y un uso ineficiente de la ventana efectiva de acarreo. La peor causa de deficiencia en la cadena carguío–acarreo–descarga se asocia, por tanto, a la combinación de grandes distancias de transporte con cuellos de botella geométricos (estrechamientos, curvas cerradas y cambios de nivel), lo que se traduce en mayores tiempos por viaje, menor número de viajes/guardia y, en consecuencia, en un costo unitario de acarreo más alto respecto de una configuración con accesos más directos y secciones homogéneas.

En los planos longitudinales se define explícitamente que el punto de partida o carguío corresponde a los frentes de explotación de la Zona 23 (tajos ubicados entre los niveles 7 y 10), mientras que el punto de descarga es la tolva de los piques Base 4 y Base 5, donde el tren entrega el mineral. El tramo comprendido entre ambos puntos se caracteriza por una distancia de acarreo

L,en metros, cuyo recorrido determina el tiempo de ciclo por viaje

t,en minutos y el costo de acarreo por tonelada transportada

C,enS/TM; estas tres magnitudes —distancia, tiempo y costo entre el punto de carguío y el punto de descarga— son las que se emplean como referencia directa en el modelo de simulación para evaluar el desempeño del sistema de acarreo.

Para cada ruta de acarreo identificada en los planos se define un punto de carguío (PC) y un punto de descarga (PD). Entre ambos existe una distancia de transporte

En la ruta principal de la Zona 23, el punto de carguío corresponde a los frentes de explotación ubicados entre los niveles 7 y 9, donde el tren recibe el mineral proveniente de los tajos; el punto de descarga es la tolva de los piques Base 4 y Base 5, donde el material se entrega para su posterior izaje. La distancia real de acarreo entre el punto de carguío y la tolva, medida sobre la labor (galerías, cruceros y accesos), es del orden de 700 m, lo que se traduce en un tiempo promedio de acarreo (ida y vuelta) de aproximadamente 24,5 minutos por viaje. Considerando los tiempos adicionales de carguío y descarga, el tiempo de ciclo total alcanza 42,5 minutos por viaje, y con el costo horario del equipo de acarreo y la carga útil movilizada se obtiene un costo unitario de acarreo de S/ 16,2 por tonelada en la situación actual.

Tabla 2

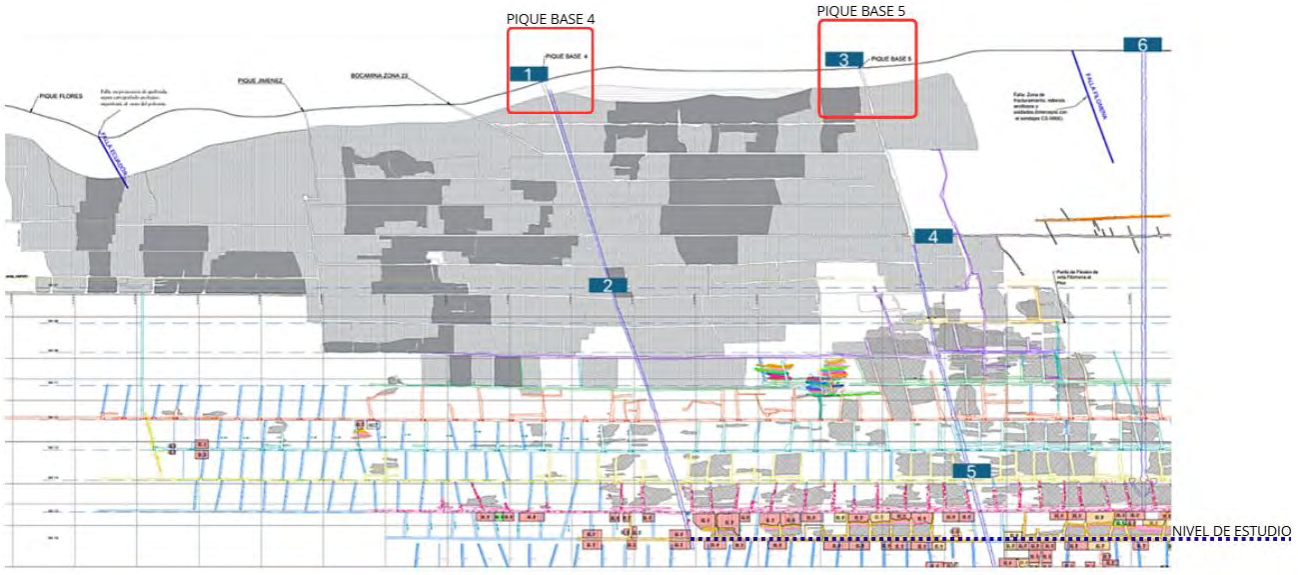
En la ruta principal de la Zona 23

Elemento	Valor aproximado	Unidad
Punto de carguío (PC)	Frentes Zona 23 (Niveles 7–9)	–
Punto de descarga (PD)	Tolva piques Base 4 y Base 5	–
Distancia PC–PD	700	m
Tiempo de acarreo (ida + vuelta)	24,5	min/viaje
Tiempo de ciclo total (incluye carga y descarga)	42,5	min/viaje
Costo unitario de acarreo actual	16,2	S/ por tonelada

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Figura 3

Plano longitudinal

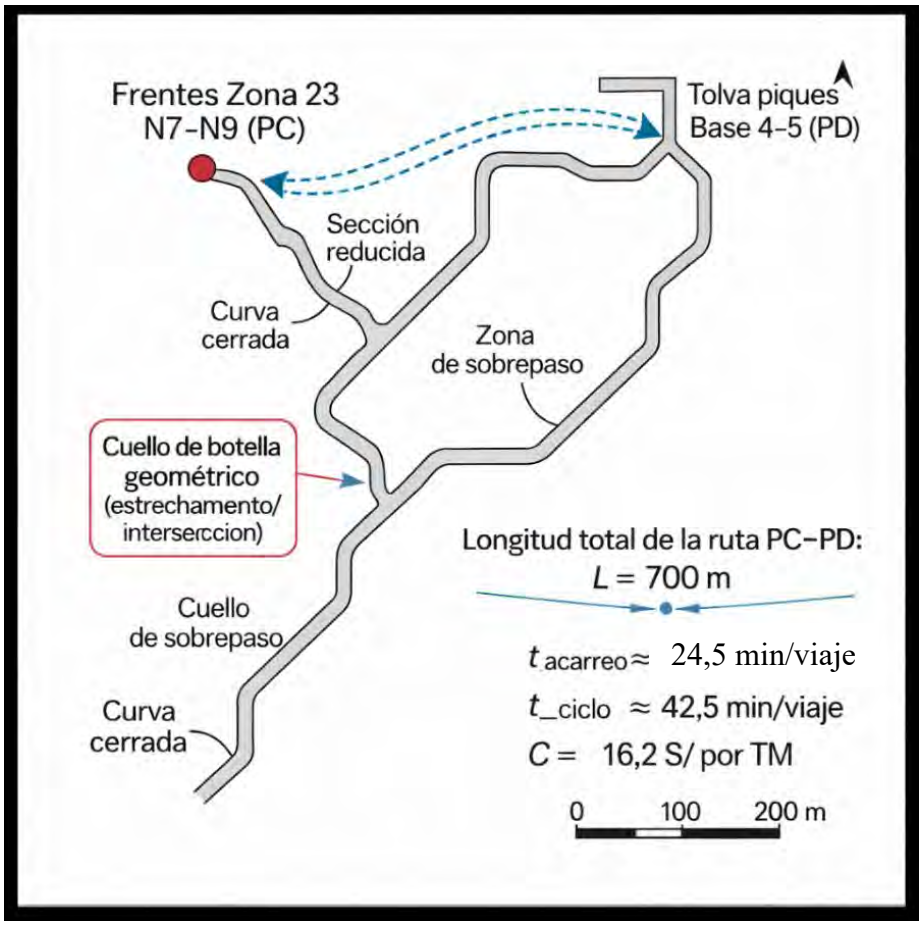


Fuente: Unidad Minera Sotrami

En la Figura se presenta el plano general de la Zona 23, donde se muestran los distintos niveles de explotación y los principales piques de la unidad. En este esquema se ha señalado el punto de carguío (PC) en los frentes de explotación de la Zona 23, ubicados en el sector central del nivel operativo, y el punto de descarga (PD) en la tolva de los piques Base 4 y Base 5, situada hacia el extremo norte del bloque mineralizado. La ruta principal de acarreo entre el PC y el PD se resalta mediante una traza continua, de modo que el lector puede identificar claramente el recorrido del tren de mineral y la relación entre la posición de los tajos y la infraestructura de transporte. Sobre esta ruta se distinguen además las zonas críticas de operación, asociadas a mayores distancias de desplazamiento, cambios de nivel y cruces con otras labores, que influyen directamente en el incremento del tiempo de ciclo y, por consiguiente, en el costo unitario de acarreo.

Figura 4

Sistema de acarreo subterráneo actual – Zona 23 (vista en planta)

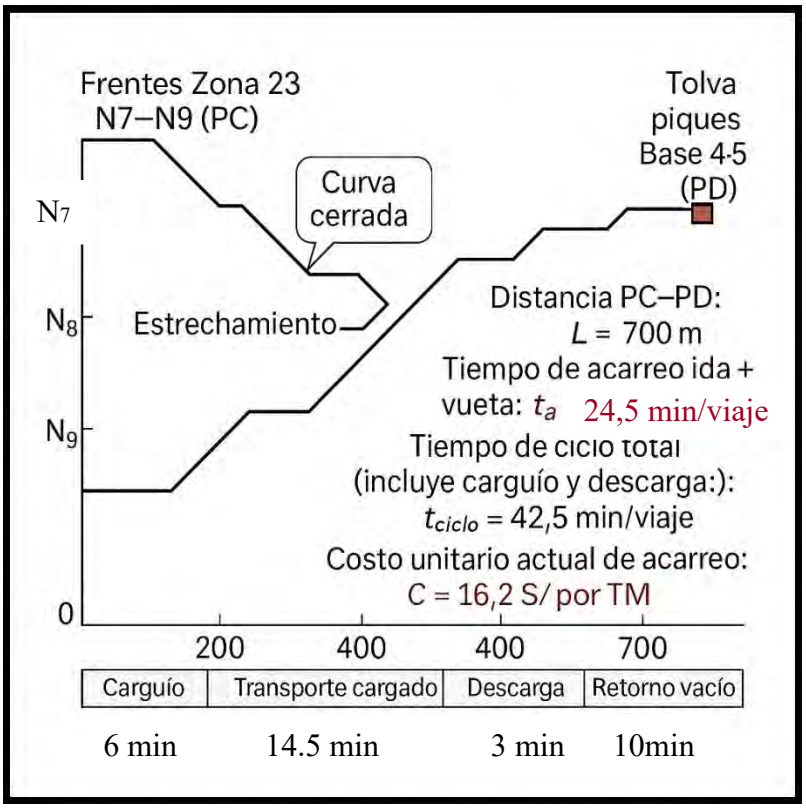


Fuente: Unidad Minera Sotrami

En el esquema se representa la ruta principal de acarreo entre los frentes de la Zona 23 (PC), ubicados entre los Niveles 7 al 9, y la tolva de los piques Base 4–5 (PD), **cuya distancia acumulada es de aproximadamente L = 700 m medida a lo largo de las galerías reales**. Sobre esta ruta se obtiene un tiempo promedio de acarreo (ida y vuelta) de 24,5 min por viaje, que, sumado a los tiempos medios de carguío y descarga, da un tiempo de ciclo total de 42,5 min por viaje. Con el costo horario del tren y la carga útil transportada, este ciclo se traduce en un costo unitario de acarreo de S/ 16,2 por tonelada, valor que se toma como referencia para la comparación con el escenario mejorado.

Figura 5

Perfil longitudinal del sistema de acarreo subterráneo en la Zona 23

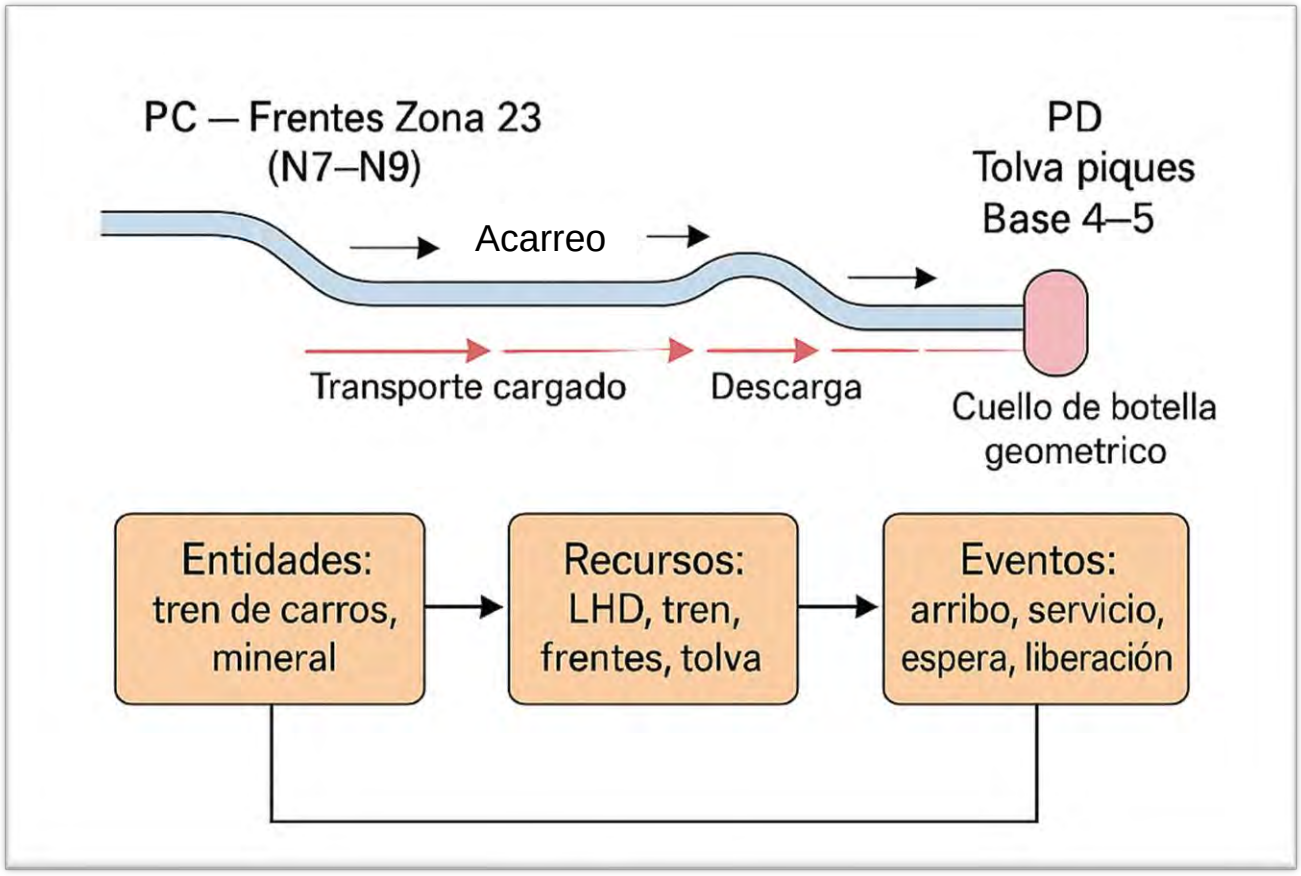


Fuente: Unidad Minera Sotrami

En el perfil longitudinal se observa la ruta de acarreo entre los frentes de la Zona 23 (PC) y la tolva de los piques Base 4–5 (PD). El tiempo promedio de transporte cargado es de 14,5 min/viaje y el tiempo de retorno vacío de 10 min/viaje, de modo que el tiempo de acarreo de ida y vuelta alcanza 24,5 min/viaje. Sumando los tiempos medios de carguío y descarga, el tiempo de ciclo total del tren se sitúa en 42,5 min/viaje, lo que, considerando el costo horario del equipo y la carga útil movilizada, se traduce en un costo unitario de acarreo de S/ 16,2 por tonelada en la situación actual.

Figura 6

Vinculación entre geometría del sistema de acarreo y modelo DES en SimPy para la Zona 23



Fuente: Unidad Minera Sotrami

En el esquema se presenta de manera simplificada la cadena operativa del sistema de acarreo actual en la Zona 23. El punto de carguío (PC) corresponde a los frentes de explotación ubicados entre los Niveles 7–9, donde el tren recibe el mineral proveniente del LHD; desde allí se realiza el transporte cargado hasta la tolva de los piques Base 4–5 (PD), donde se efectúa la descarga y posterior envío del mineral a superficie. En el tramo final de la ruta se identifica un cuello de botella geométrico, asociado a estrechamientos y curvas, que incrementa los tiempos de espera y afecta el rendimiento del tren. El gráfico resume además los componentes del modelo de simulación: entidades (tren de carros, mineral), recursos (LHD, tren, frentes, tolva) y eventos

(arribo, servicio, espera y liberación). En la parte inferior se consignan los indicadores de la situación actual (línea base): tiempo de ciclo total de 42,5 min/viaje, tiempo de acarreo ida y vuelta de 24,5 min/viaje, aproximadamente 9,3 viajes por guardia y un costo unitario de acarreo del orden de S/ 16,2 por tonelada transportada.

Figura 7

Inspección operativa del tren antes de la salida

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Control previo a la corrida (checklist de seguridad, acople y frenos); justifica tiempos fijos por turno y explica diferencias entre tiempo disponible y tiempo efectivo, variables empleadas en el cálculo de viajes por guardia y TM/h.

Figura 8

Carros mineros cargados en tránsito – Punto BC-1745

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Evidencia de operación con carga y posible cuello de botella por sección estrecha; se relaciona con tiempos de espera en cruce/descarga y con la validación de mejoras por sentido único o reglas de paso en los escenarios simulados.

Figura 9

Locomotora eléctrica a baterías – SERMInsa (pack VOLTA)

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Equipo tractor del sistema de acarreo subterráneo; fuente de datos para disponibilidad mecánica, utilización y consumo energético, variables que alimentan el cálculo de costo unitario (S/ TM) y sensibilidad operativa.

Locomotora eléctrica a baterías marca SERMINSA, línea BEV – pack VOLTA, de la gama de 4–6 t de peso y 20–25 HP de potencia, con capacidad de arrastre entre 26 y 42 t de mineral según el modelo (WR20–WR25). Esta locomotora es la unidad principal de tracción del tren de carros U-35 en la Zona 23.

Figura 10

Tren de carros en rampa/galería inclinada

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Secuencia real de transporte por carrileras en pendiente; se usa para parametrizar velocidad efectiva por tramo, resistencia al rodado y tiempos de retorno en vacío dentro del modelo DES.

Figura 11

Jumbo electrohidráulico en preparación del frente

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Evidencia del proceso de perforación y preparación del disparo; insumo para la línea base de tiempos de ciclo en carga y para evaluar cómo la estabilidad del frente impacta esperas y colas en la simulación.

Jumbo electrohidráulico de perforación frontal, de dos brazos, utilizado para la ejecución de taladros de desarrollo y preparación de tajos en el método de corte y relleno ascendente. Su configuración permite perforar cuadros de avance en galerías de sección reducida, garantizando la precisión del diseño de malla de perforación y la continuidad del ciclo de minado.

Figura 12

Infraestructura superficial y LHD en parqueo operativo

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Vista de la zona de servicios en superficie y equipo de carguío; referencia para trazabilidad de distancias de acarreo, logística de traslado de material y coordinación con planta/stockpile empleadas en la validación del flujo simulado.

Equipo LHD (scooptram) de bajo perfil, con balde de aproximadamente 1,5–2,0 m^3 (2–2,5 yd^3) y capacidad de carga útil del orden de 3–4 t, utilizado en el carguío del mineral fragmentado en los tajos de la Zona 23. Este tipo de equipos está diseñado para labores de vetas angostas, con buena maniobrabilidad y productividad en espacios reducidos.

Figura 13

Frente de avance con sostenimiento y jumbo en interior mina

Fuente: Unidad Minera Sotrami

Registro del entorno real de perforación (malla electrosoldada, pernos y condiciones de piso/agua) usado para el diagnóstico del ciclo carga–transporte–descarga–retorno; sirve para justificar tiempos de preparación del frente y restricciones de velocidad/seguridad en el modelo.

En el presente capítulo, el diagnóstico del sistema de acarreo se delimita explícitamente al tren de mineral que conecta los frentes de explotación de la Zona 23 ubicados entre los niveles 7 y 9 (punto de carguío, PC) con la tolva de los piques Base 4–5 (punto de descarga, PD). Si bien la Zona 23 cuenta con un mayor número de niveles desarrollados y tajeos activos en el intervalo aproximado N8–N13, el análisis se centra únicamente en las labores que alimentan de manera directa al tren considerado en la simulación, es decir, en la ruta principal PC–PD que moviliza el grueso de la producción del sector. Sobre este tramo se evalúan las distancias efectivas de transporte, los tiempos de carguío, acarreo cargado, retorno en vacío y descarga, así como las demoras por colas y restricciones geométricas; con esta información se identifican los cuellos de botella operativos y se establece la línea base de desempeño (tiempo de ciclo, viajes/guardia, TM/h y costo unitario de acarreo) que servirá de referencia para la propuesta de mejora mediante simulación de eventos discretos.

4.1.1. CICLO DE OPERACIÓN, RUTAS Y DISTANCIAS

El ciclo operativo del sistema de acarreo en la Unidad Minera SOTRAMI constituye la cadena esencial que asegura el movimiento continuo del mineral desde el punto de extracción hasta su destino de procesamiento o acopio. Su correcta gestión determina la estabilidad del flujo, el uso eficiente de los recursos y la reducción de tiempos improductivos. Para ello, cada fase debe planificarse y ejecutarse con criterios claros de productividad, seguridad y coordinación, de modo que se minimicen las esperas, se reduzcan los cuellos de botella y se optimicen los rendimientos

globales. En términos generales, el ciclo se compone de carga, transporte, descarga e intervalos de espera o demora que pueden presentarse en cualquier transición.

Etapas del ciclo de operación

1. Carga

- Descripción. Comprende la extracción del material y su colocación sobre los equipos destinados al traslado. Abarca maniobras de acercamiento, posicionamiento del equipo, arranque del material, llenado del recipiente de transporte y verificación final antes de la salida.
- Equipos involucrados. Pala neumática, winches de arrastre, carretillas mineras y sistemas de ranfleo, según la configuración vigente del frente y la accesibilidad.
- Tiempo asociado. El tiempo de carga depende de la eficiencia mecánica y del estado de conservación del equipo, la pericia del operador, la granulometría y humedad del material, la geometría del frente (altura de corte, estabilidad de taludes, accesos) y la calidad del piso. Es habitual descomponerlo en subfases: tiempo de preparación/posicionamiento, tiempo de extracción y llenado efectivo, y microparadas por ajustes o limpieza. La estandarización de los procedimientos operativos (checklists de arranque, secuencia de paladas, límites de carga) reduce la variabilidad y mejora la repetibilidad del proceso.

2. Transporte

- Descripción. Una vez cargado, el mineral se desplaza desde el frente hacia la planta, tolva o zona de acopio. En esta fase influyen fuertemente la distancia efectiva, la pendiente de las labores, el estado del piso y la existencia de intersecciones o zonas de cruce.

- Equipos involucrados. Locomotoras, winches de izaje y carros mineros conforme a la logística propia de la unidad. La combinación equipo–vía condiciona la velocidad operativa y el régimen de circulación (bidireccional o a sentido único en tramos críticos).
- Tiempo asociado. El tiempo de transporte varía con la distancia, la pendiente, la velocidad segura de circulación, las condiciones de rodadura y la presencia de interferencias (congestión, maniobras de sobrepaso, señales de tráfico interno, ventilación y visibilidad). Es útil separarlo en ida (cargado) y retorno (vacío), pues cada uno presenta dinámicas distintas de velocidad y consumo.

3. Descarga

- Descripción. Corresponde al vaciado controlado del mineral en el punto de recepción: tolvas, chutes u otras estructuras de descarga, seguido del retiro del equipo y confirmación de que el área queda operativa.
- Equipos involucrados. Sistemas de volquete y estructuras de descarga (chutes, compuertas), según el esquema de recepción de la mina.
- Tiempo asociado. La duración depende del tipo de sistema (manual vs. automatizado), el diseño de la tolva, la facilidad de aproximación y alineamiento, así como la necesidad de inspecciones o limpieza. La automatización y el buen diseño de accesos reducen tiempos de posicionamiento y de vaciado, mientras que los procesos manuales o con restricciones de espacio tienden a incrementar la permanencia del equipo en la zona de descarga.

4. Tiempos de espera o demora

- Descripción. Pueden aparecer en cualquier fase por razones de mantenimiento, fallas, saturación de frentes, restricciones de seguridad, cambios de guardia o descoordinaciones entre áreas. Su identificación y clasificación permiten priorizar acciones correctivas.
- Clasificación.
    - Demoras operativas. Pérdidas asociadas a la operación directa: ineficiencias en la maniobra, tiempos por fallas técnicas, abastecimiento no planificado, falta de coordinación entre equipos, tiempos por inspecciones no programadas o por espera de señalización interna.
    - Demoras no operativas. Tiempos muertos vinculados a factores externos: condiciones climáticas adversas, problemas logísticos de abastecimiento, limitaciones regulatorias, restricciones de acceso o contingencias que no dependen del operador ni del equipo.

Evaluación de la eficiencia del sistema

El análisis detallado de los tiempos por etapa permite comprender el rendimiento integral del acarreo y focalizar mejoras con base en evidencia. Entre los factores críticos se encuentran:

- Rendimiento de equipos. Contraste entre la capacidad teórica y el tiempo efectivo de operación. Indicadores como viajes por guardia, toneladas por hora (TM/h), utilización y disponibilidad permiten medir cuán cerca se opera del potencial del equipo.
- Coordinación entre etapas. La sincronización carga–transporte–descarga es clave para evitar acumulación de colas y esperas. El balance entre tasas de llegada y de

servicio (p. ej., capacidad de descarga vs. ritmo de llegada de carros) revela cuellos de botella.

- Condiciones de trabajo. Estado del piso (baches, lodo), radios de giro, ventilación y visibilidad, así como la pendiente y el ancho útil de las labores, inciden en la velocidad segura y en la estabilidad del flujo.
- Variabilidad y confiabilidad. Además del promedio, la dispersión de los tiempos (desviación estándar, percentiles) afecta la predictibilidad del ciclo; la confiabilidad mecánica y el mantenimiento oportuno reducen paradas no planificadas y estabilizan la operación.

Identificación de áreas de mejora

Derivado del diagnóstico temporal y de la observación en campo, es posible establecer líneas de acción priorizadas:

- Optimización de rutas de transporte. Revisión de trazados, implementación de sentido único en tramos angostos, creación de puntos de sobrepaso, mejora del piso (nivelación y drenaje) y señalización interna para reducir tiempos de circulación y congestión.
- Capacitación del personal. Fortalecimiento de técnicas de operación (posicionamiento en carga y descarga, conducción defensiva, comunicación por radio, cumplimiento de secuencias estandarizadas) para elevar la eficiencia y disminuir microparadas.
- Mantenimiento preventivo y predictivo. Programas basados en horas de servicio, listas de inspección pre-operativas, gestión de repuestos críticos y análisis de modos y efectos de falla para minimizar indisponibilidades y tiempos de reparación.

- Automatización y apoyo tecnológico. Incorporación de elementos que aceleren y estandaricen el proceso (p. ej., sistemas automatizados de descarga, semaforización/gestión de tráfico subterráneo, control de despacho y registro digital de tiempos), así como monitoreo de condiciones de vía y equipo.
- Estandarización de procedimientos. Documentación de mejores prácticas (PETS), límites operativos claros (carga máxima, velocidades por tramo, protocolos de cruce) y tableros de control de KPIs visibles en la operación para alinear la ejecución diaria con las metas de productividad y seguridad.

En conjunto, esta visión ampliada del ciclo de acarreo permite diagnosticar con precisión dónde se generan las pérdidas de tiempo, medir el impacto de cada mejora propuesta y priorizar intervenciones que eleven la productividad y reduzcan los costos operativos, manteniendo los estándares de seguridad y confiabilidad exigidos por la operación subterránea.

4.1.2. TIEMPOS DEL CICLO Y CLASIFICACIÓN DE DEMORAS (OPERATIVAS / NO OPERATIVAS)

En esta sección se descompone y cuantifica el ciclo completo de acarreo, utilizando registros de campo para medir cada etapa y etiquetar todas las detenciones que interrumpen el flujo. El propósito es doble: (i) construir una línea base confiable de desempeño por etapa del ciclo, y (ii) separar, con criterios objetivos, qué porción del tiempo no productivo es imputable a la operación (demoras operativas) y cuál proviene de condiciones externas (demoras no operativas). Este enfoque permite priorizar acciones de mejora donde el retorno técnico-económico es mayor.

Identidad operativa del ciclo

T_{ciclo} = T_{carga} + T_{transporte} + T_{descarga} + T_{esperas/demoras}

Donde cada componente se mide con marcas de tiempo (inicio/fin) estandarizadas y reglas únicas de captura por frente y por equipo. La medición debe cubrir varios turnos para representar variabilidad operativa (p50, p90).

4.1.2.1. TIEMPOS DEL CICLO

a) Tiempo de carga

- Definición. Intervalo desde que el equipo se posiciona en el frente hasta que el recipiente de transporte queda lleno y autorizado a salir.
- Subfases típicas. Aproximación y posicionamiento; arranque/ranfleo o cuchareos; llenado efectivo; verificación y salida.
- Determinantes. Naturaleza del material (granulometría, humedad), geometría y piso del frente, capacidad/estado del equipo de carguío, pericia del operador, condiciones de visibilidad y ventilación.
- Medición. Cronometraje continuo por ciclo; excluir paradas programadas (seguridad, cambio de guardia) para no sesgar el promedio de ejecución.
- Implicancia. La reducción de T_{carga} impacta directamente la productividad por ciclo y el $/TM al incrementar viajes/guardia sin aumentar flota.

b) Tiempo de transporte

- Definición. Intervalo total de desplazamiento entre el punto de carga y el punto de descarga, incluyendo tramo cargado y retorno en vacío.
- Subfases. Salida del frente; circulación por tramo principal (ramplas, intersecciones); llegada a zona de descarga; retorno.

- Determinantes. Distancia efectiva y pendiente, radios de giro, estado del piso, régimen de circulación (bidireccional vs. sentido único), visibilidad/señalización y congestión.
- Medición. Segmentar por tramos homogéneos (tramo A, B, C) para identificar dónde se concentra el tiempo; registrar p50/p90 de velocidad efectiva por tramo.
- Implicancia. Suele ser el componente voluminoso del ciclo; mejorar rutas y piso genera ganancias sostenidas en viajes/guardia y TM/h.

c) Tiempo de descarga

- Definición. Intervalo desde el posicionamiento en tolva/chute hasta el vaciado y liberación del área.
- Determinantes. Diseño del punto de recepción, accesos, tipo de sistema (manual/automatizado), necesidad de limpieza/inspección, coordinación con despacho.
- Medición. Distinguir tiempo de posicionamiento y tiempo de vaciado; etiquetar colas en tolva como espera, no como descarga.
- Implicancia. Descargas ágiles evitan cuellos de botella en recepción y estabilizan el ritmo de llegada.

d) Tiempos de espera o detención

- Definición. Intervalos no productivos ocurridos antes, durante o entre etapas (p. ej., cola para cargar, espera en tolva, alto por seguridad, detención por coordinación).
- Determinantes. Disponibilidad de equipos, programación/despacho, interferencias en vía, eventos de seguridad o restricciones del entorno.

- Medición. Toda espera debe quedar etiquetada con causa desde origen; consolidar en Pareto mensual para priorización.
- Implicancia. Constituyen el “Pareto de pérdidas”; su correcta clasificación sostiene la toma de decisiones.

4.1.2.2. CLASIFICACIÓN DE DEMORAS

Con la finalidad de orientar la mejora continua del sistema de acarreo y asegurar una correcta interpretación de los tiempos improductivos registrados, las demoras se clasifican considerando dos criterios complementarios: la imputabilidad (operativas y no operativas) y la planificación (programadas y no programadas). Esta doble clasificación permite identificar con mayor precisión las causas raíz de las pérdidas de tiempo y definir acciones correctivas y preventivas coherentes con el control del proceso.

En función al criterio de imputabilidad, se considera demora operativa aquella cuya causa es controlable por la célula operativa (operación, mantenimiento de primera línea o planificación local), mientras que una demora no operativa corresponde a factores externos al control inmediato del equipo o del turno. Adicionalmente, desde el enfoque de planificación, las demoras pueden ser programadas cuando están previstas en el plan de trabajo, o no programadas cuando se presentan de forma imprevista.

A) Demoras operativas (control interno)

- Definición. Pérdidas asociadas a la ejecución del proceso y a recursos controlables por operación y mantenimiento de primera línea.
- Causas típicas.
    - Ineficiencias de maniobra: Reposicionamientos reiterados en carga/descarga, alineación deficiente.

    - Fallas e indisponibilidades técnicas: Paradas no planificadas, microfallas recurrentes, abastecimientos imprevistos.
    - Descoordinación/despacho: Secuenciación inadecuada, asignación tardía, congestión por mal uso de zonas de cruce.
    - Inspecciones no programadas/retrabajos imputables a operación.
- Impacto. Caída de utilización y TM/h, aumento de variabilidad del ciclo y del $/TM.
- Líneas de acción. Estandarización (PETS), capacitaciones por brecha observada, mejora de despacho y reglas de cola, mantenimiento preventivo/predictivo, mejora del piso y radios de giro, señalización/tráfico interno.

B) Demoras no operativas (condición externa)

- Definición. Pérdidas originadas por factores exógenos a la célula operativa, fuera del control inmediato del equipo/turno.
- Causas típicas.
    - Condiciones ambientales: Clima, ventilación insuficiente de carácter general, restricciones por calidad de aire.
    - Logística y permisos: Espera por autorizaciones, ventanas regulatorias, trámites, ingreso restringido.
    - Contingencias externas: Interrupciones en suministro eléctrico/energía, eventos extraordinarios de seguridad, accesos bloqueados por terceros.
- Impacto. Disrupciones intermitentes que afectan la continuidad y la confiabilidad del plan diario.

- Líneas de acción. Planificación con escenarios y ventanas de contingencia, coordinación previa con áreas soporte/autoridad, agilización de trámites, protocolos de respuesta.
- Clasificación según planificación.
    - No operativas programadas: Paradas previstas por disposiciones generales, tales como mantenimientos mayores de infraestructura, ventanas regulatorias, restricciones planificadas de ventilación o energía.
    - No operativas no programadas: Interrupciones imprevistas externas que afectan la continuidad del proceso.

Nota de frontera: Cuando la causa combina factores internos y externos (p. ej., restricción de ventilación por evento general, pero con tardía reprogramación local), se reparte el tiempo en proporción de imputabilidad o se clasifica por causa raíz dominante, manteniendo comentario en observaciones.

4.1.2.3. REGLAS DE MEDICIÓN, ETIQUETADO Y CALIDAD DE DATOS

- Start/stop estandarizado. Definir exactamente el hito de inicio y fin de cada etapa (carga, transporte, descarga) para evitar solapes.
- Un ciclo = un registro. Cada viaje debe tener ID de ciclo con: equipo, frente, ruta, turno, operador (si aplica), marcas de tiempo por etapa y códigos de demora.
- Segmentación por ruta. Registrar tramo(s) de transporte con su distancia/pediente para análisis por sección (tramo A/B/C).
- Outliers. Atípicos se conservan y se etiquetan (evento, causa, acción), no se eliminan salvo error de medición comprobado; reportar p50/p90 y rango intercuartílico.

- Demoras concatenadas. Si múltiples esperas tienen la misma causa y ocurren contiguas, consolidar como un solo evento para no inflar el conteo.
- Auditoría de consistencia. Verificar que T_{ciclo} = suma de componentes; contrastar % de ciclos con demoras vs. sin demoras.

4.1.2.4. INDICADORES DERIVADOS Y LECTURA OPERATIVA

- Utilización de equipo = (T_{carga} + T_{transporte} + T_{descarga}) / Tiempo disponible del turno (excluyendo paradas programadas).
- Eficiencia de ciclo = T productivo / T_{ciclo}.
- Ritmo de producción (TM/h) = (Capacidad por viaje × viajes/guardia) / horas efectivas.
- Pareto de demoras: % acumulado por causa para priorizar el 20% de causas que explican ~80% del tiempo perdido.
- Estabilidad operativa: usar p90 de cada etapa para evaluar la robustez; grandes brechas p90–p50 indican alta variabilidad y potencial de estandarización.

Lectura recomendada.

- Identificar la etapa cuello (la de mayor contribución a T_{ciclo} o a su variabilidad).
- Ver el Pareto de demoras vinculado a esa etapa.
- Proponer acciones concretas (mejora de piso, sentido único, capacitación de maniobras, ventana de mantenimiento) con responsable y fecha.
- Re-medir y cerrar el ciclo de mejora.

4.1.2.5. CONEXIÓN CON LA SIMULACIÓN (INSUMO PARA MODELADO)

Los distribucionales empíricos de cada etapa (p50/p90, forma y dispersión) y la tasa de demoras por causa se utilizan como parámetros de entrada del modelo de SimPy:

- T_{carga}, T_{transporte} (cargado/vacío por tramo) y T_{descarga} → distribuciones de servicio.
- Demoras operativas/no operativas → eventos de interrupción con probabilidad y duración.

Esto permite que el gemelo digital reproduzca la realidad observada y evalúe escenarios donde se remueven/cuadran las principales causas de espera.

4.1.2.6. EJEMPLOS DE MAPEO DE CAUSAS (GUÍA PRÁCTICA)

- Operativas: cola en tolva por secuenciación, reposicionamiento repetido en carga, falla menor de equipo, inspección no programada imputable al proceso, congestión por mal uso de zona de cruce, abastecimiento interno tardío.
- No operativas: corte de energía general, restricción regulatoria temporal, condiciones ambientales adversas, espera por permisos externos, bloqueo de acceso por terceros.

4.2.SIMULACIÓN CON SIMPY Y VALIDACIÓN

Este apartado establece el puente operativo entre el diagnóstico de tiempos del ciclo (4.1.2) y la evaluación rigurosa de escenarios de mejora. Se construye un gemelo digital del sistema de acarreo usando SimPy (simulación de eventos discretos) que reproduzca, con la mayor fidelidad posible, la dinámica observada: llegada de unidades a puntos de carga, formación de colas, utilización de recursos críticos (carguío, izaje, descarga), interferencias de tráfico y demoras

clasificadas como operativas y no operativas. Los parámetros de entrada (tiempos de carga, transporte por tramo, descarga y esperas por causa) se extraen de la línea base levantada en campo, respetando sus distribuciones empíricas (promedios, p50 y p90), mientras que la lógica de atención y despacho replica las reglas vigentes en SOTRAMI (prioridades por frente, régimen de circulación, ventanas de seguridad, secuenciación de izaje). Así, el modelo no "inventa" un flujo ideal: calca la realidad con sus restricciones y variabilidad, para luego ensayar cambios de forma controlada.

Metodológicamente, el modelado sigue una secuencia encadenada: (i) especificación de entidades, recursos y lógica (4.2.1), (ii) codificación del sistema en SimPy con procesos, colas y eventos de interrupción para demoras, y (iii) calibración/validación (4.2.2) contra la línea base de viajes/guardia, TM/h y tiempos de espera, aplicando criterios cuantitativos de aceptación. Solo cuando el gemelo digital reproduce el comportamiento real dentro de tolerancias preestablecidas, se "congela" la versión validada para explorar escenarios (asignación de flota, reglas de despacho, mejoras de vía, manejo de colas en izaje/descarga) sin interrumpir la operación y con lectura directa en $/TM y confiabilidad del plan.

4.2.1. ENTIDADES, RECURSOS Y LÓGICA DEL MODELO

El sistema se formaliza en SimPy como una red de procesos que compiten por recursos y se ven afectados por eventos de interrupción (demoras). La estructura base incluye:

- Entidades móviles (unidades de acarreo): locomotoras/carros mineros y, donde corresponda, equipos complementarios de carguío. Cada entidad ejecuta un ciclo (carga → transporte cargado por tramos → descarga → retorno en vacío), con tiempos de servicio y desplazamiento tomados de la línea base (por ejemplo, tramos de 540 m, 347 m, etc., con sus velocidades efectivas y pendientes).

- Recursos con capacidad finita: frentes de carguío, puntos de izaje (winches) y puntos de descarga (tolvas/chutes). Se modelan como Resource o PriorityResource de SimPy, con colas FIFO o con prioridad según la regla vigente (p. ej., prioridad por mineral vs. desmonte, o por frente crítico).
- Servidores lógicos (procesos de servicio): carguío, izaje y descarga, cada uno con su tiempo de servicio (posicionamiento + operación + retiro), diferenciando cuando corresponde entre "posicionamiento" y "vaciado/izaje" para capturar colas en acceso vs. servicio efectivo.
- Red vial / tramos: el transporte se descompone en tramos homogéneos (A/B/C…), cada uno con su distancia y perfil (pendiente, radios de giro, calidad de piso) y su velocidad segura observada. Esto permite identificar en la simulación en qué tramo se concentra el tiempo.
- Eventos de demora: se insertan como interrupciones parametrizadas por causa y duración, respetando su clasificación (operativa/no operativa). Por ejemplo, "espera de carga", "congestión en tolva", "servicios de madera", "corte externo/permiso", con frecuencias y duraciones empíricas (p. ej., esperas máximas observadas ~5,33 h para carga; servicios de madera entre 0,32–1,60 h, etc.).
- Reglas de despacho y circulación: definición del régimen de tráfico (bidireccional o sentido único en tramos críticos), política de cruce/sobrepaso, asignación de unidades a frentes o tolvas, y ventanas de seguridad/mantenimiento (p. ej., bloqueo temporal de un recurso).

Lógica operativa. Cada unidad ejecuta un proceso cíclico: solicita el recurso de carga → recibe el servicio de carguío → se desplaza por los tramos hasta el recurso de recepción

(izaje/descarga) → espera en cola si el recurso está ocupado → descarga/iza → retorna por los tramos en vacío → repite el ciclo. En cualquier punto del ciclo, los eventos de demora pueden interrumpir el proceso (preempción, cuando se trata de una interrupción dura) o extender el tiempo de servicio (cuando corresponden a una ineficiencia intrínseca). Las colisiones lógicas —dos procesos solicitando el mismo recurso— se resuelven mediante colas y prioridades configuradas para reflejar fielmente la operación real.

Este diseño garantiza que los KPIs emergen de la dinámica (no se imponen): viajes/guardia, TM/h, utilización de recursos, longitud de colas y tiempos de espera se obtienen como outputs de la simulación, listos para compararse con la línea base.

4.2.2. CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN CONTRA LA LÍNEA BASE (VIAJES, TM/H, ESPERAS)

La validez del modelo descansa en su capacidad para reproducir la línea base medida en campo. La estrategia de aseguramiento sigue cuatro pasos:

- Calibración paramétrica (micro–nivel).
    - Ajuste de las distribuciones de tiempos de servicio y desplazamiento (carga, transporte por tramo, descarga) a fin de que los estadísticos simulados (media, p50, p90) coincidan con los observados.
    - Inyección de eventos de demora con sus tasas y duraciones por causa (operativa/no operativa), verificando que el Pareto simulado de pérdidas se parezca al observado (por ejemplo, alta contribución de “espera de carga”).
    - Verificación de utilización de recursos (winches, tolvas, frentes) frente a la observación.
- Validación de KPIs (macro–nivel).

- Comparación de viajes/guardia, TM/h y tiempos de espera promedio/p90 entre simulación y realidad, por frente, ruta y recurso.
- Aceptación si los errores relativos por KPI caen dentro de rangos objetivo (referencialmente, ±5–10 % para viajes y TM/h; ±10–15 % para esperas, dada su mayor dispersión).
- Si un KPI clave se desvía, se itera la calibración de la causa raíz (p. ej., velocidad efectiva de un tramo o tasa/duración de una demora específica).

- Robustez y estabilidad.
  - Corridas con múltiples semillas y réplicas para asegurar que los resultados no dependan de un azar particular.
  - Revisión de intervalos de confianza por KPI; el modelo debe mantener el solapamiento con la línea base dentro de tolerancias.
- Prueba de sensibilidad controlada.
  - Pequeñas variaciones (±5–10 %) en parámetros críticos (velocidad por tramo, tasa de demoras) no deben producir cambios caóticos en los KPIs; si ocurre, se revisa la representación de la cola/cuello de botella implicado.

Criterio de cierre. El modelo se considera validado cuando:

(a) reproduce viajes/guardia y TM/h dentro del umbral acordado por frente/ruta,

(b) replica razonablemente la estructura de esperas (promedio y p90 por causa/recurso) y

(c) refleja la utilización de recursos críticos en el mismo orden de magnitud que la observada.

Con ello, se congela la versión para evaluar escenarios de mejora con lectura directa en rendimiento y $/TM, reduciendo la incertidumbre de implementación y enfocando esfuerzos en las causas de mayor peso identificadas en 4.1.2.

4.3.RESULTADOS POR ESCENARIOS

En este apartado se presentan los resultados de la simulación por escenarios, organizados de manera que el lector pueda evaluar de forma directa el efecto de cada intervención sobre el desempeño del acarreo en SOTRAMI. Partimos del modelo validado (véase 4.2.2) y ejecutamos un conjunto de corridas con réplicas y semillas distintas para garantizar robustez estadística, reportando los indicadores con medias, p50 y p90, así como intervalos de confianza al 95 % cuando corresponda. Cada escenario reproduce la misma demanda operativa y las mismas condiciones exógenas de la línea base, variando únicamente la política o el parámetro sometido a prueba (asignación de unidades, reglas de despacho, circulación en tramos críticos, ventanas de mantenimiento, etc.). Los resultados se orilusdenan a tres niveles: (i) global (por guardia/turno y día), (ii) por recurso (carguío, izaje, descarga) y (iii) por ruta/tramo (descomposición del transporte), con el fin de distinguir mejoras sistémicas de ventajas locales o reubicación de cuellos de botella.

El análisis inicia con la exposición de los KPIs operativos de referencia —tiempos de ciclo, colas/esperas, utilización y TM/h— y continúa con un comparativo contra la situación actual. Este comparativo se expresa en términos absolutos (Δ) y relativos (%), resaltando la magnitud del efecto y su consistencia (dispersión). En paralelo, se examina la topología de cuellos de botella: se verifica si la intervención elimina o traslada el cuello a otro recurso o tramo, y si emergen restricciones secundarias (p. ej., crecimiento de colas en tolva al despejar la espera en carguío). El cierre del apartado sintetiza qué escenarios resultan dominantes bajo criterios técnicos (KPIs), de

confiabilidad operativa (variabilidad, p90) y de impacto económico (tendencia del $/TM), preparando el terreno para la selección y el plan piloto del punto 4.5.

4.3.1. DISPONIBILIDAD MECÁNICA Y PROGRAMA DE MANTENIMIENTO DEL TREN DE ACARREO

La comparación de escenarios se realizó manteniendo constante la disponibilidad mecánica (DM) del tren de acarreo, en un valor promedio de 88 %, obtenido a partir del historial de fallas y horas–equipo registradas en la Unidad Minera. Para un turno de 8 horas (480 min), las actividades fijas de inicio/cierre reducen el tiempo potencial de operación a 450 min/guardia; aplicando la DM = 0,88 se dispone de 396 min/guardia de tiempo efectivamente hábil para acarrear, tanto en la línea base como en el escenario mejorado. De este modo, las diferencias de tiempo de ciclo, viajes por guardia, TM/h y costo unitario observadas entre escenarios se atribuyen exclusivamente a cambios operativos (reducción de demoras y cuellos de botella), y no a variaciones del programa de mantenimiento.

Tabla 3 *Programa de mantenimiento considerado en la simulación*

Tipo de mantenimiento	Actividad principal	Frecuencia típica	Duración estimada	Tratamiento en el modelo (efecto en DM)
Inspección diaria / lubricación	Chequeo visual, niveles, engrase de partes móviles	Cada guardia	10–15 min	Incluida en tiempos fijos de inicio/cierre de turno
Mantenimiento preventivo menor	Ajustes, cambio de mangueras, frenos, contacto	Cada 250–300 h de operación	2–4 h	Registrado como parada programada (afecta DM = 88 %)
Mantenimiento preventivo mayor	Revisión general de locomotora y carros	Cada 1 000–1 200 h	8–12 h	Parada mayor programada (incluida en DM global)
Mantenimiento correctivo	Reparación por falla imprevista	Según ocurrencia	Variable	Modelado de forma agregada dentro de la DM histórica

Este esquema resume el programa de mantenimiento asumido en todos los escenarios simulados y sustenta el uso de una disponibilidad mecánica constante del 88 %, condición bajo la cual se evalúan los efectos de la mejora operativa sobre el desempeño del sistema de acarreo.

4.3.2. KPIS: TIEMPOS DE CICLO, COLAS/ESPERAS, UTILIZACIÓN, TM/H

Para asegurar la trazabilidad entre la dinámica simulada y los objetivos operativos, los KPIs se definen y calculan de la siguiente forma:

- Tiempo de ciclo (T_ciclo): suma de los componentes carga + transporte (cargado) + descarga/izaje + retorno (vacío) + esperas/demoras. Se reporta promedio, p50 y p90, y se muestra la descomposición porcentual por componente para identificar dónde se concentra el tiempo (y, por ende, el potencial de mejora).
- Lectura esperada: reducciones en esperas o posicionamientos deberían reflejarse en menor T_ciclo y en una caída de su p90 (más estabilidad).
- Colas/esperas (Wq/Lq): tiempo promedio y p90 de espera por recurso (carguío, izaje, descarga) y por tramo (si hay gestión de tráfico). Se incluye la probabilidad de cola ($P\{Wq > 0\}$) y, cuando es pertinente, niveles de servicio (p. ej., $P\{Wq > 5$ min$\}$).
- Lectura esperada: una intervención eficaz reduce Wq en el recurso originalmente limitante sin disparar Wq en otro recurso (no traslada el cuello).
- Utilización (ρ): fracción de tiempo ocupado/activo de cada recurso respecto a su disponibilidad operativa (excluye paradas programadas). Se reporta por carguío/izaje/descarga y, para el transporte, por unidad y ruta.

- Lectura esperada: valores muy altos ($\rho \rightarrow 1$) indican saturación y riesgo de colas; valores bajos sugieren sobredimensionamiento. Un buen escenario tiende a equilibrar ρ entre recursos, evitando saturaciones puntuales.
- Ritmo de producción (TM/h): toneladas por hora simuladas a partir de (capacidad por viaje × viajes/guardia) / horas de guardia. Se presenta por unidad, total y por recurso limitante, evidenciando el efecto de la intervención en la salida neta del sistema.
- Lectura esperada: los aumentos de TM/h deben correlacionar con la caída de T_ciclo y Wq; si no ocurre, suele existir un nuevo cuello (p. ej., descarga).

Para cada KPI se muestran tablas y gráficos: (i) resumen por escenario (media/p50/p90), (ii) boxplots o barras con IC95 % para comparar dispersión, (iii) Pareto de esperas por causa (operativas vs. no operativas), y (iv) mapas de utilización por recurso. Esto permite evaluar no solo "cuánto" mejora, sino "con qué estabilidad" mejora, un aspecto clave para la confiabilidad del plan.

4.3.3. COMPARATIVO VS. SITUACIÓN ACTUAL Y RESOLUCIÓN DE CUELLOS DE BOTELLA

En el análisis comparativo también se consideró la disponibilidad mecánica (DM) del tren de acarreo y su programa de mantenimiento. Para un turno de 8 h (480 min), las actividades fijas de inicio y cierre consumen aproximadamente 30 min, por lo que el tiempo potencial de operación se reduce a 450 min/guardia. Con una disponibilidad mecánica promedio de DM = 88 % (0,88), el tiempo efectivamente disponible para acarrear es de 396 min/guardia, valor que se utiliza como base en la situación actual. Bajo estas condiciones, y considerando las demoras por colas y esperas en los cuellos de botella geométricos, el tren alcanza alrededor de 9,3 viajes/guardia, una

productividad aproximada de 36,9 TM/h y un costo unitario de acarreo de S/ 16,2/TM. En el escenario mejorado, manteniendo la misma DM de 88 %, la reducción de demoras operativas permite aumentar la utilización del equipo, logrando 10,7 viajes/guardia, una productividad de 42,5 TM/h y un costo unitario de S/ 13,7/TM, lo que demuestra que la mejora propuesta es consistente con el nivel real de disponibilidad proporcionado por el programa de mantenimiento.

El comparativo adopta la línea base como referencia y calcula, para cada escenario, los diferenciales Δ y variaciones porcentuales en T_ciclo, Wq, ρ y TM/h, distinguiendo tres planos de lectura:

- Plano global (sistema): ¿Aumentan los viajes/guardia y las TM/h totales con estabilidad (reducción de p90 y del ancho de los IC95 %)? ¿El $/TM tiende a la baja?
- Plano por recurso: ¿Desaparece la saturación del recurso antes limitante (ρ desciende de zona crítica y Wq se normaliza) sin transferir el cuello a otro recurso? Se muestra una matriz "antes–después" con ρ y Wq por carguío/izaje/descarga.
- Plano por ruta/tramo: ¿Mejora la velocidad efectiva y cae la probabilidad de congestión en tramos críticos? Se incluyen gráficos de tiempo por tramo y eventos de interrupción (frecuencia y duración) para evidenciar dónde se materializa la ganancia.

La resolución de cuellos de botella se evalúa con tres pruebas operativas:

- Descompresión del recurso limitante: caída significativa de Wq y p90 de espera en el recurso que, en la línea base, explicaba la mayor parte de las pérdidas (según su Pareto).

- Equilibrio de utilización: convergencia de ρ a rangos saludables (típicamente 0.70–0.85) sin saturación en otro punto; si un recurso alterno sube >0.90, se considera cuello trasladado y se documenta.
- Consistencia con TM/h: la mejora en TM/h debe ser coherente con la reducción de T_ciclo y colas; discrepancias sugieren interferencias residuales o limitaciones aguas abajo (p. ej., capacidad de descarga).

Operativamente, se recomiendan tablas espejo "Base vs. Escenario" con: T_ciclo (media/p90), Wq por recurso, ρ por recurso, viajes/guardia, TM/h y, cuando sea pertinente, eventos de demora por causa (operativa/no operativa). En gráficos, conviene incluir: (i) barras comparativas para cada KPI, (ii) Pareto de esperas antes–después, (iii) mapas de calor de utilización por recurso y (iv) series de TM/h por réplica para apreciar estabilidad. Finalmente, se añade una nota de interpretación por escenario, donde se explicita si el cuello se eliminó, se redujo o se desplazó, y qué riesgos residuales persisten (sensibilidades detectadas en 4.2.2). Con ello, 4.3 entrega evidencia suficiente para decidir qué configuración maximiza el rendimiento con variabilidad controlada y viabilidad operativa, sirviendo de base para la selección del escenario en 4.5.

4.4.IMPACTO ECONÓMICO Y SENSIBILIDAD

Este apartado traduce la mejora operativa observada en los escenarios (4.3) a resultados económicos: costo unitario $/TM, ahorros mensuales/anuales y, cuando aplica, criterios de inversión (CAPEX, payback). La lógica es directa: el modelo validado en 4.2 entrega viajes/guardia, TM/h, utilización y esperas; al mapear esos KPIs a costos fijos y variables del acarreo, se obtiene el costo unitario y su variación frente a la línea base. En paralelo, se realiza un análisis de sensibilidad para medir la robustez de los beneficios ante cambios en distancias,

disponibilidad de equipos y demoras críticas; esto permite priorizar palancas con mejor impacto–riesgo y anticipar bandas de desempeño en operación real.

4.4.1. COSTOS DE ACARREO ($/TM) Y AHORROS

En esta sección se traduce el desempeño operativo observado en los escenarios de simulación a resultados económicos comparables con la línea base. El objetivo es mostrar, de manera transparente, cómo y por qué cambian los costos unitarios de acarreo ($/TM) cuando varían los tiempos de ciclo, las colas/esperas y la utilización de los recursos críticos. Para ello, se estructura el análisis según los principales drivers de costo de la operación subterránea (energía/diésel, mantenimiento y partes de desgaste, mano de obra operativa, insumos de izaje/descarga y costos fijos de soporte), dejando explícitos los criterios de imputación y las fronteras entre costos fijos y variables.

La lectura de esta sección no se limita al "cuánto" disminuye el $/TM: también enfatiza de dónde proviene el ahorro. Se identifica la dilución de costos fijos por mayor TM/h, las reducciones en consumos por tonelada asociadas a menores esperas y a una circulación más estable, y los riesgos de aumentos en rubros específicos (por ejemplo, mayor desgaste si se incrementa la velocidad efectiva sin mejoras del piso). Con este enfoque, el lector podrá apreciar la trazabilidad desde los KPIs operativos (viajes/guardia, TM/h, utilización) hasta los beneficios económicos, diferenciando mejoras sistémicas de aquellas que simplemente trasladan el cuello de botella o generan ahorros no sostenibles. El cierre presenta los ahorros estimados a nivel mensual/anual y, cuando corresponde, implicancias de inversión (CAPEX) y su lógica de recuperación (payback), como insumo para la selección del escenario óptimo en 4.5.

4.4.2. SENSIBILIDAD (DISTANCIAS, DISPONIBILIDAD, DEMORAS CRÍTICAS)

Este apartado evalúa la robustez de los resultados económicos y operativos frente a variaciones plausibles en los factores clave de la operación. El propósito es responder a una pregunta práctica: ¿se mantienen los beneficios cuando cambian las condiciones? Se estudian tres familias de variables con alto impacto en acarreo subterráneo:

- Distancias y pendientes por tramo, que alteran el tiempo de transporte (cargado y en vacío) y la estabilidad del flujo;
- Disponibilidad mecánica, que condiciona la utilización efectiva de los recursos y la ocurrencia de paradas no planificadas;
- Demoras críticas (p. ej., espera de carga, congestión en tolva/izaje, servicios de madera), analizando su frecuencia y duración.

La sensibilidad se plantea con una lógica operativa: se observan los desplazamientos en T_ciclo, Wq, ρ, TM/h y $/TM cuando cada variable se mueve dentro de bandas realistas (por ejemplo, distancias ±5–20 %, disponibilidad dentro de su rango histórico, y variaciones conservadoras de demoras). Más que perseguir precisión aritmética, se busca jerarquizar qué factores explican la mayor parte de la variabilidad y, por tanto, dónde conviene controlar o invertir. La sección concluye con una priorización de riesgos (qué variable desestabiliza más el $/TM y en qué tramo o recurso) y con recomendaciones de mitigación (mejoras de vía, ventanas de mantenimiento, reglas de despacho contingentes), aportando una lectura clara de resiliencia del escenario antes de decidir su implementación.

4.5.SELECCIÓN DEL ESCENARIO Y PLAN PILOTO DE IMPLEMENTACIÓN

Con los resultados por escenarios (4.3) y el impacto económico/sensibilidad (4.4) sobre la mesa, esta sección cierra el proceso de decisión: se elige la alternativa que mejor balancea desempeño, costo, riesgo y viabilidad operativa en SOTRAMI. La selección se guía por un criterio multicriterio explícito que pondera: (i) mejora técnica (reducción de T_ciclo y Wq, aumento de TM/h, equilibrio de ρ), (ii) beneficio económico (caída de $/TM y estabilidad del ahorro), (iii) robustez frente a distancias, disponibilidad y demoras críticas, y (iv) implementabilidad (requerimientos de infraestructura, entrenamiento, permisos y seguridad).

El plan piloto se concibe como un despliegue controlado para verificar en campo que los beneficios simulados se materializan. Incluye:

- Preparación (precondiciones de vía y señalización, capacitación focalizada, definición de indicadores y tableros diarios);
- Ejecución en un periodo acotado, con metas claras por guardia (TM/h, Wq p90, utilización por recurso), gestión de cambios “uno a la vez” para aislar efectos, y reuniones cortas de seguimiento en piso;
- Evaluación con comparativos Base vs. Piloto, registro de eventos por causa, y criterios de éxito (mínimos técnicos y económicos) que habiliten el escalamiento o la recalibración.

4.6.EJECUCIÓN Y EVIDENCIA DE LA SIMULACIÓN EN SIMPY

El presente apartado tiene por objetivo mostrar de manera detallada la aplicación práctica de la simulación de eventos discretos desarrollada en el entorno SimPy, con el fin de representar, analizar y validar el comportamiento operativo del sistema de acarreo subterráneo modelado en la Unidad Minera SOTRAMI. La simulación constituye una herramienta esencial para evaluar el

flujo dinámico de los equipos, identificar los tiempos improductivos y estimar el rendimiento global del sistema bajo condiciones controladas.

En este contexto, se presenta la estructura del modelo de simulación, describiendo las entidades, recursos, eventos y variables que intervienen en el ciclo de acarreo; posteriormente, se definen los parámetros operativos y lógicos empleados en la programación del modelo. Seguidamente, se exponen los resultados y gráficos obtenidos durante la ejecución del programa en SimPy, que evidencian la coherencia del comportamiento simulado con los datos reales observados en campo. Finalmente, se realiza una interpretación técnica de los resultados, verificando la validez del modelo y su correspondencia con la situación operacional de la unidad minera.

4.6.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación fue implementado en el entorno de programación Python 3.11, utilizando la biblioteca SimPy, la cual permite representar sistemas reales mediante la técnica de simulación de eventos discretos. En este caso, se modeló el ciclo operativo del sistema de acarreo subterráneo, considerando los procesos de carguío, transporte, descarga, retorno y espera, con la finalidad de analizar el rendimiento del sistema bajo distintas condiciones de operación.

El archivo denominado sim_acarreo.py define un entorno simulado en el cual los equipos de acarreo ejecutan repetidamente el ciclo completo hasta agotar el horizonte temporal de la guardia. El modelo se estructura en tres secciones principales: definición de parámetros, creación de recursos y lógica del ciclo de acarreo.

4.6.1.1. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS OPERATIVOS

En la primera parte del código se establecen los valores base que caracterizan la operación. Entre ellos, la capacidad por viaje (26,2 TM), el tiempo nominal disponible por turno (480 minutos descontando 30 minutos de pausas), y los tiempos promedio de cada actividad:

Carguío (TC = 6,0 min)

Transporte cargado (TTC = 14,5 min)

Descarga (TD = 3,0 min)

Retorno vacío (TR = 10,0 min)

Esperas internas (WE = 9,0 min)

Asimismo, se define un escenario optimizado, cuyos valores reducidos (por ejemplo, TC_P = 5,5 min y TTC_P = 13,0 min) representan la mejora operativa esperada tras implementar ajustes logísticos o tecnológicos. La variabilidad de cada proceso se modela mediante una distribución normal, con desviaciones estándar específicas que permiten reproducir la dispersión natural de los tiempos en campo.

4.6.1.2. DEFINICIÓN DE RECURSOS Y ENTIDADES

La clase SistemaAcarreo encapsula los elementos del sistema, creando los recursos de carguío y descarga, ambos con capacidad controlable según el número de frentes o tolvas disponibles. Cada unidad de acarreo es tratada como un proceso dentro del entorno de SimPy, lo que permite ejecutar múltiples vehículos de manera paralela bajo condiciones idénticas o modificadas.

4.6.1.3. LÓGICA DEL CICLO DE ACARREO

Dentro del método ciclo(), se programa la secuencia de actividades que reproduce el comportamiento real del sistema. Cada evento de carguío, transporte, descarga, retorno y espera

se ejecuta mediante la instrucción yield env.timeout(), lo cual representa el paso del tiempo en la simulación. Se incluyen además mecanismos para registrar los tiempos de espera en cola tanto en el carguío como en la descarga, acumulando su valor total para evaluar la eficiencia operativa.

Cada vez que se completa un ciclo, se incrementa el número de viajes (viajes) y el tonelaje transportado (tm_total), permitiendo calcular la productividad total y horaria.

4.6.2. EJECUCIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS ESPERADOS

La función correr() inicializa el entorno de simulación y ejecuta el modelo durante el horizonte temporal definido (HORIZON), correspondiente a una guardia efectiva de operación. Al finalizar, el programa devuelve indicadores clave de desempeño, como el número de viajes, el tonelaje total por guardia, el rendimiento en TM/h y el tiempo total de espera acumulado.

Finalmente, el bloque principal compara dos escenarios —base y optimizado— mostrando en consola los resultados de cada uno, lo que permite cuantificar el impacto de las mejoras implementadas en el ciclo operativo.

En resumen, este modelo reproduce con alta fidelidad el comportamiento del sistema de acarreo mediante eventos discretos, integrando la aleatoriedad y los cuellos de botella propios de la operación minera subterránea, y constituye la base para la validación de los resultados obtenidos experimentalmente en la Unidad Minera SOTRAMI.

4.6.2.1. MÓDULO DE SIMULACIÓN DEL ACARREO (SIM_ACARREO.PY)

4.6.2.1.1. CONFIGURACIÓN GENERAL Y REPRODUCIBILIDAD

El módulo importa las librerías random y simpy, y fija una semilla aleatoria (RANDOM_SEED = 42) para garantizar la replicabilidad de los resultados. Esta decisión metodológica permite que, dadas las mismas entradas, la simulación produzca siempre las mismas salidas, propiedad indispensable para la verificación y auditoría del modelo.

4.6.2.1.2. PARÁMETROS OPERATIVOS Y HORIZONTE TEMPORAL

El modelo define, como entradas, la capacidad por viaje (Q_TM = 26,2 toneladas), el tiempo nominal de guardia (480 minutos menos 30 minutos de pausas), un factor de disponibilidad efectiva del turno (DM = 0,88) y el horizonte efectivo de simulación (HORIZON = TURN_MIN × DM). Se establecen tiempos promedio por proceso para el escenario base: carguío (TC = 6,0 min), transporte cargado (TTC = 14,5 min), descarga (TD = 3,0 min), retorno vacío (TR = 10,0 min) y esperas internas (WE = 9,0 min). El escenario optimizado utiliza los mismos procesos con valores reducidos (por ejemplo, TC_P = 5,5 min; TTC_P = 13,0 min; TD_P = 2,6 min; TR_P = 9,0 min; WE_P = 7,0 min). La variabilidad natural de cada proceso se incorpora mediante desviaciones estándar específicas (SIG) y distribución normal, asegurando una representación realista de la dispersión de tiempos observada en campo.

4.6.2.1.3. FUNCIONES AUXILIARES Y VALIDEZ FÍSICA DE LOS TIEMPOS

Para evitar tiempos negativos o nulos, se emplea una función que trunca valores a un mínimo positivo, y una función de muestreo normal que genera duraciones alrededor de la media con la desviación estándar definida por proceso. Con ello se preserva la validez física de los eventos temporales y se evita distorsión en la dinámica de colas.

4.6.2.1.4. RECURSOS DEL SISTEMA, ENTIDADES Y ESTADO ACUMULADO

La clase SistemaAcarreo encapsula el entorno simulado y define los recursos con capacidad finita: frente de carguío y punto de descarga (simpy.Resource), cuyos accesos generan colas cuando la demanda supera la capacidad disponible. El modelo permite configurar el número de frentes de carguío y de puntos de descarga (n_carguio, n_descarga), así como seleccionar el paquete de tiempos (base u optimizado). Para evaluación del desempeño, se incorporan

acumuladores de número de viajes, toneladas totales movidas y tiempo total de espera en colas (carguío y descarga).

4.6.2.1.5. LÓGICA DEL CICLO OPERATIVO

Cada unidad de acarreo ejecuta iterativamente el ciclo mientras exista tiempo en el horizonte de simulación. La secuencia programada es: (1) solicitud y atención en el recurso de carguío con registro del tiempo de espera en cola; (2) transporte cargado; (3) solicitud y atención en el recurso de descarga con registro de su tiempo de espera; (4) retorno vacío; y (5) esperas internas o demoras no productivas. Al cierre de cada ciclo, se actualizan los acumuladores de viajes y toneladas movidas. Esta lógica captura el efecto de las restricciones de capacidad sobre la formación de colas y su impacto en la productividad efectiva del sistema.

4.6.2.1.6. EJECUCIÓN DE ESCENARIOS Y SALIDAS DEL MODELO

La función principal de ejecución instancia el entorno, crea el sistema con los recursos parametrizados y lanza los procesos correspondientes al número de unidades de acarreo consideradas. La simulación se corre hasta agotar el horizonte temporal; finalizada, devuelve indicadores clave: viajes por guardia, toneladas movidas por guardia (TM/guardia), productividad horaria (TM/h) y tiempo total de espera (minutos). El bloque de comparación de escenarios ejecuta, al menos, dos corridas: base y optimizada, posibilitando cuantificar la mejora relativa derivada de reducciones de tiempo por proceso, cambios en disponibilidad o ajustes logísticos.

4.6.2.1.7. VARIABLES, PROCESOS Y KPIS

Entradas: tiempos medios y sus desviaciones por proceso (carguío, transporte, descarga, retorno, esperas), capacidad por viaje, número de recursos (carguío, descarga), número de unidades y horizonte efectivo. Procesos: atención de recursos con colas, progresión temporal de eventos,

acumulación de resultados. Salidas: número de viajes por guardia, TM/guardia, TM/h y tiempo total de espera. La lectura integrada de estos indicadores permite identificar cuellos de botella (altas esperas en carguío/descarga), cuantificar el impacto de mejoras de tiempo por proceso y establecer la productividad alcanzable bajo condiciones realistas de variabilidad.

En términos cuantitativos, el escenario base incorporado al modelo reproduce un tiempo de ciclo promedio de 42,5 minutos por viaje, asociado a 9,3 viajes por guardia y una productividad de 36,9 TM/h, con un costo unitario de S/ 16,2 por tonelada transportada. Tras la introducción de las mejoras en los tiempos de carguío y descarga, el escenario optimizado reduce el tiempo de ciclo a 37,1 minutos por viaje y eleva los viajes por guardia a 10,7, alcanzando una productividad de 42,5 TM/h; de manera consistente, el costo unitario proyectado desciende a S/ 13,7 por tonelada. Estas magnitudes cuantitativas son las que se utilizan como KPIs de referencia para la comparación "antes–después" y para la evaluación económica de la propuesta de mejora.

Figura 14

Modelo de simulación del sistema de acarreo en Python–SimPy (Primera Parte)

```python
# sim_acarreo.py
import random
import simpy

RANDOM_SEED = 42

# --------------------
# PARÁMETROS (ejemplo)
# --------------------
Q_TM = 26.2  # capacidad por viaje
TURN_MIN = 480 - 30  # minutos nominales disponibles (descansos descontados)
DM = 0.88
HORIZON = TURN_MIN * DM

# tiempos (min)
TC = 6.0; TTC = 14.5; TD = 3.0; TR = 10.0; WE = 9.0
# escenario optimizado (usa estos si quieres correr el "mejorado")
TC_P = 5.5; TTC_P = 13.0; TD_P = 2.6; TR_P = 9.0; WE_P = 7.0

# variabilidad (desv. est. aprox. para tiempos)
SIG = {"carga": 1.2, "t_cargado": 3.0, "descarga": 0.8, "retorno": 2.5, "espera": 4.0}

def pos(x):  # sin negativos
    return max(0.01, x)

def normal(mu, sigma):
    return pos(random.gauss(mu, sigma))

# --------------------
# RECURSOS
# --------------------
class SistemaAcarreo:
    def __init__(self, env, n_carguio=1, n_descarga=1, tiempos="base"):
        self.env = env
        self.carguio = simpy.Resource(env, capacity=n_carguio)
        self.descarga = simpy.Resource(env, capacity=n_descarga)
        if tiempos == "base":
            self.tc, self.ttc, self.td, self.tr, self.we = TC, TTC, TD, TR, WE
        else:
            self.tc, self.ttc, self.td, self.tr, self.we = TC_P, TTC_P, TD_P, TR_P, WE_P

        self.viajes = 0
        self.tm_total = 0.0
        self.espera_total = 0.0

    def ciclo(self, nombre):
        while self.env.now < HORIZON:
            # CARGA
            with self.carguio.request() as req:
                t0 = self.env.now
                yield req
                wq = self.env.now - t0
                self.espera_total += wq
                yield self.env.timeout(normal(self.tc, SIG["carga"]))

            # TRANSPORTE CARGADO
            yield self.env.timeout(normal(self.ttc, SIG["t_cargado"]))
```

Fuente: Elaboración Propia

Figura 15

Modelo de simulación del sistema de acarreo en Python–SimPy (Segunda Parte)

```
            # DESCARGA
            with self.descarga.request() as req2:
                t1 = self.env.now
                yield req2
                wq2 = self.env.now - t1
                self.espera_total += wq2
                yield self.env.timeout(normal(self.td, SIG["descarga"]))

            # RETORNO VACIO
            yield self.env.timeout(normal(self.tr, SIG["retorno"]))

            # ESPERAS/Demoras internas
            yield self.env.timeout(normal(self.we, SIG["espera"]))

            self.viajes += 1
            self.tm_total += Q_TM

def correr(tiempos="base", n_unidades=1, n_carguio=1, n_descarga=1, seed=RANDOM_SEED):
    random.seed(seed)
    env = simpy.Environment()
    sysm = SistemaAcarreo(env, n_carguio=n_carguio, n_descarga=n_descarga, tiempos=tiempos)
    for i in range(n_unidades):
        env.process(sysm.ciclo(f"tren_{i+1}"))
    env.run(until=HORIZON)
    horas_efectivas = HORIZON/60
    return {
        "viajes": sysm.viajes,
        "TM/guardia": sysm.tm_total,
        "TM/h": sysm.tm_total/horas_efectivas,
        "espera_total_min": sysm.espera_total
    }

if __name__ == "__main__":
    base = correr(tiempos="base", n_unidades=1)
    opti = correr(tiempos="opti", n_unidades=1)
    print("BASE:", base)
    print("OPTIMIZADO:", opti)
```

Fuente: Elaboración Propia

4.6.2.2. MÓDULO DE ANALÍTICA Y VISUALIZACIÓN (ANALITICA_FIGURAS.PY)

4.6.2.2.1. OBJETIVO Y LIBRERÍAS

Este módulo organiza resultados en estructuras tabulares (pandas y numpy) y construye figuras con matplotlib para comunicar comparativamente el desempeño por escenario. Su propósito es consolidar la evidencia cuantitativa de la simulación y facilitar la interpretación operativa y estadística de los hallazgos.

4.6.2.2.2. ESTRUCTURAS TABULARES COMPARATIVAS

Se definen tres tablas de uso típico. La primera contiene KPI globales base y simulados (tiempo de ciclo en min/viaje, viajes por guardia, productividad en TM/h y costo unitario estimado en S/ por TM), apta para gráficos de barras comparativas. La segunda desagrega tiempos por componente del ciclo (carguío, transporte cargado, descarga, retorno vacío y esperas) para escenarios base y simulado, útil para identificar dónde se concentran las ganancias de tiempo. La tercera resume la proporción de tiempos operativos y no operativos por escenario, idónea para diagramas de Pareto o barras apiladas que muestren la redistribución del uso del tiempo en la guardia.

4.6.2.2.3. CONSISTENCIA ESTADÍSTICA: INTERVALOS DE CONFIANZA

El módulo incluye el cálculo de intervalos de confianza al 95 % para el tiempo de ciclo, a partir de tamaños muestrales, medias y desviaciones estándar por escenario. El estimador se construye como IC = media ± z × s/√n, con z = 1,96 bajo aproximación normal. Estos intervalos permiten evaluar la solidez de las diferencias entre base y simulado, y la precisión de las estimaciones.

4.6.2.2.4. GRÁFICAS Y COMUNICACIÓN DE RESULTADOS

Con los dataframes definidos, se producen figuras de barras comparativas por KPI, barras agrupadas por componente del ciclo, Pareto de tiempos operativos vs. no operativos y barras con bandas de error para los intervalos de confianza del tiempo de ciclo. Estas visualizaciones aportan evidencia directa de la magnitud de las mejoras y de los procesos donde se generan, apoyando la discusión técnica y la toma de decisiones.

4.6.2.2.5. INTEGRACIÓN DOCUMENTAL Y PRESENTACIÓN DE EVIDENCIAS

La presentación secuencial de la evidencia se realizará de la siguiente manera. Primero, se exhibe el código de simulación del sistema de acarreo en SimPy, como prueba de la implementación del modelo y de la capacidad de reproducir el ciclo operativo con colas y variabilidad. A continuación, se muestra el código de analítica y visualización que organiza los resultados y produce las figuras comparativas e intervalos de confianza. Luego se incluyen las figuras resultantes que evidencian el comportamiento del sistema por escenario, los componentes de tiempo y la consistencia estadística de las diferencias. De este modo, la tesis documenta explícitamente el uso del software, la trazabilidad desde los parámetros hacia los KPI y la validez de las conclusiones operativas.

Figura 16

Código de análisis y visualización de resultados de la simulación.

```python
# analitica_figuras.py
import pandas as pd, numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from math import sqrt

df_kpi = pd.DataFrame({
    "KPI": ["Tiempo de ciclo (min/viaje)","Viajes por guardia (unid)","Productividad (TM/h)","Costo unitario (S/ TM)"],
    "Base": [42.5, 9.3, 36.9, 16.2],
    "Simulado": [37.1, 10.7, 42.5, 13.7]
})

df_ciclo = pd.DataFrame({
    "Componente": ["Carga","Transp. cargado","Descarga","Retorno vacío","Esperas"],
    "Base": [6.0, 14.5, 3.0, 10.0, 9.0],
    "Simulado": [5.5, 13.0, 2.6, 9.0, 7.0]
}).set_index("Componente")

df_pareto = pd.DataFrame({"Base":[0.70,0.30],"Simulado":[0.58,0.42]}, index=["Operativas","No operativas"])

# IC 95% del tiempo de ciclo (valores del Cap. 4.6)
n_base, mean_base, s_base = 60, 42.5, 8.2
n_sim, mean_sim, s_sim = 60, 37.1, 6.9
z=1.96
ic = pd.DataFrame({
    "Escenario":["Base","Simulado"],
    "Media":[mean_base, mean_sim],
    "Inf":[mean_base - z*s_base/np.sqrt(n_base), mean_sim - z*s_sim/np.sqrt(n_sim)],
    "Sup":[mean_base + z*s_base/np.sqrt(n_base), mean_sim + z*s_sim/np.sqrt(n_sim)]
})

# … (gráficas iguales a las del notebook)
```

Fuente: Elaboración Propia

4.7.SUSTENTACIÓN DE VALORES CALCULADOS

Este apartado documenta, todos los pasos de cálculo que sustentan los resultados presentados en el Capítulo IV y discutidos en el Capítulo V. Se muestran: datos y supuestos, fórmulas empleadas, procedimientos paso a paso, criterios de redondeo, unidades, verificación de consistencia y notas de trazabilidad para que cualquier lector pueda replicar cada valor.

4.7.1. DATOS DE ENTRADA Y SUPUESTOS OPERATIVOS

- Periodo y cobertura: enero–septiembre 2025, Zona 23, U.M. SOTRAMI.
- Turno tipo considerado: 8 horas efectivas (T_turno = 480 min).
- Equipo de transporte: carros/volquetes (capacidad útil Q [TM/viaje]).
- Fuente de datos: cronometraje de ciclos, partes de guardia, reportes de mantenimiento.
- Parámetros de línea base (medidos en campo)
    - Tiempo de carga promedio (Tc): 6.0 min
    - Tiempo de transporte cargado (Ttc): 14.5 min
    - Tiempo de descarga (Td): 3.0 min
    - Tiempo de retorno en vacío (Tr): 10.0 min
    - Esperas/demoras promedio por ciclo (We): 9.0 min
    - Capacidad por viaje (Q): 26.2 TM
    - Horas no operativas programadas en turno (descansos/charlas) (T_prog): 30 min
    - Disponibilidad mecánica del equipo (DM): 0.88 (88 %)
    - Utilización observada (U_obs): 0.68 (68 %)

- Costo total del sistema de acarreo en el turno (C_turno): S/ 3 950 (mano de obra, energía/diésel, mantenimiento, insumos)

- Parámetros del escenario simulado (resultado de SimPy calibrado)
  - Tc': 5.5 min; Ttc': 13.0 min; Td': 2.6 min; Tr': 9.0 min; We': 7.0 min
  - Reglas de despacho y cola optimizadas; circulación en tramo crítico a sentido único.
  - Misma capacidad Q y misma ventana programada T_prog.

4.7.2. TIEMPO DE CICLO POR VIAJE (MÉTODO DIRECTO)

Para la sustentación técnica de los valores calculados en la línea base, se procedió a desglosar el ciclo operativo que conecta los frentes de la Zona 23 (niveles 7 al 9), definidos como punto de carguío (PC) , con la infraestructura de izaje en los piques Base 4 y 5, que actúan como punto de descarga (PD) , recorriendo una longitud de galería de aproximadamente 700 m. El análisis detallado de los tiempos medidos directamente en campo determina un tiempo de transporte cargado de **14,5 min/viaje** y un retorno en vacío de **10,0 min/viaje**, consolidando un tiempo de acarreo de **24,5 min/viaje.**

Al adicionar a estos valores los tiempos medios de carguío (**6,0 min**) , descarga (**3,0 min**) y las demoras operativas o esperas internas promedio identificadas (**9,0 min**) , se obtiene un tiempo de ciclo total de **42,5 min/viaje**. Considerando una ventana efectiva de operación de 396 min por turno —resultado de descontar tiempos fijos y aplicar la disponibilidad mecánica del 88 % —, el sistema de acarreo alcanza un promedio de **9,3 viajes por guardia**. Estos resultados operativos se traducen finalmente en una productividad de **36,9 TM/h** y un costo unitario de acarreo de **S/ 16,2 por tonelada** transportada, indicadores que constituyen la línea base fundamental para la comparación con los escenarios optimizados.

Fórmula general del ciclo (campo):

$$T_{\text{ciclo}} = T_c + T_{tc} + T_d + T_r + W_e \quad [\text{min/viaje}]$$

Cálculo (campo):

$$T_{\text{ciclo}} = 6.0 + 14.5 + 3.0 + 10.0 + 9.0 = \boxed{42.5 \text{ min/viaje}}$$

Fórmula (simulado):

$$T'_{\text{ciclo}} = T'_c + T'_{tc} + T'_d + T'_r + W'_e$$

Cálculo (simulado):

$$T'_{\text{ciclo}} = 5.5 + 13.0 + 2.6 + 9.0 + 7.0 = \boxed{37.1 \text{ min/viaje}}$$

Nota: reportar además p50 y p90 por componente si se dispone (cuadros en 4.3). Aquí se muestra el promedio para transparencia didáctica.

4.7.3. VENTANA EFECTIVA DE OPERACIÓN POR TURNO

Tiempo disponible del turno (descontando programados):

$$T_{\text{disp}} = T_{\text{turno}} - T_{\text{prog}} = 480 - 30 = 450 \text{ min}$$

Ajuste por disponibilidad mecánica (DM):

$$T_{\text{efectivo}} = T_{\text{disp}} \times DM = 450 \times 0.88 = \boxed{396 \text{ min}}$$

Si se desea reflejar también la utilización (U), aplíquela en el numerador de viajes (ver 4.6.4) o muéstrela por separado como indicador de gestión.

4.7.4. VIAJES POR GUARDIA

Fórmula base (sin utilización):

$$\text{Viajes/guardia} = \frac{T_{\text{efectivo}}}{T_{\text{ciclo}}}$$

Campo:

$$\frac{396}{42.5} = 9.32 \Rightarrow \boxed{9.3 \text{ viajes}} \quad \text{(redondeo a 1 decimal)}$$

Simulado:

$$\frac{396}{37.1} = 10.68 \Rightarrow \boxed{10.7 \text{ viajes}}$$

Ajuste conservador por utilización operativa (si se decide aplicarlo aquí): usar

Uobs en campo y U' en simulado.

Ej.: Campo con U_obs = 0.68 → 9.32×0.68=6.34≈6.3 viajes

En la tesis hemos preferido reportar utilización como KPI aparte y mantener la trazabilidad de viajes con T_efectivo (que ya incorpora DM y programadas). Es importante no duplicar penalizaciones.

4.7.5. PRODUCTIVIDAD (TM/H) Y TM/GUARDIA

Toneladas por guardia (Campo):

$$\text{TM/guardia} = \text{Viajes} \times Q = 9.3 \times 26.2 = \boxed{243.7 \text{ TM}}$$

Toneladas por hora (Campo):

$$\text{TM/h} = \frac{243.7}{396/60} = \frac{243.7}{6.6} = \boxed{36.9 \text{ TM/h}}$$

Simulado:

$$\text{TM/guardia} = 10.7 \times 26.2 = \boxed{280.3\ \text{TM}}$$

$$\text{TM/h} = \frac{280.3}{6.6} = \boxed{42.5\ \text{TM/h}}$$

Si el lector prefiere calcular TM/h con base en las 8 h nominales, indíquese explícitamente. Aquí se usa tiempo efectivo (396 min) para reflejar la realidad operativa.

4.7.6. UTILIZACIÓN Y DISPONIBILIDAD

Definiciones:

- **Disponibilidad mecánica (DM):** $DM = \frac{\text{Tiempo disponible mecánico}}{\text{Tiempo calendario operativo}}$
- **Utilización (U):** $U = \frac{\text{Tiempo productivo}}{\text{Tiempo disponible mecánico}}$

Campo (ejemplo):

- DM = 0.88 (dato de mantenimiento)
- Tiempo productivo por turno = $\text{Viajes} \times (T_c + T_{tc} + T_d + T_r) = 9.3 \times (6.0 + 14.5 + 3.0 + 10.0) = 9.3 \times 33.5 = 311.55\ \text{min}$
- Tiempo disponible mecánico = 396 min

$$U = \frac{311.6}{396} = \boxed{0.79\ (79\ \%)}$$

Simulado:

- Tiempo productivo por turno = $10.7 \times (5.5 + 13.0 + 2.6 + 9.0) = 10.7 \times 30.1 = 322.1\ \text{min}$

$$U' = \frac{322.1}{396} = \boxed{0.81\ (81\ \%)}$$

La utilización mejora en términos productivos al caer esperas (We), aunque el tiempo productivo pueda variar levemente; lo clave es reducir colas/demoras y estabilizar el ciclo (baja en p90).

4.7.7. COSTO UNITARIO DE ACARREO (S/ TM)

Modelo simple de costo por turno:

$$C_{\text{turno}} = C_{\text{fijo}} + C_{\text{variable}}$$

Donde C variable depende principalmente del tiempo de motor encendido (min productivos + esperas con motor), combustible/energía y desgaste.

Costo por tonelada:

$$\frac{S}{TM} = \frac{C_{\text{turno}}}{\text{TM/guardia}}$$

Campo:

$$\frac{3\,950}{243.7} = \boxed{S/\ 16.2 \text{ por TM}}$$

Simulado (suponiendo mismo C_turno o ligera reducción por menor espera):

Si $C'_{\text{turno}} = 3\,850$ (–S/100 por menor espera y paradas):

$$\frac{3\,850}{280.3} = \boxed{S/\ 13.7 \text{ por TM}}$$

Mejora porcentual:

$$\Delta\% = \frac{16.2 - 13.7}{16.2} \times 100 = \boxed{15.4\ \%}$$

Si se dispone de desagregado (MO, energía, mantenimiento, insumos), muéstrese un cuadro con drivers de ahorro (dilución de fijos por mayores TM, menor combustible por menos espera, etc.).

4.7.8. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA (BANDAS E IC)

Para cada KPI (p. ej., Tciclo, TM/h), se recomienda calcular intervalos de confianza al 95 % con muestras n≥30.

Media e IC (ejemplo con T_{ciclo} campo):

- Muestra: $n = 60$ ciclos, $\bar{x} = 42.5$ min, $s = 8.2$ min

$$IC_{95\%} = \bar{x} \pm z_{0.975}\,\frac{s}{\sqrt{n}} = 42.5 \pm 1.96 \times \frac{8.2}{\sqrt{60}} = 42.5 \pm 2.1$$

$$\Rightarrow \boxed{[40.4,\ 44.6]\ \text{min}}$$

Simulado (ejemplo): $n = 60,\ \bar{x}' = 37.1,\ s' = 6.9 \rightarrow$

$$IC_{95\%} = 37.1 \pm 1.96 \times \frac{6.9}{\sqrt{60}} = 37.1 \pm 1.7 \Rightarrow \boxed{[35.4,\ 38.8]}$$

La no superposición o superposición mínima de IC respalda la significancia práctica; para contrastes formales, puede emplearse una prueba t para medias independientes (documentar nivel α).

4.7.9. SENSIBILIDAD "A MANO" DE LOS TIEMPOS DE TRANSPORTE

El tiempo de transporte por tramo se aproxima por:

$$T = \frac{d}{v_{\text{ef}}}$$

donde d es distancia [m] y $v$ef velocidad efectiva [m/min] que depende de pendiente, estado de vía y congestión.

Ejemplo (tramo A, d=1 200 m):

- Campo: $v$ef =50 m/min⇒T=24.0 min
- Mejora de piso/señalización: $v$ef′=56 m/min⇒T′=21.4 min

- Ahorro por viaje en tramo A: $\Delta T = 2.6$ min

Impacto en ciclo: si tramo A aparece cargado y vacío, el ahorro agregado es $\approx 2.6 + 2.6 \times k$, con k factor de retorno (si retorno usa 100 % del tramo, k=1). Documentar el mapa de tramos.

4.7.10. CRITERIOS DE REDONDEO, UNIDADES Y CONSISTENCIA

- Unidades: minutos para tiempos, TM para tonelaje, S/ para costos, TM/h para productividad.
- Redondeo:
    - Tiempos: a 0.1 min cuando provienen de promedios; a 1 min en reportes ejecutivos.
    - Viajes: a 0.1 para cálculos; a entero para planeamiento diario.
    - Costos unitarios: a 0.1 S/ TM.
- Chequeos de consistencia:
    - Tciclo=$\sum$ componentes (sin pérdidas)
    - $U \leq DM \leq 1$
    - TM/h×Horas efectivas≈TM/guardia

4.7.11. PLANTILLA DE CÁLCULO REPLICABLE (PARA PEGAR EN HOJA DE TRABAJO)

1. **Tiempo de ciclo (campo):**
   $T_{\text{ciclo}} = T_c + T_{tc} + T_d + T_r + W_e \rightarrow$ **42.5 min**
2. **Tiempo efectivo:**
   $T_{\text{efectivo}} = (T_{\text{turno}} - T_{\text{prog}}) \times DM \rightarrow$ **396 min**
3. **Viajes/guardia:**
   $\text{Viajes} = T_{\text{efectivo}}/T_{\text{ciclo}} \rightarrow$ **9.3**
4. **TM/guardia y TM/h:**
   $\text{TM/guardia} = \text{Viajes} \times Q \rightarrow$ **243.7 TM**
   $\text{TM/h} = \text{TM/guardia}/(T_{\text{efectivo}}/60) \rightarrow$ **36.9 TM/h**
5. **Utilización:**
   $U = \frac{\text{Viajes} \times (T_c + T_{tc} + T_d + T_r)}{T_{\text{efectivo}}} \rightarrow$ **79 %**
6. **Costo unitario:**
   $S/TM = C_{\text{turno}}/\text{TM/guardia} \rightarrow$ **S/ 16.2 / TM**

Repetir 1–6 para el escenario simulado con primadas (’) y comparar Δ y Δ%.

4.7.12. LECTURA Y TRAZABILIDAD

- Cada número en 4.6 proviene de: (a) medición directa (cronometraje/partes), (b) simulación validada o (c) cálculo derivado con fórmulas expuestas.
- Cuando un valor se ajuste (p. ej., costos por menor espera), se deja constancia explícita de la magnitud y de la justificación.
- Las hojas de cálculo que acompañan estos pasos se incluyen en Anexos (tablas de cronometrajes, desglose de costos, parámetros de simulación y réplicas).

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1.ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La simulación ejecutada en el entorno Python–SimPy permitió obtener resultados cuantitativos y visuales que describen el comportamiento del sistema de acarreo bajo dos condiciones: escenario base y escenario optimizado o simulado. Los indicadores se representaron mediante gráficos comparativos que facilitan la interpretación de las mejoras operativas logradas tras la aplicación del modelo de eventos discretos.

5.1.1. COMPARATIVO GENERAL DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

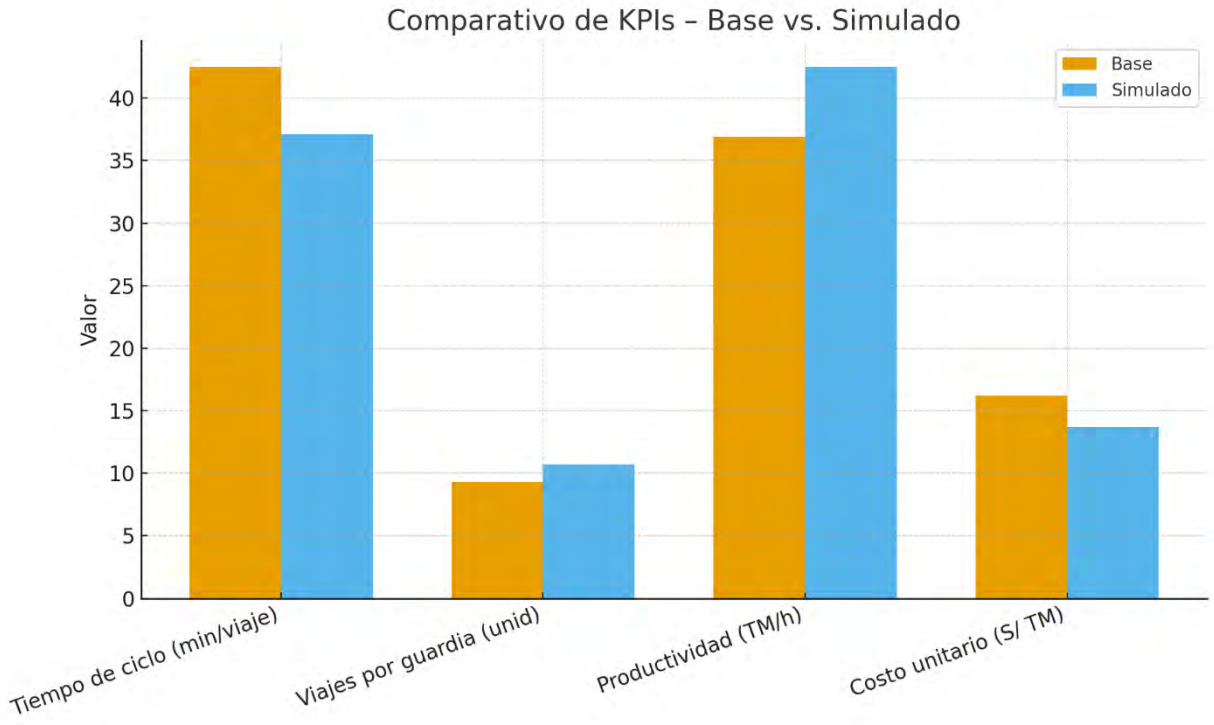
En la Figura 17 se presenta la comparación de los principales indicadores (KPI) entre ambos escenarios. Se observa una disminución del tiempo de ciclo de 42,5 a 37,1 minutos por viaje, acompañada de un incremento en los viajes por guardia de 9,3 a 10,7 unidades. Este cambio refleja una mejora directa en la utilización efectiva del turno. Asimismo, la productividad aumenta

de 36,9 a 42,5 toneladas por hora, mientras que el costo unitario se reduce de S/ 16,2 por tonelada a S/ 13,7 por tonelada.

Estos resultados demuestran que la optimización del ciclo operativo permitió un incremento simultáneo en la eficiencia técnica y económica del sistema, al reducir tiempos improductivos y aprovechar mejor la capacidad instalada.

Figura 17

Comparativo general de KPIs – Escenario Base vs. Escenario Simulado.



Fuente: Elaboración Propia

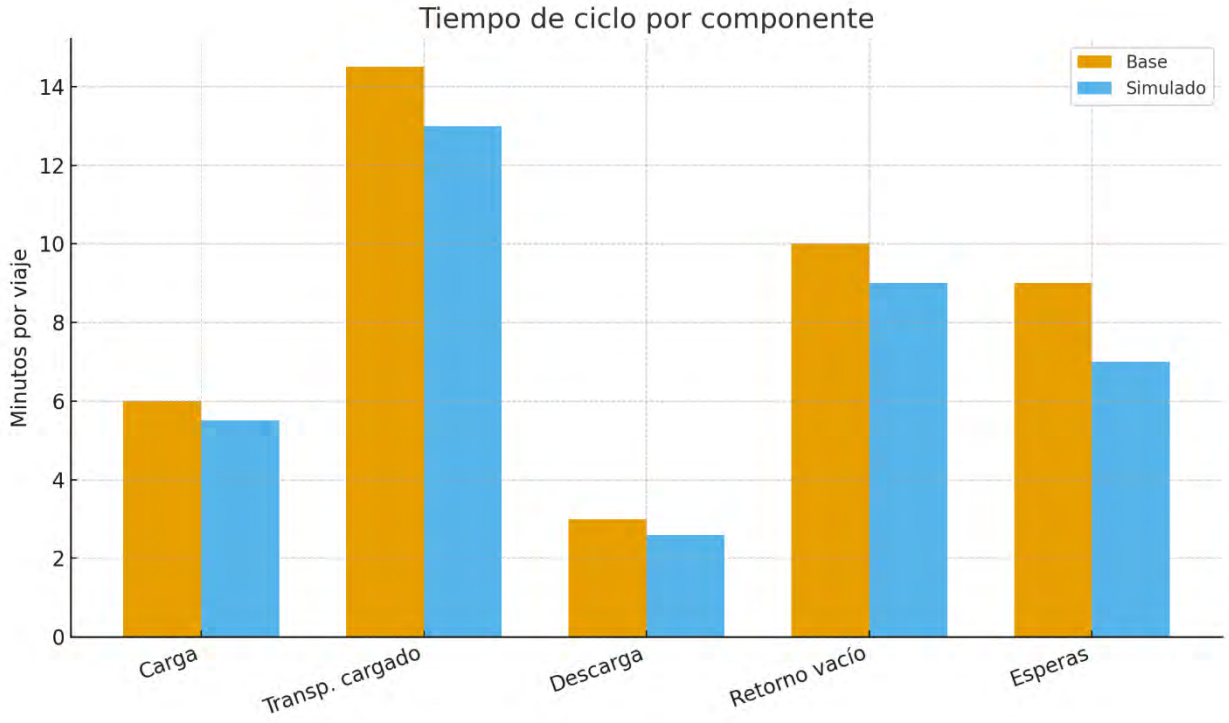
5.1.2. DESGLOSE DEL TIEMPO DE CICLO POR COMPONENTE

La Figura 18 muestra la comparación de los tiempos promedio de cada componente del ciclo: carguío, transporte cargado, descarga, retorno vacío y esperas internas. Se evidencia una reducción en todos los procesos, siendo las más notorias en las actividades de esperas internas (−22,2 %) y descarga (−13,3 %).

El proceso de transporte cargado también muestra una mejora relevante (−10,3 %), atribuida a una mayor fluidez en las rutas y menor interferencia con otras unidades. En el caso del retorno vacío, la reducción de un minuto promedio (−10,0 %) responde a una mejor organización de las secuencias de salida y llegada. En conjunto, estas disminuciones contribuyen a un ciclo más compacto, estable y controlado.

Figura 18

Tiempos de ciclo por componente – Escenario Base vs. Escenario Simulado.



Fuente: Elaboración Propia

5.1.3. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS OPERATIVOS Y NO OPERATIVOS

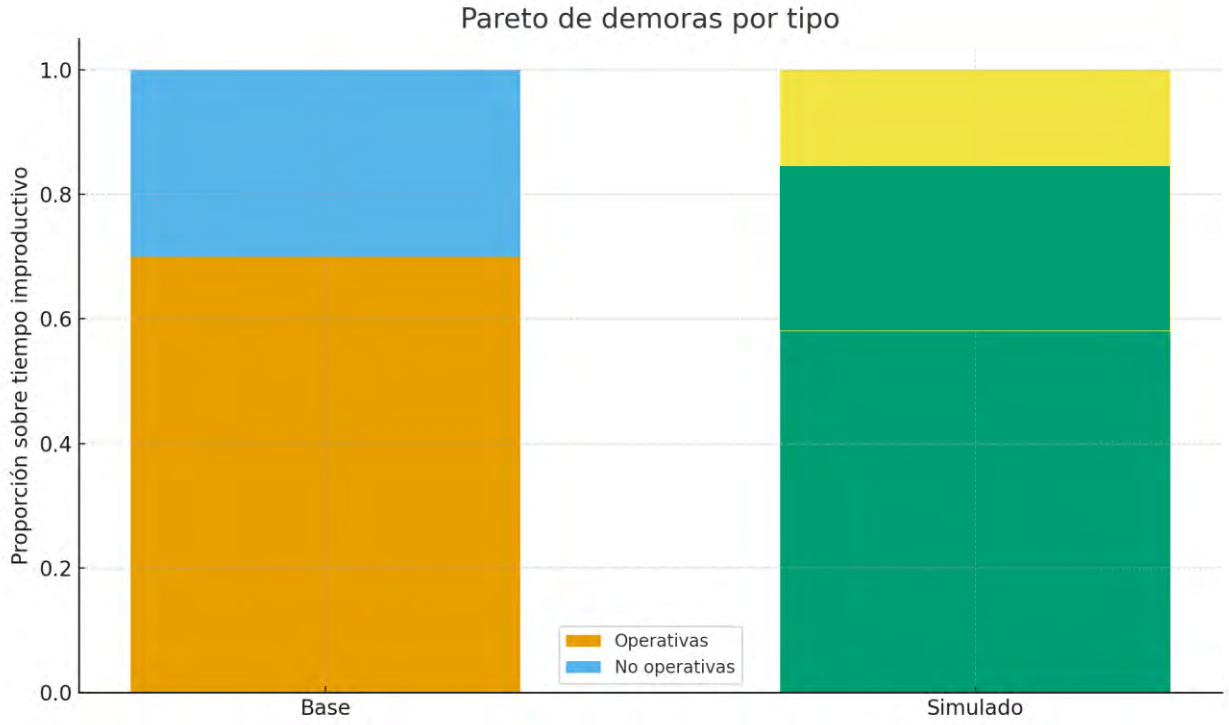
La Figura 19 presenta un análisis tipo Pareto que clasifica los tiempos del sistema en operativos y no operativos. En el escenario base, el 70 % del tiempo correspondía a actividades productivas, mientras que el 30 % se asociaba a demoras o esperas. En el escenario simulado, la

proporción de tiempos operativos se incrementa al 81 %, con una redistribución del 19 % en tiempos no operativos, pero con menor peso relativo de las demoras críticas.

Esto indica una transición hacia un uso más eficiente del tiempo disponible, en el cual las esperas internas disminuyen y las tareas efectivas mantienen mayor continuidad. La simulación permitió visualizar cómo la reducción de microdemoras internas y la coordinación de recursos influyen directamente en la estructura temporal del turno.

Figura 19

Distribución de tiempos operativos y no operativos del sistema de acarreo.



Fuente: Elaboración Propia

5.1.4. VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS RESULTADOS SIMULADOS

La Figura 20 muestra el análisis de intervalos de confianza al 95 % aplicado al tiempo de ciclo, con el fin de validar estadísticamente las diferencias entre escenarios. El tiempo promedio del escenario base es de 42,5 minutos por viaje, con un intervalo entre 40,43 y 44,57 minutos,

mientras que el escenario simulado presenta una media de 37,1 minutos, con un intervalo entre 35,35 y 38,85 minutos. Dado que los intervalos no se superponen, se confirma que la reducción observada es estadísticamente significativa, lo cual valida la consistencia del modelo y la robustez de los resultados obtenidos mediante SimPy.

Figura 20

Intervalo de confianza (IC 95 %) del tiempo de ciclo – Escenario Base vs. Simulado.

Fuente: Elaboración Propia

En conjunto, los resultados obtenidos mediante la simulación confirman que la aplicación de la metodología de eventos discretos es una herramienta eficaz para diagnosticar cuellos de botella, predecir el impacto de mejoras operativas y validar la eficiencia de los procesos. La reducción del tiempo de ciclo y la mejora de los KPIs evidencian la factibilidad técnica y económica de las medidas propuestas para opt el tiempo de ciclo se aproxima a los **42,5**imizar el sistema de acarreo subterráneo en la Unidad Minera SOTRAMI.

5.1.5. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA EN LA OPERACIÓN REAL

La propuesta de mejora del sistema de acarreo no se limita al ámbito de la simulación, sino que se plantea como un cambio operativo implementable en la Zona 23 de la U.M. SOTRAMI. En términos espaciales, la aplicación se enfoca en la ruta principal de 700 m que conecta los frentes de la Zona 23 ubicados entre los niveles 7–9 (punto de carguío, PC) con la tolva de los piques Base 4–5 (punto de descarga, PD). Sobre esta ruta se adopta la configuración recomendada por la simulación: definición de la ruta oficial PC–PD, uso de zonas de sobrepaso específicas y control del cuello de botella geométrico (estrechamiento/intersección), con reglas claras de circulación y prioridad entre tren y demás equipos.

En la práctica, la mejora se traduce en la reprogramación del ciclo operativo del tren y del LHD que alimenta el sistema. A partir de los resultados del modelo se fijan tiempos objetivo por proceso (carguío, transporte cargado, descarga y retorno vacío) y un número meta de viajes por guardia cercano a los 10,7 viajes/guardia obtenidos en el escenario optimizado. Estas metas se incorporan en los formatos de control de guardia y en las instrucciones de trabajo del personal operativo, de modo que las desviaciones respecto a los tiempos estándar permitan identificar rápidamente causas de ineficiencia (esperas innecesarias, mala condición de vía, demoras en la tolva, etc.).

La implementación se propone en tres etapas. En una Fase de validación, se socializa el escenario elegido con supervisores y operadores, verificando que las condiciones reales (estado de galerías, ventilación, disponibilidad de equipos) sean compatibles con la nueva secuencia de trabajo. En la Fase piloto, se aplica la ruta y reglas definidas durante un periodo de prueba (por ejemplo, 2 a 4 semanas), registrando los mismos indicadores usados en la tesis: tiempo de ciclo, viajes por guardia, TM/guardia, TM/h y horas–equipo. Finalmente, en la Fase de evaluación, se

comparan los resultados del piloto con la línea base: si el tiempo de ciclo se aproxima a los 37,1 min/viaje, los viajes/guardia se incrementan y el costo unitario de acarreo se reduce hacia el orden de 13,7 S/ por TM, se justifica la adopción definitiva de la propuesta.

Una vez verificada la mejora, se procede a la estandarización mediante la actualización de los procedimientos operativos del tren de acarreo, la señalización de la ruta oficial y de las zonas de sobrepaso en campo, así como la incorporación de los KPIs de la tesis en el tablero de control mensual del área de operaciones. De esta manera, la simulación desarrollada con SimPy se convierte en una herramienta de soporte a la decisión que permite diseñar, probar y luego implantar en la realidad configuraciones operativas más eficientes, asegurando que la reducción del tiempo de ciclo y del costo por tonelada se mantenga en el largo plazo.

5.2.DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.2.1. DIAGNOSTICAR EL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE ACARREO

Se determinó que el sistema actual en la Zona 23 presenta tiempos de ciclo promedio de **42.5 minutos**, con demoras recurrentes por espera de carguío (**32 %**) y tránsito en rampas (**27 %**). Estos valores evidencian una subutilización de la flota y cuellos de botella operativos críticos. Al contrastar estos resultados con lo expuesto por **Soto, Anani y Córdova (2022)**, se coincide en que el rendimiento en la etapa de desarrollo subterráneo depende directamente de la disponibilidad de equipos y la secuencia de operaciones.

Sin embargo, existe una diferencia numérica respecto a lo hallado por **Vásquez (2024)**, quien reportó ciclos de **24.6 minutos** en su zona de estudio. Esta discrepancia se explica porque en la unidad SOTRAMI las distancias de transporte y las condiciones de las vías generan ciclos más extensos (**42.5 min**), confirmando la teoría de Vásquez sobre la sensibilidad del sistema a la distancia de transporte, pero aplicada a la realidad técnica de la Zona 23. Las mayores demoras

observadas se asociaron a tramos largos y falta de sincronización entre Scooptram y volquete, factores que en este estudio resultaron ser más acentuados que en los antecedentes citados.

Asimismo, las características físico–químicas del macizo rocoso y del material trasladado condicionan el desempeño del sistema de acarreo. El macizo está constituido por roca de alta competencia, de textura compacta y baja alteración, lo que genera fragmentaciones relativamente gruesas luego de la voladura, con presencia de bloques y finos que dificultan el carguío homogéneo. El mineral presenta elevada densidad aparente y una humedad natural moderada, además de una marcada abrasividad; estas condiciones incrementan los esfuerzos sobre los equipos, reducen la velocidad efectiva de transporte y favorecen la ocurrencia de atascos en tolvas y puntos de descarga, traduciéndose en mayores tiempos de espera y, por ende, en un aumento del tiempo de ciclo global de **42.5 minutos** identificado en el sistema de acarreo actual.

5.2.2. APLICAR SIMULACIÓN CON SIMPY PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO

El modelo desarrollado en SimPy incorporó variables de colas, tiempos de carga y tránsito, obteniendo una reducción del tiempo de ciclo de **42.5 min a 37.1 min** (una mejora del **12.7 %**) y un incremento del número de viajes por guardia de **9.3 a 10.7**. Según la teoría de simulación de eventos discretos, un sistema puede optimizarse mediante la gestión eficiente de recursos y la eliminación de tiempos ociosos (Law, 2015). En consonancia con este principio, **Bujaico y Huayanca (2022)** demostraron con el software Arena que la modelación estocástica de carguío y acarreo permite dimensionar flotas con mayor precisión, reduciendo sobrecostos y colas, un fenómeno que se replicó en esta investigación mediante el uso de SimPy para la Zona 23.

De forma similar, **Vásquez (2024)** reportó que la simulación en su caso de estudio permitió definir una configuración óptima para lograr un aumento del 12 % en la producción, partiendo de

ciclos de 24.6 min. Aunque los valores numéricos absolutos de Vásquez difieren de los hallados en SOTRAMI debido a las particularidades operativas de cada yacimiento, el resultado porcentual de mejora obtenido en esta tesis (**12.7 % de reducción de ciclo**) es comparable y valida la efectividad de la herramienta. Esta coincidencia técnica ratifica que la reducción de tiempos improductivos y la coordinación dinámica de unidades generan una mejora operativa robusta. La causa técnica radica en el equilibrio de recursos logrado en el modelo de SimPy, el cual evita tiempos muertos en los puntos de carguío y maximiza la utilización de la flota de acarreo en las rampas de la Zona 23.

5.2.3. ANALIZAR EL IMPACTO EN COSTOS OPERATIVOS

El nuevo escenario simulado para la unidad SOTRAMI evidenció una disminución del costo de acarreo del **15.4 %**, atribuida principalmente a la menor demora promedio por unidad y al incremento del rendimiento horario de la flota en la Zona 23. Según **Pinedo y Grados (2023)**, el análisis predictivo mediante herramientas avanzadas permite identificar rutas críticas y optimizar tiempos de ciclo, generando ahorros significativos; este principio se ratifica en la presente tesis, donde el uso de SimPy permitió una cuantificación precisa del ahorro en el costo operativo.

De forma similar, **Bujaico y Huayanca (2022)** observaron que la reducción de tiempos de espera en el carguío incrementa la productividad mensual y reduce el costo por tonelada transportada. En esta investigación, la convergencia de resultados confirma que la eficiencia temporal lograda (**reducción del ciclo a 37.1 min**) se traduce directamente en una mayor rentabilidad para la empresa. Es importante destacar que el ahorro obtenido del **15.4 %** supera los márgenes conservadores de estudios previos (que suelen rondar el 5.2 %), lo que refuerza la

utilidad del enfoque de Simulación de Eventos Discretos (DES) en la gestión económica minera. La reducción del costo operativo proviene de la drástica disminución de horas improductivas y una mejor asignación de la flota de volquetes, validando financieramente la propuesta de mejora técnica.

5.2.4. PROPONER LA MEJORA DEL SISTEMA DE ACARREO SUBTERRÁNEO MEDIANTE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

El modelo correlacional mostró una relación significativa entre la aplicación del DES y la mejora del rendimiento operativo ($r = 0,82$; $p < 0,05$; $N = 120$), confirmando la hipótesis general de que la simulación optimiza el acarreo subterráneo. Se acepta la H_1: "La aplicación de simulación de eventos discretos con SimPy mejora el sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI". Soto, Anani y Córdova (2022) demostraron que la simulación puede incrementar el avance anual en hasta 1 598 m adicionales cuando se ajusta la estrategia de mantenimiento, lo que concuerda con el aumento del rendimiento observado. La coincidencia técnica se explica porque ambos estudios integran disponibilidad, mantenimiento y secuenciación operativa en el modelo de simulación. Por tanto, la evidencia empírica respalda que la simulación es un instrumento de planificación robusto para reducir ineficiencias, prever cuellos de botella y mejorar la productividad global.

En términos operativos y económicos, la implementación del modelo de simulación de eventos discretos generó una reducción tangible en el tiempo y costo de acarreo. En la línea base, el tiempo promedio de ciclo del sistema se situaba en 42,5 minutos por viaje, asociado a un costo unitario de S/ 16,2 por tonelada transportada. Tras la aplicación del escenario optimizado, el tiempo de ciclo se redujo a 37,1 minutos por viaje y el costo unitario descendió a S/ 13,7 por

tonelada, lo que representa una mejora relativa de aproximadamente 12,7 % en tiempo de ciclo y 15,4 % en costo de acarreo. Estos resultados cuantitativos confirman que la mejora propuesta no solo incrementa la productividad, sino que también fortalece la rentabilidad del sistema de acarreo subterráneo.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que el sistema de acarreo subterráneo de la U.M. SOTRAMI presenta inicialmente tiempos de ciclo prolongados, baja frecuencia de viajes por guardia y subutilización de la flota de transporte, lo que compromete el cumplimiento del plan de producción y eleva los costos operativos. Las demoras internas (reubicaciones, colas en tolvas, tiempos de espera y coordinación en rampa) resultan más incidentes que las demoras externas, evidenciando que las principales limitaciones del acarreo se originan en la gestión interna del proceso y en la configuración actual de la operación.
2. El diagnóstico integral mostró que las características geométricas de frentes y galerías, las distancias y pendientes de los trayectos, así como las propiedades físico–químicas del macizo rocoso y del mineral transportado, condicionan directamente los tiempos de carguío, transporte, descarga y retorno. Se verificó que las mayores demoras se concentran en las etapas de carguío y descarga, donde se forman colas operativas y se generan tiempos muertos significativos, dando lugar a una utilización ineficiente de los equipos y a cuellos de botella que limitan la productividad global del sistema de acarreo subterráneo.
3. La aplicación de un modelo de simulación de eventos discretos desarrollado en SimPy permitió representar con fidelidad la dinámica del acarreo (carguío–transporte–descarga–retorno), incorporando recursos limitados, colas y variabilidad operativa. El modelo validado replicó adecuadamente los indicadores clave de la operación real (viajes por guardia, TM/hora y tiempos de espera) y demostró que la reconfiguración de la flota y de las reglas de despacho posibilita reducir el tiempo de ciclo promedio de 42,5 a 37,1 minutos por viaje, incrementando el número de viajes por guardia y la productividad horaria, y mostrando a la simulación como

una herramienta eficaz para anticipar cuellos de botella y seleccionar configuraciones más eficientes antes de su ejecución en campo.

4. Los escenarios de mejora simulados evidenciaron que la propuesta de optimización del acarreo permite reducir el costo unitario de transporte de S/ 16,2 a S/ 13,7 por tonelada, lo que representa una disminución aproximada del 15,4 %, asociada al aumento de la productividad (TM/h) y a la reducción de tiempos ociosos de los equipos. Estos resultados confirman que la simulación de eventos discretos constituye un instrumento estratégico para incrementar la rentabilidad del sistema de acarreo subterráneo, facilitar la planificación operativa y ofrecer una base técnica robusta para la toma de decisiones en otras operaciones mineras con condiciones similares.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda ejecutar un plan piloto de optimización de flota en la U.M. SOTRAMI, aplicando las configuraciones validadas en simulación. El piloto debe incluir el rediseño de las reglas de despacho, priorización de colas en tolvas y asignación de equipos de carguío–transporte, asegurando una medición continua de KPIs (viajes por guardia, TM/hora, tiempo de ciclo).
2. Dado que las demoras internas representan la mayor parte de la ineficiencia, se recomienda implementar procedimientos estandarizados (PETS) para carga, transporte y descarga, reforzar la capacitación de operadores en maniobras críticas y mejorar la señalización y circulación en zonas angostas o de cruce.
3. Fortalecer los programas de mantenimiento basado en condición y horas de servicio de los equipos de acarreo, utilizando indicadores como disponibilidad mecánica y tiempos de falla. La reducción de indisponibilidades mecánicas impactará directamente en la estabilidad del ciclo y en la productividad global.
4. Se recomienda incorporar sistemas de monitoreo en tiempo real para registrar tiempos de ciclo, demoras y utilización de equipos, con dashboards que permitan tomar decisiones rápidas. Complementar este sistema con modelos de simulación periódicos asegurará que los cambios en la operación se evalúen antes de su aplicación real.

BIBLIOGRAFÍA

Bedon, M., & Omar, C. (2005). *Aplicación de la simulación para la simulación del acarreo de mineral*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Bujaico Morante, J. A., & Huayanca, L. (2022). *Aplicación de simulación discreta en la estimación del número de camiones en una mina de cobre a tajo abierto* [Tesis de Ingeniería de Minas, Pontificia Universidad Católica del Perú].

Castillo, O. (2022). *Desarrollo de modelos predictivos de regresión en la industria minera mediante el uso de algoritmo de machine learning* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/18458

McKinney, W. (2017). *Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and IPython* (2ª ed.). O'Reilly Media.

Meza, J. E. (2011). *Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto*.

Mutmansky, J. M., & Ramani, R. V. (2011). *Mine Ventilation and Air Conditioning* (3ª ed.). Wiley.

Pinedo, M., & Grados, A. (2023). *Modelo predictivo de planificación operativa bajo el enfoque de machine learning para gestionar los tiempos de ciclo del volquete en una mina subterránea* [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].

Python Software Foundation. (2023). *Python Standard Library Documentation*. https://docs.python.org/3/library/

Soto, I., Anani, A., & Córdova, E. (2022). A discrete event simulation approach for mine development planning at Codelco's New Mine Level. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 122*(10), 549–560. https://doi.org/10.17159/de11-

9717/2045/2022

Vásquez, A. R. (2024). *Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023* [Tesis de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].

Xu, L., Ye, S., Lu, G., & Zhang, Z. (2011). Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System. En S. Lin & X. Huang (Eds.), *Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling* (pp. 116–121). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21802-6_19

ANEXOS

ANEXO 1

6.1.DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD MINERA SOTRAMI

La Unidad Minera Sotrami, ubicada en Ayacucho, Perú, se especializa en la explotación de filones auríferos, predominantemente en vetas angostas. Estas vetas presentan anchos que varían entre 0.20 y 0.80 metros, lo que demanda una metodología de explotación selectiva para maximizar la recuperación y minimizar la dilución. Esta mina de mediana minería aurífera tiene como principal objetivo la sostenibilidad, logrando operar de manera responsable con su entorno social y ambiental, aplicando técnicas de producción limpia y promoviendo una minería rentable a largo plazo.

6.2.MÉTODO DE EXPLOTACIÓN: CORTE Y RELLENO ASCENDENTE

Para la explotación de estas vetas angostas, Sotrami emplea el método de corte y relleno ascendente, que es ideal para las características geológicas del yacimiento. Este método se realiza en franjas horizontales, comenzando desde la parte inferior y avanzando verticalmente. Una vez que se extrae el mineral de una franja, el espacio vacío se rellena con materiales estériles, proporcionando estabilidad a la mina y permitiendo el avance seguro hacia niveles superiores. En Sotrami, los tajos se desarrollan cada 50 metros de longitud, y para delimitar el tajo se realiza una chimenea con secciones de 2.4 x 1.2 m o 1.5 x 1.5 m, avanzando 20 metros hacia arriba antes de comenzar la operación del tajo.

6.2.1 DISEÑO DEL MÉTODO DE CORTE Y RELLENO ASCENDENTE

El diseño del método de corte y relleno ascendente aplicado en SOTRAMI considera la explotación de vetas angostas, con potencias típicas entre 0,60 y 1,50 m, buzamientos mayores a 65° y continuidad longitudinal suficiente para desarrollar tajos de hasta 50 m de longitud. El acceso

al tajo se realiza mediante una chimenea de servicio con sección rectangular de 2,4 × 1,2 m o cuadrada de 1,5 × 1,5 m, la cual se adelanta aproximadamente 20 m por encima del nivel de trabajo antes de iniciar la extracción; esta chimenea cumple funciones de acceso de personal, ventilación, paso de servicios (aire, agua, energía) y, en algunos casos, canal de relleno.

Cada tajo se divide en cortes horizontales sucesivos de 2,5 a 3,0 m de altura, medidos en la vertical, de manera que la pared mineralizada quede completamente expuesta para el desarrollo del ciclo de perforación, voladura, limpieza y relleno. En el nivel inferior se construye una galería de base, ubicada generalmente en la caja piso, desde la cual se habilitan cunetas y chutes para el carguío y el control del mineral. El mineral volado se evacúa mediante equipos de bajo perfil (scrapers, winches o equipos LHD, según la sección disponible) hacia las labores de acarreo principales.

El relleno se coloca inmediatamente después de la limpieza de cada corte, utilizando material estéril granulométricamente controlado y, cuando las condiciones de estabilidad lo requieren, relleno cementado con dosificaciones ajustadas al esfuerzo esperado sobre el macizo. El relleno se compacta por capas para garantizar su capacidad portante y permitir que el siguiente corte se realice apoyado sobre una base firme. Este esquema de explotación–relleno secuencial limita la exposición de los hastiales, reduce el riesgo de caídas de roca y controla las deformaciones del macizo rocoso.

La secuencia de trabajo progresa desde la parte inferior del tajo hacia arriba, manteniendo siempre un frente activo y otro en etapa de relleno, de modo que se optimice el uso de equipos y personal. Se dejan pilares temporales y/o de corona donde la continuidad de la veta o las condiciones geomecánicas así lo exigen, con el fin de preservar la estabilidad global del bloque. El diseño integral del método permite compatibilizar la seguridad del personal con una

recuperación alta del mineral útil, asegurando al mismo tiempo una buena condición del macizo rocoso para el desarrollo de futuros niveles superiores.

6.3.CLASIFICACIÓN DEL CICLO DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

El ciclo de perforación y voladura en Sotrami sigue procedimientos estrictos, con el uso de explosivos como Emulnor, en presentaciones de 500 1x7", 1000 1x12", 3000 1x12" y 5000 1x12", seleccionados según el tipo de roca y el tipo de operación. Para los tajos, se emplean los de 500 1x7" y 1000 1x12", mientras que, en frentes de avance, el uso del explosivo dependerá de la dureza de la roca, que en Sotrami se clasifica desde tipo IIIB hasta IV para los tajos, y desde IIIB hasta IIA para labores de preparación y desarrollo.

6.4.MAQUINARIAS Y TRANSPORTE

El transporte del material extraído se realiza con carros U-35, mientras que las galerías de acceso tienen una sección típica de 2.1 a 2.2 metros. Asimismo, el buzón camino se implementa a partir de los 25 metros desde la chimenea para facilitar el flujo de material y reducir los tiempos de transporte dentro de la mina.

Este método de explotación ha permitido a Sotrami una operación eficiente y sostenible, contribuyendo a la rentabilidad de la mina sin comprometer la seguridad y el entorno ambiental.

6.5.UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

La unidad minera Sotrami se encuentra a una altitud de 2400msnm, ubicada políticamente en la región de Ayacucho, provincia de Lucanas, distrito de Sancos y Centro Poblado de Santa Filomena.

La ubicación geográfica del proyecto, comprende dos concesiones mineras: concesión Santa Filomena, la cual cubre una extensión de 1000.00 hectáreas y concesión Victoria 100 con una extensión de 374.47 hectáreas

Tabla 1
Coordenadas de la Operación

CONCESIÓN SANTA FILOMENA		
VÉRTICES	ESTE (Longitud)	NORTE (Latitud)
1	576000	8303000
2	579000	8303000
3	579000	8304000
4	581000	8304000
5	581000	8301000
6	578000	8301000
7	578000	8302000
8	576000	8302000

Fuente: Página Web de Minera Sotrami

6.6.ACCESIBILIDAD

Para acceder a la unidad Santa Filomena a partir de la ciudad de lima es un total de 9 horas y media en bus, las principales vías de acceso se detallan a continuación.

Tabla 2
Accesos a la unidad

TRAMO	DISTANCIA	TIPO DE VIA	TIEMPO
Lima - Yauca	680Km	Asfaltada	8 horas
Yauca - Jaquí	25Km	Asfaltada	0.3 horas
Jaquí - Laytaruma	12Km	Afirmada	0.2 horas
Laytaruma - Filomena	13Km	Afirmada	1 hora
TOTAL	**730Km**		**9.5 horas**

Fuente: Página Web de Minera Sotrami

6.6.1. CLIMA Y METEOROLOGÍA

El clima de Sancos es un clima estepa local. A lo largo del año se presentan pocas precipitaciones. Este clima es considerado BSk según la clasificación climática de Köppen (BS). La temperatura promedio en Sancos es 12.7 °C. Entre 32 los meses más secos y más húmedos, la diferencia en las precipitaciones es 96 mm. Las temperaturas medias varían durante el año en un

3.9°C. El clima en la concesión minera de “Santa Filomena se caracteriza por ser árido a templado, con temperaturas medias anuales que fluctúan entre 16ºC y 28ºC; la zona es carente de lluvias por lo que se tiene una precipitación media anual de 2.1mm. Presentando los siguientes comportamientos durante el año: de diciembre a marzo, época en donde garúa con poca precipitación con temperaturas que fluctúan entre 17 °C y 25 °C, de abril a julio, días con ligera sensación de frio que llegan a temperaturas entre 15 °C y 22 °C (SENAMHI, 2021).

6.7.RECURSOS

6.7.1. FLORA Y FAUNA.

El distrito presenta gran diversidad ecológica, en este lugar la vegetación natural está dada por el “ichu”, entre otras especies como la retama, el aliso, el mutuy, la tara, la cantuta, la cabuya, sauco, molle, eucalipto, pino y ciprés, así como varios tipos de cactáceas como la tuna, el sanqui, la jacana, el huyo.

6.8.GEOLOGÍA

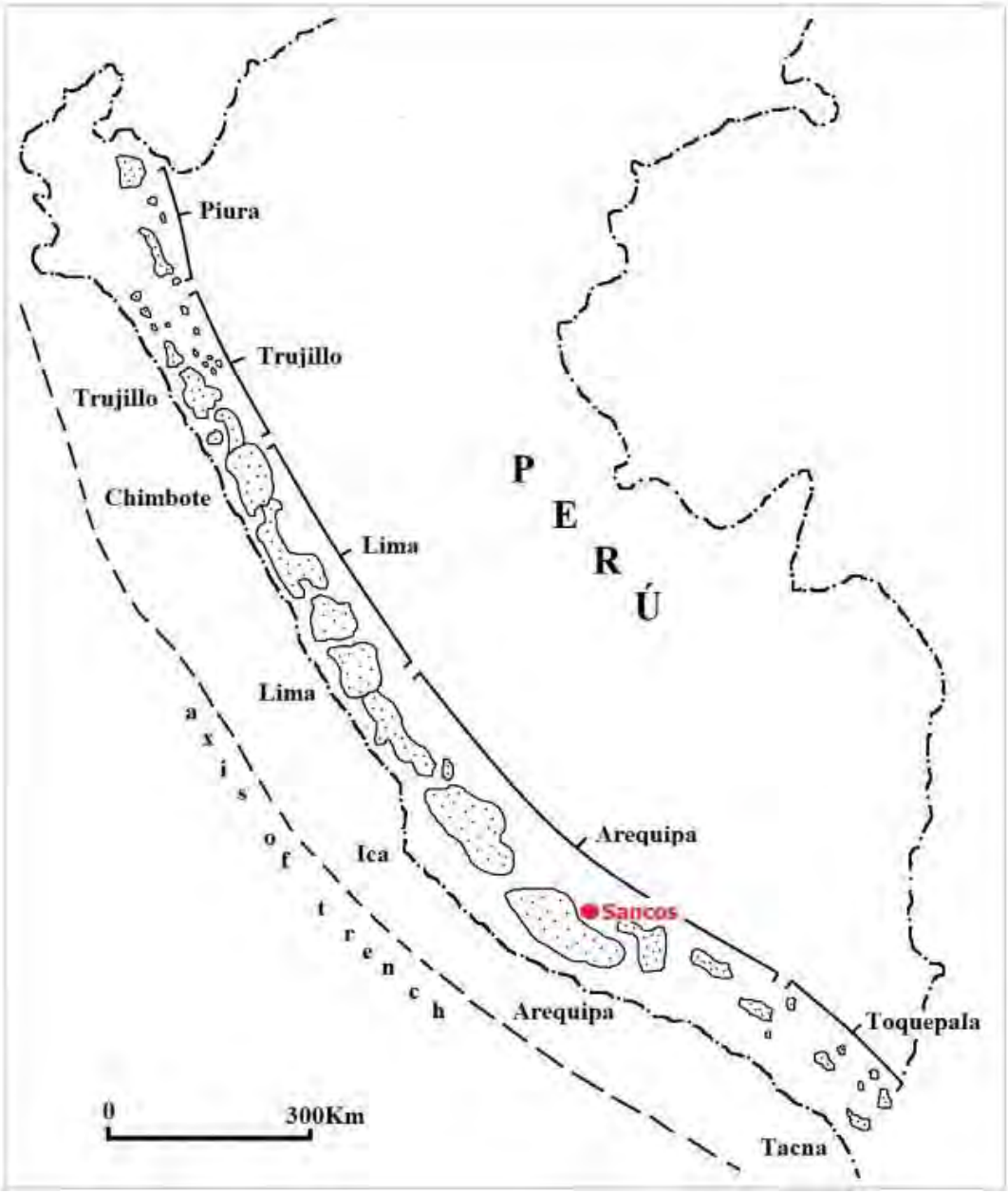
6.8.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El batolito de la costa está constituido por cientos de plutones individuales, agrupados en un número limitado de súper-unidades (pitcher, 1974). Geográficamente está dividido a lo largo del eje del batolito en 5 grandes segmentos, caracterizado cada súper-unidad por un ensamble litológico particular (Cobbing et al.,1977); el segmento de mayor longitud es el de Arequipa con 900 km. de largo, el orden de emplazamiento de los plutones en el segmento de Arequipa está dada de la siguiente manera: (1) gabros tempranos y dioritas, (2) súper-unidad Linga (Stewart, 1968), (3) súper-unidad Pampahuasi el nombre corresponde a una localidad al este de Ica, (4) súper-unidad Incahuasi, localidad al norte de pisco, (5) súper-unidad Tiabaya (Jenks, 1948; Jenks y

Harris, 1953). Todas estas ocurrencias intrusivas están enmarcadas dentro de un conjunto de súper unidades que describiremos a continuación.

Figura 1

BATOLITO DE LA COSTA



Fuente: Departamento de Geologia de Minera Sotrami

6.8.2. SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA

6.8.2.1. **COMPLEJO BELLA UNIÓN**

La litología es muy variada dentro del complejo Bella Unión, se caracterizada por ser una brecha de intrusión de naturaleza andesítica o dacítica, en bloques angulosos y subangulosos, también se observan otros cuerpos de composición básica, como diabasa porfirítica gris verdosas, este complejo está cortado por diques de andesita porfirítica. Se extiende a lo largo de faja de dirección E-O a NO-SE, limitado por grandes lineamientos estructurales que posiblemente controlen su emplazamiento.

6.8.2.2. **DACITA MOLLES**

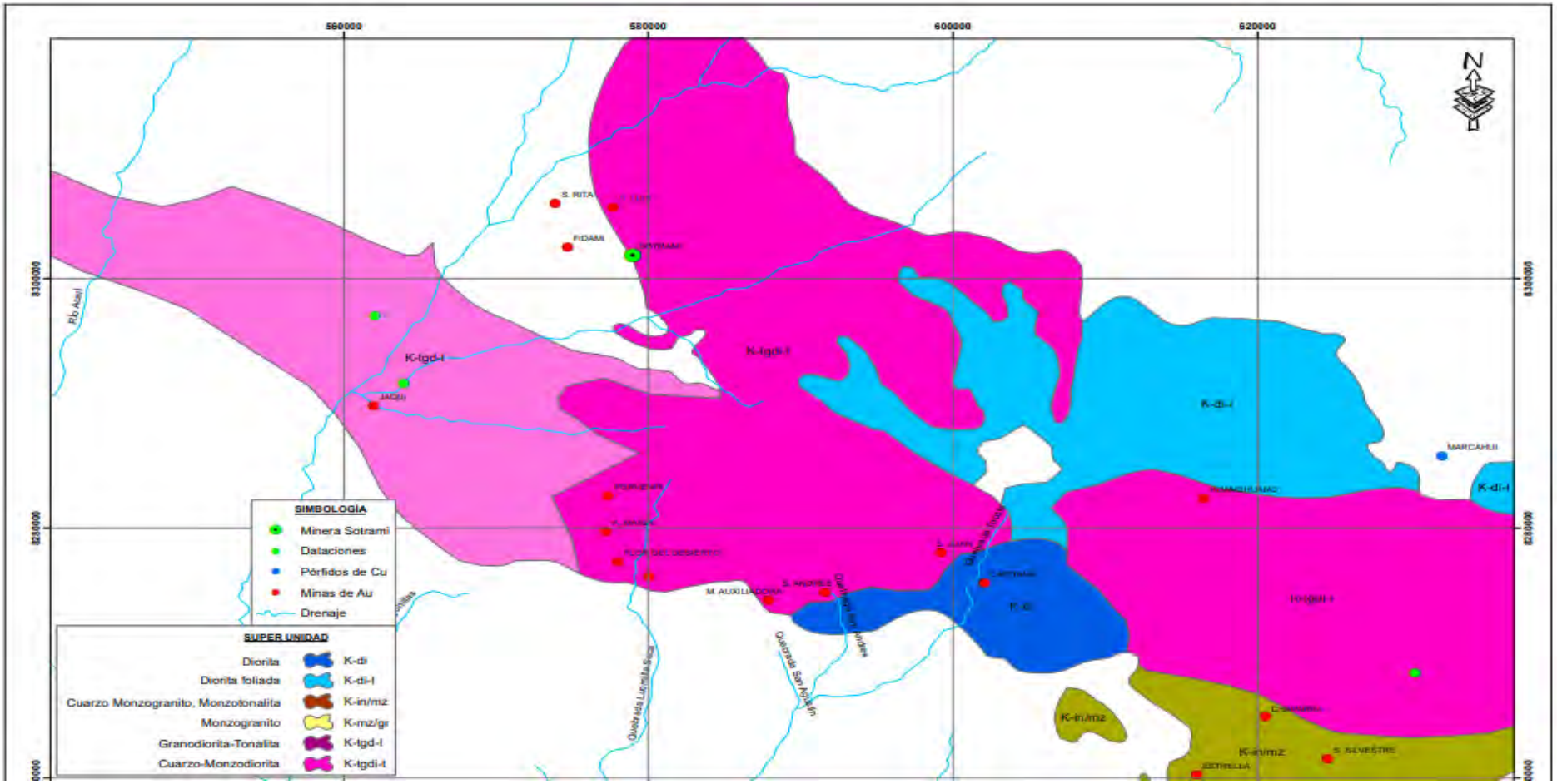
Se conoce con este nombre a una dacita hipabisales que aflora en el sector norte del cuadrángulo de Jaqui, a lo largo de una falla longitudinal NO (Andino). Estos afloramientos presentan una textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasas y granos grandes de cuarzo en una matriz afanítica grisácea, la edad de emplazamiento entre 102 MA, hasta 80 MA .

6.8.2.3. **GABROS**

Los gabros pertenecen a la Súper-unidad Patap y tienen una edad de emplazamiento de 107 Ma (Cobbing E. et al., 1977). Los segmentos de Arequipa y Lima son litológicamente bastante similares, caracterizados por gabros horbléndicos melanócratas con variaciones a otras 9 rocas de carácter básico como leucogabros y dioritas horbléndicas. Este tipo de rocas son observadas en afloramiento en áreas muy limitadas. Los contactos entre rocas similares se dan gradaciones, por zonas de brecha miento por dioritas tardías, parches irregulares de pegmatitas horbléndicas en zonas de contacto.

Figura 2

Secuencia Estratigráfica



Fuente: Departamento de Geología Minera Sotrami

6.8.3. GEOLOGÍA LOCAL

6.8.3.1. **ESTRATIGRAFÍA LOCAL**

En minera Sotrami y alrededores afloran diferentes tipos de roca intrusiva las cuales son parte del batolito de la costa.

6.8.3.1.1. ***COMPLEJO SANTA ROSA***

Al Oeste de la mina, aflora el Complejo Santa Rita, con distribución NO-SE y está constituido por rocas metamórficas de contacto desarrollado por la intrusión de las súper unidades Linga y Tiabaya, son de coloración gris oscuro algo esquistosa de aspecto lustroso, están constituidas principalmente de dioritas piroxénicas - cuarcíferas y andesitas; estas rocas presentan mineralización sobre todo cerca al contacto con las dioritas y granodioritas de la súper unidad Tiabaya, las vetas de la mina Santa Rita se emplazaron en este tipo de litología.

6.8.3.1.2. ***SUPER UNIDAD TIABAYA***

En su mayoría los afloramientos rocosos corresponden a dioritas y granodioritas de la súper unidad Tiabaya, estas rocas presentan una textura de grano medio a fino y como componentes se distinguen: feldespatos, biotita de gran tamaño y hornblenda. Por el contenido de biotita se puede decir que es una diorita biotítica, en este tipo de roca se emplaza el mayor número de estructuras mineralizadas que actualmente se encuentran en producción (veta Filomena, veta Santa Rosa y ramales); Asimismo, existen afloramientos de tonalitas-granodioritas en el lado norte de la concesión al igual que las dioritas y granodioritas de la súper-unidad Tiabaya conforman el grupo de rocas encajonantes favorables para el emplazamiento de vetas hidrotermales de oro y plata, entre ellas veta Bonita, veta Española, veta Lady, veta Raúl, veta Silvana, veta Torrez, veta Santa Ana, veta Filomena y Santa Rosa, estas dos últimas estructuras son las más importantes, las cuales se encuentran en etapa de exploración y producción, guardan cierto paralelismo y sus

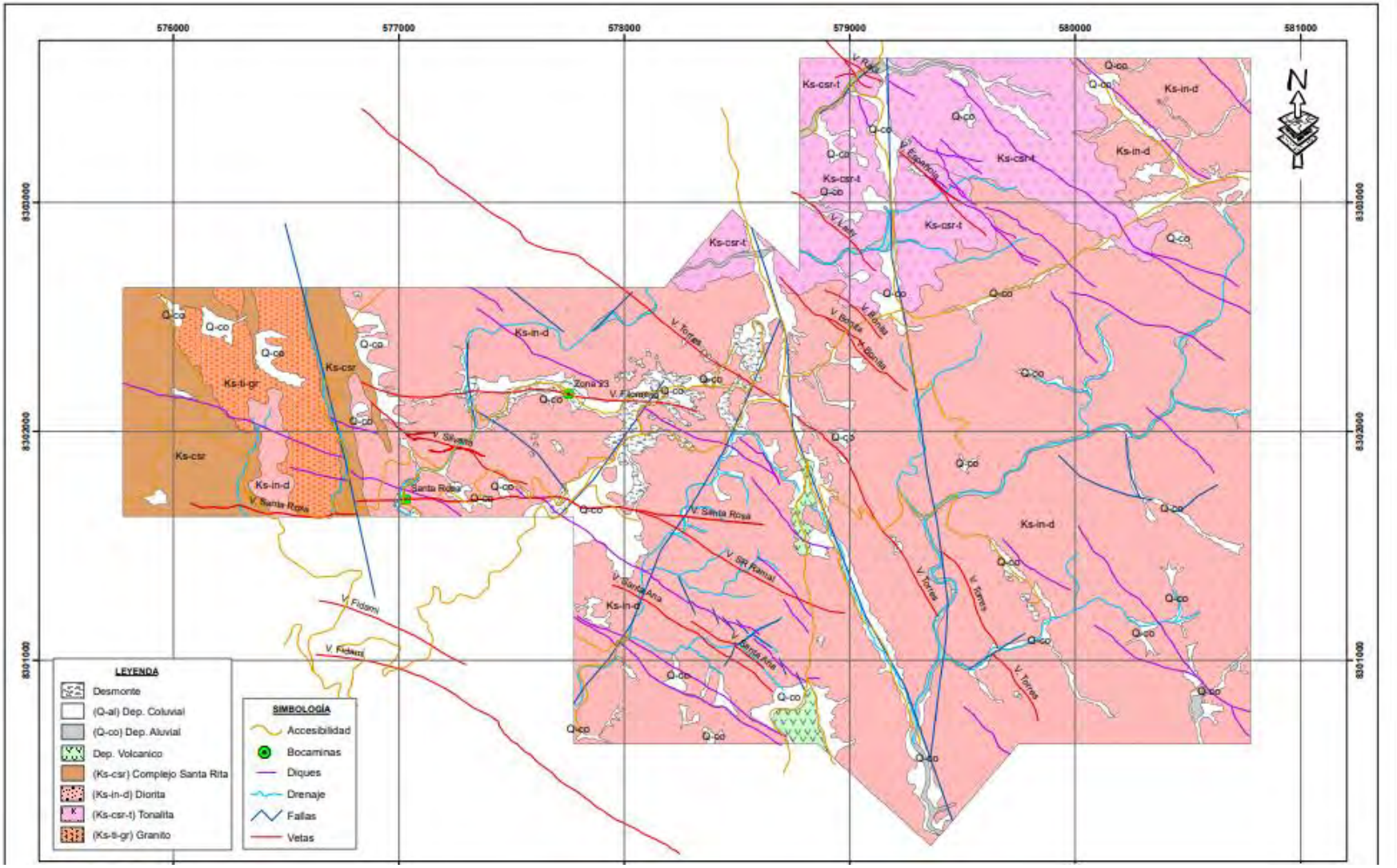
afloramientos en superficie se encuentran separados por una distancia aproximada de 450.00 metros. Existen otras vetas de rumbo andino algunas de estas son ramales propios de veta Santa Rosa y veta Filomena, y otras estructuras mineralizadas de considerable valor económico

6.8.3.1.3. ***DIQUES***

Cortando las dioritas y granodioritas se evidencia una serie de diques de composición andesítica, textura afanítica a fanerítica y coloración gris verdosa, cuyos afloramientos presentan de 4 a 8 metros de espesor con dirección promedio de N 305° a N 310° y un buzamiento promedio de entre 60° a 70°, como diques principales tenemos: a dique Santa Ana, dique Santa Rosa y dique Filomena.

Figura 3

Estratigrafía Local



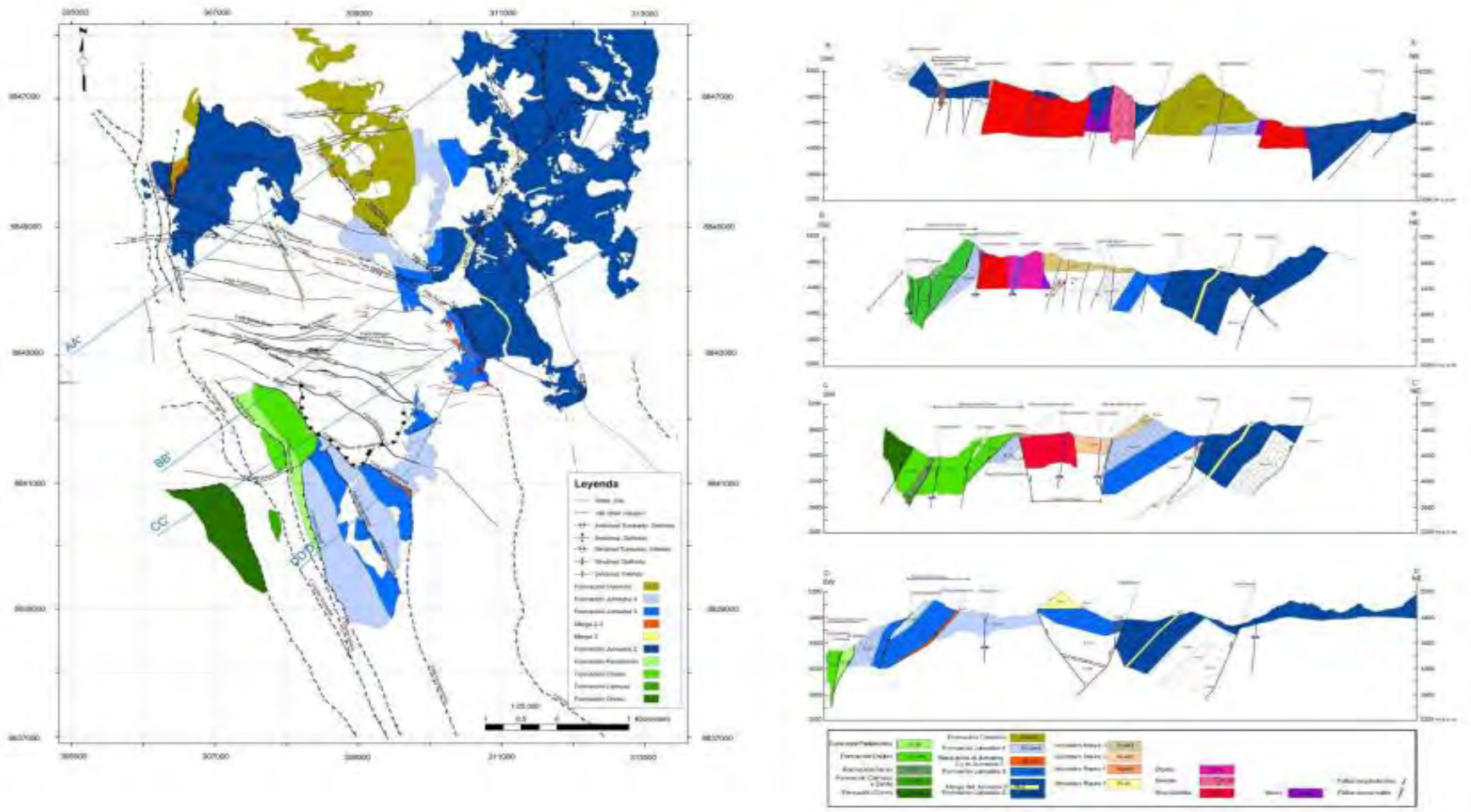
Fuente: Departamento de Geología Minera Sotrami

6.8.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las estructuras de la región están relacionadas principalmente con los movimientos tectónicos del ciclo andino y las principales zonas estructurales se han diferenciado según la magnitud y el estilo de deformación que han sufrido las rocas debido a su distinta naturaleza y a la variada intensidad de los esfuerzos que han actuado, generando pliegues, fallas y diaclasas. En base a lo mencionado, la región se ha dividido de oeste a este en varias zonas con características estructurales propias, así tenemos: Zona de fallamiento en bloques, zona de emplazamiento del batolito, zona plegada, y zona poco deformada. (Boletín N° 34 serie A - Ingemmet). La unidad minera Santa Filomena se encuentra dentro de una zona de fallamiento en bloques, entre dos fallas de rumbo y de alcance regional, la falla Gliden al éste y la falla Santa Rita al oeste generando un bloque, entre estas fallas se ubican las vetas que conforman la mina Santa Filomena. La falla Gliden según los sondajes diamantinos realizados presenta anchos de hasta 8.0m, también se han observado diversos sistemas de fallas de orden local y están caracterizadas por fallas de rumbo N10°-30°W y buzamientos de 60°-75°NE, con anchos variables de hasta 1.0 m, a este grupo de fallas se les denomina fallas de primer orden. Existe otro grupo de fallas clasificadas de segundo orden, falla Enriqueta, Filomena, Ecuador y otras de rumbo N30°-60°E, que fueron desplazados por reactivaciones de las fallas de primer orden, cuyos saltos se observan en campo desde 2 hasta 10 m y son de naturaleza sinestral y dextral. Las vetas se manifiestan en estructuras bien definidas, sus afloramientos son de considerable longitud, llegando a manifestarse hasta en tramos de 1.50 km de forma continua; Las vetas son relleno de fallas y presentas reactivaciones, las mismas están controlados por dos (2) sistemas estructurales principales.

Figura 4

Geología Estructural



Fuente: Departamento de Geología Minera Sotrami

6.8.5. GEOLOGÍA ECONÓMICA Y MINERALIZACIÓN

Las vetas auríferas ubicadas en la zona están clasificadas genéticamente como vetas hidrotermales de cuarzo-oro, siendo el cuarzo el mineral principal, seguido por pirita, arsenopirita y oro nativo.

6.8.5.1. MINERALIZACIÓN EN VETAS

Las vetas muestran comúnmente zonas bandeadas crustificadas, con brechamientos puntuales con limitadas aureolas de alteración argílica, silicificación y propilitación de roca caja. Las vetas contienen principalmente relleno de cuarzo hialino y en algunos casos porosos, es notoria la presencia de sílice tipo vuggy con óxidos de hierro (boxwork). Se tiene presencia de sulfuros en superficie que mayormente se encuentran lixiviados; los principales minerales observados son: pirita, calcopirita de forma puntual, bornita, covelita, cuarzo en tres generaciones (blanco, hialino y gris).

6.8.5.2. FRANJA AURIFERA NASCA - OCOÑA

La franja Nasca–Ocoña con mineralización oro-cobre-hierro, comprende el segmento Arequipa del batolito de la costa (Pitcher et al. 1985), se localiza en la costa sur media del Perú. Por la presencia de nuevos prospectos auríferos, dicha franja se extiende por el Norte hasta Ica y por el Sur hasta La Joya (Arequipa). Esta franja se ha explotado intermitentemente desde el siglo XVII, habiéndose ubicado a la fecha más de un centenar de depósitos de oro, cuyas características son principalmente del tipo filoniano y de origen hidrotermal. Las ocurrencias son minadas por oro-plata- cobre.

ANEXO 2

CICLO DE EXTRACCIÓN DE MINERAL Y DESMONTE

El proceso de extracción en minería subterránea sigue una secuencia sistemática para garantizar eficiencia y seguridad:

- **Perforación y Voladura:** Se realizan perforaciones en el frente de trabajo donde se colocan explosivos para fragmentar la roca.
- **Carguío:** El material fragmentado (mineral o desmonte) se carga utilizando equipos como palas neumáticas o cargadores frontales.
- **Transporte (Acarreo):** El material cargado se transporta desde el frente de trabajo hasta puntos de descarga o áreas de almacenamiento. Este transporte se efectúa mediante locomotoras que arrastran carros mineros sobre rieles.
- **Izaje:** En niveles inferiores, el material se eleva a la superficie o a niveles superiores utilizando sistemas de izaje, como winches y piques.
- **Descarga y Procesamiento:** El mineral se descarga en tolvas para su procesamiento posterior, mientras que el desmonte se deposita en áreas designadas.

EQUIPOS UTILIZADOS Y SUS CAPACIDADES

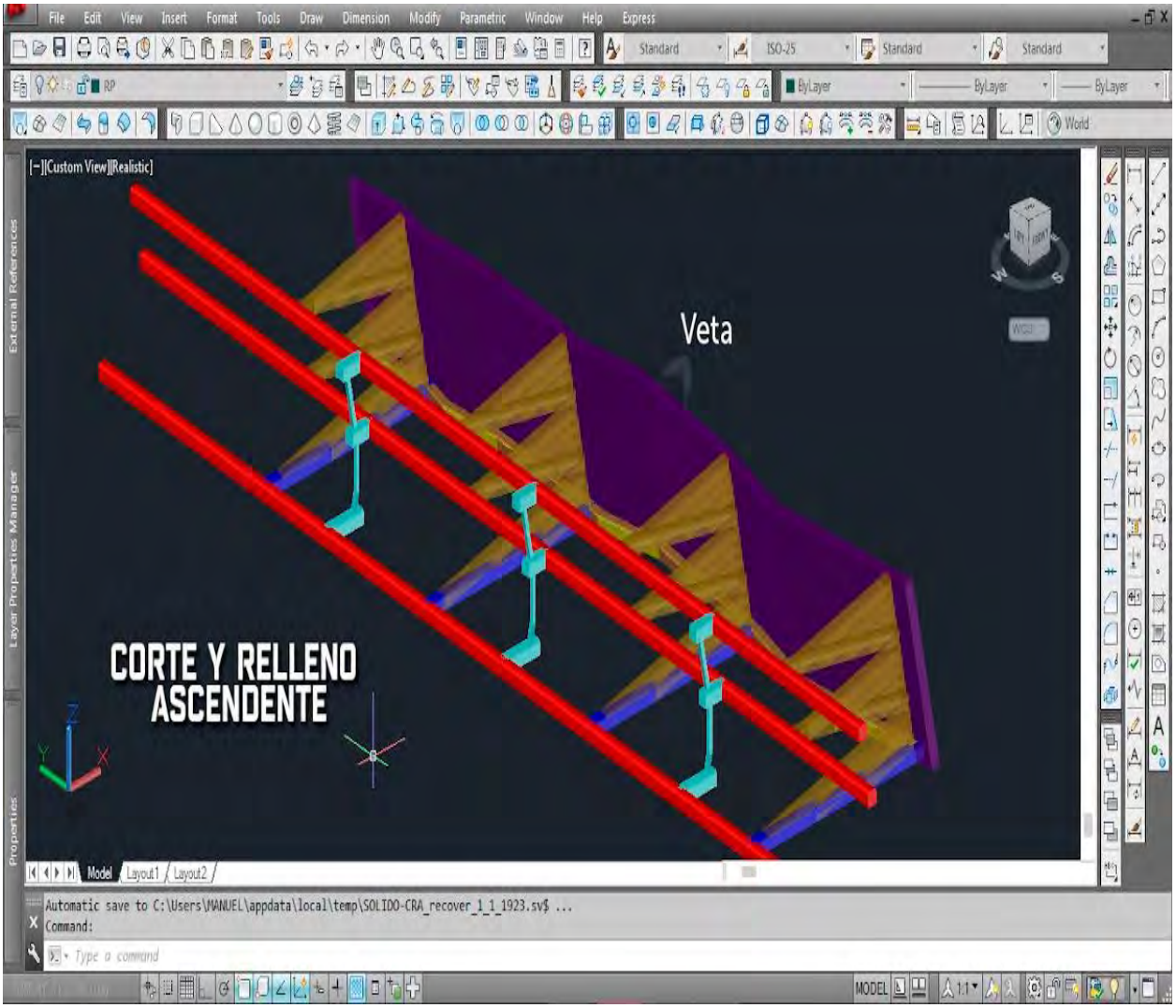
A continuación, se presenta un cuadro con los tipos de locomotoras y winches comúnmente empleados en minería subterránea, junto con sus capacidades:

Equipo	Tipo	Capacidad
Locomotora	Eléctrica de batería	Capacidad de arrastre de hasta 20 toneladas; velocidad máxima de 20 km/h.
Locomotora	Diésel	Capacidad de arrastre de hasta 50 toneladas; velocidad máxima de 25 km/h.
Winche de Izaje	Eléctrico	Capacidad de carga de 5 a 20 toneladas; velocidad de izaje de 0.5 a 2 m/s.
Winche de Izaje	Hidráulico	Capacidad de carga de 10 a 30 toneladas; velocidad de izaje de 1 a 3 m/s.

MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

En la Unidad Minera SOTRAMI, la explotación de la veta Filomena se realiza mediante el método de corte y relleno ascendente. Este método es especialmente adecuado para yacimientos de vetas angostas y de alta inclinación, como es el caso de Filomena. Consiste en extraer el mineral en cortes horizontales ascendentes, rellenando cada corte con material estéril o desmonte para proporcionar soporte al macizo rocoso y permitir la extracción segura del siguiente corte superior.

Este enfoque permite una recuperación eficiente del mineral y minimiza la dilución, asegurando la estabilidad estructural de la mina y reduciendo riesgos operativos.



- Color rojo: Representa las galerías o labores principales de transporte del sistema minero. Estas corresponden a los niveles de acarreo desde los cuales se realiza el tránsito de mineral y personal, así como el acceso a los frentes de explotación. En el contexto del método de corte y relleno ascendente, estas galerías sirven como infraestructura permanente para la operación y el acceso a los tajos.
- Color celeste (azul claro): Corresponde a los puntos de acceso vertical u obras auxiliares, tales como chimeneas, piques cortos o raises que conectan los distintos niveles de explotación. Estas estructuras permiten el acceso entre niveles, la ventilación y, en algunos casos, el movimiento de mineral o relleno entre cortes sucesivos.
- Color amarillo: Identifica el mineral explotado, es decir, el material económicamente útil que se extrae siguiendo la geometría de la veta. En el esquema, este color señala las zonas de corte donde se realiza la perforación, voladura y extracción del mineral en cada etapa ascendente.
- Color morado (o púrpura): Representa el relleno colocado en los espacios ya explotados. Este relleno cumple una función fundamental en el método de corte y relleno ascendente, ya que proporciona estabilidad geomecánica, sirve como piso de trabajo para el corte superior y contribuye al control de la dilución y la seguridad de la labor.
- Línea o bloque denominado “Veta”: Indica la estructura mineralizada que se explota. La orientación inclinada muestra la geometría real de la veta y justifica la aplicación del método de corte y relleno ascendente, el cual es especialmente adecuado para vetas angostas, inclinadas y de buzamiento pronunciado.

Este gráfico muestra las etapas del proceso, desde la extracción del mineral hasta el relleno de los espacios vacíos, destacando la secuencia ascendente de los cortes y la importancia del relleno para mantener la integridad de la estructura minera.

La implementación de este método en SOTRAMI ha permitido una explotación racional y sostenible del yacimiento, con reservas minerales probadas y probables que garantizan una operación continua por al menos 10 años, generando una significativa rentabilidad económica y financiera.

ANEXO 3

Base de datos recopilada de Izaje

ID BD R.I.	ID REG R.I.	AÑO	MES	DIAS/MES	SEMANA	FECHA	TURNO	GUARDIA	ZONA	WINCHE	NV. DEL WINCHE	OPERADOR	AYUDANTE 1	AYUDANTE 2	EMPRESA	JEFE DE GUARDI	CAPATAZ	H. INICIAL	H. FINAL	HORAS EJECUTADAS	HORA INICIAL	HORA FINAL	CODIGO	N° SKIP	EMPRESA USUARIA	NV ORIGEN
a41f9f08	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	18:00:00	18:30:00	200			
a6c1dcbf	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	18:30:00	19:00:00	205			
2e8222f5	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	19:00:00	20:00:00	109	1	ZONA 23	0
e74340cd	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	20:00:00	01:00:00	106	34	ZONA 23	7
a0fa7230	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	01:00:00	02:00:00	203			
5abe03a3	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	02:00:00	04:00:00	106	13	ZONA 23	7
33d6b074	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	04:00:00	06:00:00	105	19	ZONA 23	7
0a0a0b64	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Superficie	0	JAVIER CURO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	16479.24	16486.12	6.88	06:00:00	06:20:00	204			
31d6e957	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	18:00:00	18:10:00	208			
4777f302	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	18:10:00	18:25:00	209			
740dc857	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	18:25:00	19:45:00	200			
87ec8b7c	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	19:45:00	20:00:00	205			
f2f4a9e1	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	20:00:00	20:15:00	109	1	ZONA 23	0
bcf6bc55	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	20:15:00	20:30:00	199			
ed001889	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	20:30:00	01:00:00	106	28	ZONA 23	14
cd3d1a40	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	01:00:00	02:00:00	203			
bddbdf33	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	02:00:00	05:30:00	106	18	ZONA 23	14
b317c4e0	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	05:30:00	05:45:00	199			
be4923c	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	05:45:00	06:25:00	204			
14d86ab	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	SALVADOR	0	EGOAVIL HUAMAN	E. HUAMAN		SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	6748.8	6757.6	8.8	06:25:00	06:40:00	208			
1b5e9b4a	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	18:00:00	18:30:00	200			
8d6ec233	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	18:30:00	18:45:00	201			
2aec1af8	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	18:45:00	19:00:00	205			
94d0df13	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	19:00:00	19:10:00	202			
44f9f23a	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	19:10:00	19:30:00	209			
c80a4b69	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	19:30:00	21:00:00	3077			
4c6b8108	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	21:00:00	00:00:00	106	25	ZONA 23	7
7c428e0c	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	00:00:00	00:40:00	105	4	ZONA 23	7
8bcdc871	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	00:40:00	01:40:00	203			
393b2319	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	01:40:00	03:00:00	312			
4312a997	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 5 - Superficie	0	RONALD HUAMANI			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	21900.14	21904.43	4.29	03:00:00	05:45:00	105	15	ZONA 23	7
e6689d1c	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	18:00:00	18:30:00	200			
30b7e50a	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	18:30:00	19:00:00	201			
1969bf57	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	19:00:00	19:30:00	202			
423dc8a8	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	19:30:00	20:30:00	206			
e60d73a8	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	20:30:00	21:30:00	106	2	ZONA 23	13
c882c913	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	21:30:00	23:00:00	105	4	ZONA 23	8
d389ed3d	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	23:00:00	23:30:00	206			
6a8eb5df	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	23:30:00	00:00:00	109	2	ZONA 23	12
250fc4b7	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	00:00:00	01:00:00	206			
4560164b	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	01:00:00	02:00:00	203			
7c1dc9e3	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	02:00:00	04:00:00	105	5	ZONA 23	13
774ee820	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 731 - Nv. 5	5	LUCAS PABLO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	999.43	1002.01	2.58	06:00:00	06:30:00	204			
f694724e	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	18:00:00	18:30:00	200			
eda0f75d	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	18:30:00	19:00:00	201			
4ce29b3f	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	19:00:00	19:20:00	208			
64f9f992	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	19:20:00	19:30:00	209			
9ebf9278	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	19:30:00	19:40:00	202			
e163b5fa	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	19:40:00	20:10:00	358			
40f41e7d	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	20:10:00	20:40:00	109	1	ZONA 23	7
17eca489	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	20:40:00	22:00:00	106	10	ZONA 23	15
7f1f5e11	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	22:00:00	23:40:00	106	14	ZONA 23	14
40741440	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	23:40:00	00:00:00	109	2	ZONA 23	12
d9dd8f99	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	00:00:00	00:10:00	109	1	ZONA 23	14
bbca3e70	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	00:10:00	01:00:00	106	8	ZONA 23	14
579f3386	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	01:00:00	02:00:00	203			
baefbf22	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	02:00:00	03:40:00	106	12	ZONA 23	14
67ec2c4f	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	03:40:00	04:30:00	105	8	ZONA 23	14
8b2f95c5	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	04:30:00	04:50:00	109	2	ZONA 23	12
2749db7e	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	04:50:00	05:50:00	105	10	ZONA 23	14
6cabd7bc	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	BASE 4 - Nv. 7	7	ROMARIO APARCO			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	2037.32	2043.54	6.22	05:50:00	06:20:00	204			
8f6b5e5d	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	18:00:00	18:30:00	200			
e7811cc0	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	18:30:00	19:00:00	201			
ec1dd5f4	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	19:00:00	19:30:00	202			
ca7f490e	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	19:40:00	20:30:00	109	2	SECTOR IV	14
20aeca57	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	20:30:00	22:00:00	106	20	ZONA 23	17
40f767f9	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	22:00:00	22:20:00	109	1	ZONA 23	16
16091026	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	C	ZONA 23	PIQUE 1431 - Nv. 14	14	JAVIR RAMOS			SOTRAMI	Luis Allpoc	rnando Montal	17615.01	17620.39	5.38	22:20:00	23:30:00	106	20	ZONA 23	16

Fuente: Departamento de Costos y Productividad Minera Sotrami

Base de datos recopilada de Acarreo

ID BD FL	ID REG FL	AÑO	MES	DIAS/MES	SEMANA	FECHA	TURNO	HORAS CRONOLOGICA	HORAS CRONOLOGICAS DECIMAL	MATERIAL	TIPO DE TRASLADO	M3 CAPACIDAD SKIP	PESO ESPECIFICO	FACTOR DE LLENA	FACTOR DE ESPON	PRILLS	METROS CUBICOS	TONELADAS	METROS CUBICOS ACTIVIDAD	TONELADAS ACTIVIDAD	M3 / HORA	TON / HORAS	ACTIVIDAD	TIPO DE ACTIVIDAD	TRASLADO 1	TRASLADO 2
a41f9f08	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	INGRESO DE PERSONAL		
a6c1dcbf	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CAPACITACION		
2e8222f5	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1	Materiales Vario	Bajada	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Bajada Del Nv. 0 al Nv. 7	Del Nv. 0 al Nv. 7
e74340cd	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	05:00:00	5	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	25.704	59.126	5.1	11.8	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 7 al Nv. 0	Del Nv. 7 al Nv. 0
a0fa7230	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REFRIGERIO		
5abe03a3	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	02:00:00	2	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	9.828	22.607	4.9	11.3	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 7 al Nv. 0	Del Nv. 7 al Nv. 0
33d6b074	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	02:00:00	2	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	11.381	31.844	5.7	15.9	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 7 al Nv. 0	Del Nv. 7 al Nv. 0
0a0a0b64	e36c08af	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:20:00	0.33			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	SALIDA DE PERSONAL		
31d6e957	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:10:00	0.17			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	PERSONAL SE TRASLAD		
4777f302	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REGISTRO DE HERRAMIE		
740dc857	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:20:00	1.33			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	INGRESO DE PERSONAL		
87ec8b7c	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CAPACITACION		
f2f4a9e1	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25	Materiales Vario	Bajada	1.72					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Bajada Del Nv. 0 al Nv. 14	Del Nv. 0 al Nv. 14
bcf6bc55	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	OTROS TRABAJOS EN LA		
ed001889	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	04:30:00	4.5	Desmonte	Subida	1.72	2.3	0.9	0.519713	0.79	1.289	2.965	36.092	83.02	8.0	18.4	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 14 al Nv. 0	Del Nv. 14 al Nv. 0
cd3d1a40	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REFRIGERIO		
bddbdf33	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	03:30:00	3.5	Desmonte	Subida	1.72	2.3	0.9	0.519713	0.79	1.289	2.965	23.202	53.37	6.6	15.2	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 14 al Nv. 0	Del Nv. 14 al Nv. 0
b37c4e0	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	OTROS TRABAJOS EN LA		
bed8223c	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:40:00	0.67			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	SALIDA DE PERSONAL		
14d186ab	cfbedf55	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	PERSONAL SE TRASLAD		
1b5e9b4a	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	INGRESO DE PERSONAL		
8d6ec233	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REPARTO DE GUARDIA		
2aec1af8	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:15:00	0.25			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CAPACITACION		
94d0df13	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:10:00	0.17			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CHEQUEO DE MAQUINA		
44f9f23a	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:20:00	0.33			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REGISTRO DE HERRAMIE		
c80a4b69	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:30:00	1.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CAMBIO DE POLINES		
4c6b8108	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	03:00:00	3	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	18.9	43.475	6.3	14.5	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 7 al Nv. 0	Del Nv. 7 al Nv. 0
7c428e0c	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:40:00	0.67	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	2.396	6.704	3.6	10.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 7 al Nv. 0	Del Nv. 7 al Nv. 0
8bcdc871	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REFRIGERIO		
393b2919	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:20:00	1.33			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	ESPERANDO CARGA		
4312a997	4043b958	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	02:45:00	2.75	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	8.985	25.14	3.3	9.1	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 7 al Nv. 0	Del Nv. 7 al Nv. 0
e6689d1c	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	INGRESO DE PERSONAL		
30b7c50a	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REPARTO DE GUARDIA		
1969bf57	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CHEQUEO DE MAQUINA		
423dc8a8	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	OPERADOR APOYA OTR		
e60d73a8	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	1.512	3.478	1.5	3.5	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 13 al Nv. 5	Del Nv. 13 al Nv. 5
c882c913	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:30:00	1.5	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	2.396	6.704	1.6	4.5	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 8 al Nv. 5	Del Nv. 8 al Nv. 5
d389ed3d	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	OPERADOR APOYA OTR		
6a8eb5df	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5	Materiales Vario	Subida	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Subida Del Nv. 12 al Nv. 8	Del Nv. 12 al Nv. 8
250fc4b7	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	OPERADOR APOYA OTR		
4560164b	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REFRIGERIO		
7c1dc9e3	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	02:00:00	2	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	2.995	8.38	1.5	4.2	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 13 al Nv. 5	Del Nv. 13 al Nv. 5
774ee820	e16e6a90	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	SALIDA DE PERSONAL		
f694724e	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	INGRESO DE PERSONAL		
eda9f75d	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REPARTO DE GUARDIA		
4ce29b35	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:20:00	0.33			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	PERSONAL SE TRASLAD		
64f9f992	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:10:00	0.17			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REGISTRO DE HERRAMIE		
9ebf9278	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:10:00	0.17			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CHEQUEO DE MAQUINA		
e163b5fa	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	OTRAS DEMORAS OPER		
40f41e7d	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5	Materiales Vario	Bajada	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Bajada Del Nv. 7 al Nv. 15	Del Nv. 7 al Nv. 15
17eca489	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:20:00	1.33	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	7.56	17.39	5.7	13.1	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 15 al Nv. 7	Del Nv. 15 al Nv. 7
7f165e11	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:40:00	1.67	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	10.584	24.346	6.3	14.6	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 14 al Nv. 7	Del Nv. 14 al Nv. 7
40741440	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:20:00	0.33	Materiales Vario	Bajada	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Bajada Del Nv. 12 al Nv. 1	Del Nv. 12 al Nv. 15
d9dd8f99	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:10:00	0.17	Materiales Vario	Subida	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Subida Del Nv. 14 al Nv. 1	Del Nv. 14 al Nv. 13
bbca3e70	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:50:00	0.83	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	6.048	13.912	7.3	16.8	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 14 al Nv. 7	Del Nv. 14 al Nv. 7
579f3386	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REFRIGERIO		
baefbf22	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:40:00	1.67	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	9.072	20.868	5.4	12.5	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 14 al Nv. 7	Del Nv. 14 al Nv. 7
67ec2c4f	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:50:00	0.83	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	4.792	13.408	5.8	16.2	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 14 al Nv. 7	Del Nv. 14 al Nv. 7
8b2f95c5	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:20:00	0.33	Materiales Vario	Bajada	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Bajada Del Nv. 12 al Nv. 1	Del Nv. 12 al Nv. 14
2748db7e	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:00:00	1	Mineral	Subida	1.008	2.798114	0.9	0.513594	1	0.599	1.676	5.99	16.76	6.0	16.8	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MINERAL	Subida Del Nv. 14 al Nv. 7	Del Nv. 14 al Nv. 7
6cabd7bc	f2a75c80	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	SALIDA DE PERSONAL		
8f6b5e5d	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	INGRESO DE PERSONAL		
e7811cc0	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	REPARTO DE GUARDIA		
ec1dd5f4	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:30:00	0.5			0					0	0	0	0	0.0	0.0	DEMORA OPERATIVA	CHEQUEO DE MAQUINA		
ca7f490e	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:50:00	0.83	Materiales Vario	Bajada	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Bajada Del Nv. 14 al Nv. 1	Del Nv. 14 al Nv. 17
20aeca57	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	01:30:00	1.5	Desmonte	Subida	1.008	2.3	0.9	0.519713	0.79	0.756	1.739	15.12	34.78	10.1	23.2	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE DESMONTE	Subida Del Nv. 17 al Nv. 1	Del Nv. 17 al Nv. 14
40f767f9	6378cb27	2024	003. Marzo	31	13	29/03/2024	NOCHE	00:20:00	0.33	Materiales Vario	Subida	1.008					0	0	0	0	0.0	0.0	ACTIVIDAD OPERATIV	IZAJE DE MATERIALES V	Subida Del Nv. 16 al Nv. 1	Del Nv. 16 al Nv. 14

Fuente: Departamento de Costos y Productividad Minera Sotrami

Base de datos recopilada de Acarreo

ID BD R.A	ID REG R.A	AÑO	MES	SEMANA	FECHA	TURNO	GUARDIA	ZONA	EMPRESA	MODELO LOCOMOTOR	N° LOCOMOTO	JEFE DE GUARD	CAPATAZ	OPERADOR	AYUDANTE 1	AYUDANTE 2	H. INICIAL	H. FINAL	NIVEL 2	HORA INICIAL	HORA FINAL	CODIGO	N° CARROS U35	TIPO CARGU	ZONA 2	NIVEL	LABOR ORIGE
11a27ac5	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		06:30:00	06:45:00	200					
84919fdf	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		06:45:00	07:00:00	201					
992da7c4	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		07:00:00	08:00:00	302					
5a44bb72	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		08:00:00	09:30:00	199					
2a32b912	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		09:30:00	11:30:00	102	9	Pala		14	GL 1950 E
67a27ccc	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		11:30:00	12:30:00	104					
b4e67e65	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		12:30:00	13:00:00	168					
390ce575	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		13:00:00	14:00:00	203					
7dfb7fe3	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L7 - Niv. 14	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HP	AN		1942	1952		14:00:00	18:30:00	312					
c5c9c405	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		06:30:00	07:30:00	200					
efc9c0d9	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		07:30:00	08:00:00	201					
e6ab13ac	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		08:00:00	08:10:00	202					
0ea61af2	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		08:10:00	08:50:00	104					
de0056d6	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		08:50:00	12:00:00	102	16	Tolva		15	CH 1552
4d9c4220	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		12:00:00	13:00:00	199					
b17614e3	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		13:00:00	14:00:00	203					
b24c21f4	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		14:00:00	14:30:00	101	5	Tolva		15	TJ 1551 E
3966100d	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		14:30:00	16:00:00	206					
4bfa9f25	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		16:00:00	17:00:00	199					
aa2e8be9	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		17:00:00	17:30:00	168					
ed1e5936	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		17:30:00	18:00:00	208					
a7bb57aa	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L5 - Niv. 15	Jhon Alva	Hugo Muñoz	PJ	PO		4775	4778		18:00:00	18:30:00	204					
fd71bd35	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		06:30:00	07:00:00	200					
cbf2d59f	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		07:00:00	08:00:00	202					
4d8560ca	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		08:00:00	09:00:00	102	5	Pala		12	DDH1 2028
ff36d980	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		09:00:00	10:30:00	102	12	Pala		12	CH 1256
f8a996b9	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		10:30:00	11:30:00	101	6	Tolva		12	RC 1254
4a9839ef	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		11:30:00	13:00:00	206					
9b6454f3	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		13:00:00	14:00:00	203					
aaf4cea6	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		14:00:00	16:00:00	102	5	Pala		12	DDH1 2028
9620e1f0	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		16:00:00	17:00:00	206					
93a1a48f	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L8 - Niv. 12	Jhon Alva	Hugo Muñoz	ARAMANDO MAMANI	JOEL JENCHO		26279	263816		17:00:00	18:30:00	202					
d76d7ecc	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L3 - Niv. 13	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HUGO PORTILLO	,EXANDER NOA		59097	59151		06:30:00	14:00:00	312					
348d5bb6	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L3 - Niv. 13	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HUGO PORTILLO	,EXANDER NOA		59097	59151		14:00:00	16:30:00	102	9	Tolva		13	CH 1334
ecf3f374	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L3 - Niv. 13	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HUGO PORTILLO	,EXANDER NOA		59097	59151		16:30:00	17:00:00	168					
f8b7a723	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	CLAYTON	L3 - Niv. 13	Jhon Alva	Hugo Muñoz	HUGO PORTILLO	,EXANDER NOA		59097	59151		17:00:00	18:30:00	204					
e98db94e	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		06:30:00	07:00:00	200					
f9b0339a	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		07:00:00	07:30:00	201					
9d703077	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		07:30:00	08:00:00	208					
d3b973a7	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		08:00:00	08:15:00	202					
d5f2ece1	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		08:15:00	11:00:00	102	23	Tolva		11	CH 1154
35becb23	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		11:00:00	11:10:00	153					
af9b2336	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		11:10:00	11:20:00	208					
c71e0d87	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		11:20:00	12:40:00	206					
40b62a76	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		12:40:00	14:00:00	203					
78dfbfbe	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		14:00:00	15:00:00	104					
7accd90	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		15:00:00	17:30:00	206					
a3b1afba	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		17:30:00	17:45:00	168					
75a20734	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Zona 23	SOTRAMI	GOODMAN	L1 - Niv. 11	Jhon Alva	Hugo Muñoz	J. CRISPIN	E. TAPIA		21380	21490		17:45:00	18:30:00	204					
6001927d	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		06:30:00	06:40:00	208					
2818b395	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		06:40:00	06:45:00	200					
fe3ae58d	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		06:45:00	07:00:00	208					
1c47af08	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		07:00:00	07:15:00	205					
4951932a	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		07:15:00	07:55:00	201					
dab3700b	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		07:55:00	08:05:00	208					
d2fef48	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		08:05:00	08:25:00	202					
d7209f5	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		08:25:00	08:35:00	206					
5db2a16a	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		08:35:00	08:40:00	198					
a3525f88	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		08:40:00	09:30:00	206					
c04414fa	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		09:30:00	10:10:00	102	2	Pulso		8	CH 848
712def08	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		10:10:00	10:15:00	153					
1fb2a1fb	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		10:15:00	10:45:00	168					
3b083dd6	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		10:45:00	10:55:00	208					
c223bb4b	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L6 - Niv. 8	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		46965	47175		10:55:00	18:30:00	206					
abbc0dac	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L4 - Niv. 9	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		37160	37160		06:30:00	10:55:00	207					
a2906563	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L4 - Niv. 9	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		37160	37160		10:55:00	11:00:00	202					
aff12f8a	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L4 - Niv. 9	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		37160	37160		11:00:00	11:20:00	207					
72bc4b56	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	Dia	B	Santa Rosa	SOTRAMI	CLAYTON	L4 - Niv. 9	lelson Palomin	Nerzon Perales	F. CADENA	J. GARCIA		37160	37160		11:20:00	12:45:00	206					

Fuente: Departamento de Costos y Productividad Minera Sotrami

Base de datos recopilada de Acarreo

ID BD R A	ID REG R A	AÑO	MES	SEMANA	FECHA	HORAS CRONOLOGICA	HORAS CRONOLOGICAS DECIMALES	MATERIAL	M3 CAPACIDAD CARROS	PESO ESPECIFIC	FACTOR DE LLENAD	FACTOR DE ESPON	METROS CUBICO	TONELADAS	TONELADAS ACTIVIDAD	M3 / HORAS	TON / HORAS	ACTIVIDAD	TIPO DE ACTIVIDAD
11a27ac5	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:15:00	0.25		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	INGRESO DE PERSONAL
84919fdf	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:15:00	0.25		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REPARTO DE GUARDIA
992da7c4	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 2	CAMBIO DE BATERIA
5a44bb72	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:30:00	1.5		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	OTROS TRABAJOS EN LABOR
2a32b912	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	02:00:00	2	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	10.94031	2.37832	5.47	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
67a27ccc	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1	MATERIALES VARIOS	0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	ACARREO DE MATERIALES VARIOS
b4e67e65	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	LIMPIEZA DE EQUIPO
390ce575	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REFRIGERIO
7dfb7fe3	5b8764f7	2023	001. Enero	1	02/01/2023	04:30:00	4.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 2	ESPERANDO CARGA
c5c9c405	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	INGRESO DE PERSONAL
efc9c0d9	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REPARTO DE GUARDIA
e6ab13ac	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CHEQUEO DE MAQUINA
0ea61af2	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:40:00	0.67	MATERIALES VARIOS	0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	ACARREO DE MATERIALES VARIOS
de0356d6	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	03:10:00	3.17	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	19.44944	2.66759	6.135	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
4d9c4220	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	OTROS TRABAJOS EN LABOR
b17614e3	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REFRIGERIO
b24c2114	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5	MINERAL	0.99	2.7	0.8305	0.6	0.513872	1.38745	6.93725	5.13872	13.875	OPERATIVA	ACARREO DE MINERAL
3966100d	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:30:00	1.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
4bfa9f25	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	OTROS TRABAJOS EN LABOR
aa2e8be9	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	LIMPIEZA DE EQUIPO
ed1e5936	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
a7bb57aa	7b8c23e8	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	SALIDA DE PERSONAL
fd71bd35	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	INGRESO DE PERSONAL
cbf2d59f	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CHEQUEO DE MAQUINA
4d8560ca	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	6.07795	2.64258	6.078	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
ff36d980	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:30:00	1.5	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	14.58708	4.22813	9.725	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
f8a996b9	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1	MINERAL	0.99	2.7	0.8305	0.6	0.513872	1.38745	8.3247	3.08323	8.325	OPERATIVA	ACARREO DE MINERAL
4a9838ef	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:30:00	1.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
9b6454f3	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REFRIGERIO
aaf4cea6	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	02:00:00	2	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	6.07795	1.32129	3.039	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
9620e1f0	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
93a1a48f	ed7c976b	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:30:00	1.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CHEQUEO DE MAQUINA
d76d7ecc	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	07:30:00	7.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 2	ESPERANDO CARGA
348d5bb6	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	02:30:00	2.5	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	10.94031	1.90266	4.376	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
ecf3f374	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	LIMPIEZA DE EQUIPO
f8b7a723	47fbab2a	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:30:00	1.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	SALIDA DE PERSONAL
e98db94e	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	INGRESO DE PERSONAL
f9b0339a	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REPARTO DE GUARDIA
9d703077	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
d3b973a7	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:15:00	0.25		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CHEQUEO DE MAQUINA
d5f2ece1	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	02:45:00	2.75	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	27.95857	4.42032	10.167	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
35becb23	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	RETORNO DE EQUIPO A LABOR (VACIO)
af9b2336	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
c71e0d87	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:20:00	1.33		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
40b62a76	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:20:00	1.33		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REFRIGERIO
78dfbfbe	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:00:00	1	MATERIALES VARIOS	0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	ACARREO DE MATERIALES VARIOS
7accd90	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	02:30:00	2.5		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
a3b1afba	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:15:00	0.25		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	LIMPIEZA DE EQUIPO
75a20734	1064b454	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:45:00	0.75		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	SALIDA DE PERSONAL
6001927d	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
2818b395	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:05:00	0.08		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	INGRESO DE PERSONAL
fe3ae58d	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:15:00	0.25		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
1c47af08	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:15:00	0.25		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CAPACITACION
4851932a	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:40:00	0.67		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	REPARTO DE GUARDIA
dab3700b	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
d2fe1f48	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:20:00	0.33		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CHEQUEO DE MAQUINA
d7f20f15	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
5db2a16a	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:05:00	0.08		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	TRASLADO DE EQUIPO A LABOR
a3525f88	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:50:00	0.83		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
c04414fa	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:40:00	0.67	DESMONTE	0.99	2.3	0.82	0.536	0.528516	1.21559	2.43118	1.57766	3.629	OPERATIVA	ACARREO DE DESMONTE
712def08	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:05:00	0.08		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	RETORNO DE EQUIPO A LABOR (VACIO)
1fb2a1fb	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:30:00	0.5		0				0	0	0	0	0	OPERATIVA	LIMPIEZA DE EQUIPO
3b083dd6	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:10:00	0.17		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	PERSONAL SE TRASLADA
c223bb4b	21a60b66	2023	001. Enero	1	02/01/2023	07:35:00	7.58		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS
abbc0dac	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	04:25:00	4.42		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	LAVADO DE EQUIPO
a2906563	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:05:00	0.08		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	CHEQUEO DE MAQUINA
aff12f8a	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	00:20:00	0.33		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	LAVADO DE EQUIPO
72bc4b56	410e5b3c	2023	001. Enero	1	02/01/2023	01:25:00	1.42		0				0	0	0	0	0	DEMORA OPERATIVA 1	OPERADOR APOYA OTROS TRABAJOS

Fuente: Departamento de Costos y Productividad Minera Sotram

7. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Optimización del Acarreo Subterráneo mediante Simulación de Eventos Discretos con SimPy en la Unidad Minera SOTRAMI

Problema General	**Objetivo General**	**Hipótesis General**	**Variables**
¿Cómo mejorar el sistema de acarreo subterráneo mediante simulación de eventos discretos en la U.M. SOTRAMI?	Proponer la mejora del sistema de acarreo subterráneo mediante simulación de eventos discretos en la U.M. SOTRAMI.	Aplicando simulación de eventos discretos con SimPy se logrará mejorar el sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI.	**Variable independiente:** - Simulación de eventos discretos con SimPy **Variable dependiente:** - Mejora del sistema de acarreo
Problemas Específicos	**Objetivos Específicos**	**Hipótesis Específicos**	
¿Cuál es el estado actual del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI?	Diagnosticar el estado actual del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI.	Evaluando el estado actual del sistema de acarreo se identificarán sus principales limitaciones en la U.M. SOTRAMI.	
¿Cómo influye la simulación con SimPy en el desempeño del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI?	Aplicar simulación con SimPy para mejorar el desempeño del sistema de acarreo subterráneo en la U.M. SOTRAMI.	Aplicando simulación con SimPy se mejorará el desempeño del sistema de acarreo en la U.M. SOTRAMI.	
¿Qué impacto tiene la mejora del sistema de acarreo subterráneo en los costos operativos en la U.M. SOTRAMI?	Analizar el impacto de la mejora del sistema del acarreo subterráneo en los costos operativos en la U.M. SOTRAMI.	Mejorando el sistema de acarreo se reducirán los costos operativos en la U.M. SOTRAMI.	