

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS:

**Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de
transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua
2023**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Fritz Joseph VASQUEZ CHILLCCE

ASESOR:

Dr. Víctor Félix FLORES MORENO

AYACUCHO - PERÚ

2024

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, cuyo apoyo incondicional y amor constante han sido mi fuente de fortaleza y la inspiración que me ha llevado a superar desafíos y alcanzar mis metas.

A Angela, cuya valentía y determinación son un constante recordatorio de que no hay obstáculo insuperable y de la importancia de perseverar en cada etapa de la vida

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma mater, por brindarme la oportunidad invaluable de crecer tanto académica como personalmente. Su compromiso con la educación y el desarrollo de sus estudiantes ha sido fundamental en mi formación como profesional.

RESUMEN

La eficiencia operativa en las operaciones mineras subterráneas depende en gran medida de la optimización de los sistemas de transporte de mineral. En la unidad minera Andaychagua, el proceso de transporte enfrenta importantes desafíos debido a la distancia entre los puntos de extracción y los lugares de acopio, lo que afecta la productividad global. Este estudio tuvo como objetivo principal optimizar la flota de transporte mediante la simulación de eventos discretos, evaluando el impacto de diferentes combinaciones de volquetes y Scooptrams en los tiempos de ciclo y la eficiencia operativa. Para alcanzar este objetivo, se utilizó una metodología cuantitativa, con un enfoque descriptivo y correlacional. Se trabajó con un diseño no experimental, empleando el software de simulación Arena para modelar el proceso de carga, transporte y descarga de mineral. La simulación se realizó con diferentes configuraciones de volquetes y Scooptrams en distancias que oscilaron entre los 3800, 4700 y 5300 metros. Los resultados se analizaron en función de los ciclos diarios de transporte y la producción estimada. Los resultados muestran que, a mayor distancia, el número de ciclos diarios disminuye significativamente, afectando la producción. Sin embargo, el uso de 22 volquetes y 8 Scooptrams para distancias de 5300 metros demostró ser la configuración más eficiente, con una producción de 14.08 ciclos por día, representando un incremento del 12.1% respecto a configuraciones subóptimas. Además, se identificaron mejoras en la reducción de tiempos improductivos en la carga y descarga al aumentar el número de Scooptrams, lo que permitió optimizar los tiempos de espera en la operación. En conclusión, la simulación de eventos discretos se consolida como una herramienta efectiva para mejorar la planificación y gestión de la flota de transporte en la unidad minera Andaychagua. Se recomienda su uso regular para ajustar las configuraciones de equipos según las condiciones operativas y así maximizar la productividad.

Palabras clave: Optimización, simulación, flota de transporte, volquetes, Scooptram

ABSTRACT

The operational efficiency in underground mining operations depends on the optimization of the mineral transport systems. At the Andaychagua mining unit, the transport process faces significant challenges due to the distance between extraction points and storage sites, which affects the overall productivity. The main objective of this study was to optimize the transport fleet by means of discrete event simulations, evaluating the impact of different combinations of dump trucks and Scooptrams on cycle times and operational efficiency. To achieve this objective, a quantitative methodology was used, with a descriptive and correlational approach. A non-experimental design was used, using the Arena simulation software to model the mineral loading, transport and unloading process. The simulation was carried out with different configurations of dump trucks and Scooptrams at distances ranging from 3,700, 4,700 and 5,300 metres. The results were analysed in terms of daily transport cycles and estimated production. The results show that, at greater distances, the number of daily cycles decreases significantly, affecting production. However, the use of 22 dump trucks and 8 Scooptrams for distances of 5,300 metres proved to be the most efficient configuration, with a production of 14.08 cycles per day, representing an increase of 12.1% compared to suboptimal configurations. In addition, improvements were identified in the reduction of unproductive times in loading and unloading by increasing the number of Scooptrams, which allowed for optimising waiting times in the operation. In conclusion, discrete event simulation is consolidated as an effective tool to improve the planning and management of the transport fleet at the Andaychagua mining unit. Its regular use is recommended to adjust equipment configurations according to operating conditions and thus maximize productivity.

Keywords: Optimization, simulation, transport fleet, dump trucks, Scooptram

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
1 CAPITULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1 Espacial (geográfica).....	3
1.2.2 Temporal.	4
1.3 TEMÁTICA Y UNIDAD DE ANÁLISIS.....	4
1.3.1 Temática.....	4
1.3.2 Unidad de Análisis.....	4
1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4.1 Problema general.	4
1.4.2 Problemas específicos.	5
1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5
1.5.1 Justificación teórica.....	5
1.5.2 Justificación práctica.....	6
1.5.3 Justificación metodológica.....	6
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.	6
1.7 OBJETIVOS.	7
1.7.1 Objetivo general.....	7
1.7.2 Objetivos específicos.	7
2 CAPITULO II MARCO TEORICO.....	8
2.1 ANTECEDENTES.	8
2.1.1 Investigaciones internacionales.	8
2.1.2 Investigaciones nacionales.....	11
2.2 INVESTIGACIONES LOCALES	14
2.3 BASES TEÓRICAS.	15
2.3.1 Operaciones del proceso minero.....	15
2.3.2 Sistemas de transporte de mineral	17
2.3.3 Definición de tiempos.....	17
2.3.4 Tiempo de Ciclo:	19
2.3.5 Simulación	21
2.3.5.1 Simulación de eventos discretos.....	21
2.3.5.2 Simulación, sistema y modelo	21
2.3.5.3 Componentes de la simulación	22
(a) Entidades	22

(b)	Atributos.....	23
(c)	Actividades	23
(d)	Eventos.....	24
(e)	Variables del estado del sistema.....	24
(f)	Filas.....	24
2.3.6	<i>Simulación para minería</i>	25
2.3.7	<i>Software de simulación</i>	26
2.3.7.1	Ventajas	30
2.3.7.2	Desventajas.....	30
2.4	MARCO CONCEPTUAL	31
3	<i>CAPITULO III MATERIALES Y MÉTODOS</i>	33
3.1	ENFOQUE.....	33
3.2	ALCANCE (EXPLORATORIO, DESCRIPTIVO, CORRELACIONAL, EXPLICATIVO).....	34
3.3	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN (TIPOS: EXPERIMENTAL Y/O NO EXPERIMENTAL).....	34
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA.	35
3.5	HIPÓTESIS.	36
3.5.1	<i>Hipótesis general</i>	36
3.5.2	<i>Hipótesis específicas</i>	36
3.6	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES, DEFINICIÓN CONCEPTUAL Y OPERACIONAL.....	37
3.7	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.	38
3.8	TÉCNICAS ESTADÍSTICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	40
3.9	DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS	40
3.9.1	<i>Sistema de transporte de mineral</i>	40
3.9.2	<i>Proceso de mejora para el transporte de mineral en interior mina</i>	41
3.9.3	<i>Diagnóstico y medición de tiempos de los equipos de transporte de mineral</i>	42
3.9.4	<i>Plan de mejora</i>	46
3.9.5	<i>Aplicación del software de simulación</i>	48
4	<i>CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	54
4.1	GENERALIDADES DE LA MINA.....	54
4.1.1	<i>Ubicación y acceso</i>	54
4.1.2	<i>Geología</i>	55
4.1.2.1.	<i>Geología regional</i>	55
4.1.2.2.	<i>Geología estructural</i>	57
4.1.2.3.	<i>Geología económica</i>	58
4.2	RESULTADOS DEL TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	58
4.2.2	<i>Modelo del proceso de carga, transporte y descarga de material</i>	58
4.2.1.1.	<i>Construcción del modelo</i>	59
4.2.1.2.	<i>Construcción del modelo</i>	61
4.2.3	<i>Tiempos de carga, transporte y descarga de mineral</i>	68
4.2.4	<i>Escenario a una distancia de 3800 metros</i>	68
4.2.5	<i>Escenario a una distancia de 4700 metros</i>	69
4.2.6	<i>Escenario a una distancia de 5300 metros</i>	71
4.2.7	<i>Escenarios para la flota en el proceso de transporte de mineral</i>	72
4.3	DISCUSIÓN	84
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES.....	89

<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	90
<i>LISTA DE ABREVIATURAS</i>	92
<i>GLOSARIO</i>	93
5 <i>ANEXOS</i>	94

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 RENDIMIENTO DEL SCOOPTRAM 6YD3	43
TABLA 2 RENDIMIENTO DE VOLQUETE 22 M3	44
TABLA 3 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 18 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	68
TABLA 4 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 20 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	69
TABLA 5 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 22 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	69
TABLA 6 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 18 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	69
TABLA 7 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 20 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	70
TABLA 8 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 22 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	70
TABLA 9 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 18 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	71
TABLA 10 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 20 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	71
TABLA 11 TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 22 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	16
OPERACIONES UNITARIAS DEL PROCESO MINERO (SECCIÓN 4MX4.5M)	16
FIGURA 2	28
PANEL DE PROCESOS BÁSICOS.....	28
FIGURA 3	29
PANEL DE PROCESOS AVANZADOS.....	29
FIGURA 4	29
PANEL DE PROCESOS AVANZADOS.....	29
FIGURA 5	41
PROCESO CÍCLICO DE MEJORA CONTINUA PARA EL TRANSPORTE DE MINERAL CON VOLQUETES.	41
FIGURA 6	44
FIGURA 7 ESQUEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE DE MINERAL.	47
FIGURA 8	48
ETAPAS DE APLICACIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN	48
FIGURA 9	50
CREACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN.....	50
FIGURA 10	54
UBICACIÓN UNIDAD MINERA ANDAYCHAGUA.....	54
FIGURA 11	60
CERACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS.....	60
FIGURA 12	61
CONFIGURACIÓN DEL INICIO DEL SISTEMA	61
FIGURA 13	62
CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO DECIDE	62
FIGURA 14	62
CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO DELAY.....	62
FIGURA 15	63
CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PROCESS CARGA DE MATERIAL MINERAL	63
FIGURA 16	64
CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PROCESS TRANSPORTE DE VOLQUETE CARGADO	64
FIGURA 17	65
CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PROCESS RETORNO A MINA.....	65

<i>FIGURA 18</i>	<i>65</i>
<i>CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PROCESS RETORNO A MINA.....</i>	<i>65</i>
<i>FIGURA 19</i>	<i>66</i>
<i>CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO CREATE DE LLEGADA DE SCOOP</i>	<i>66</i>
<i>FIGURA 20</i>	<i>66</i>
<i>CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PROCESS DE CARGUÍO DE MATERIAL A PALA.....</i>	<i>66</i>
<i>FIGURA 21</i>	<i>67</i>
<i>CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO PROCESS DE VUELTA A LABOR</i>	<i>67</i>

1 CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La simulación de eventos discretos con el software de simulación es un enfoque de modelado y análisis que utiliza el programa de simulación para crear un modelo de un sistema complejo en el que los eventos ocurren en momentos específicos y de manera discreta en el tiempo. La simulación de eventos discretos con el software de simulación implica la creación de un modelo que represente fielmente el sistema real que se desea analizar y mejorar. Este modelo incluye la definición de eventos, recursos, variables de estado y las relaciones entre ellos (Capuñay, 2020).

En el contexto global actual, uno de los principales desafíos para las empresas en todo el mundo radica en su capacidad para ser altamente competitivas y enfrentar el desarrollo de mercados globales con estándares cada vez más exigentes. La gestión de existencias emerge como un factor clave para lograr la competitividad y rentabilidad de las empresas (Cinco Días, 2015, p.1).

La creciente competencia en el sector minero ha llevado a una búsqueda constante de formas más rentables de gestionar las operaciones. En este sentido, la gestión logística juega un papel fundamental, con un impacto directo e indirecto en los costos de la empresa (Rumbo Minero, 2018, pp.1-2).

La complejidad y diversidad de los proyectos mineros demandan soluciones tecnológicas innovadoras que optimicen la cadena de producción. En este contexto, los softwares de simulación se presentan como herramientas valiosas para abordar estos desafíos,

ofreciendo productos y servicios que agregan valor y mejoran la eficiencia productiva (Van Niekerk, Kleingeld & Booysen, 2013).

La simulación ha sido ampliamente utilizada en diversos aspectos de la minería, desde el examen de problemas en minería a cielo abierto y subterránea hasta el análisis de activos mineros y el estudio del impacto ambiental del transporte de materiales (Newman et al., 2010; Vásquez-Coronado & Tenorio, 2015; Hodkiewicz, Richardson & Durham, 2010; Tarshizi et al., 2015). También es aplicado en otras industrias, como la agropecuaria y la gestión de desastres naturales (Iannoni & Morabito, 2006; Li et al., 2015).

El proceso de encontrar el funcionamiento óptimo de un proceso minero es complejo, dada la gran cantidad de variables involucradas. Se requiere de cálculos iterativos y mejoras continuas para alcanzar la solución óptima y maximizar la productividad deseada (Hudson, 2003).

En la unidad minera Andaychagua, se viene desarrollando actividades de explotación minera en la provincia de Yauli, Departamento de Junín. Cabe resaltar que la explotación minera que realiza la Empresa Volcan es subterránea, por lo que el proceso de extracción de mineral se inicia en la propia mina y tiene que transportarse mediante volquetes a la zona de apilado de mineral. Sin embargo, se enfrenta a deficiencias significativas en su sistema de transporte subterráneo de mineral debido a la disponibilidad limitada de puntos de acopio, lo que obliga a que los traslados recorran distancias de hasta 3800 metros y 5300 metros. Estas deficiencias impactan directamente en la productividad. Entre los problemas identificados se encuentran la distribución inadecuada de volquetes en los puntos de carga en las labores de profundización, lo cual afecta el cumplimiento de la producción en esa área específica de la mina. Además, se evidencian tiempos improductivos tanto en el proceso de carga como en el acarreo del mineral, así como

dificultades de acoplamiento entre los equipos, como el volquete y el scooptram, durante el carguío. Para abordar estos desafíos, se propone simular el proceso de carguío y transporte de mineral en toda la Unidad Minera Andaychagua, con el objetivo de mejorar la flota. Este programa integral incluye aspectos técnicos y operativos, con la finalidad de optimizar la extracción y transporte del mineral.

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Espacial (geográfica).

La presente investigación se desarrolla en la unidad minera Andaychagua, perteneciente a la empresa minera Volcán Compañía Minera S.A.A., una de las principales productoras de zinc, plata y plomo en Perú. La unidad minera Andaychagua está estratégicamente ubicada en el caserío Andaychagua, anexo San José de Andaychagua, distrito Huayhuay, provincia Yauli, dentro del departamento de Junín, una región de alta importancia minera en el país debido a su rica geología, caracterizada por yacimientos polimetálicos de gran valor económico.

La provincia de Yauli se encuentra en la sierra central del Perú, a una altitud promedio que varía entre los 4,000 y 4,800 metros sobre el nivel del mar, en la cordillera occidental de los Andes. Esta región es conocida por su compleja estructura geológica, dominada por formaciones del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, que han dado lugar a un entorno propicio para la mineralización. La unidad minera Andaychagua, específicamente, se sitúa dentro de la faja polimetálica central, que se extiende a lo largo de 900 km, abarcando importantes operaciones mineras en el país.

1.2.2 Temporal.

Los datos que se tomará en cuenta para llevar a cabo el estudio de investigación propuesto estarán delimitada al período 2023 centrándose exclusivamente en la temática de trabajo asociadas con la simulación de procesos discretos aplicados al dimensionamiento de flota para equipos mineros.

1.3 Temática y unidad de análisis

1.3.1 Temática

El análisis se centrará únicamente en la optimización de la flota de transporte utilizada en la unidad minera Andaychagua. Otros aspectos de la operación minera, como la extracción, procesamiento o comercialización, no estarán dentro del alcance de este estudio.

1.3.2 Unidad de Análisis

La unidad de análisis en este contexto serán los volquetes y scooptram utilizados en la operación de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua. Estos vehículos constituyen los elementos principales de la flota de transporte y son fundamentales para el proceso de extracción y traslado de material dentro de la mina.

1.4 Formulación del problema.

1.4.1 Problema general.

¿Como la simulación de eventos discretos ayuda a optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023?

1.4.2 Problemas específicos.

- ¿Será posible mediante la simulación de eventos discretos modelar el proceso de carga, transporte y descarga de material de la mina hasta la estocada +015?
- ¿Será factible establecer los tiempos improductivos el proceso de carga, transporte y descarga de mineral de la mina hasta la estocada +015 mediante la simulación de eventos discretos?
- ¿Se podrá evaluar mediante escenarios de eventos discretos el número de volquetes mineros de transporte y Scooptram para el proceso de extracción de mineral óptimo, comparándolos con el número de unidades actuales?

1.5 Justificación e importancia.

1.5.1 Justificación teórica

El uso de modelos de simulación en la gestión y optimización de procesos en la industria minera tiene una base teórica sólida respaldada por los principios de la teoría de sistemas y la teoría de colas. La simulación permite representar sistemas complejos y dinámicos, como el proceso de transporte de material en una mina, de manera que se puedan comprender las interacciones entre variables, identificar cuellos de botella y evaluar el rendimiento en condiciones diversas. Además, la teoría de colas proporciona herramientas para analizar y mitigar los tiempos de espera y las congestiones en sistemas de transporte (Torres, 2016).

1.5.2 Justificación práctica

En la práctica, la industria minera enfrenta desafíos significativos relacionados con la eficiencia y la reducción de costos. Optimizar el tiempo y el número de transporte es esencial para maximizar la productividad de los volquetes y minimizar los gastos operativos. El uso de un modelo de simulación con software permite probar diferentes estrategias y configuraciones de flotación de manera virtual, lo que ahorra tiempo y recursos en comparación con los experimentos en el mundo real. Esto es especialmente crucial en un entorno donde el tiempo y los recursos son valiosos.

1.5.3 Justificación metodológica

La metodología propuesta se basa en la construcción y ejecución de un modelo de simulación utilizando el software de simulación. Esta elección metodológica se justifica debido a la capacidad del software para crear modelos detallados y realistas de sistemas complejos. Además, la simulación permite incorporar variabilidad y evaluar múltiples escenarios, lo que es esencial para abordar la incertidumbre propia de la operación minera. La metodología incluye la recopilación de datos relevantes, la construcción del modelo, la validación y verificación del mismo, la ejecución de simulaciones y el análisis de resultados para identificar oportunidades de optimización.

1.6 Limitaciones de la investigación.

La investigación se centra en las deficiencias específicas identificadas en la mina Andaychagua, lo que podría limitar su aplicabilidad a otras operaciones mineras con diferentes contextos y condiciones. Además, la recolección de datos se basa en información proporcionada por la propia empresa minera, lo que podría introducir sesgos o limitaciones en la precisión de los datos. Estas limitaciones sugieren la necesidad de futuras

investigaciones que aborden estas preocupaciones y validen los resultados obtenidos en este estudio.

1.7 Objetivos.

1.7.1 Objetivo general.

Evaluar como la simulación de eventos discretos ayuda a optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023.

1.7.2 Objetivos específicos.

- Ejecutar la simulación de eventos discretos para modelar el proceso de carga, transporte y descarga de material de la mina hasta la estocada +015.
- Establecer los tiempos improductivos el proceso de carga, transporte y descarga de mineral de la mina hasta la estocada +015 mediante la simulación de eventos discretos.
- Evaluar mediante escenarios de eventos discretos el número de Volquetes mineros de transporte y Scooptram para el proceso de extracción de mineral óptimos, comparándolos con el número de unidades actuales.

2 CAPITULO II MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes.

2.1.1 Investigaciones internacionales.

Fica, (2018), En su tesis titulada ***“Detección de anomalías en un proceso de carguío autónomo”*** para obtener el grado de Ingeniería Civil Eléctrica en la Universidad de Chile, Santiago de Chile, propuso identificar modelos basados en similitudes con el fin de detectar anomalías en el proceso de carguío y acarreo. La investigación se llevó a cabo utilizando datos recopilados de un cargador LHD propiedad de GHH Chile SpA y modificado en colaboración por ingenieros del Laboratorio de Robótica de Campo del AMTC e ingenieros de GHH Chile SpA. Esta máquina está equipada con sensores adicionales que permiten la navegación autónoma dentro de la mina y la ejecución autónoma del proceso de carguío, siguiendo una secuencia programada. Los resultados obtenidos revelaron que, al aplicar 30 pruebas en diferentes modelos para reducir el porcentaje de error, se logró identificar el modelo más efectivo, siendo el modelo SBM el más preciso, logrando una disminución del porcentaje de error en un 7.5%. En conclusión, la investigación destacó varios puntos importantes en el proceso de carguío y acarreo. Además, se demostró la viabilidad del uso del modelo SBM en comparación con el modelo ARX, que presenta un mayor factor de error debido a la presencia de numerosas variables.

González, (2018), En su tesis titulada ***“Modelo evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en compañía minera Doña Inés de Collahuasi”*** presentada para obtener el título de Ingeniería Civil de Minas en la Universidad de Chile, Santiago de Chile, se propuso desarrollar un modelo de cálculo para equipos de carguío y transporte en una empresa minera. El primer objetivo del modelo era determinar si la

capacidad de carguío disponible era suficiente para cumplir con los planes de corto plazo con una buena adherencia. Además, se planteó la posibilidad de modificar la asignación de Scooptram a las fases para mejorar la eficiencia. El segundo objetivo era calcular la cantidad de Volquetes necesarios para el movimiento de los tonelajes planificados, proporcionando información retrospectiva al plan mensual. Los resultados y conclusiones indicaron que al comparar el modelo de asignación automática con el manual, la dispersión de la flota disminuyó de -9.0% a -4.8%. Esta reducción se atribuyó a que las fases que se ajustaron al modelo lo hicieron de manera integral, ya que las variaciones en los tonelajes eran mínimas. En resumen, el modelo evaluativo propuesto demostró ser eficaz al optimizar la asignación de equipos de carguío y transporte en la compañía minera Doña Inés de Collahuasi.

Medina y Vásquez, (2018), En su proyecto integrador titulado ***"Evaluación de la operación de transporte minero usando simulación por eventos discretos en la cantera calizas HUAYCO S.A. ubicada en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas – Ecuador"***, realizado como requisito previo para obtener el título de Ingeniero de Minas en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, se propusieron desarrollar un modelo de simulación por eventos discretos para evaluar con alta confiabilidad el sistema de carga y transporte en la cantera calizas HUAYCO S.A. El objetivo principal fue evaluar el sistema de carga y transporte en función del ciclo de producción, utilizando los recursos existentes y operativos de la empresa sin la necesidad de dimensionar nueva maquinaria o crear nuevas rutas de transporte. Para ello, se formularon distribuciones probabilísticas de las actividades mineras a partir de datos de tiempos recolectados en el campo, y se implementó el modelo en el software Arena Input Analyzer. El análisis incluyó la evaluación de vías internas de la mina para simular el movimiento de los volquetes mineros en el ciclo de acarreo, considerando variaciones en cada ciclo. Además, se llevó a cabo un análisis

matemático para comparar los resultados con el modelo de simulación. Los resultados de la simulación indicaron que, de los 140 escenarios evaluados, 24 de ellos fueron considerados óptimos. En contraste, el análisis matemático sugirió que para cada frente de explotación se requerían 4 volquetes en el parque automotor. Estos hallazgos ofrecen una perspectiva valiosa para mejorar la eficiencia y la planificación en la operación de transporte minero en la cantera calizas HUAYCO S.A.

Alarcón, (2022), En su tesis titulada ***"Evaluación del sistema de transporte de mineral en minas de block caving mediante la simulación de eventos discretos"*** presentada para obtener el grado de Magíster en Minería en la Universidad de Chile, Santiago de Chile, se propuso evaluar el impacto de la incorporación de eventos operacionales en el plan minero a corto plazo de una mina subterránea de block caving. El objetivo principal fue identificar los cambios generados en la producción al incorporar ciertos eventos operacionales, con el fin de mejorar la calidad de los modelos de simulación. El estudio se centró en una mina de block caving con dos niveles de operación: el nivel de producción y el sistema de manejo de materiales. La evaluación de la incertidumbre se realizó en dos etapas. En la primera etapa, se analizó el efecto en la producción al vincular el nivel de producción con el sistema de manejo de materiales en un modelo de simulación. En la segunda etapa, se evaluó la incertidumbre generada por las fallas de los equipos LHD y las fallas ocasionadas por el sistema de manejo de materiales. Entre las conclusiones obtenidas, se destacó que la implementación de un modelo de simulación con dos niveles de transporte (producción y sistema de manejo de materiales) afectó el rendimiento operativo de los equipos LHD hasta en un 7% a lo largo de un mes del plan. Respecto a la incertidumbre generada por las fallas de equipos LHD y el sistema de manejo de materiales, se observó que al realizar una sensibilidad a la función de distribución, esto generó un

impacto del 1% en la producción, concluyendo que no causó un cambio significativo en la producción de la mina subterránea.

2.1.2 Investigaciones nacionales.

Vargas, (2019) En su tesis titulada ***"Mejoramiento del sistema de carguío y transporte en la UM San Rafael"*** presentada para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, se propuso mejorar el sistema de carguío y transporte de mineral con el fin de optimizar el dimensionamiento de la flota. El enfoque de la tesis se basó en un estudio de tiempos para identificar demoras operativas y no operativas en el sistema de carguío y transporte. El objetivo era evaluar el rendimiento de los equipos y, a partir de estos resultados, calcular el número óptimo de unidades para la flota de equipos, buscando generar beneficios útiles y minimizar costos para la empresa. Los resultados obtenidos revelaron que dos volquetes estaban ubicados en la cola del área de evacuación del mineral y desmonte, generando tiempos muertos extensos. En cuanto al equipo de transporte, se determinó que solo se necesitaban seis volquetes para cumplir con el plan de producción. Como conclusión, se logró optimizar el dimensionamiento de la flota mediante la implementación de un cargador frontal L566 y la reducción de dos volquetes, resultando en un total de nueve equipos, tres de carguío y seis de transporte. Este ajuste permitió mejorar la eficiencia del sistema, generando beneficios operativos y económicos para la empresa minera UM San Rafael.

Martínez, (2019) En su tesis titulada ***"Mejoramiento de producción del carguío y transporte mediante la teoría de colas en compañía minera Los Andes Perú Gold S.A.C."***, presentada para obtener el título de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional del Centro del Perú, se propuso mejorar la producción del carguío y transporte utilizando la teoría de colas. La operación de carguío involucra cuatro excavadoras 336DL_CAT

distribuidas en diversos frentes de minado, y la operación cuenta con 40 volquetes de 20m³, de los cuales 30 están asignados al carguío y acarreo, y 10 al área de Proyectos. Los resultados obtenidos revelaron un error en la distribución del número de volquetes en cada frente, lo cual generaba pérdidas de producción y costos elevados. Al aplicar la teoría de colas, se logró mejorar la producción del carguío y acarreo del material. La conclusión principal de la tesis fue que, para evitar colas en los frentes, era necesario reducir el número de equipos de carguío y transporte en cada frente, lo que afectaba directamente el rendimiento de las excavadoras. Este enfoque basado en la teoría de colas no solo permitió corregir la distribución ineficiente de recursos, sino que también contribuyó a optimizar la producción en la compañía minera Los Andes Perú Gold S.A.C. mediante una mejor gestión de los equipos de carguío y transporte en los diversos frentes de minado.

Araujo, (2018) En su tesis titulada "**Optimización de la flota de volquetes en el acarreo, para incrementar la producción en la mina Los Andes Perú Gold – Huamachuco**", presentada para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas en la Universidad Nacional de Trujillo, se propuso optimizar la flota de volquetes en la actividad de acarreo con el objetivo de incrementar la producción. Para lograr esto, se evaluó el número de volquetes necesarios, se realizó un análisis de costo-beneficio de los equipos a utilizar y se determinó la cantidad óptima según el análisis del número de volquetes. Los resultados obtenidos indicaron que para abordar eficientemente el problema, se asignó una flota de volquetes, representando una unión entre etapas con el fin de que cada etapa, al optimizarse por separado, fuera factible para el problema completo. Como conclusión, se destacó que la herramienta de programación dinámica logró la optimización de la flota de volquetes para cada excavadora de la empresa, resultando en un menor costo operativo. La aplicación de la programación dinámica como enfoque para la optimización demostró ser exitosa en la asignación eficiente de volquetes a cada excavadora, lo que contribuyó a

reducir los costos operativos y, por ende, mejorar la producción en la mina Los Andes Perú Gold – Huamachuco. Este enfoque analítico y estratégico subraya la importancia de la planificación eficiente en la gestión minera.

Julca, (2019) En su tesis titulada ***"Optimización del ciclo de carguío y acarreo del tajo al PAD de lixiviación para evitar tiempos muertos y reducir costos en una empresa minera de la mediana minería, 2019"***, presentada para obtener el título profesional de Ingeniera de Minas en la Universidad Privada del Norte, se propuso optimizar el ciclo de carguío y acarreo desde el tajo hasta el PAD de lixiviación con el objetivo de evitar tiempos muertos y reducir costos. Para llevar a cabo la optimización, se dividió el acceso minero en siete tramos, permitiendo así una evaluación más analítica de los tiempos en cada segmento. Los tramos incluyeron desde el punto de carguío hasta la cima del acceso minero, pasando por la vía nacional, el Haul Road, y finalmente, hasta el punto de descarga de mineral en el Pad de Lixiviación. Los resultados obtenidos indicaron mejoras significativas, como el aumento de la velocidad del camión al regresar (vacío) de 43,11 km/h a 45,22 km/h. La optimización del ciclo de carga redujo el tiempo de 28,36 minutos a 25,53 minutos. Esta optimización se aplicó específicamente a los turnos diurnos, donde no se presentaban problemas de retrasos prolongados en comparación con los turnos nocturnos. En cuanto al tiempo con y sin retardo de la lixiviación, se observó una reducción de 56,72 a 52,07 minutos en el turno diurno y de 58,52 a 57,52 minutos en el turno nocturno. Estos resultados demostraron la efectividad de la optimización en la reducción de tiempos y costos, contribuyendo así a una mayor eficiencia en el ciclo de carguío y acarreo en la empresa minera de mediana minería.

2.2 Investigaciones locales

Ramos, (2021) En su tesis titulada "Optimización del ciclo de carguío, transporte y descarga de mineral para aumentar la producción de mineral en la Unidad Minera Andaychagua", presentada para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas en la Universidad Continental Huancayo, siendo su objetivo Optimizar el ciclo de carguío, transporte y descarga de mineral para aumentar la producción de mineral en la unidad minera Andaychagua.

En el estudio situacional del ciclo de carguío, transporte y descarga de mineral, con el diagrama de Pareto se muestra tres actividades que se sitúan antes del 80 %. La actividad crítica, que es el refrigerio, es un tiempo determinado e imposible de reducirlo porque es parte del sistema de labor; sin embargo, las actividades como la cola de los volquetes y las reparaciones mecánicas son tiempos improductivos que optimizar y mejorar respectivamente. En el análisis de la teoría de colas se tiene dos situaciones: el actual y la óptima. Se concluye que, en la situación actual, el número de espera de volquetes es de 1, el tiempo de carguío es de 8.41 minutos y el tiempo de espera en la fila es de 3.91 minutos, lo cual genera pérdidas productivas y económicas. Por otro lado, en la situación óptima, el número de espera de volquetes es de 0, el tiempo de carguío es de 4.81 minutos y el tiempo de espera en la fila es de 0.36 minutos, lo cual es óptima sin ningún equipo parado en espera respectivamente y el tiempo de espera de 0.36 minutos refleja la concordancia de mejora en el carguío, transporte y descarga de mineral. El costo total por la operación minera del carguío y transporte por kilómetro es de 1.20 \$/t-km. Esto nos dice que para la unidad minera Andaychagua en la ruta 1 de la veta Salvadora a la parrilla Roberto Letts y la ruta 2 de la veta Adriana a la parrilla Roberto Letts, nos da ese mismo costo respectivamente.

La optimización del costo de carguío y transporte de la veta Salvadora en 6 \$/t, esto reflejado en el tonelaje programado por veta se tendría una optimización de 4,324 \$/t-día, para los 3 volquetes y 1 Scooptram. La optimización del costo de carguío y transporte de la veta Adriana en 5.76 \$/t. Esto reflejado en el tonelaje programado por veta tendría una optimización de 4,151 \$/t-día para los 3 volquetes y 1 Scooptram.

Pituy, (2020) En su tesis titulada " Mejoramiento del transporte de mineral con volquete en interior mina para incrementar la productividad en U.M. Andaychagua de Volcán Compañía

Minera S.A.A ", presentada para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas en la Universidad del Centro del Perú, siendo su objetivo Mejorar el transporte de mineral en interior mina e incrementar la productividad en la Unidad Minera Andaychagua de Volcán Compañía Minera S.A.A.

La investigación Mejoramiento del transporte de mineral con volquete en interior mina para incrementar la productividad en U.M. Andaychagua de Volcán Compañía Minera S.A.A., tuvo como objetivo general mejorar el transporte de mineral en interior mina e incrementar la productividad. La investigación se inicia con el problema ¿Como mejorar el transporte de mineral en interior mina para incrementar la productividad en la Unidad? La investigación utilizo la metodología científica, teniendo como método de investigación específica: la inductiva – deductiva y la analítica; es del tipo descriptivo y de diseño longitudinal. Se concluye que el mejoramiento del ciclo de carguío – transporte – descarga minimiza los tiempos perdidos en transporte, por conceptos de esperas al utilizar la teoría de colas y el factor de acoplamiento, estimando así la correcta flota de volquetes, permitiendo así, saber la excelente flota para realizar el transporte al mínimo costo desde las vetas: Vanesa (Nv. 1250), Salvadora (Nv. 1325) y Adriana (Nv. 1325) con destino a la parrilla Roberto Letts (Nv. 1000) lo cual contribuye en el incremento de la productividad en La Unidad Minera. El margen de ganancia por transporte llega a incrementarse de 9,01% a 11,91% logrando así mayores ganancias y mayor rendimiento por guardia, beneficiando a la minera.

2.3 Bases teóricas.

2.3.1 Operaciones del proceso minero

La descripción del proceso minero proporcionada por Gonzales (2018) se centra en la etapa de extracción y no aborda el procesamiento de los minerales para su beneficio posterior.

La fase de extracción se compone de tres subprocesos:

1. Perforación: Inicia con la definición de la malla de perforación. Luego, se taladra la roca mediante una perforadora y se introduce explosivos en la cavidad generada.

2. Voladura: Este proceso implica la detonación controlada de los explosivos depositados durante la perforación. Como resultado de la voladura que debe cumplir con una granulometría específica.

3. Carguío: En esta etapa, el material tronado se carga utilizando un equipo de carguío, como un Scooptram. Este material se transfiere a un equipo de transporte, generalmente volquetes, en el contexto de la minería subterránea.

- Transporte: Además de las etapas anteriores, se considera el proceso de transporte, donde el material extraído se traslada desde el macizo rocoso hasta su destino final. La elección del destino depende de la ley de valioso que tenga el material. Materiales de baja ley (estéril) se llevan a botaderos, los de mediana ley a stocks, y los de alta ley (mineral) se dirigen al proceso de chancado.

Figura 1

Operaciones unitarias del proceso minero subterráneo (sección 4mx4.5m).



Fuente: elaboración propia.

2.3.2 Sistemas de transporte de mineral

Los sistemas de transporte de mineral constituyen una pieza fundamental dentro del entramado operativo de una mina, siendo su eficiencia un factor determinante que puede incidir de manera significativa en la productividad y rentabilidad del yacimiento. De acuerdo con las ideas expuestas por (Mutmansky & Ramani, 2011) la importancia de diseñar sistemas de transporte que minimicen los tiempos muertos y maximicen la capacidad de carga, con miras a mejorar la eficiencia global de las operaciones mineras. En este sentido, la teoría de sistemas de transporte de mineral emerge como un campo de estudio crucial para el desarrollo sostenible de la industria minera, ofreciendo herramientas y estrategias que permiten enfrentar los desafíos operativos y económicos inherentes a este sector. La interrelación entre los diferentes componentes de los sistemas de transporte, desde la planificación de rutas hasta la selección y mantenimiento de equipos, es crucial para garantizar un flujo eficiente de mineral que maximice la producción y optimice los recursos disponibles. En resumen, la gestión eficaz de los sistemas de transporte de mineral se erige como un pilar fundamental para el éxito operativo y financiero de una mina, requiriendo un enfoque integrado que considere tanto aspectos técnicos como económicos en la búsqueda constante de la mejora continua.

2.3.3 Definición de tiempos

“La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) se establece como el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y la distribución de tiempos en los que el equipo, máquina o instalación incurre durante la operación. Ajustada de manera adecuada a la realidad operacional de la mina, esta norma pondera diversas variables y proporciona indicadores del comportamiento y rendimiento de los equipos empleados en la extracción, beneficio e industrialización de minerales”. Para describir la norma ASARCO,

se toma en consideración la definición proporcionada por (CODELCO, 2005) en sus documentos corporativos.

- Nominal: Espacio de tiempo en que se produce la medición. Este dependerá del tiempo de continuidad de faena productiva.
- Fuera de Servicio: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo Mecánico o Eléctrico.
- Disponible: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado para cumplir con su función de diseño.
- Reserva: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente apto para cumplir su función de diseño no teniendo operador que lo utilice, o que bajo una condición específica del avance de la operación no pueda ser operado.
- Operativo: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente apto, con operador y cumpliendo con las actividades asociadas a la operación.
- Demoras Programadas: Espacio de tiempo en que el equipo no cumple su función de diseño debido a actividades normadas por ley, como lo son; el medio turno o colación y el cambio de turno.
- Demoras No Programadas: Espacio de tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función de diseño, debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de esta.

- Efectivo: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para las cuales ha sido adquirido por la organización.
- Pérdidas Operacionales: Espacio de tiempo donde el equipo no puede cumplir con su función asignada, debido a la espera de equipo complementario.

2.3.4 Tiempo 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.

$$T_{\text{ciclo transporte}} = T_{\text{ciclo carguío scooptram(LHD)}} + T_{\text{ciclo volquete}}$$

Donde:

$$T_{\text{ciclo carguío scooptram(LHD)}} = T_c + T_d + T_m + T_{vc} + t_{vv}$$

- T_c : Tiempo de carga; es el tiempo que el scooptram demora en promedio en cargar la cuchara en el punto de extracción.
- T_d : Tiempo de descarga; es el tiempo que el scooptram demora en promedio en vaciar la cuchara en el punto de vaciado.

- T_m : Tiempo maniobra; es el tiempo que el operador del equipo scooptram demora en promedio para realizar las maniobras de un ciclo
- T_{vc} : 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.
- T_{vv} : 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.

$$T_{\text{ciclo volquete}} = T_c + T_t + T_d + T_r$$

- T_c : Tiempo de carga.
- T_t : Tiempo de transporte.
- T_d : Tiempo de descarga.
- T_r : 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)

2.3.5 Simulación

2.3.5.1 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).

2.3.5.2 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.

2.3.5.3 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”:

- Entidad
- Atributo
- Actividad
- Evento
- Variables
- Filas

(a) 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.

(b) 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.

(c) 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.

(d) 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.

(e) 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.

(f) 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.

2.3.6 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.

2.3.7 Software de simulación

Arena de Rockwell Software ha sido seleccionado como el software para llevar a cabo la simulación en el proyecto de optimización de carga y transporte en una mina a cielo abierto. Aguirre (2017) describe a Arena como una herramienta poderosa para la simulación de procesos, cuyo origen se remonta a 1982 cuando Dennis Pegden introdujo un lenguaje de

simulación para modelar sistemas de manufactura. En 1993, este lenguaje evolucionó y fue lanzado como Arena, permitiendo la creación de modelos a través de interfaces gráficas e interactivas para simular áreas específicas de los procesos de producción o construcción.

En su esencia, Arena es un software diseñado para analizar el impacto de cambios significativos y complejos en procesos empresariales, abarcando aspectos como la cadena de suministro, fabricación, logística, distribución, almacenamiento y sistemas de servicio. Agrega flexibilidad y amplitud de cobertura, permitiendo modelar cualquier nivel de detalle y complejidad deseado.

Entre las capacidades de Arena destacan:

- a. Modelar procesos, documentarlos y comunicarlos de manera colaborativa.
- b. Simular escenarios futuros de sistemas para comprender relaciones complejas e identificar oportunidades de mejora.
- c. Visualizar operaciones mediante gráficos de animación dinámicos.
- d. Analizar sistemas utilizando el método "Qué pasaría si (What if)" para evaluar alternativas de soluciones y seleccionar la mejor ruta para implementar cambios en la empresa.

En resumen, Arena se presenta como una herramienta orientada al proceso, brindando la capacidad de modelar, simular, visualizar y analizar sistemas complejos, lo cual será fundamental en el desarrollo y optimización del proyecto minero.

Arena se presenta como un ambiente completo de desarrollo de simulaciones con una amplia gama de capacidades. Según Kelton (2004), este software ofrece la posibilidad de crear modelos, producir datos aleatorios como entradas, ejecutar modelos bajo condiciones parametrizables, crear animaciones, generar informes estándar y personalizados, comparar

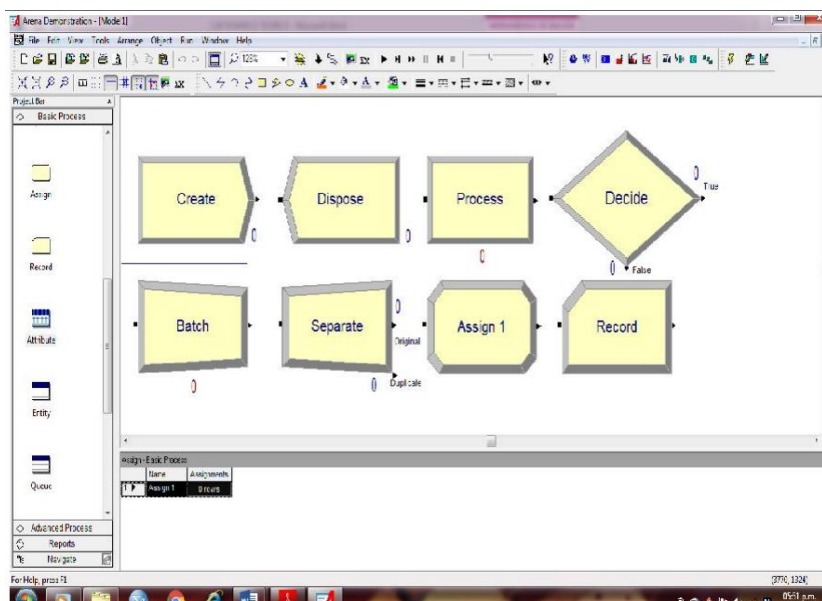
diferentes modelos, buscar optimizaciones y realizar integraciones con aplicaciones ampliamente utilizadas como Microsoft Office, bases de datos y lenguajes de programación.

Kelton, Sadowski y Sturrock (2008) explican que los módulos en Arena pueden presentarse en dos formas básicas: diagrama de flujo y datos. Los módulos de diagrama de flujo describen los procesos dinámicos del modelo, mientras que los módulos de datos definen las características de diversos elementos del proceso, como entidades, recursos y colas.

Es crucial destacar que las entidades no fluyen a través de los módulos de datos, y estos últimos no se proyectan en la ventana del modelo. En cambio, los módulos de datos existen "detrás de escena" en el modelo para definir diferentes clases de valores, expresiones y condiciones. Esto proporciona una estructura sólida para modelar y simular sistemas complejos de manera efectiva y eficiente. Los paneles principales de Arena Rockwell están compuestos por:

Figura 2

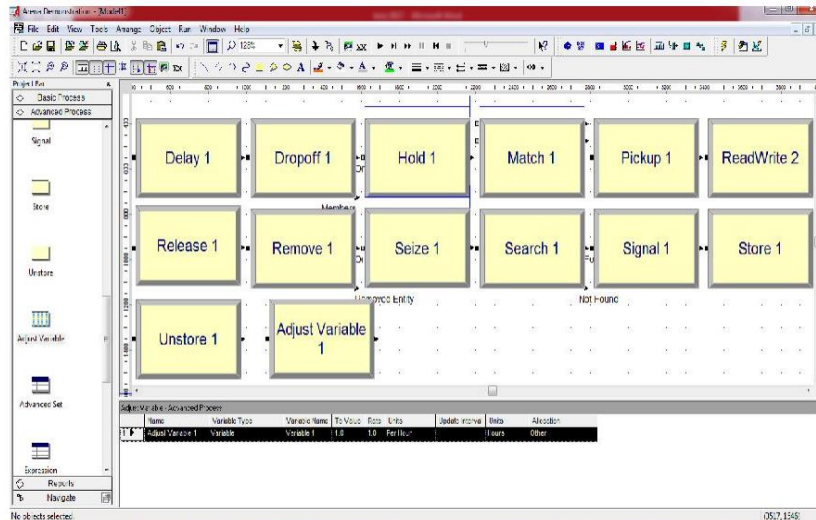
Panel de procesos básicos



Fuente: Arena Rockwell

Figura 3

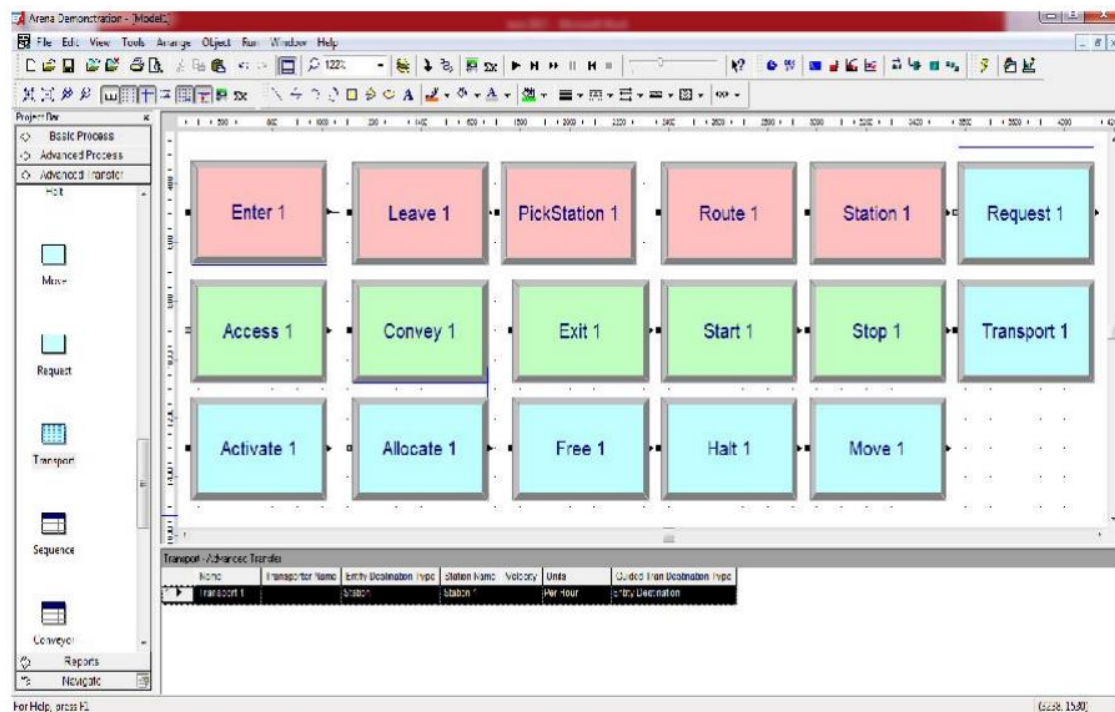
Panel de procesos avanzados



Fuente: Arena Rockwell

Figura 4

Panel de procesos avanzados



Fuente: Arena Rockwell

Es importante destacar que Arena incluye herramientas integradas para el ingreso y salida de datos, como el Input Analyzer, el Output Analyzer (Analizador de Resultados) y el Process Analyzer (Analizador de Procesos). Según Kelton, Sadowski y Sturrock (2008, pág. 177), el Input Analyzer es una herramienta estándar que acompaña a Arena y está diseñada específicamente para ajustar distribuciones para datos observados, proporcionar estimados de sus parámetros y medir qué tan bien se ajustan a los datos. Estas herramientas ofrecen funcionalidades esenciales para la validación y mejora continua de los modelos de simulación.

2.3.7.1 Ventajas

- A través de la simulación, es posible llevar a cabo pruebas que involucren la comparación de modelos alternativos, con el fin de determinar cuál de ellos se ajusta mejor a los objetivos establecidos.
- Se logra un control más efectivo sobre las condiciones del sistema en comparación con la supervisión directa sobre el sistema en sí.
- La simulación permite analizar los cuellos de botella para identificar dónde se producen demoras en un proceso específico.
- Es factible implementar cambios en el sistema sin interrumpir la operación en curso.
- La simulación proporciona un ahorro de tiempo y ofrece flexibilidad para ajustar las condiciones según sea necesario (Meza, 2011).

2.3.7.2 Desventajas

- La interpretación de los resultados puede ser desafiante a causa de las complejas interrelaciones dentro del sistema y a la naturaleza aleatoria de ciertas variables.

- Se precisa llevar a cabo múltiples repeticiones para evaluar exhaustivamente el modelo y obtener una muestra representativa del desempeño del sistema.
- La simulación demanda recursos humanos con capacitación adecuada y la disponibilidad de equipo informático especializado (Meza, 2011).

2.4 Marco conceptual.

Simulación de eventos discretos: Método modelado para analizar sistemas dinámicos con eventos distintos y específicos en momentos discretos.

Optimización: Proceso de mejorar o maximizar la eficiencia y rendimiento de un sistema, en este caso, la flota de transporte.

Flota de transporte: Conjunto de vehículos utilizados para el transporte de material mineral en la unidad minera.

Material mineral: Sustancias extraídas de la tierra con valor económico, objeto de transporte en la unidad minera.

Eficiencia: Capacidad para realizar una tarea de manera óptima, minimizando los recursos empleados y maximizando los resultados.

Análisis de sistemas: Estudio detallado de las interrelaciones entre componentes de un sistema para comprender su funcionamiento.

Modelado: Representación abstracta y simplificada de un sistema real para su estudio y análisis.

Dinámica de sistemas: Enfoque que estudia cómo las variables de un sistema cambian a lo largo del tiempo y cómo interactúan entre sí.

Gestión de flotas: Conjunto de actividades y estrategias para administrar eficientemente una flota de vehículos.

Transporte de minerales: Movimiento de materiales minerales desde el lugar de extracción hasta su destino final.

Planificación logística: Diseño y organización de procesos para garantizar un flujo eficiente en la cadena de suministro.

Simulación: Imitación de la operación de un proceso o sistema a lo largo del tiempo para comprender su comportamiento y optimizar su rendimiento.

Logística minera: Coordinación y gestión de actividades relacionadas con la extracción, transporte y procesamiento de minerales.

Ingeniería de transporte: Aplicación de principios de ingeniería para planificar y diseñar sistemas de transporte eficientes.

Rendimiento operativo: Medida de la eficacia de un sistema en términos de su capacidad para cumplir sus objetivos.

Costos de transporte: Gastos asociados con el movimiento de materiales desde la fuente hasta el destino.

Planificación estratégica: Desarrollo de estrategias a largo plazo para alcanzar objetivos específicos, aplicado al transporte y la gestión de flotas.

Eficiencia energética: Utilización eficiente de la energía en el contexto del transporte de material mineral.

Innovación tecnológica: Implementación de avances tecnológicos para mejorar los procesos y resultados en la gestión de flotas y transporte mineral.

3 CAPITULO III MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 Enfoque.

El enfoque de investigación responde al tipo cuantitativo que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos para comprender fenómenos, identificar patrones y establecer relaciones causales (Carrasco, 2006). En el contexto del tema "Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023", el enfoque cuantitativo sería fundamental por varias razones:

Medición Objetiva: Permite la medición objetiva de variables relevantes para la optimización de la flota de transporte, como tiempos de ciclo, capacidades de carga de los Volquetes, distancias recorridas y costos asociados.

Análisis Estadístico: Facilita el análisis estadístico de los datos recopilados, lo que permite identificar tendencias, calcular promedios, desviaciones estándar y otros parámetros que ayudan a entender el comportamiento del sistema.

Modelización Matemática: Permite la construcción de modelos matemáticos que representan el proceso de transporte de material mineral en la unidad minera. Estos modelos pueden simular diferentes escenarios y calcular métricas de desempeño clave, como tiempos de espera, eficiencia operativa y costos.

Predicción de Resultados: A través de la simulación de eventos discretos, se pueden prever los resultados de cambios en el sistema, como aumentar o disminuir el tamaño de la flota de transporte, modificar rutas o implementar nuevas tecnologías. Esto permite tomar decisiones informadas y anticipar posibles impactos.

3.2 Alcance (exploratorio, descriptivo, correlacional, explicativo).

El alcance de la investigación, según Salkind (2005), se refiere a los límites y fronteras que el investigador establece para su estudio. En otras palabras, el alcance define qué aspectos del fenómeno o problema se abordarán y cuáles se dejarán fuera del estudio. Esto incluye la especificación de las variables a investigar, los límites temporales y geográficos, así como las poblaciones o muestras a estudiar.

En el contexto de la presente investigación, el alcance respondió a un tipo descriptivo – correlacional, ya que se enfocó en caracterizar y describir detalladamente el funcionamiento de la flota de transporte, incluyendo datos sobre tiempos de ciclo, capacidades de carga, distancias recorridas y costos operativo y por otro lado se buscó comprender las causas subyacentes de ciertos fenómenos observados en la operación de la flota de transporte. Esto proporciona una visión clara de la situación actual y serviría como punto de partida para futuros análisis.

3.3 Diseño de investigación (tipos: experimental y/o no experimental).

El diseño de investigación se refiere al plan o estructura metodológica que guía la recopilación y análisis de datos con el fin de responder preguntas de investigación o probar hipótesis (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

En el caso de la investigación el diseño es no experimental es fundamental para abordar el tema de "Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023" de manera rigurosa y efectiva, ya que nos permitió identificación de Variables : En este estudio, se aplicó la implementación de diferentes estrategias de optimización en la operación de la flota de transporte, como la asignación de recursos, o la optimización de los tiempos de carga. y descarga.

3.4 Población y muestra.

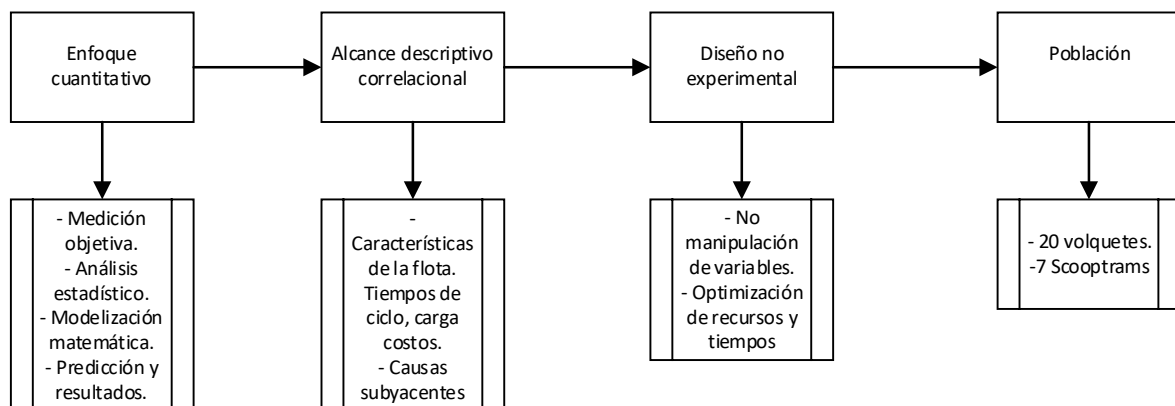
La población se define como el conjunto de todos los elementos que pertenecen al ámbito espacial donde se realizará la investigación (Carrasco, 2005, p. 236).

“La muestra es un subconjunto que representa la población y es representativo porque refleja las características de la población al aplicarse las técnicas correctas de muestreo en la cual se determina la cantidad y/o forma de elección del mismo” (Valderrama, 2002, p. 184).

La población de esta investigación está conformada por 20 volquetes que transportan el mineral de la mina a la zona de apilamiento, con una rampa de 12%, y 7 Scooptram que cargan el mineral a los volquetes transportadores.

Por otro lado, la muestra estuvo representada por la misma cantidad de máquinas de la población de volquetes y Scooptram.

Flujograma de la investigación



3.5 Hipótesis.

3.5.1 Hipótesis general.

La simulación de eventos discretos ayuda a optimizar significativamente la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023.

3.5.2 Hipótesis específicas.

- Si se implementa exitosamente la simulación de eventos discretos, entonces será posible modelar de manera eficiente el proceso de carga, transporte y descarga de material desde la mina hasta el hasta la estocada +015.
- La simulación de eventos discretos permitirá establecer de manera precisa los tiempos improductivos en el proceso de carga, transporte y descarga de mineral, lo que hará factible su identificación y cuantificación.
- Al emplear escenarios de eventos discretos, será posible evaluar y determinar el número óptimo de volquetes mineros de transporte y scooptram para el proceso de extracción de mineral, logrando comparaciones significativas con el número actual de unidades.

3.6 Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.

TIPO DE VARIABLE	MARCO CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDADES DE MEDIDAS	TIPO DE VARIABLE
VARIABLE INDEPENDIENTE	Simulación de eventos discretos	La simulación de eventos discretos es un enfoque para estudiar el comportamiento de sistemas dinámicos complejos, donde se modelan y simulan los eventos individuales que afectan el estado del sistema en momentos discretos en el tiempo, (Torres, 2016)	Se identifican los eventos clave que afectan el comportamiento del sistema y se definen sus características, como el momento de ocurrencia, la duración y el impacto en el estado del sistema.	Tiempos a escala Simulación de Eventos Resultados confiables	Minutos Global Global cuantitativa
VARIABLE DEPENDIENTE	Optimizar la flota de transporte de material mineral	La optimización de la flota de transporte de material mineral se refiere al proceso de mejorar la eficiencia y la efectividad en la gestión de los vehículos utilizados para transportar minerales desde las minas hasta los puntos de procesamiento o exportación.	Aplicaremos pasos y utilizar enfoques y herramientas adecuadas, es posible optimizar la flota de transporte de material mineral, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los costos asociados con la logística de transporte.	Flota de Volquetes Flota de Scooptram cargadoras Distancia de transporte y acarreo	Und Und Metros Cuantitativa Cuantitativa Cuantitativa

3.7 Técnicas e instrumentos.

Técnicas de recolección de datos

“Las técnicas de investigación representan el conjunto de pasos cuyo objetivo es operativizar el proceso investigativo” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2010). En la presente tesis, se han empleado diversas técnicas de recolección de datos, seleccionadas en función de las necesidades y características del estudio:

Análisis documental: Esta técnica implica el examen y análisis de documentos, archivos o registros existentes, como informes, actas, diarios, etc. En este caso, se recurrió a referencias bibliográficas y se buscó información relevante sobre la simulación de carguío y acarreo en procesos mineros a través de gestores de búsqueda reconocidos. Esta técnica proporciona información histórica y contextual sobre el tema de estudio, enriqueciendo así el análisis.

Observación: La observación consiste en la recolección de datos mediante la observación directa de los sujetos o fenómenos en estudio. En esta investigación, se llevó a cabo una observación in situ para recoger información sobre la ejecución de las actividades de carguío y acarreo de material mina. Esta técnica permite obtener datos objetivos y en tiempo real, aunque puede verse afectada por el sesgo del observador. Se registraron y controlaron los tiempos de las actividades realizadas durante el carguío y acarreo de material minero, lo que proporcionó información detallada y precisa sobre el proceso.

Instrumento

“Un instrumento de investigación se refiere a la herramienta o recurso utilizado para recopilar datos en un estudio. Es el medio a través del cual se obtiene información relevante para responder a las preguntas de investigación o alcanzar los objetivos planteados” (Carrasco, 2005).

En la presente investigación, se emplearon los siguientes instrumentos:

- a. Reporte diario de la toma de datos in situ: Este instrumento consiste en la recopilación sistemática de datos en el lugar mismo donde ocurren los eventos o fenómenos objeto de estudio. Proporciona información detallada y actualizada sobre las condiciones y variables relevantes durante el desarrollo de las actividades mineras.
- b. Software de simulación Arena: Se utilizó el software de simulación Arena como herramienta principal para modelar y simular el sistema de transporte de mineral en la mina Andaychagua. Este software permite crear modelos detallados y realizar simulaciones para evaluar el rendimiento y la eficiencia del sistema en diferentes escenarios.
- c. Programa Excel: Se empleará el programa Excel para llevar a cabo cálculos adicionales, procesar datos y presentar resultados de manera organizada y fácilmente interpretable. Excel proporciona una plataforma versátil para realizar análisis numéricos y gráficos, lo que facilita la interpretación de los datos recopilados durante el estudio.

3.8 Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.

El análisis y procesamiento de datos se llevará a cabo utilizando formatos establecidos en Excel para cada una de las simulaciones ejecutadas. Se utilizarán procedimientos validados para la simulación estadística de los datos, y los resultados obtenidos serán sometidos a un análisis comparativo con las especificaciones técnicas vigentes. Además, para validar las hipótesis planteadas, se utilizará el software SPSS. Se empleará el estadístico de correlación de Pearson para medir el grado de influencia de las variables independientes y dependientes. Este enfoque permitirá una evaluación rigurosa de la relación entre las variables y contribuirá a una interpretación precisa de los resultados obtenidos en el estudio.

3.9 Desarrollo del trabajo de tesis

3.9.1 Sistema de transporte de mineral

Al diseñar un sistema de transporte de mineral, es imprescindible abordar una serie de aspectos clave que influyen directamente en su eficiencia y efectividad operativa. Es crucial considerar la capacidad de carga y las especificaciones técnicas de los equipos de transporte disponibles, tales como Volquetes, cintas transportadoras o sistemas de transporte. Asimismo, se deben evaluar los aspectos logísticos, como la disponibilidad de infraestructuras de carga y descarga, así como la planificación de rutas óptimas que minimicen los tiempos de traslado y los costos operativos. Es importante también integrar tecnologías avanzadas, como sistemas de monitoreo y gestión de flotas, para optimizar la operación del sistema y mejorar la seguridad en el transporte de mineral. En conjunto, la

consideración cuidadosa de estos aspectos garantizará el diseño y la implementación exitosa de un sistema de transporte de mineral eficiente y confiable para la operación minera.

3.9.2 Proceso de mejora para el transporte de mineral en interior mina

La operación unitaria de transporte de mineral se lleva a cabo de manera rutinaria, lo que implica una constante necesidad de mejora. Este proceso de mejora se representa de manera cíclica, tal como se observa en la figura 5. Este enfoque cíclico permite identificar áreas de oportunidad, implementar acciones correctivas y evaluar los resultados obtenidos, con el objetivo de optimizar de forma progresiva el transporte de mineral mediante volquetes. La mejora continua se convierte así en un proceso iterativo y dinámico, fundamental para mantener y aumentar la eficiencia operativa en la actividad minera, garantizando una operación de transporte de mineral eficiente y rentable a lo largo del tiempo.

Figura 5

Proceso cíclico de mejora continua para el transporte de mineral con volquetes.



3.9.3 Diagnóstico y medición de tiempos de los equipos de transporte de mineral

El diagnóstico de los equipos empleados en el transporte de mineral requiere de una recopilación exhaustiva de datos provenientes de la Unidad Minera Andaychagua, La figura 6 ilustra el proceso de recopilación y procesamiento de datos para los equipos de carguío y transporte de mineral. En esta etapa inicial, se recolecta información detallada sobre el rendimiento, la capacidad de carga, el estado de mantenimiento y cualquier otro aspecto relevante de los equipos involucrados en el proceso de transporte. Una vez recopilados estos datos, se procede a su análisis y procesamiento para identificar patrones, tendencias y posibles problemas que puedan estar afectando la eficiencia y la operatividad de los equipos. De esta manera, el proceso de diagnóstico se convierte en un paso fundamental para la implementación de estrategias de mejora continua que contribuyan a optimizar el transporte de mineral y aumentar la rentabilidad de la operación minera.

TABLA 1***RENDIMIENTO DEL SCOOPTRAM 6YD3***

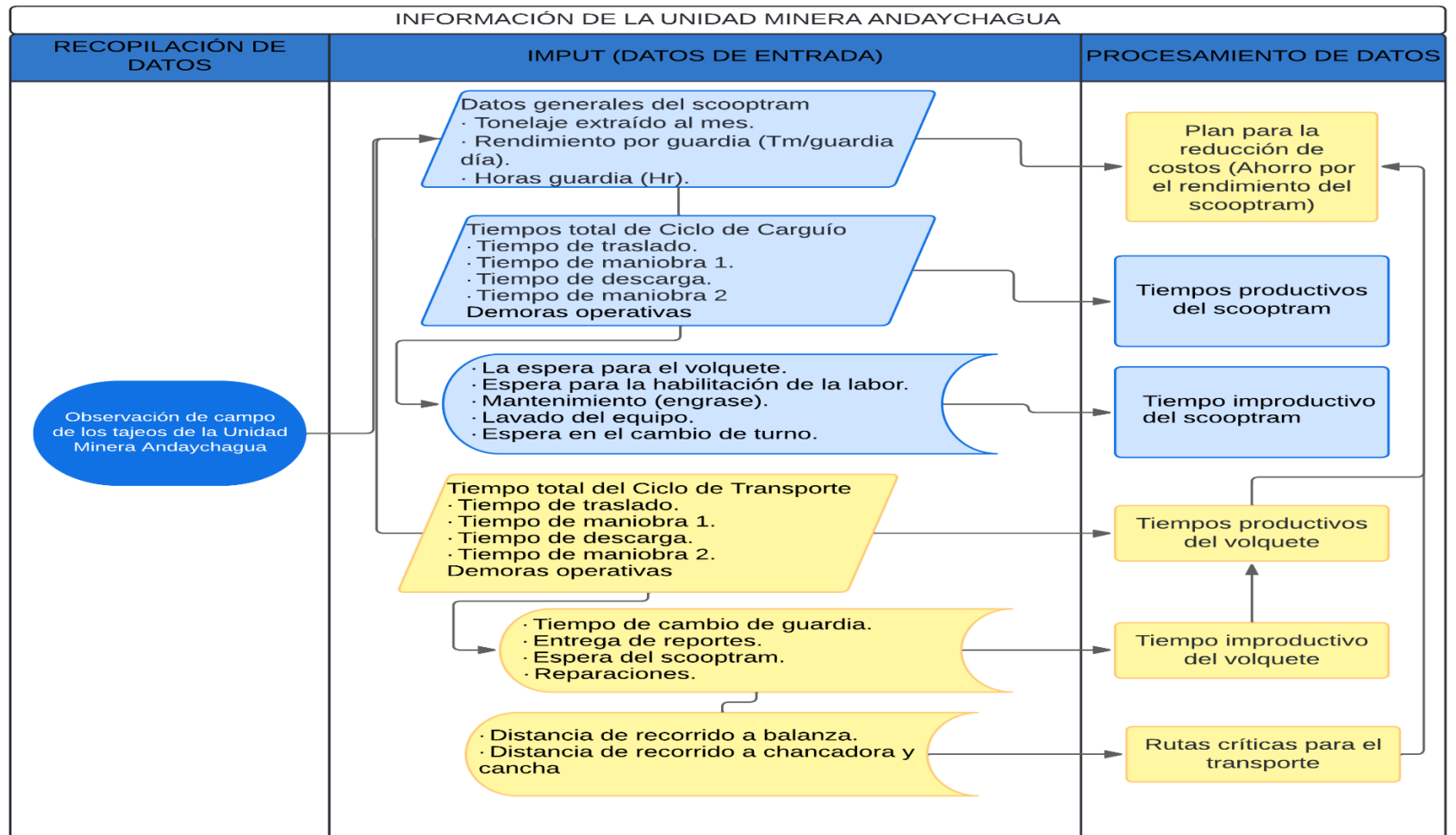
LHD 6yd3		Productividad pala		
Descripción	Unidad	Valor	Valor	Valor
Carga Nominal	yd3	6.0	6.0	6.0
Carga Nominal	m3	4.6	4.6	4.6
Factor Llenado		0.8	0.8	0.8
Densidad Esponjada	ton/m3	2.16	2.16	2.16
Carga efectiva	ton	7.9	7.9	7.9
Velocidades				
V Cargado	km/hr	4.6	4.6	4.6
V Vacío	km/hr	6.0	6.0	6.0
Distancia cargada	m	60	80	100
Distancia vacía	m	60	80	100
Tiempo carguío LHD	min	0.5	0.5	0.5
Tiempo descarga LHD	min	0.25	0.25	0.25
Tiempo maniobras	min	0.48	0.48	0.48
Tiempo viaje balde cargado	min	0.78	1.04	1.30
Tiempo viaje balde vacío	min	0.60	0.80	1.00
Tiempo de viaje	min	1.38	1.84	2.30
Tiempo de ciclo	min	2.61	3.07	3.53
Número de Pala		1	1	1
Productividad efectiva	t/hora	182.21	154.89	134.69
Tiempo disponible para operar	hora/turno	5.6	5.6	5.6
Perdidas operacionales	%	25%	25%	25%
Productividad Operacional	t/hora	136.66	116.17	101.02
Producción por LHD	ton/turno	765.28	650.53	565.70

TABLA 2**RENDIMIENTO DE VOLQUETE 15 M3**

Volquete 15m3		Productividad		
Descripción	Unidad	Valor	Valor	Valor
Carga Nominal	m3	15	15	15
Factor Llenado		0.8	0.8	0.8
Densidad Esponjada	ton/m3	2.16	2.16	2.16
Carga efectiva	ton	25.9	25.9	25.9
Velocidades				
Cargado	km/hr	8.00	8.00	8.00
Vacío	Km7hr	12.00	12.00	12.00
Distancia cargada	m	3800	4700	5300
Distancia vacía	m	3800	4700	5300
Tiempo de carguío volquete	min	9.22	9.22	9.22
Tiempo interferencia	min	8	10	11.5
Tiempo viaje cargado (Vp=8-12km/h)	min	28.5	35.25	39.75
Tiempo viaje vacío (Vp=12-15km/h)	min	19	23.5	26.5
Tiempo de viaje	min	47.5	58.75	66.25
T ciclo	min	64.72	77.97	86.97
Número de Palas		3	3	3
Productividad efectiva	t/hora	23.99	19.91	17.85
Tiempo disponible para operar	hora/turno	5.6	5.6	5.6
Perdidas operacionales	%	25%	25%	25%
Productividad Operacional	t/hora	17.99	14.93	13.39
Producción por LHD	ton/turno	100.74	83.62	74.97

Figura 6

Proceso cíclico de mejora continua para el transporte de mineral con volquetes.



3.9.4 Plan de mejora

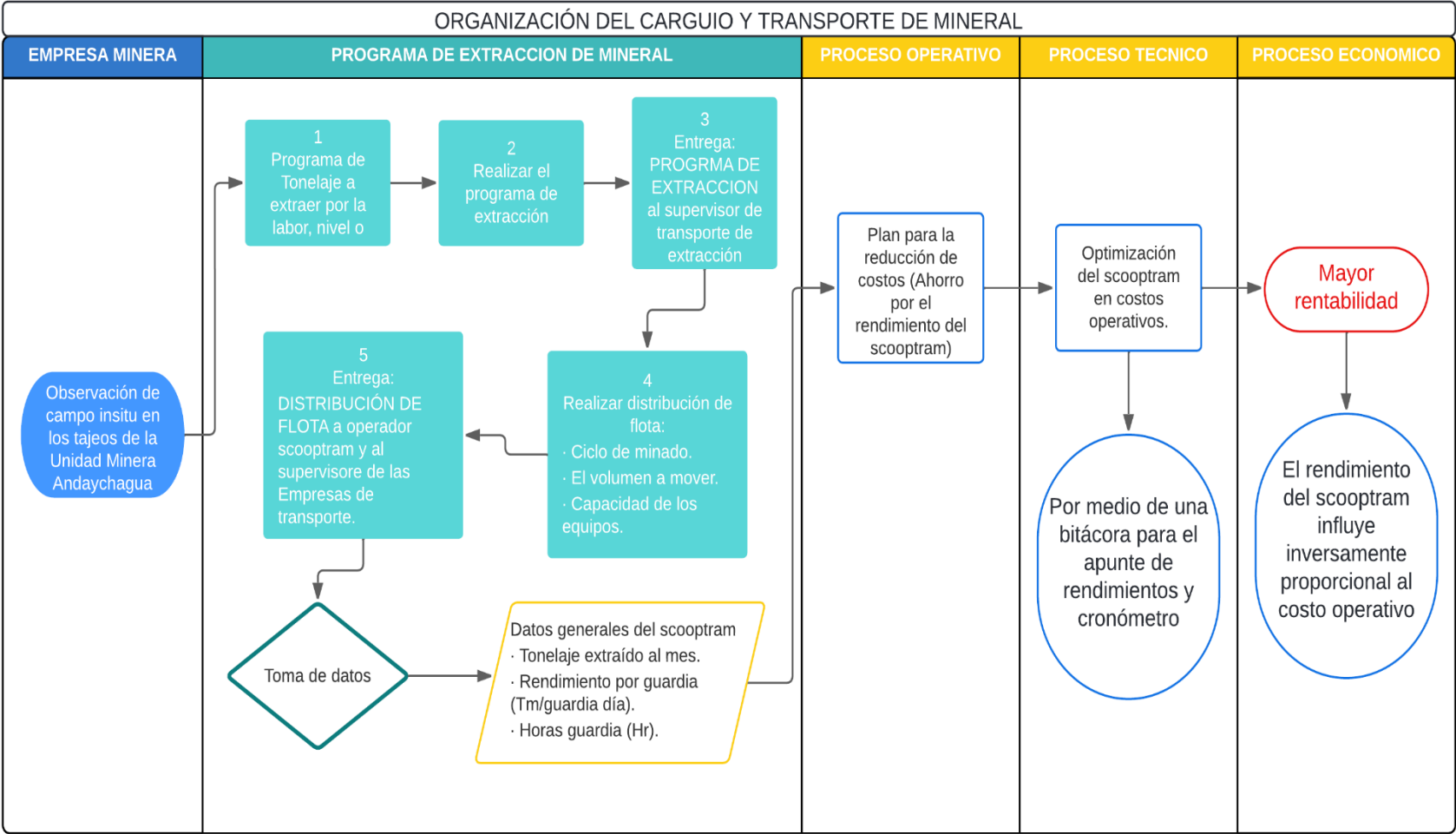
El plan de mejora para abordar las deficiencias en el transporte subterráneo de mineral en la Mina Andaychagua se fundamenta en la identificación y solución de los problemas detectados en la operación. Se propone una serie de acciones específicas para mejorar la eficiencia de la operación unitaria de carguío y transporte de mineral.

- En primer lugar, se abordará la inadecuada distribución de volquetes en los puntos de carguío en las labores mediante un análisis detallado de la demanda y capacidad de carga en cada área de la mina, optimizando así la asignación de recursos.
- Para mitigar los tiempos improductivos durante el carguío y acarreo del mineral, se implementarán medidas para reducir los tiempos de espera y aumentar la eficiencia de los procesos logísticos.
- Además, se propone la implementación de simulaciones utilizando software como Arena para evaluar y validar las mejoras propuestas antes de su implementación en la operación real.

Para ello, se simulará el funcionamiento del sistema de transporte con diferentes configuraciones de equipos, incluyendo la utilización de 6, 7 y 8 scooptrams y 20, 21 y 22 volquetes, con el fin de identificar la configuración óptima que maximice la eficiencia y la rentabilidad de la operación. En conjunto, estas acciones constituyen un enfoque integral y sistemático para mejorar el transporte de mineral en la Mina Andaychagua, contribuyendo así a incrementar su productividad.

Figura 7

Esquema de carguío y transporte de mineral.

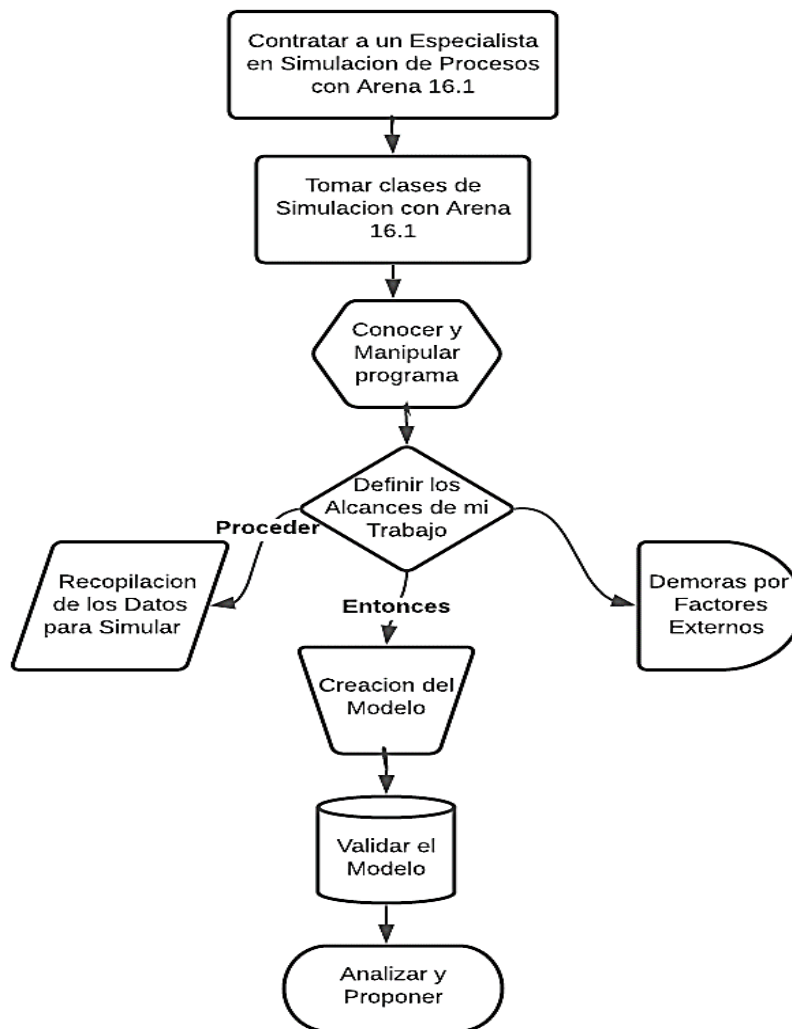


3.9.5 Aplicación del software de simulación

Para realizar la aplicación del software Arena se seguirá las siguientes etapas mostradas a continuación.

Figura 8

Etapas de aplicación del software de simulación



Contratación de un Especialista en Simulación de Procesos con Arena 16.1:

Después de realizar un análisis exhaustivo y buscar información, se llevó a cabo la

contratación de un especialista en simulación de procesos con experiencia en el software Arena 16.1. Este proceso implicó coordinación durante un período de 5 días para asegurar los servicios de enseñanza necesarios.

Clases de Simulación con Arena 16.1: Para desarrollar el modelo de simulación del proyecto, se llevó a cabo un proceso de aprendizaje que abarcó un total de 76 horas, iniciando el 14 de octubre de 2023 y concluyendo el 14 de diciembre del mismo año. Durante este período, se adquirieron habilidades en el manejo de las herramientas fundamentales del software, incluyendo Basic Process y Advanced Process.

Conocer y Manipular el Programa: Durante el proceso de aprendizaje, se estudiaron diversos módulos que componen Basic Process y Advanced Process, como create, process, decision, delay, hold, assign, record, dispose, entre otros. Estos módulos se utilizarán para codificar el modelo, asignando tiempos de llegada, tiempos de procesamiento, condiciones, esperas, y salidas de entidades, entre otros.

Definir los Alcances del Trabajo: Después de familiarizarse con el procesamiento de información en el software, se definió el alcance de la investigación. Este se centrará en determinar el tiempo total de carguío y acarreo de material mineral en la unidad minera Andaychagua, considerando los tiempos efectivos de cada etapa evaluada.

Recopilación de Datos para Simular: Se seleccionaron y recopilamos los datos necesarios en la unidad minera Andaychagua. Estos datos, que incluyen tiempos de operaciones mineras horizontales como ventilación, retiro de marina, acuñadura, perforación y fortificación, lechado de pernos, colocación de malla, hilteo, shotcrete, perforación del frente de labor, y carga de explosivos, serán utilizados para crear y validar el modelo de simulación.

Creación del Modelo: Luego de tener todos los datos que se utilizaran en la simulación, se procedió a crear el modelo el cual será un modelo discreto con las características siguientes:

Figura 9

Creación de un modelo de simulación



Etapas para el desarrollo de un modelo de simulación de eventos discretos

Para desarrollar un modelo de simulación hay que seguir los siguientes pasos:

Formulación del Problema: La formulación del problema es un paso esencial en cualquier proceso de resolución de problemas y se lleva a cabo en varias etapas clave:

Identificación del Problema: Se utiliza una variedad de herramientas como Diagramas de Flujo, Diagramas de Causa-Efecto, Diagramas de Pareto, Tormentas de Ideas y la Técnica de Grupo Nominal para identificar el problema. Estas herramientas permiten visualizar y comprender las complejidades del problema desde diferentes perspectivas.

Comprensión del Problema: Una vez identificado, es crucial entender el problema en profundidad. Esto implica analizar la información disponible inicialmente, entrevistar a las partes clave involucradas, centrarse en las causas subyacentes en lugar de las consecuencias superficiales, y establecer prioridades entre las alternativas disponibles.

Definición del Problema: Se establecen límites claros y se responde a preguntas clave como ¿Qué? ¿Por qué? ¿Dónde? ¿Cuándo? ¿Quién? ¿Cuánto? Definir el problema de manera

precisa y concisa ayuda a enfocarse en la esencia del desafío y proporciona una base sólida para el desarrollo de soluciones

Definición de Objetivos y Plan de Proyecto: Los objetivos a definir deben cumplir con ciertas características para que el proyecto se encuentre guiado correctamente:

- Ser alcanzables
- Requerir esfuerzo para lograrlos
- Tener un plazo de finalización
- Ser simples de comunicar
- Ser mensurables
- Considerar parámetros de comparación para controlar su avance.

El Plan de Proyecto es una fase crucial que implica la definición de recursos a utilizar a lo largo del proyecto, abarcando personal, materiales, equipos, fondos, información, tecnología, edificios y terrenos. Además, se planifican aspectos como el alcance, el tiempo estimado, los costos, las especificaciones y los riesgos asociados. Esta etapa establece las bases para una ejecución efectiva y controlada del proyecto.

Conceptualización del Modelo: En esta etapa, se elaboran los conceptos inherentes al modelo, generando una abstracción de la realidad. Además de los elementos previamente mencionados, se detallan indicadores de rendimiento, supuestos, parámetros, variables de control, variables, agentes y decisiones. La inclusión de la lógica del modelo es esencial; esta lógica representa el comportamiento del sistema que se busca modelar. La fase de

Conceptualización del Modelo es descriptiva y cualitativa, sentando las bases para las etapas posteriores del proyecto.

Recolección y Análisis de Datos: Esta fase está estrechamente vinculada a la conceptualización del modelo, ya que implica la recopilación y análisis de datos que serán fundamentales para dimensionar y ajustar el modelo propuesto. Inicialmente, se lleva a cabo un relevamiento de datos del sistema real. Posteriormente, se asignan distribuciones probabilísticas a estos datos, determinando sus parámetros para lograr una representación precisa en el modelo. Finalmente, se realizan pruebas de bondad de ajuste para verificar la adecuación de las distribuciones seleccionadas a los datos del sistema real.

Por último, se deben realizar las pruebas de bondad de ajuste para verificar que las distribuciones seleccionadas se aproximan lo suficiente a los datos del sistema real.

Traslación al Modelo: Esta etapa reviste gran importancia, ya que implica la traducción de los elementos presentes en el Modelo Conceptual y el Modelo de Datos al lenguaje informático del software Arena. Aquí es donde se estructuran y codifican las representaciones del sistema de manera que puedan ser interpretadas y ejecutadas por el software de simulación. Este paso facilita la transición del diseño conceptual a un modelo operativo y funcional.

Verificación: La verificación consiste en confirmar que la codificación en Arena refleje fielmente lo descrito en el Modelo Conceptual. Es decir, se asegura de que la traslación del diseño conceptual al código del simulador se haya realizado de manera precisa y conforme a las especificaciones previamente establecidas.

Validación: A diferencia de la verificación, la validación busca confirmar que el modelo simulado sea una representación precisa de la realidad, no del Modelo Conceptual. Este proceso implica una calibración iterativa del modelo, comparándolo con el comportamiento del sistema real. Las diferencias identificadas se utilizan para mejorar y ajustar continuamente el modelo, buscando una correspondencia más exacta con la realidad.

Diseño Experimental: En esta fase se definen las alternativas que se evaluarán para alcanzar los objetivos planteados. Estas alternativas pueden implicar ajustes en el Modelo Conceptual y, por ende, en la traslación al simulador. Es probable que este proceso sea iterativo para asegurar que las modificaciones se alineen con la realidad o con las expectativas para una realidad futura. Además, se determinan los parámetros temporales de las corridas (período de calentamiento y duración), la cantidad de corridas necesarias para obtener resultados estadísticamente significativos y los criterios de aceptación de las alternativas propuestas.

Experimentación y Análisis: En esta etapa, se lleva a cabo la ejecución de las corridas planificadas, generando datos para su posterior análisis. La información obtenida se compara según lo establecido en el Plan de Cuadros, permitiendo el análisis de indicadores y la formulación de conclusiones derivadas del estudio de simulación.

Documentación y Generación de Reportes: Para concluir el estudio de simulación, es fundamental documentar todas las actividades realizadas, incluyendo la codificación del programa. Además, se elaboran reportes escritos que presentan los resultados obtenidos y los análisis realizados. Estos informes proporcionan una interpretación comprensible para todas las personas involucradas en el proceso de toma de decisiones.

4 CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Generalidades de la mina

4.1.1 Ubicación y acceso

“La unidad de Andaychagua pertenece a la Volcán Compañía Minera S.A.A., políticamente pertenece al caserío Andaychagua - anexo San José de Andaychagua – distrito Huayhuay - provincia Yauli – departamento Junín. Se encuentra en el flanco este de la cordillera occidental de los Andes Centrales del Perú”.

Sus coordenadas geográficas son:

76°05' Longitud Oeste y 11° 40' Latitud Sur

Sus coordenadas UTM:

- 8'702,762 N
- 384,547 E

A una altitud de 4718 m s. n. m.

Figura 10

Ubicación unidad minera Andaychagua



Nota: Tomado de unidad minera Andaychagua.

4.1.2 Geología

4.1.2.1. Geología regional

El depósito mineral de Andaychagua se encuentra situado en el anticlinal de Chumpe, cuyo eje se orienta en dirección N45°O. Esta estructura muestra una configuración de doble hundimiento, con una inclinación hacia el noroeste y otra hacia el sureste. Dentro de esta formación, se han identificado intrusivos de composición ácida, intermedia y básica, que han cortado o se disponen de manera paralela a la secuencia estratigráfica del anticlinal de Chumpe. Estos intrusivos juegan un papel significativo en la génesis y distribución de los depósitos minerales en la zona de Andaychagua, contribuyendo a la diversidad y complejidad de los yacimientos presentes en la región.

Estratigrafía

El distrito minero de Andaychagua se encuentra en la parte suroeste de una extensa estructura regional de naturaleza domal, conocida como el complejo Domal de Yauli. Este

complejo abarca completamente los distritos de San Cristóbal y Andaychagua, y constituye una ventana geológica que expone formaciones Paleozoicas en medio de la faja intracordillerana de formaciones mesozoicas.

Las rocas más antiguas en la Cordillera Occidental del centro del Perú son las filitas Excélsior, que forman el núcleo del anticlinal de Chumpe. Estas rocas afloran a lo largo de unos 19 km y tienen un ancho de aproximadamente 1.5 km, extendiéndose desde Andaychagua hasta las cercanías del pueblo de Yauli, en la base del valle del mismo nombre. Estos afloramientos se encuentran ubicados a unos 1000-1200 metros al este de la Mina San Cristóbal.

El grupo Excélsior comprende una variedad de rocas, como pizarras, filitas (lutitas metamorfoseadas), esquistos, calizas, flujos basálticos, cuarcitas y bancos calcáreos marmorizados con fósiles (Crinoideos). Este conjunto muestra una intensa fracturación y alteración, exhibiendo una exfoliación característica su paralela a los planos axiales de los pliegues. Además, contiene numerosos lentes y vetillas de cuarzo segregado, lo que indica el efecto del metamorfismo regional.

La mineralización en el grupo Excélsior se manifiesta principalmente en forma de filones y sistemas de vetas, como las vetas Virginia, San Cristóbal y Andaychagua. Además, se ha descrito una mineralización por H. W. Kobe que comprende dos tipos: un manto en la mina Ultimátum de Fe, Zn, Pb, Ag; y otra asociada estrictamente a estratos, ubicada en el anticlinal de Ultimátum, que contiene Ni, Co, As, Sb, Fe y S.

4.1.2.2. Geología estructural

El domo de Yauli se considera una estructura regional que se extiende desde el valle de Suitucancha hasta Ticlio. Esta estructura tiene una forma rectangular y alargada, con dimensiones de aproximadamente 30 km de largo por 15 km de ancho. Su orientación general es andina, con un rumbo promedio de N35°W. El flanco este de la estructura presenta un ángulo de buzamiento entre 30° y 40°, mientras que el flanco oeste tiene un ángulo de buzamiento entre 60° y 80°. Está compuesto por varios anticlinales y sinclinales, siendo los más significativos el anticlinal de Chumpe y el anticlinal de Yauli, también conocido como Ultimátum.

En la parte central del domo afloran rocas del basamento paleozoico, incluyendo el volcánico Mitu y las Filitas Excélsior. El flanco occidental está formado por calizas del grupo Pucará y areniscas Goyllarisquizga, mientras que en el flanco oriental se extienden las rocas del grupo Mitu, seguidas por las del grupo Pucará. Además, se encuentran intrusivos del tipo Chumpe.

Estos intrusivos ácidos conforman un extenso sistema porfirítico que parece estar directamente relacionado con los eventos hidrotermales y la mineralización observada a nivel regional y distrital, como en las minas San Cristóbal, Carahuacra y Andaychagua. A nivel estructural, se han desarrollado fallas inversas, fracturas y deslizamientos de diferente magnitud durante la generación de esfuerzos compresivos suroeste-noroeste. Estas estructuras muestran una concordancia casi perfecta con la estratificación de los sedimentos del grupo Pucará.

4.1.2.3. Geología económica

En la mina Andaychagua, se pueden encontrar diversas estructuras geológicas, incluyendo vetas, mantos y cuerpos. Las vetas se ubican en el domo de Yauli, específicamente en los grupos Excelsior, Mitu y Pucará, con una orientación predominante de noreste a suroeste. Estas vetas tienen una longitud promedio de alrededor de 1600 metros y 650 metros, respectivamente, y presentan un buzamiento variable con una potencia que oscila entre 1 y 10 metros o más. Su forma se asemeja a un rosario, con características geométricas distintivas.

Por otro lado, los mantos y cuerpos se encuentran en las calizas del grupo Pucará, siguiendo el contacto Mitu-Pucará y controlados por el sistema estructural, con una dirección media de noroeste a sureste. Estas estructuras tienen una forma irregular, similar a lentes, con longitudes que varían entre 90 metros de largo y 100 metros de ancho. Estas características han sido reconocidas desde la superficie hasta los niveles inferiores de la mina Andaychagua, donde actualmente se están llevando a cabo las labores mineras.

4.2 Resultados del tratamiento de la información

4.2.2 Modelo del proceso de carga, transporte y descarga de material

La industria minera está compuesta por una serie de subsistemas interconectados que trabajan en conjunto para alcanzar los objetivos establecidos. Entre estos subsistemas, la explotación minera, la preparación del mineral para cumplir con los estándares de los clientes externos y su posterior exportación son aspectos destacados. Sin embargo, es crucial reconocer la importancia del subsistema de carga, transporte y descarga de mineral en la zona

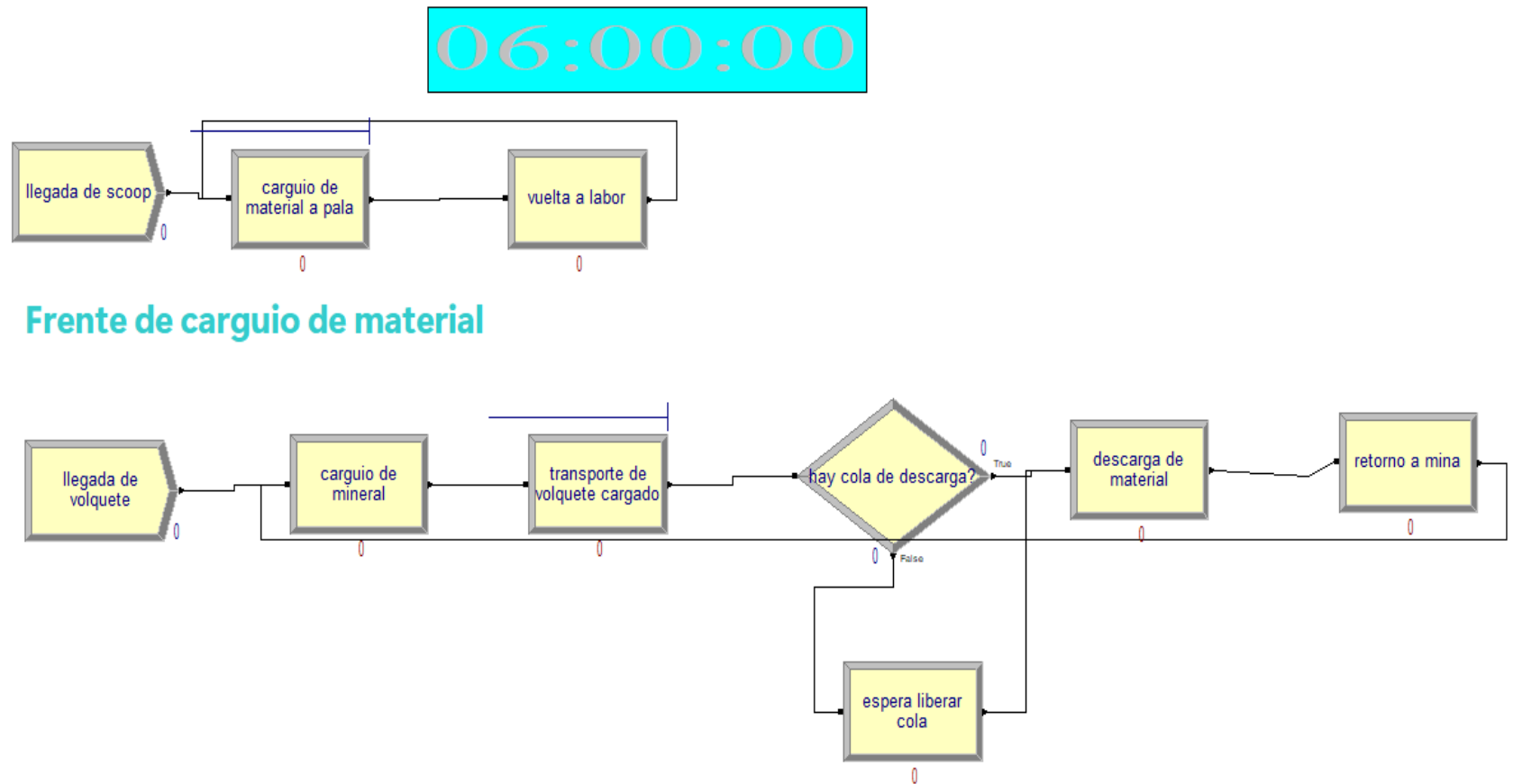
de acopio, ya que su eficiencia y funcionamiento adecuado son fundamentales para el desempeño óptimo del resto de los subsistemas en la industria minera. Este subsistema garantiza la correcta transferencia del mineral desde los puntos de extracción hasta la zona de acopio, donde se lleva a cabo su preparación y posterior envío al mercado externo. Por lo tanto, su buen funcionamiento es esencial para mantener el flujo continuo de producción y cumplir con los compromisos comerciales de la empresa minera. En resumen, el subsistema de carga, transporte y descarga de mineral en la zona de acopio sirve como un eslabón vital en la cadena de valor de la industria minera, asegurando la eficacia y eficiencia operativa en todas las etapas del proceso.

4.2.1.1. Construcción del modelo

Para la elaboración del modelo, se utilizó el software de simulación Arena, como se ha mencionado previamente. La figura 11 muestra el modelo propuesto, el cual fue construido utilizando este software.

Figura 11

Creación del modelo de simulación de eventos discretos



* Nota: el modelo de simulación propuesto, ayudara a predecir el comportamiento del sistema de transporte y acarreo.

4.2.1.2. Construcción del modelo

- Créate: Permite el ingreso de Volquetes a la zona de carga.
- Decide: Es la decisión si “el scooptram está desocupada” de ser verdad ingresa el camión a ser cargado, de lo contrario debe esperar.
- Delay: Indica el tiempo de espera de liberar la cola.
- Process: Es el proceso de carga de mineral, de transporte, de espera, de retorno a la mina.

Figura 12

Configuración del inicio del sistema

The screenshot shows the 'Create' dialog box in the Arena software. The dialog box is titled 'Create' and has a question mark icon and a close button (X) in the top right corner. It contains several fields for configuring the creation of entities:

- Name:** A dropdown menu with the selected value 'llegada de volquete'.
- Entity Type:** A dropdown menu with the selected value 'volquete'.
- Time Between Arrivals:** A section containing three fields:
 - Type:** A dropdown menu with the selected value 'Expression'.
 - Expression:** A dropdown menu with the selected value 'UNIF(9 , 11)'.
 - Units:** A dropdown menu with the selected value 'Minutes'.
- Entities per Arrival:** A text input field with the value '1'.
- Max Arrivals:** A text input field with the value '20'.
- First Creation:** A text input field with the value '0.0'.

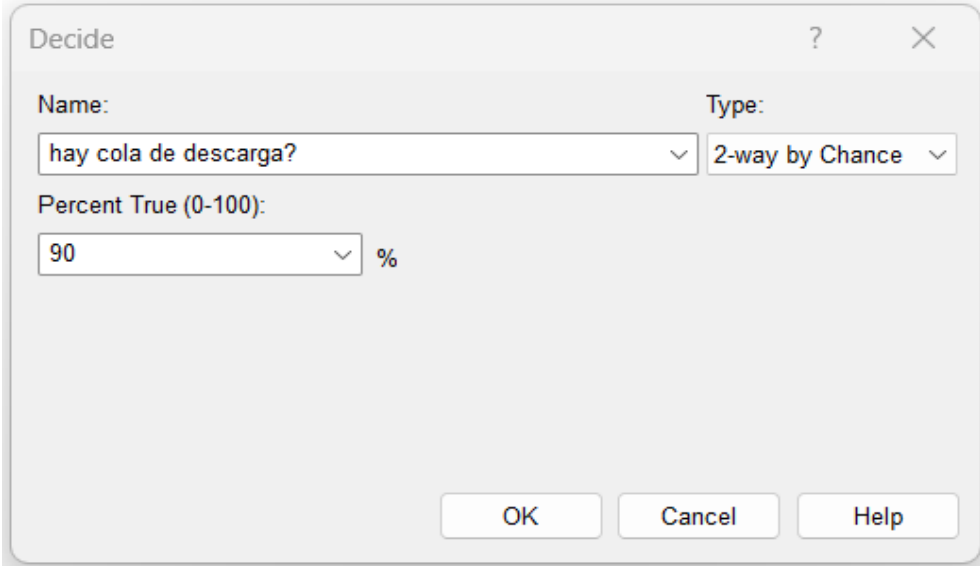
At the bottom of the dialog box are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

El módulo "Create" en Arena se utiliza para generar entidades, en este caso, Volquetes de mina para transporte de material mineral, con parámetros que incluyen el tipo de entidad, el número de entidades a crear, la frecuencia de llegada, el período de tiempo y

la capacidad de espera. Utilizando estos parámetros, puedes simular la llegada de los Volquetes al sistema y analizar su impacto en el proceso de transporte.

Figura 13

Configuración del módulo decide



The image shows a screenshot of the 'Decide' module configuration window in the Arena simulation software. The window has a title bar with the text 'Decide' and standard window controls (minimize, maximize, close). Inside the window, there are three main input fields: 'Name:', 'Type:', and 'Percent True (0-100):'. The 'Name:' field contains the text 'hay cola de descarga?'. The 'Type:' field contains the text '2-way by Chance'. The 'Percent True (0-100):' field contains the text '90'. Below these fields, there are three buttons: 'OK', 'Cancel', and 'Help'.

El módulo "Decide" en Arena se utiliza para tomar decisiones basadas en condiciones específicas, como el estado de la scooptram (ocupada o desocupada) y la existencia de Volquetes en espera. Estas decisiones pueden influir en el flujo de trabajo y la eficiencia de la simulación del proceso de carga en la mina.

Figura 14

Configuración del módulo delay

Process

Name: Type:

Logic

Action:

Delay Type: Units: Allocation:

Minimum: Maximum:

☒ Report Statistics

OK Cancel Help

Figura 15

Configuración del módulo process de carguio de mineral

Process

Name: Type:

Logic

Action:

Delay Type: Units: Allocation:

Minimum: Maximum:

☒ Report Statistics

OK Cancel Help

El módulo "Delay" simula el tiempo de carga del material mineral en los volquetes. Es importante ajustar los parámetros de cada módulo según las características específicas de tu proceso de transporte de material mineral y los datos disponibles sobre el rendimiento de la operación.

Figura 16

Configuración del módulo process transporte de volquete cargado

The screenshot shows a 'Process' dialog box with the following configuration:

- Name:** transporte de volquete cargado
- Type:** Standard
- Logic:**
 - Action:** Seize Delay
 - Priority:** Medium(2)
- Resources:**
 - Resource, camion, 1
 - <End of list>
- Buttons:** Add..., Edit..., Delete
- Delay Type:** Uniform
- Units:** Minutes
- Allocation:** Value Added
- Minimum:** 28
- Maximum:** 35
- Report Statistics:** ☒
- Buttons:** OK, Cancel, Help

Utilizando estos dos módulos en secuencia, puedes modelar eficazmente el proceso de transporte de material mineral en la simulación. El módulo "Process Seize" adquiere los recursos necesarios (volquetes), y el módulo "Delay" simula el tiempo de carga del material mineral en los Volquetes. Es importante ajustar los parámetros de cada módulo según las

características específicas de tu proceso de transporte de material mineral y los datos disponibles sobre el rendimiento de la operación.

Figura 17

Configuración del módulo process (delay) descarga de material.

The image shows a software dialog box titled "Process". It contains the following fields and controls:

- Name:** A dropdown menu with the text "descarga de material".
- Type:** A dropdown menu with the text "Standard".
- Logic:** A section containing an **Action:** dropdown menu with the text "Delay".
- Delay Type:** A dropdown menu with the text "Uniform".
- Units:** A dropdown menu with the text "Minutes".
- Allocation:** A dropdown menu with the text "Value Added".
- Minimum:** A text input field containing the number "1".
- Maximum:** A text input field containing the number "3".
- Report Statistics:** A checkbox that is checked.
- Buttons:** "OK", "Cancel", and "Help" buttons at the bottom right.

Figura 18

Configuración del módulo Process retorno a mina

Process

Name: retorno a mina Type: Standard

Logic

Action: Delay Release

Resources:

- Resource, camion, 1
- <End of list>

Add... Edit... Delete

Delay Type: Uniform Units: Minutes Allocation: Value Added

Minimum: 20 Maximum: 30

☒ Report Statistics

OK Cancel Help

Figura 19

Configuración del módulo create de llegada de scoop

Create

Name: llegada de scoop Entity Type: scoop

Time Between Arrivals

Type: Expression Expression: UNIF(9 , 11) Units: Minutes

Entities per Arrival: 1 Max Arrivals: 7 First Creation: 0.0

OK Cancel Help

Figura 20

Configuración del módulo process de carguío de material a pala

Process

Name: Type:

Logic

Action: Priority:

Resources:

Resource, scooptram, 1	Add... Edit... Delete
<End of list>	

Delay Type: Units: Allocation:

Value:

☒ Report Statistics

OK Cancel Help

Figura 21

Configuración del módulo process de vuelta a labor

Process

Name: Type:

Logic

Action:

Resources:

Resource, scooptram, 1	Add... Edit... Delete
<End of list>	

Delay Type: Units: Allocation:

Value:

☒ Report Statistics

OK Cancel Help

4.2.3 Tiempos de carga, transporte y descarga de mineral

Después de haber recopilado los datos de campo y analizado los tiempos de producción, se procedió a cumplir el segundo objetivo, que consistía en la implementación y ejecución de simulaciones utilizando el software Arena. Para alcanzar este objetivo, se definieron parámetros de simulación, como se detallan en las tablas 1 y 2, que representan los tiempos de los procesos realizados en las labores de extracción de mineral. A continuación, se desarrolló un modelo de simulación basado en la información recopilada, utilizando el software Arena, con el fin de analizar los tiempos de manera general de los equipos involucrados en el proceso. Entre los datos ingresados al software se incluyeron los tiempos de llegada, los tiempos de acarreo y los tiempos muertos. En las tablas 3 a 11 se presentan los datos registrados correspondientes a los tiempos del sistema, los cuales fueron utilizados como insumos para la simulación y análisis subsiguiente.

4.2.4 Escenario a una distancia de 3800 metros

TABLA 3

TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 18 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
18	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.58	270
18	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.86	270
18	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.02	270

TABLA 4**TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 20 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM**

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
20	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.82	270
20	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.14	270
20	8	1-3 in	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.26	270

TABLA 5**TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 22 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM**

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
22	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.98	270
22	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.28	270
22	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.42	270

4.2.5 Escenario a una distancia de 4700 metros**TABLA 6****TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 18 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM**

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
18	6	2-5 min	9- 11 min	32- 40 min	1-3 min	1-3 min	25-35 min	12.18	270
18	7	1-4 min	7- 9 min	32- 40 min	1-3 min	1-3 min	25-35 min	12.25	270
18	8	1-3 min	7- 9 min	32- 40 min	1-3 min	1-3 min	25-35 min	12.43	270

TABLA 7

TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 20 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
20	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.43	270
20	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.65	270
20	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.71	270

TABLA 8

TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 22 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
22	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.68	270
22	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.73	270
22	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	12.82	270

4.2.6 Escenario a una distancia de 5300 metros

TABLA 9

TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 18 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
18	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.02	270
18	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.16	270
18	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.72	270

TABLA 10

TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 20 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
20	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.38	270
20	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.70	270
20	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.96	270

TABLA 11

TIEMPOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN 22 VOLQUETES Y 6,7,8 SCOOPTRAM

N° de Volquetes	N° de Scooptram	Tiempo de carga	Tiempo de espera en carga	Tiempo de transporte	Tiempo de espera en descarga	Tiempo de descarga	Tiempo de retorno a mina	N° de ciclos por día	Carga por camión (tn)
22	6	2-5 min	9- 11 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.58	270
22	7	1-4 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	13.76	270
22	8	1-3 min	7- 9 min	28- 35 min	1-3 min	1-3 min	20-30 min	14.08	270

4.2.7 Escenarios para la flota en el proceso de transporte de mineral

En el escenario actual, la operación se lleva a cabo utilizando 7 Scooptrams y 20 volquetes mineros. Los tiempos asociados a las diferentes etapas del proceso de transporte y carga varían dentro de un rango específico: el tiempo de llegada de los volquetes oscila entre 1 y 4 minutos, el tiempo de carga entre 1 y 4 minutos, mientras que el tiempo de espera en la zona de carga varía entre 7 y 9 minutos. El transporte del mineral hacia la zona de acopio, que implica recorrer distancias específicas, requiere entre 28 y 35 minutos, seguido de un tiempo de espera en la zona de descarga de 1 a 3 minutos. El tiempo de descarga es de entre 1 y 3 minutos, y finalmente, el tiempo de retorno a la mina varía entre 20 y 30 minutos. Estos tiempos se detallan en la Tabla 4, la cual muestra la variación en el número de Scooptrams y volquetes para diferentes configuraciones operativas.

Escenario simulado: 18 Volquetes con 6 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 12,58 ciclos por día

Escenario simulado: 18 Volquetes con 7 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 12,86 ciclos por día.

Escenario simulado: 18 Volquetes con 8 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13,02 ciclos por día

Escenario simulado: 20 Volquetes con 6 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.

- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 12,82 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 7 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13,14 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 8 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.

- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13,26 ciclos por día

Escenario simulado: 22 Volquetes con 6 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 12,98 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 7 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.

- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13,28 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 8 Scooptrams a 3800 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13,42 ciclos por día

Escenario simulado: 18 Volquetes con 6 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.18 ciclos por día

Escenario simulado: 18 Volquetes con 7 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.25 ciclos por día

Escenario simulado: 18 Volquetes con 8 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.43 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 6 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.

- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.43 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 7 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.65 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 8 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.

- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.71 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 6 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.68 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 7 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.

- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.73 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 8 Scooptrams a 4700 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 32 a 40 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 25 a 35 minutos.
- Producción estimada: 12.82 ciclos por día.

Escenario simulado: 18 Volquetes con 6 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.

- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.02 ciclos por día.

Escenario simulado: 18 Volquetes con 7 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.16 ciclos por día.

Escenario simulado: 18 Volquetes con 8 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.72 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 6 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.38 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 7 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.70 ciclos por día.

Escenario simulado: 20 Volquetes con 8 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.

- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.96 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 6 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de carga: 2 a 5 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 9 a 11 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.58 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 7 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 4 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.

- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 13.76 ciclos por día.

Escenario simulado: 22 Volquetes con 8 Scooptrams a 5300 metros de distancia

- Tiempo entre llegadas: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de carga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de espera en la carga: 7 a 9 minutos.
- Tiempo de transporte: 28 a 35 minutos.
- Tiempo de espera en la descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de descarga: 1 a 3 minutos.
- Tiempo de retorno a la mina: 20 a 30 minutos.
- Producción estimada: 14.08 ciclos por día.

4.3 Discusión

La simulación de eventos discretos ha demostrado ser una herramienta clave para optimizar la eficiencia operativa en la unidad minera Andaychagua. Los resultados obtenidos

permiten un análisis detallado de las diferentes etapas del proceso de transporte de mineral, desde la carga hasta el retorno a la mina. La simulación no solo proporciona una visión precisa y dinámica del ciclo de transporte, sino que también destaca áreas críticas donde se concentran los tiempos improductivos, particularmente en los periodos de espera durante la carga y descarga, así como en el retorno de los volquetes a la mina.

Los escenarios simulados para diferentes configuraciones de flotas y distancias de transporte, como los de 3800, 4700 y 5300 metros, revelan que los tiempos de transporte y retorno a la mina incrementan significativamente conforme aumenta la distancia. Por ejemplo, al comparar los escenarios de 18 volquetes con 6 y 8 scooptrams, se observa que los tiempos de transporte y retorno en distancias de 5300 metros alcanzan hasta 35 minutos, lo que reduce el número de ciclos por día, afectando directamente la producción. Esto subraya la importancia de optimizar el número de scooptrams en función de la distancia para minimizar los tiempos improductivos.

Además, los resultados de la simulación muestran que el aumento en el número de scooptrams tiene un impacto positivo en la producción, pero con un rendimiento decreciente conforme se incrementa el número de volquetes. Por ejemplo, al comparar los escenarios de 22 volquetes con 6, 7 y 8 scooptrams en una distancia de 3800 metros, la producción diaria varía de 12.98 a 13.42 ciclos por día, lo que sugiere que, si bien añadir scooptrams mejora los tiempos de carga, la ganancia en términos de ciclos adicionales es marginal. Esto indica que un equilibrio entre la cantidad de volquetes y scooptrams es esencial para evitar cuellos de botella en el proceso.

La identificación de estos puntos críticos permite proponer estrategias para reducir los tiempos improductivos en cada etapa del proceso. Por ejemplo, para distancias superiores a 4700 metros, la combinación óptima de 22 volquetes y 8 scooptrams ha demostrado maximizar la producción a 14.08 ciclos por día. Esta combinación de equipos resulta en una mejora sustancial en la eficiencia operativa comparada con configuraciones de menor capacidad, destacando la importancia de ajustar el tamaño de la flota a las necesidades específicas del proceso y la distancia a cubrir.

Finalmente, la simulación ha permitido determinar que una de las áreas clave de mejora es la reducción de los tiempos de espera en la zona de descarga y durante el retorno a la mina, lo cual afecta la productividad general del ciclo de transporte. Estas observaciones resaltan la necesidad de implementar acciones correctivas, tales como una mayor sincronización entre los tiempos de carga y descarga y la optimización de rutas, lo que puede resultar en una mejora significativa en la eficiencia operativa de la mina Andaychagua.

CONCLUSIONES

La simulación de eventos discretos fue eficaz para optimizar la flota de transporte en la unidad minera Andaychagua. A través de la evaluación de diferentes escenarios, se logró identificar configuraciones óptimas de volquetes y Scooptrams para distancias de hasta 5300 metros. En particular, la configuración de 22 volquetes con 8 Scooptrams resultó ser la más eficiente, alcanzando una producción de 14.08 ciclos por día, lo que representa un incremento de aproximadamente 12.1% en comparación con configuraciones subóptimas. Este hallazgo confirma que la simulación es una herramienta valiosa para ajustar dinámicamente la flota de transporte.

La simulación permitió modelar con precisión los tiempos de cada fase del ciclo de transporte. Para distancias de 3800 metros, la configuración de 18 volquetes con 8 Scooptrams logró una producción de 13.02 ciclos por día, que es un 5.6% mayor que la configuración de 18 volquetes con 6 Scooptrams. Estos resultados demuestran que incrementar el número de Scooptrams reduce significativamente los tiempos de espera en la carga y optimiza el proceso global.

Los tiempos improductivos fueron más notables en la espera durante la carga y en el retorno a la mina. En los escenarios de 4700 metros, el uso de 20 volquetes y 7 Scooptrams redujo el tiempo improductivo en un 7.4% en comparación con configuraciones de menor capacidad de scooptrams. La clave para minimizar estos tiempos fue aumentar la cantidad de Scooptrams, lo que redujo la espera en la zona de carga y permitió ciclos más eficientes.

Según los escenarios simulados, se concluye que el número óptimo de volquetes y Scooptrams varía según la distancia. Para distancias de 5300 metros, la configuración de 22 volquetes con 8 Scooptrams demostró ser la más eficiente, permitiendo un total de 14.08 ciclos por día, que es 3.2% superior al uso de 22 volquetes con 6 Scooptrams. Este ajuste logra un equilibrio adecuado entre el número de volquetes y la capacidad de carga, maximizando la producción diaria.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar de manera periódica la simulación de eventos discretos como una herramienta de planificación operativa para ajustar la flota de transporte en función de las condiciones cambiantes de la operación minera. Esto permitirá seguir optimizando la eficiencia operativa y garantizar un uso adecuado de los recursos, especialmente en distancias superiores a **5300 metros**, donde la configuración de **22 volquetes y 8 Scooptrams** ha demostrado ser la más eficiente.

Para distancias de **3800 metros**, se sugiere aumentar la cantidad de Scooptrams a 8 unidades cuando se operen con **18 volquetes**, ya que esta configuración incrementa la producción en un **5.6%**. Este ajuste permitirá minimizar los tiempos de espera durante la carga y optimizar la operación, asegurando que el proceso de transporte de mineral se realice de manera más eficiente.

Con el fin de reducir los tiempos improductivos, especialmente en distancias de **4700 metros**, se recomienda operar con **20 volquetes y 7 Scooptrams**. Esta configuración reduce los tiempos de espera y optimiza el retorno de los volquetes a la mina, generando un **7.4%** menos de tiempos muertos. Es crucial monitorear constantemente las operaciones para ajustar el equipo según los requerimientos de la mina y las distancias de transporte.

En distancias superiores a **5300 metros**, se recomienda mantener la configuración de **22 volquetes con 8 Scooptrams** como la opción más eficiente, ya que permite un incremento del **3.2%** en la cantidad de ciclos diarios en comparación con configuraciones de menor capacidad. Esta estrategia permitirá maximizar la producción diaria y mantener los costos operativos bajo control, ajustándose a las necesidades específicas de la operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Añazco, L. (2017). Caracterización Geomecánica y Diseño de Taludes en la Cantera "Calizas Huayco." Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Barceló, J. (1996). Simulación de Sistemas Discretos. Madrid: Isdefe.
- Bedon, M., & Omar, C. (2005). Aplicación de la Simulación para la Simulación del Acarreo de Mineral. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Cetin, N., Erarslan, K., & Okuducu, A. (2001). Computer simulation of track/shovel system at Tuncbilek coal mine using GPSS/H. Proceedings of the Seventeenth International Mining Congress and Exhibition of Turkey, 0–715.
- Dindarloo, S. R., Osanloo, M., & Frimpong, S. (2015). A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 115(March), 209–219.
- García, Á., & Ortega, M. (2006). Introducción a la Simulación de Sistemas Discretos.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). Open pit mine. Planning and design. Volume 1 (3rd Editio). Utah: CRC Press.
- Land, M. (2004). Capítulo 5. - Simulación en Software Rockwell Arena.
- Maxera, C. O. (2005). Aplicación de la Simulación para la Optimización del Acarreo de Mineral (Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/978380?origin=crossref>
- 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.

Mina, A. (2016). Propuesta de Optimización del Sistema de Carga y Transporte en una Cantera de Calizas Ubicada en el Km 12 ½ Vía a la Costa. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Noriega, R. (2017). Aplicación de Modelos Matemáticos para la Predicción de Vibraciones Inducidas por Voladuras en una Explotación de Calizas en Proximidad a Zonas Urbanas. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Sturgul, J. R. (2000). Mine Design: Examples Using Simulation. Moscow: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.

Sturgul, J. R. (2016). Discrete Simulation and Animation for Mining Engineers. Boca Raton: CRC Press.

Tiile, R., Kaba, F., Aouad, N., & Arthur, F. (2016). Shovel-Truck Haulage Analysis Using Stochastic Discrete Event Simulation. International Journal of Science and Research (IJSR), 5(11), 495–500. <https://doi.org/10.21275/ART20162683>

Upadhyay, S. P. (2016). Simulation Optimización of Mine Operation for Uncertainty Based Short and Operational Planning in Open Pit Mines. University of Alberta.

Valle Flores, P., Acosta Vera, A., Salvatierra Ron, C., & Santos, E. (2012). Agregados Utilizados en Obras Civiles Extraídos de la Cantera San Luis (Vol. 1). Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Villacis, I., & Calle, J. (2000). Capítulo 2: Geología Y Suelo. Retrieved from [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6740/7/CAPITULO 2.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6740/7/CAPITULO%202.pdf)

LISTA DE ABREVIATURAS

SED: Simulación de Eventos Discretos

FT: Flota de Transporte

MM: Material Mineral

OPT: Optimización

MOD: Modelado

AS: Análisis de Sensibilidad

OE: Eficiencia Operativa

TC: Tiempo de Ciclo

CC: Capacidad de Carga

RT: Ruta de Transporte

PFT: Planificación de Flota

EE: Eficiencia Energética

PROD: Productividad

ORM: Optimización de Recursos

VM: Validación del Modelo

OPM: Optimización de la Programación de Mantenimiento

CI: Control de Inventarios

MC: Minimización de Costos

MU: Maximización de Utilidades

GLOSARIO

Simulación de Eventos Discretos (SED): Método computacional que modela el comportamiento de un sistema a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta eventos individuales que ocurren en momentos discretos.

Optimización: Proceso de encontrar la mejor solución posible para un problema, generalmente maximizando o minimizando una función objetivo, como el costo o el tiempo.

Flota de Transporte: Conjunto de vehículos utilizados para transportar material o bienes de un lugar a otro.

Material Mineral: Sustancias naturales extraídas de la tierra que contienen metales u otros elementos valiosos, como oro, cobre, hierro, etc.

Modelado de Sistemas: Proceso de representar un sistema real o hipotético con un conjunto de modelos matemáticos y lógicos para comprender su comportamiento y realizar predicciones.

Eficiencia Operativa: Capacidad de un sistema para maximizar la producción y minimizar los costos y los tiempos de inactividad.

Capacidad de carga: Máxima cantidad de material que puede ser transportado por un vehículo o equipo de transporte en una sola operación.

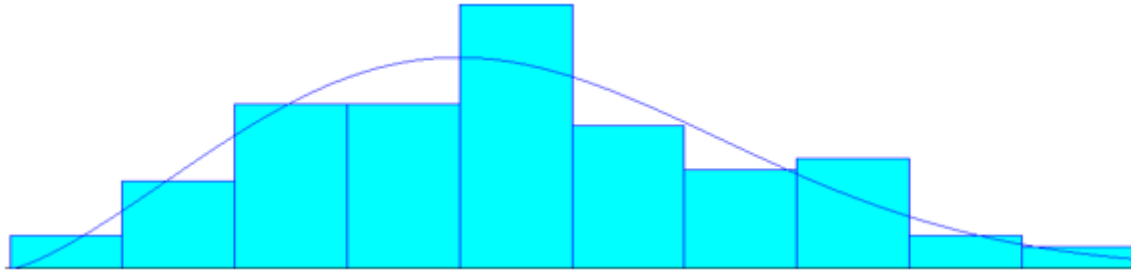
Tiempo de Ciclo: Duración total de un ciclo completo de transporte, desde la carga del material hasta su descarga en el destino.

Optimización de Ruta: Proceso de encontrar las mejores rutas de transporte para minimizar la distancia recorrida y maximizar la eficiencia del transporte.

Planificación de Flotas: Diseño y gestión estratégica de la flota de transporte para cumplir con los requisitos de operación de manera eficiente y rentable.

Validación y Verificación: Proceso de asegurar que un modelo de simulación sea preciso y confiable, mediante la comparación de los resultados simulados con datos reales o expectativas conocidas.

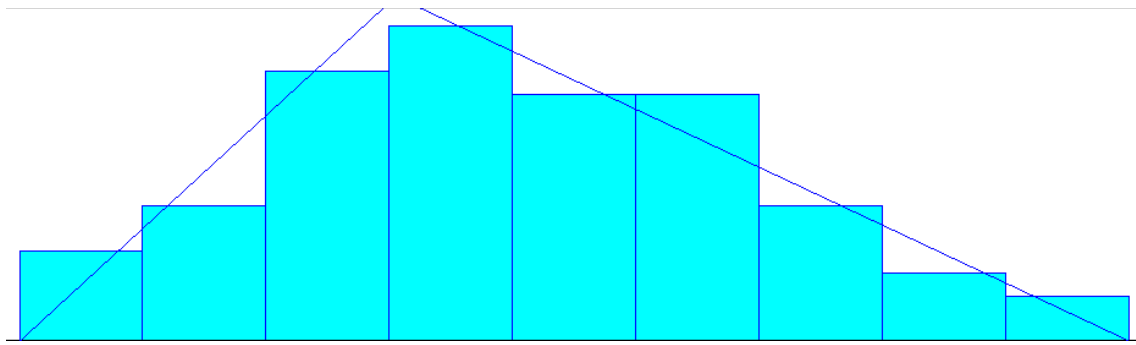
5 ANEXOS



Anexo A.1. Histograma de tiempos de posicionamiento del volquete en el frente de explotación

Distribution Summary	
Distribution:	Weibull
Expression:	12 + WEIB(32.9, 2.33)
Square Error:	0.006299
Chi Square Test	
Number of intervals	= 7
Degrees of freedom	= 4
Test Statistic	= 4.14
Corresponding p-value	= 0.403
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0418
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 102
Min Data Value	= 12.7
Max Data Value	= 76.9
Sample Mean	= 41.3
Sample Std Dev	= 13.2
Histogram Summary	
Histogram Range	= 12 to 77
Number of Intervals	= 10

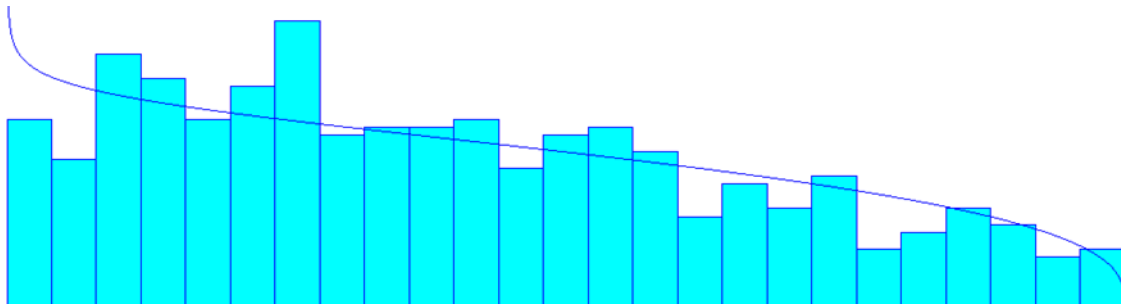
Anexo A.2. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo de posicionamiento del volquete en el frente de explotación



Anexo A.3: Histograma de tiempo de posicionamiento de la scooptram en el frente de explotación

Distribution Summary	
Distribution:	Triangular
Expression:	TRIA(13, 31.3, 67)
Square Error:	0.002238
Chi Square Test	
Number of intervals	= 6
Degrees of freedom	= 4
Test Statistic	= 0.69
Corresponding p-value	> 0.75
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0775
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 69
Min Data Value	= 13.3
Max Data Value	= 66.1
Sample Mean	= 37.1
Sample Std Dev	= 11.7
Histogram Summary	
Histogram Range	= 13 to 67
Number of Intervals	= 9

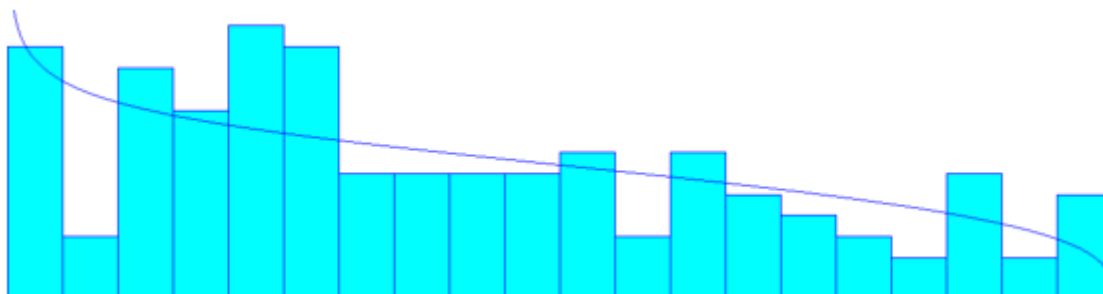
Anexo A.4. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo de posicionamiento de la scooptram en el frente de explotación



Anexo A.5. Histograma de tiempos de carga de la scooptram

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$17 + 8 * \text{BETA}(0.935, 1.36)$
Square Error:	0.002371
Chi Square Test	
Number of intervals	= 24
Degrees of freedom	= 21
Test Statistic	= 23
Corresponding p-value	= 0.354
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 19.8
Corresponding p-value	< 0.01
Data Summary	
Number of Data Points	= 457
Min Data Value	= 17
Max Data Value	= 25
Sample Mean	= 20.2
Sample Std Dev	= 2.09
Histogram Summary	
Histogram Range	= 17 to 25
Number of Intervals	= 25

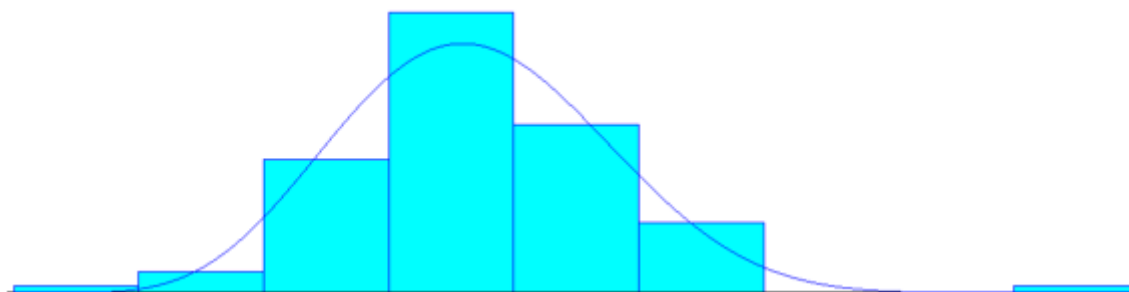
Anexo A.6. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo carga de material de la scooptram



Anexo A.7. Histograma de tiempos de carga de la scooptram

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$17 + 8 * \text{BETA}(0.877, 1.31)$
Square Error:	0.008049
Chi Square Test	
Number of intervals	= 9
Degrees of freedom	= 6
Test Statistic	= 4.56
Corresponding p-value	= 0.604
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 20.7
Corresponding p-value	< 0.01
Data Summary	
Number of Data Points	= 128
Min Data Value	= 17
Max Data Value	= 24.8
Sample Mean	= 20.2
Sample Std Dev	= 2.2
Histogram Summary	
Histogram Range	= 17 to 25
Number of Intervals	= 20

Anexo A.8. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo carga de material de la scooptram

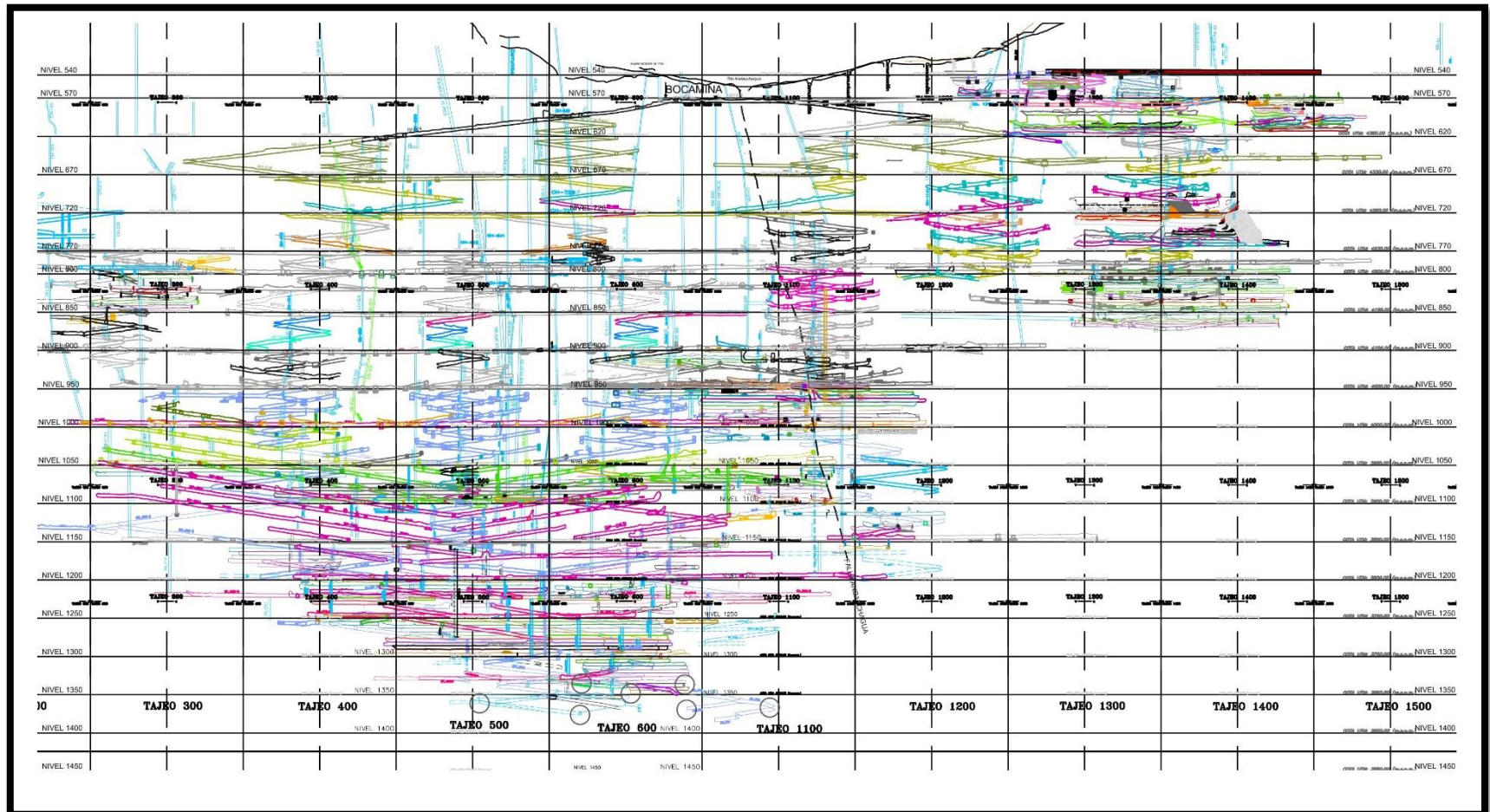


Anexo A.9. Histograma de tiempos de posicionamiento de la scooptram en la zona de descarga

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	$19 + 31 * \text{BETA}(7.07, 10.2)$
Square Error:	0.004685
Chi Square Test	
Number of intervals	= 4
Degrees of freedom	= 1
Test Statistic	= 1.33
Corresponding p-value	= 0.249
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0551
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 98
Min Data Value	= 19.6
Max Data Value	= 49.1
Sample Mean	= 31.7
Sample Std Dev	= 3.87
Histogram Summary	
Histogram Range	= 19 to 50
Number of Intervals	= 9

Anexo A.10. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de posicionamiento de la scooptram en la zona de descarg

ANEXO B: Plano General de la Unidad Minera Andaychagua

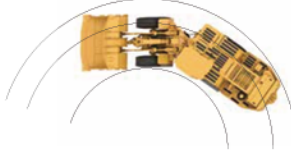


ANEXO C: Especificaciones técnicas de scooptram R 1600H

Especificaciones del Cargador Subterráneo para Minería R1600H

Motor		
Modelo de motor	Cat® C11	
Potencia del motor: motor con reducción de ventilación (VR) – ISO 14396:2002	202 kW	271 hp
Potencia del motor: motor Tier 3 de la EPA de EE.UU., ISO 14396:2002	202 kW	271 hp
Calibre	130 mm	5.1"
Carrera	140 mm	5.5"
Cilindrada	11,1 L	680,4"
- Las clasificaciones de potencia corresponden a una velocidad nominal de 1.800 rpm cuando se prueban según las condiciones de referencia para la norma especificada. - Todas las condiciones de clasificación se basan en ISO/TR14396:2002, condiciones normales de aire de admisión con una presión barométrica total de 100 kPa (29.5 pulg Hg), con una presión de vapor de 1 kPa (0.295" Hg) y 25 °C (77 °F). El rendimiento se midió con combustible según las especificaciones de la EPA en el título 40 del CFR (Code of Federal Regulations, Código de Regulaciones Federales), Parte 1065, y especificaciones de la Unión Europea en la Directiva 97/68/CE con una densidad de 0.845 a 0.850 kg/L a 15 °C (59 °F) y una temperatura de entrada del combustible de 40 °C (104 °F). - No se requiere reducción de potencia del motor hasta 3.048 m (10.000') para el motor Tier 3 y 1.828 m (6.000') para el motor VR. - Paquete de reducción de ventilación optativo disponible. - También se ofrece un motor optativo con emisiones equivalentes a Tier 3 de la EPA de EE.UU./Stage IIIA de la UE.		
Especificaciones de operación		
Capacidad de carga útil nominal	10.200 kg	22.487 lb
Peso bruto de la máquina	44.204 kg	97.453 lb
Brazos de levantamiento horizontal rectos hacia delante de carga de equilibrio estático	25.905 kg	57.110 lb
Brazos de levantamiento horizontal de giro pleno y de carga de equilibrio estático	21.803 kg	46.067 lb
Fuerza de desprendimiento (ISO), inclinación	17.928 kg	39.524 lb
Fuerza de desprendimiento (ISO), levantamiento	19.202 kg	42.333 lb
Pesos		
Peso en orden de trabajo*	30.150 kg	66.469 lb
Eje delantero	12.884 kg	28.404 lb
Eje trasero	17.266 kg	38.065 lb
Peso en orden de trabajo + carga útil nominal*	40.350 kg	88.956 lb
Eje delantero	28.128 kg	62.011 lb
Eje trasero	12.222 kg	26.944 lb
* Peso calculado.		
Transmisión		
Avance 1	4,5 km/h	2,8 mph
Avance 2	9 km/h	5,6 mph
Avance 3	16,8 km/h	10,4 mph
Avance 4	27,5 km/h	17,1 mph
Retroceso 1	5 km/h	3,1 mph
Retroceso 2	11 km/h	6,8 mph
Retroceso 3	19 km/h	11,8 mph
Retroceso 4	29,3 km/h	18,2 mph

Tiempo de ciclo hidráulico		
Levantamiento	7,6 segundos	
Descarga	1,6 segundos	
Descenso, vacío, libre	2 segundos	
Tiempo total de ciclo	11,2 segundos	
Capacidades del cucharón		
Cucharón del camión: 1	4,2 m³	5,5 yd³
Cucharón de descarga: 2 (cucharón estándar)	4,8 m³	6,3 yd³
Cucharón de descarga: 3	5,6 m³	7,3 yd³
Cucharón del camión: 4	5,9 m³	7,7 yd³
Cucharón expulsor	4,8 m³	6,3 yd³
Cucharón empuñado	5,3 m³	6,9 yd³
Dimensiones de giro		
Radio de espacio libre exterior*	6.638 mm	261,3"
Radio de espacio libre interior*	3.291 mm	129,6"
Oscilación del eje	10°	
Ángulo de articulación	42,5°	
*Las dimensiones de espacio libre se usan solo como referencia.		



Neumáticos		
Tamaño del neumático	18 × R25	
Capacidades de llenado de servicio		
Cárter del motor con filtro	34 L	8,98 gal EE.UU.
Transmisión	47 L	12,4 gal EE.UU.
Tanque hidráulico	125 L	33 gal EE.UU.
Sistema de enfriamiento	61 L	16,1 gal EE.UU.
Diferencial y mandos finales delanteros	80 L	21,1 gal EE.UU.
Diferencial y mandos finales traseros	80 L	21,1 gal EE.UU.
Tanque de combustible	400 L	105,7 gal EE.UU.
Tanque de combustible secundario (si tiene)	330 L	87,2 gal EE.UU.
Normas		
Cabinas certificadas con Estructura de Protección en Caso de Vuelcos (ROPS)/Estructura de Protección contra la Caída de Objetos (FOPS)		

Dimensiones

Todas las dimensiones son aproximadas.

	514-5710 Cucharón de descarga		203-1792 Cucharón de descarga		227-4704 Cucharón de descarga		514-5720 Cucharón de descarga		260-5198 Cucharón expulsor		598-8733 Cucharón empuñado	
Capacidad del cucharón	4,2 m³	5,5 yd³	4,8 m³	6,3 yd³	5,6 m³	7,3 yd³	5,9 m³	7,7 yd³	4,8 m³	6,3 yd³	5,3 m³	6,9 yd³
	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg
Ancho del cucharón sobre la cuchilla	2.600	102,4	2.600	102,4	2.600	102,4	2.900	114,2	2.600	102,4	3.042	120
1 Altura: cucharón levantado	5.204	204,9	5.204	204,9	5.282	208,0	5.282	208,0	5.385	212,0	5.182	204
2 Altura máxima de descarga	4.497	177,0	4.497	177,0	4.497	177,0	4.497	177,0	4.565	179,7	4.497	177,0
3 Altura: pasador del cucharón a levantamiento máximo	3.752	147,7	3.752	147,7	3.752	147,7	3.752	147,7	3.752	147,7	3.757	148
4 Altura: espacio libre de descarga en levantamiento máximo	2.365	93,1	2.207	86,9	2.042	80,4	2.095	82,5	2.120	83,5	2.190	86
5 Altura: profundidad de excavación	24	0,9	39	1,5	54	2,1	47	1,9	47	1,9	76	3
6 Altura: espacio libre sobre el suelo	344	13,5	344	13,5	344	13,5	344	13,5	344	13,5	344	14
7 Altura: parte superior del capó	1.895	74,6	1.895	74,6	1.895	74,6	1.895	74,6	1.895	74,6	1.895	75
8 Altura: parte superior de la ROPS	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94
9 Longitud: total (excavación)	9.865	388,4	10.107	397,9	10.347	407,4	10.270	404,3	10.233	402,9	10.118	398
10 Longitud: total (acarreo)	9.570	376,8	9.711	382,3	9.853	387,9	9.805	386,0	9.948	391,7	9.881	389
11 Longitud: distancia entre ejes	3.536	139,2	3.536	139,2	3.536	139,2	3.536	139,2	3.536	139,2	3.536	139
12 Longitud: desde el eje delantero hasta el enganche	1.768	69,6	1.768	69,6	1.768	69,6	1.768	69,6	1.768	69,6	1.768	70
13 Largo: desde el eje trasero hasta el parachoques	3.055	120,3	3.055	120,3	3.055	120,3	3.055	120,3	3.055	120,3	3.055	120
14 Longitud: alcance	1.255	49,4	1.408	55,4	1.573	61,9	1.530	60,2	1.495	58,9	1.433	56
15 Ancho: total entre neumáticos	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94,5	2.400	94
16 Ancho: máquina sin cucharón	2.564	100,9	2.564	100,9	2.564	100,9	2.564	100,9	2.564	100,9	2.564	101
17 Ancho: máquina con cucharón	2.723	107,2	2.723	107,2	2.723	107,2	2.965	116,7	2.723	107,2	3.042	120
18 Ancho de espacio libre recomendado	3.500	137,8	3.500	137,8	3.500	137,8	3.500	137,8	3.500	137,8	3.500	138
19 Altura de espacio libre recomendada	3.000	118,1	3.000	118,1	3.000	118,1	3.000	118,1	3.000	118,1	3.000	118

ANEXO D: Especificaciones técnicas del Volquete FMX 6X4



VOLVO FMX 6X4R
VOCACIONAL
380/420/460/500 CV



Volvo Trucks. Acelerando el futuro.

✓ 13 LITROS	✓ CABINA EXTENDIDA TECHO NORMAL	✓ CAJA I-SHIFT CON SOFT HD	✓ AIRBAG	✓ EJE CON REDUCTOR DE CUBOS
-------------	------------------------------------	----------------------------	----------	--------------------------------

DATOS TÉCNICOS

MOTOR
Modelo: VOLVO D13C Euro 5
Características: 12,8 lts, 6 cilindros en línea y 4 válvulas por cilindro. Unidades individuales de inyector bomba. Sistema de inyección con gerenciamento electrónico.
Potencias: 380 / 420 / 460 / 500 CV (1.400 a 1.900 rpm)
Torques: 1.900 / 2.100 / 2.300 / 2.500 Nm (1.000 a 1.400 rpm)

CAJA DE VELOCIDADES
Modelo: Volvo AT2612F
Tipo: Automatizada sin sincronizados
Sistema: I-Shift con soft HD
Marchas: 12 Velocidades (14,94:1 - 1:1)
Opcional: I-Shift de 14 marchas, 12 + 2 super reducidas (32,04:1 / 19,38:1)

SUSPENSIÓN DELANTERA
Tipo: Ballestas parabólicas con amortiguadores y barra estabilizadora.
Capacidad: 7.500 a 10.000 kg

FRENOS
Tipo: A tambor con ABS, EBS y control de tracción.
Freno auxiliar: Freno de motor VEB a través de válvulas de 410 CV (para 380/420) o VEB+ de 510 CV (para 460/500)
Opcional: Retardador Hidráulico

TANQUES DE COMBUSTIBLE
Tipo: Rectangular plástico.
Capacidad: 400 lts

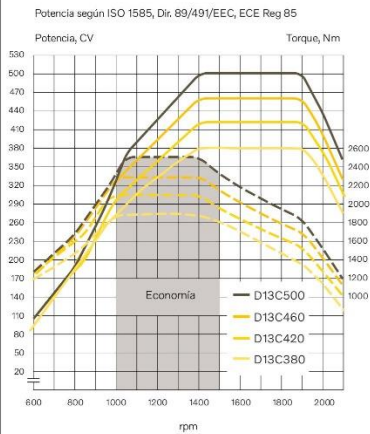
DIFERENCIAL
Modelo: RTH3210F con red. de cubos.
Relación de reducción: 3,33 / 3,46 / 3,61 / 3,76 / 3,97 / 4,12 / 4,55 / 5,41 / 6,18 / 7,21
Capacidad de arrastre: 100 Ton*
*(consultar para mayores capacidades)
Opcional: RTS2370 sin red. de cubos

SUSPENSIÓN TRASERA
Tipo: Ballestas semielípticas con amortiguadores y barra estabilizadora.
Capacidad: 26.000 a 32.000 kg
Opcional: Parabólica o neumática de 8 fuelles (21.000 a 26.000 kg)

CHASIS
Material: Acero especial LNE60 de alta resistencia y bajo peso, con refuerzo interno.
Altura: 300 mm.
Ala: 90 mm
Espesor + refuerzo: 9 + 5 mm

NEUMÁTICOS Y LLANTAS
Neumáticos: 12R20
Llantas: Acero

D13C Potencia/Torque



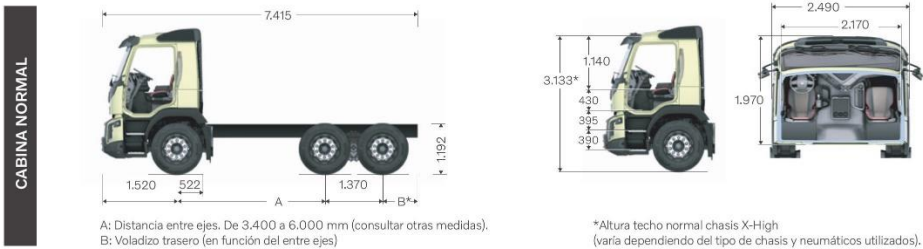
PESOS Y CAPACIDADES (Kg)

	Eje delantero	Eje trasero	Total
Capac. técnica	7500 a 10.000	21.000 a 32.000	28.500 a 42.000
Límite legal	6.000	18.000	24.000
Peso del chasis*	5.031	4.557	9.588

*Pesos estimados con 100 lts de combustible, sin chofer y con rueda de auxilio. Llantas de acero, frenos a tambor, cabina extendida techo normal y eje RTH 3210F. Distancia entre ejes 3.700 mm. Para eje sin reductor RTS 2370 restar 150 Kg.

MEDIDAS

Cabina FMX: Cabina extendida techo normal, con paragolpes de acero y mayor ángulo de ataque especialmente diseñado para trabajo pesados. Suspensión mecánica. Opcional cabina dormitorio (techo normal o alto).



*Altura techo normal chasis X-High (varía dependiendo del tipo de chasis y neumáticos utilizados).

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 092-2024-FIMGC****PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL No 749-2024-FIMGC-D**, a los cuatro días del mes de diciembre de 2024, siendo las 10:00 a.m. reunidos en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, bajo la presidencia del MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS y los miembros; Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES, MSc. Ing. Efraín César ALARCON MEDINA y Dr. Víctor Félix FLORES MORENO, actuando como secretario docente el MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO, para proceder a la sustentación de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas, del bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Minas:

Fritz Joseph VASQUEZ CHILLCCE

Quien presentó la tesis denominada:

Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023

Los señores miembros del jurado luego de expuesto la tesis y absueltas las preguntas, delibera y lo declaran:

APROBADO NOTA QUINCE (15)

Siendo las 11:50 a.m. del día 04 de diciembre de 2024, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad a lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CARDENAS
Presidente

Dr. Jaime Alberto HUAMAN MONTES
Miembro

MSc. Ing. Efraín César ALARCON MEDINA
Miembro

Dr. Víctor Félix FLORES MORENO
Miembro-Asesor

MSc. Ing. Kelvis BERROCAL ARGUMEDO
Secretario docente

cc:
Archivo



UNSCH

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El que suscribe; en mi calidad de Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación y encargado de certificar la originalidad de la tesis abajo indicado y por lo tanto responsable verificador de originalidad de trabajo de tesis de pregrado en primera instancia, en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N°039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación UNSCH, deja constancia que:

- Apellidos y Nombres del Bach. : VASQUEZ CHILLCCE, Fritz Joseph
- Escuela Profesional : Ingeniería de Minas
- Título de la Tesis : Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023
- Evaluación de la originalidad : 27% de similitud

Por tanto, según los artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, **es procedente el certificado de originalidad** para los fines que crea conveniente.

Ayacucho, 18 de diciembre de 2024

MBA Ing° Leonil Fernando Quispe Aronés
Instructor de Originalidad de Trabajos de Investigación

Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023

por Fritz Joseph VASQUEZ CHILLCCE

Fecha de entrega: 18-dic-2024 11:39p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2555794480

Nombre del archivo: TESIS_FRITZ_JOSEPH_VASQUEZ_CHILLCCE.pdf (3.11M)

Total de palabras: 20365

Total de caracteres: 120208

Simulación de eventos discretos para optimizar la flota de transporte de material mineral en la unidad minera Andaychagua 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

27%

INDICE DE SIMILITUD

27%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

13%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

8%

2

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

5%

3

Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

4%

4

dspace.espol.edu.ec

Fuente de Internet

3%

5

repositorio.uchile.cl

Fuente de Internet

2%

6

Submitted to Universidad Continental

Trabajo del estudiante

1%

7

inspection.canada.ca

Fuente de Internet

1%

8

repositorio.unsaac.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

9	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
10	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
12	repositorio.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
13	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
14	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.unp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
18	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
19	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
20	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo