

Queues in loading and hauling at the open-pit mine 'El Toro' in 2023

Milagros V. Blas-Gutierrez, Bachiller en ingeniería de minas¹, Richard A. Cornejo-Espinoza, Bachiller en ingeniería de minas², Pamela E. Velarde-Loayza,³ , Juan F. Retamozo Belsuzarri⁴ 

^{1,2,3,4} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19205150@utp.edu.pe, U19103981@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe, c18783@utp.edu.pe

Abstract – This study focuses on analyzing the loading and hauling processes at the “El Toro” mine, operated by Summa Gold Corporation, as a critical problem of truck waiting times has been identified, leading to increased operational costs. A total of 12.22 hours are lost daily, amounting to a waiting cost of \$562.58 per day. The main objective of the study is to develop a solution to reduce waiting times by applying Float Estimation software, thereby optimizing operational costs. Specific objectives include analyzing current information, evaluating parameters influencing waiting times, using Float Estimation to optimize truck cycles, simulating waiting times in MS Excel, and comparing results with the current situation at the mine. The research approach is quantitative, using measurable data and mathematical calculations. The scope is correlational and pre-experimental, focusing on manipulating operational costs to reduce waiting times. Data collection will be conducted through analyzing operational time records and equipment performance, utilizing digital tools such as Microsoft Excel, Geocatmin, and Float Estimation. By implementing the proposed strategy, Scenario 3 projects a potential saving of 70% in daily waiting costs, an 8% reduction in annualized costs, and improvements of 6 - 8% in unit and total loading and hauling costs compared to the current scenario.

Keywords – Waiting times, Operational costs, Float Estimation, Optimization, Potential savings.

Colas en el carguío y acarreo a cielo abierto en la mina “El Toro” en el año 2023

Milagros V. Blas-Gutierrez, Bachiller en ingeniería de minas¹, Richard A. Cornejo-Espinoza, Bachiller en ingeniería de minas²

^{1,2} Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19205150@utp.edu.pe U19103981@utp.edu.pe

Resumen – Este estudio se centra en analizar los procesos de carguío y acarreo de la mina “El Toro”, operada por Summa Gold Corporation, ya que se identificó un problema crítico de espera de volquetes que genera un aumento de costos operacionales; en total son 12.22 horas perdidas diarias y un costo de \$562.58 por día de concepto de espera. El objetivo principal del estudio es desarrollar una solución para reducir los tiempos de espera mediante la aplicación del software Float Estimation, buscando así optimizar los costos operacionales. Los objetivos específicos incluyen el análisis de la información actual, la evaluación de parámetros que influyen en los tiempos de espera, la utilización de Float Estimation para optimizar ciclos de volquetes, la simulación en MS Excel para estimar tiempos de espera, y la comparación de resultados con la situación actual de la mina. El enfoque de investigación es cuantitativo, utilizando datos medibles y cálculos matemáticos. El alcance es correlacional y pre-experimental, centrado en la manipulación de costos operacionales para reducir tiempos de espera. La recolección de datos se realizará mediante análisis de registros de tiempos operativos y rendimiento de equipos, utilizando herramientas digitales como Microsoft Excel, Geocatmin y Float Estimation. Al aplicar la estrategia propuesta el escenario 3 proyecta un ahorro potencial del 70% en el costo de espera diario, una disminución del 8% en el costo anualizado, y mejoras del 6 - 8% en los costos unitarios y totales de carga y acarreo en comparación con el escenario actual.

Palabras clave – Tiempos de espera, Costos operacionales, Float Estimation, Optimización, Ahorro potencial.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de las operaciones para la extracción de minerales en minería superficial, el carguío y acarreo desempeñan un papel fundamental en el flujo operativo y la rentabilidad de la explotación minera; debido a los considerables costos asociados con la inversión y el mantenimiento de los equipos utilizados.

El costo de las operaciones de carguío y acarreo en la unidad minera “El Toro”, operada por la compañía minera Summa Gold Corporation, representa el 54,53% del costo total de producción de la mina [1]. Además, se ha identificado un problema de espera de camiones para ser cargados, lo que genera colas en la zona de carga de material [1].

El tiempo de espera registrado asciende a 0.61 horas por cada hora efectiva de trabajo, lo que se traduce en un total de 12.22 horas perdidas al día por la flota total de 9 volquetes, representando un costo de 562.58 \$/día [1].

En este contexto, el presente estudio propone una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia de las operaciones de carga y acarreo. Esta mejora contribuirá significativamente a la optimización de los costos de carguío y acarreo en la mina El Toro, permitiendo un uso más eficaz de los recursos y reduciendo los costos operativos.

II. BASE TEÓRICA

A. Carguío y acarreo

La actividad de carguío se enfoca en la extracción del material fragmentado en la zona de trabajo, llevándolo posteriormente hacia el equipo de carguío. Para llevar a cabo este proceso de manera efectiva, es esencial contar con un espacio de trabajo donde ambos equipos puedan operar sin inconvenientes. Luego, el transporte se encarga de desplazar el material hacia su destino final, considerando sus características [2].

Por ejemplo, el material estéril se dirige hacia los botaderos para ser depositados en PAD's, mientras que el mineral se deposita en áreas de almacenamiento como acopios, que pueden incluir PAD's de lixiviación o chancadoras, según sea el procesamiento del mineral. La elección de los equipos adecuados para esta tarea depende de las características específicas de la operación.

B. Ciclo de trabajo del equipo de carguío

El ciclo de carguío se refiere al tiempo total necesario para que el equipo de carguío extraiga el material volado desde el frente de operación y lo deposite posteriormente en el equipo de acarreo [3].

El tiempo total del ciclo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Ciclo de carguío} = \text{Llenado balde} + \text{Giro cargado} + \text{Descarga} + \text{Giro vacío} \quad (1)$$

C. Rendimiento de la excavadora

El rendimiento de una excavadora hace referencia a la evaluación de la eficiencia y productividad en términos de la cantidad de material excavado o cargado por unidad de tiempo, como toneladas por hora (TPH) o metros cúbicos por hora (m³/h) [4].

$$R = \frac{3600 \times Q \times E \times K}{T_c} \quad (2)$$

- R = Rendimiento en m³/hora.
- E = Factor de eficiencia.
- Q = Capacidad de la excavadora.
- K = Factor de llenado del equipo.
- T_c = Tiempo del ciclo en segundos.

D. Factor de eficiencia

El factor de eficiencia es un factor que tiene en cuenta las pérdidas de tiempo o ineficiencias en el proceso de carga que se mide en porcentaje respecto a las 24 horas del día.

E. Factor de llenado

El factor de llenado es un parámetro importante en el cálculo del rendimiento de una excavadora. Hace referencia

a la proporción de la capacidad del cucharón de la excavadora que se llena de material en cada ciclo de excavación y carga. En otras palabras, indica cuánto del cucharón se carga con material en comparación con su capacidad máxima [5].

El factor de llenado influye significativamente en el rendimiento de la excavadora por lo que debe ser controlado con una supervisión efectiva para maximizar el uso del equipo, mejorar el rendimiento y, por ende, reducir los costos operativos. En la Fig. 1, se puede observar una representación gráfica de 3 diferentes factores de llenado para el cucharón de la excavadora, los más efectivos son mayor o igual al 100%.

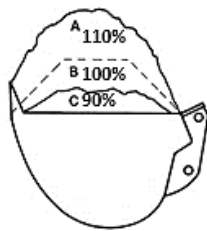


Fig. 1 Equipo de carga operando. Adaptado de [6].

F. Ciclo de trabajo de la unidad de acarreo

El ciclo de trabajo se refiere al tiempo necesario para llevar a cabo un ciclo completo de transporte de material desde el frente de trabajo hasta el punto de descarga. La velocidad del volquete afecta significativamente el ciclo de carga y descarga y, por lo tanto, el rendimiento del volquete [5].

Una mayor velocidad en el desplazamiento del volquete disminuye el tiempo total necesario para completar un ciclo, lo que aumenta la eficiencia.

En la Fig. 2, se detalla la suma de los tiempos fijos y variables necesarios para calcular un ciclo de trabajo.

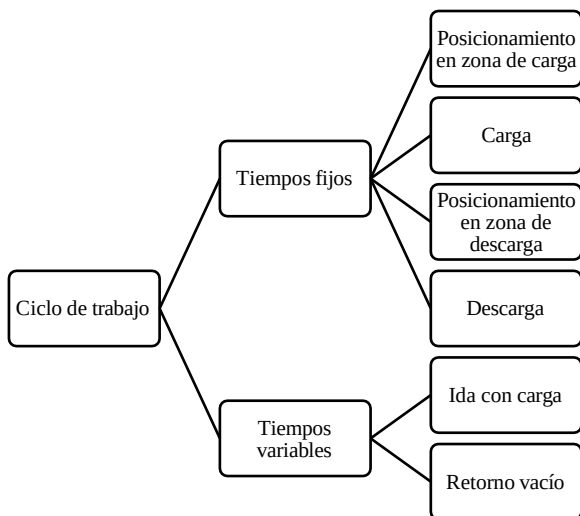


Fig. 2 Ciclo de trabajo de un equipo de acarreo. Adaptado de [4].

G. Rendimiento de volquete

El rendimiento de un volquete hace referencia a la eficiencia y productividad con la que el equipo transporta material desde el sitio de carga hasta el sitio de descarga. El rendimiento de un volquete se mide en términos de la cantidad de material transportado por unidad de tiempo, como toneladas por hora (TPH) o metros cúbicos por hora (m³/h) [4].

La fórmula para calcular el rendimiento de un volquete en minería es la siguiente:

$$R = \frac{60 \times Q \times E}{T} \quad (3)$$

- R = Rendimiento en m³/hora.
- E = Factor de eficiencia.
- Q = Capacidad de volumen movido por ciclo respecto al match factor.
- T = Tiempo del ciclo en minutos.

H. Match factor

El match factor o factor de acoplamiento significa la cantidad de ciclos que el equipo de carga necesita para cargar el equipo de acarreo al 100%.

I. Factor de corrección de velocidad

Es importante destacar que la velocidad del volquete debe equilibrarse con la seguridad y las condiciones del terreno, ya que un aumento excesivo de la velocidad puede aumentar el riesgo de accidentes y daños a la maquinaria. Los operadores y supervisores de volquetes deben considerar cuidadosamente estos factores al determinar la velocidad óptima para maximizar el rendimiento sin comprometer la seguridad [5].

Al contar con un buen equilibrio entre optimización y seguridad, se puede obtener la flota ideal para maximizar la eficiencia de los equipos y así reducir los costos unitarios por hora de los equipos.

J. Herramienta tecnológica: Float Estimation

El programa Float Estimation es una herramienta que nos brindará la capacidad de calcular el número de camiones requeridos por un equipo de carguío (pala, excavadora, etc.). Por otra parte, nos proporcionará el tiempo necesario para que el sistema pueda mover una cantidad específica de material.

Esta herramienta dinámica emplea los siguientes parámetros de los camiones o volquetes, equipo de carguío y la ruta de acarreo.

1) Parámetros de entrada:

- a. Tonelaje deseado.
- b. Capacidad del camión.
- c. Velocidad del camión cargado en camino plano.
- d. Velocidad del camión vacío en camino plano.
- e. Velocidad del camión cargado en subida.
- f. Velocidad del camión vacío en subida.
- g. Velocidad del camión cargado en bajada.
- h. Velocidad del camión vacío en bajada.
- i. Tiempo de posicionamiento del camión.
- j. Tiempo de descarga.
- k. % de eficiencia del camión.
- l. Ruta de acarreo.
- m. Capacidad del balde.
- n. Ciclo de la excavadora.
- o. Tiempo de retraso en el primer pase.

El programa nos permite determinar la distancia equivalente, el ciclo de tiempo y la cantidad de camiones necesarios para satisfacer el plan de minado. Los cálculos realizados son en base a la ruta considerando los distintos tramos, pendientes y velocidades.

2) Parámetros de salida

- Distancia de acarreo.
- Distancia equivalente cargado.
- Distancia equivalente vacío.
- Tiempo de viaje cargado.
- Tiempo de viaje vacío.
- Ciclo cargado.
- Ciclo vacío.
- Ciclo total.
- N° de pases (Match factor).
- N° de camiones requeridos al día.
- N° total de camiones.
- Tiempo requerido.

En la Fig. 3, se presenta el programa Float Estimation con los parámetros de entrada y salida necesarios para su funcionamiento.

Fig. 3 Tiempos del ciclo de trabajo de un equipo de acarreo.

K. Sostenibilidad Ambiental

La reducción de colas en las operaciones de carguío y acarreo no solo busca mejorar la eficiencia económica, sino también reducir el impacto ambiental de las operaciones mineras. Estudios recientes demuestran que la reducción de los tiempos de espera y la optimización en el uso de equipos puede disminuir significativamente el consumo de combustible, lo que resulta en una menor emisión de CO₂ [6]. Además, la implementación de tecnologías avanzadas contribuye a la sostenibilidad al optimizar los recursos y reducir el desgaste de los equipos, lo que a su vez prolonga su vida útil y disminuye la generación de residuos.

III. RESULTADOS

La mina El Toro es un proyecto minero aurífero a tajo abierto ubicado en el norte de Perú, en el caserío Coigobamba, distrito de Huamachuco, provincia de Sánchez Carrión, región La Libertad. Se encuentra entre los 3200 y 3600 m.s.n.m. Coordenadas UTM Datum WGS 84, zona 17: N 9133687, E 830160. En la Fig. 4, se observa su ubicación geográfica.



Fig. 4 Ubicación de la mina El Toro. Adaptado de [3].

La mina El Toro se encuentra en la Cordillera Occidental de los Andes peruanos, a unos 120 kilómetros al norte de la ciudad de Trujillo. La región es montañosa y está cubierta de bosques y páramos. En la Fig. 5, se algunos tramos y pendientes de la ruta de acarreo de mineral.



Fig. 5 Vista general de la mina El Toro. Adaptado de [1].

A. Herramienta tecnológica: Float Estimation

Para el desarrollo de las operaciones de carguío y acarreo en la unidad minera el Toro, se cuenta con excavadoras CAT 336D L y volquetes Volvo FMX 440. En la Tabla 1, se muestra la cantidad de equipos disponibles para cada un frente de mineral, así como su respectiva capacidad.

Tabla 1
Equipos operativos mina El Toro. Adaptado de [1].

Proceso	Carguío	Acarreo
Tipo de Equipo	Excavadora	Volquete
Modelo	CAT 336D L	Volvo FMX 440
Capacidad (m3)	3.62	20
Cantidad de equipos operativos	1	9
Tipo de equipo	Hidráulica	Mecánico

En la operación de la mina El Toro, se emplean la ruta de transporte para el acarreo de mineral desde la zona de

extracción. La Tabla 2, presenta la distancia total y la pendiente promedio para la ruta de transporte.

Tabla 2
Características de la ruta. Adaptado de [1].

Características de la ruta	Descripción
Punto de origen	Banco de trabajo
Destino	PAD
Distancia (Km)	3.51
Pendiente Promedio (%)	7
Velocidad ida promedio	12.05
Velocidad regreso promedio	26.14

C. Ciclo actual

En la Tabla 3, se observa los promedios de los tiempos totales en segundos del ciclo de carguío según 22 observaciones diferentes, obteniendo así un promedio final de 26.20 segundos que representa un ciclo óptimo dentro de la operación minera.

Tabla 3
Tiempo total en segundos del ciclo de carguío. Adaptado de [1].

Proceso (segundos)	Promedio
Carga del cucharón	8.71
Giro con carga	6.6
Descarga del cucharón	4.41
Giro sin carga	6.48
Tiempo total	26.2

D. Rendimiento del equipo de carguío actual

En la Tabla 4, se evidencia que el rendimiento actual de la excavadora CAT 336D L en la mina El Toro es de 371.63 m3/h; sin embargo, este puede ser mejorado mediante un factor de llenado más eficiente, según las especificaciones del catálogo de rendimientos CAT, [7].

Tabla 4
Rendimiento de la excavadora CAT 336D L. Adaptado de [1].

Capacidad (m3)	Factor de llenado	Rendimiento (m3/h)
3.62	83%	371.63

E. Ciclo de acarreo actual

En la Tabla 5, se presenta el promedio final del ciclo del volquete Volvo FMX, el cual arrojó un valor de 30.94 minutos. Estos resultados se basan en el análisis de 22 observaciones de las actividades realizadas durante el proceso de acarreo de mineral.

Tabla 5
Tiempo total en minutos del ciclo de acarreo para mineral. Adaptado de [1].

Proceso (minutos)	Promedio
Posicionamiento y carguío de material	3.63
Ida cargado	17.49
Descarga del material	1.74
Regreso vacío	8.06
Tiempo total	30.94

F. Rendimiento del equipo de acarreo actual

El rendimiento del volquete se refiere a la cantidad de material que puede trasladar en una hora.

Para dicho cálculo se utiliza la capacidad del volquete definido en Tabla 1, el promedio del ciclo de acarreo de mineral obtenido en la Tabla 6 y el factor de eficiencia de trabajo 83% [1].

Este rendimiento 36.71 m3/h se puede mejorar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

G. Costo diario actual

En la Tabla 6, se detalla el costo horario asociado a los equipos de carguío y acarreo.

Tabla 6
Costos horario de los equipos de carguío y acarreo. Adaptado de [1].

Operaciones	Equipos	Costo \$/h
Carguío	Excavadora 336D L CAT	107
Acarreo	Volquete Volvo FMX 440	46

IV. PROPUESTA TECNOLÓGICA DE SOLUCIÓN

A. Evaluación de escenarios para el equipo de carguío

Se propone maximizar el rendimiento de la excavadora modificando el factor de llenado siguiendo las recomendaciones del manual de rendimiento Caterpillar [7]. En la Tabla 7, podemos visualizar que el rango del porcentaje óptimo para el factor de llenado recomendado según el fabricante es de 80% a 90% para buena voladura.

Tabla 7
Factores de llenado recomendado para excavadora CAT. Adaptado de [6].

Materiales	Factor de llenado
Suelo o arcilla húmeda	A — 100 - 110%
Arena y grava	B — 95 - 110%
Roca — Buena voladura	C — 80 - 90%
Roca — Media voladura	60 - 75%
Roca — Mala voladura	40 - 50%

En la Tabla 8, podemos visualizar los 5 escenarios propuestos para conseguir un rendimiento óptimo en función al factor de llenado de la excavadora CAT cuando el material de voladura tiene un buen grado de fragmentación.

Tabla 8
Selección del rendimiento óptimo. Adaptado de [6].

Escenarios	Factor de llenado
Escenario actual	83%
Escenario 1	80%
Escenario 2	85%
Escenario 3	90%
Escenario 4	95%
Escenario 5	100%

B. Rendimiento óptimo de equipo de carguío

En la Tabla 9, se presenta el rendimiento de la excavadora registrado en distintos escenarios. Según las recomendaciones del fabricante, se aconseja cargar la cuchara de la excavadora al 90% cuando se trabaja con material de buena fragmentado debido a una voladura eficiente.

El escenario 3 refleja este nivel de carga resultando en un rendimiento de 402.97 m³/hr, lo que se traduce en un costo unitario de producción de 0.26 \$/m³. Se puede encontrar información adicional en el Anexo 1. Se puede observar la mejora en el rendimiento en el Gráfico 1.

Tabla 9
Selección del rendimiento óptimo. Elaboración propia.

	Factor de llenado	Rendimiento excavadora m ³ /hr	Costo unitario de producción \$/m ³
Escenario actual	83%	371.63	\$ 0.29
Escenario 1	80%	358.19	\$ 0.30
Escenario 2	85%	380.58	\$ 0.28
Escenario 3	90%	402.97	\$ 0.27
Escenario 4	95%	425.35	\$ 0.25
Escenario 5	100%	447.74	\$ 0.24

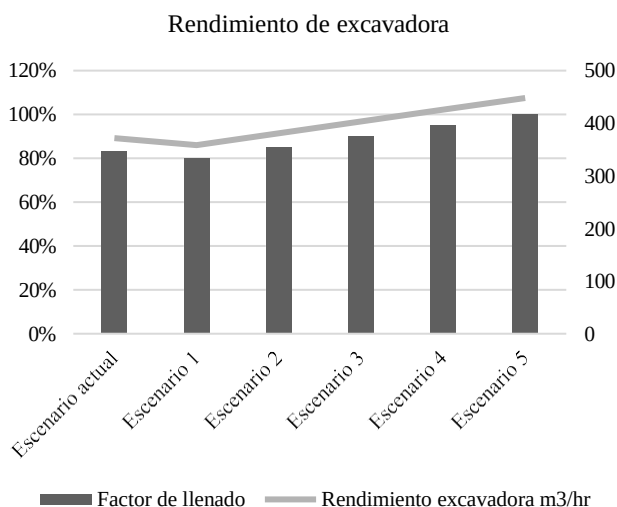


Gráfico 1 Mejora de rendimientos de excavadora. Elaboración propia.

C. Evaluación de escenarios para el equipo de acarreo

Se propone maximizar el rendimiento del volquete y reducir el ciclo de acarreo para conseguir una flota óptima de equipos que reduzcan la cola de espera. En la Tabla 10 y 11, se detalla las velocidades propuestas según el ábaco del fabricante. Información adicional en Anexo 2.

Las velocidades tienen un factor de corrección del 59% respecto a su carga del volquete, altitud de la mina y el recorrido por tramo. Información adicional en el Anexo 3, 4 y 5.

Tabla 10
Velocidades propuestas: Equipo de acarreo cargado. Elaboración propia.

Volquete cargado	Actual	Factor corrección	Propuesta
Bajada km/hr	32.50		19.32
Plano km/hr	38.50	59%	22.88
Subida km/hr	18.00		10.70

Tabla 11
Velocidades propuestas: Equipo de acarreo vacío. Elaboración propia.

Volquete vacío	Actual	Factor corrección	Propuesta
Bajada km/hr	70.00		41.61
Plano km/hr	64.00	59%	38.04
Subida km/hr	50.00		29.72

D. Flota óptima con el nuevo ciclo de acarreo

En la Tabla 12, se detalla el nuevo ciclo de acarreo y la flota óptima de equipos obtenidos a través del software Float Estimation. Se puede encontrar información adicional en el Anexo 6.

El escenario 3 destaca por la reducción de la flota de volquetes en 1 unidad al escenario actual, lo cual indicaría un cálculo erróneo de la flota inicial.

Así también, en dicho escenario se previene la sobrecarga del equipo, asegurando un rendimiento óptimo del mismo.

Este escenario se traduce en una evidente mejora en el rendimiento operativo en comparación al rendimiento actual de la mina El Toro. Se puede observar la mejora en el rendimiento en el Gráfico 2.

Tabla 12
Velocidades propuestas para el equipo de acarreo. Elaboración propia.

Escenario	Carga de volquete m ³	Rendimiento m ³ /hr	Llenado del volquete	Equipos	Ciclo min.
Escenario actual	21.03	36.71	1.05	9	30.94
Escenario 1	20.27	39.65	1.01	7	28.71
Escenario 2	21.54	42.13	1.08	7	28.71
Escenario 3	19.55	38.83	0.98	8	28.27
Escenario 4	20.63	40.99	1.03	8	28.27
Escenario 5	21.72	43.15	1.09	8	28.27

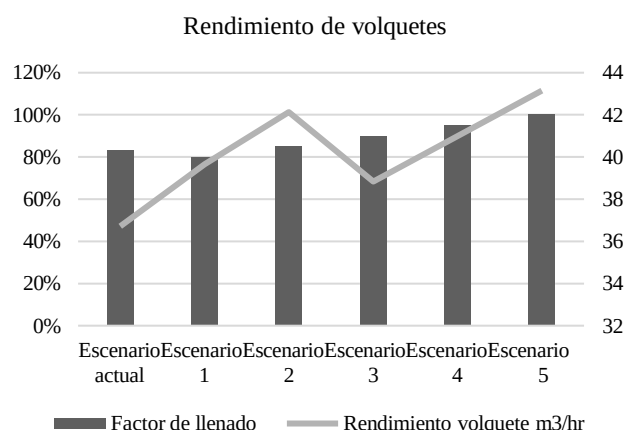


Gráfico 2: Mejora de rendimientos de volquetes. Elaboración propia

E. Simulador de tiempos de espera MS Excel

En la Tabla 13, se muestran los nuevos tiempos de espera estimados para los escenarios planteados de acuerdo con sus nuevos ciclos y las nuevas flotas propuestas. Se puede encontrar información adicional en el Anexo 7.

Se puede evidenciar que los escenarios 1, 2 y 3 representan un mismo tiempo de espera para la excavadora, el cual resulta significativamente menor en comparación con el tiempo actual de espera de los volquetes.

Tabla 13
Nuevos tiempos de espera. Elaboración propia.

Escenario	Equipo en espera	Tiempo de espera hr.	Flota de equipos de acarreo
Escenario actual	Volquete	12:13:46	9
Escenario 1	Excavadora	01:34:34	7
Escenario 2	Excavadora	01:34:34	7
Escenario 3	Excavadora	01:34:34	8
Escenario 4	Volquete	07:14:11	8
Escenario 5	Volquete	07:14:11	8

F. Costos operacionales y de espera

En la Tabla 14 se pueden observar la variación de los costos unitarios con los escenarios trabajados. Se puede observar una disminución del 70% del costo de espera de \$562.58 a \$168.64.

La disminución del tiempo de espera de los camiones no solo reducirá los costos operativos, sino también el consumo de combustible, lo que implica una reducción en la emisión de gases contaminantes, contribuyendo así a un entorno más sostenible.

El escenario 3 destaca además por dicha disminución del costo de espera en relación con un factor de llenado bueno.

Tabla 14
Costos de carguío y acarreo. Elaboración propia.

Escenario	Costo unitario \$/m3	Costo de espera	Costo carguío y acarreo \$/día	Costo anualizado	Ahorro potencial
Escenario actual	\$ 1.54	\$ 563	\$ 20,286	\$ 7,404,291	-
Escenario 1	\$ 1.46	\$ 169	\$ 18,841	\$ 6,876,817	-\$ 527,474
Escenario 2	\$ 1.37	\$ 169	\$ 17,742	\$ 6,475,920	-\$ 928,371
Escenario 3	\$ 1.45	\$ 169	\$ 18,730	\$ 6,836,339	-\$ 567,952
Escenario 4	\$ 1.37	\$ 333	\$ 17,917	\$ 6,539,702	-\$ 864,589
Escenario 5	\$ 1.31	\$ 333	\$ 17,038	\$ 6,218,791	-\$ 1,185,501

En el Gráfico 3, se puede observar la comparación de escenarios propuestos cambiando el factor de llenado y su respectiva variación del costo unitario en comparación al escenario actual.

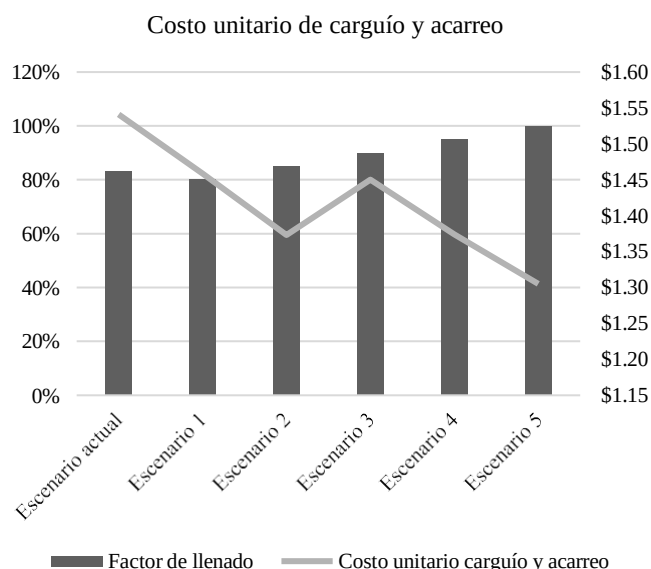


Gráfico 3 Mejora de rendimientos de volquetes. Elaboración propia.

En el Gráfico 4, se visualiza el costo anualizado que representa cada escenario y su respectivo ahorro en comparación al costo actual.

Ahorro anual en costos de carguío y acarreo

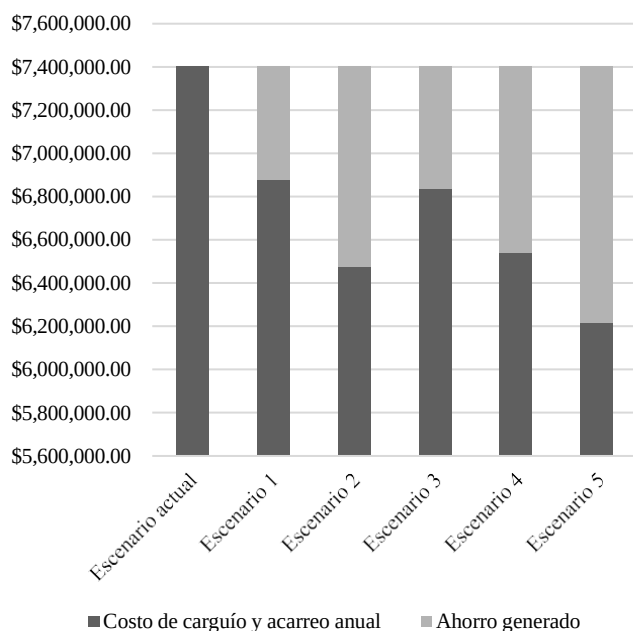


Gráfico 4

Costos anualizados de las operaciones de carguío y acarreo. Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

El costo operacional anualizado del escenario 3 propuesto asciende a \$6,836,339, lo que refleja un ahorro del 8% (\$567,952) en comparación al costo operacional actual de \$7,404,291.

Inicialmente, el tiempo de espera para los camiones era de 12.22 horas diarias, generando un costo total de \$562.58. Con el escenario propuesto, se elimina por completo la espera para los camiones. Sin embargo, este escenario produce una espera de 1.56 horas diarias para la excavadora, lo que representa un costo de \$168.64 (una disminución del 70% del costo de espera).

La evaluación detallada de los parámetros que influyen en los tiempos de espera destaca la importancia crítica del factor de llenado de la excavadora, especialmente evidente en el escenario óptimo (escenario 3). Mantener un llenado adecuado no solo optimiza los tiempos de espera, sino que también previene sobrecargas, cumpliendo así con el objetivo de evaluar los parámetros que afectan estos tiempos.

La aplicación del software Float Estimation ha contribuido directamente a la optimización de la asignación de la nueva flota, cumpliendo con el objetivo específico de utilizar esta herramienta para mejorar la eficiencia en las operaciones de acarreo.

Después de analizar los cinco escenarios, se ha determinado que el escenario 3 es la opción más eficiente para reducir el tiempo de espera. Ya que es un escenario dónde hay un equilibrio positivo en cuanto a los costos y rendimientos de los equipos. Así mismo con este escenario se

redujo la flota de acarreo de 9 a 8 volquetes para el frente de mineral en estudio.

La consideración de pendientes en la ruta, respaldada por el uso de un simulador, ha permitido comparar los tiempos de espera y costos antes y después de implementar el software, validando así la eficacia de la nueva estrategia y cumpliendo con el último objetivo establecido.

La optimización de las operaciones de carguío y acarreo en la minería no solo contribuye a una mayor eficiencia económica, sino que también refuerza el compromiso de la industria con la sostenibilidad. Al reducir el uso de combustible se reducen las emisiones de CO₂ y se hace un uso más eficiente de los recursos

VI. RECOMENDACIONES

Se sugiera la utilización de herramientas avanzadas como el analizador dinámico Dispatch para mejorar el control y la gestión de los equipos de carguío y acarreo. Este sistema proporcionará una supervisión en tiempo real, permitiendo ajustes inmediatos en la operación.

Se aconseja una supervisión efectiva ya que es clave para el éxito de las operaciones de carguío y acarreo. La supervisión activa es esencial para corregir desviaciones en tiempo real, maximizando así la eficiencia y minimizando posibles problemas operativos.

Se recomienda establecer un control riguroso en el proceso de voladura, ya que el grado de fragmentación de la roca influye directamente en las operaciones de carguío y acarreo. Un control preciso de la voladura facilitará el trabajo de los equipos de carguío, mejorando la eficiencia y reduciendo el desgaste de los equipos.

VI. AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros docentes por su constante motivación y por inculcarnos el valor de la investigación como herramienta clave para el aprendizaje y el desarrollo profesional. En especial, queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a la Dra. Pamela Velarde, por su guía y apoyo a lo largo de todo el proceso, cuyo compromiso fue fundamental para la finalización y publicación de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] E. Martinez Aguilar, “Mejoramiento de producción del carguío y transporte mediante la teoría de colas en Compañía Minera Los Andes Perú Gold SAC,” Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019. [Online]. Available: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4941/T010_47479449_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [2] H. A. Gonzales Riquelme, “Selección y asignación de equipos de carguío para el cumplimiento de un plan de producción en minería a cielo abierto por medio de una metodología de simulación y optimización,” Universidad de Chile, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/175086/Selección-y-asignación-de-equipos-de-carguío-para.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] C. R. Ordoñez, “Costo de Carguío y Transporte en Minería Superficial,” pp. 1–209, [Online]. Available: <https://es.scribd.com/presentation/406875564/Costo-de-Carguio-y-Transporte-en-Opet-Pit>
- [4] R. Vargas Sánchez, “La maquinaria pesada en movimiento de tierras,” Instituto Tecnológico de la Construcción, 1999. [Online]. Available: https://www.academia.edu/35941821/LA_MAUINARIA_PESADA_EK_MOVIMIENTO_DE_TIERRAS_DESCRIPCION_Y_RENDIMIENTO
- [5] J. Tiktin, *Movimiento de tierras*. 1997. [Online]. Available: https://www.academia.edu/35941821/LA_MAUINARIA_PESADA_EK_MOVIMIENTO_DE_TIERRAS_DESCRIPCION_Y_RENDIMIENTO
- [6] A. Pipón Castro, ““ Servicio de optimización de combustible en camiones de transporte en minería ,”” 2023.
- [7] Caterpillar Performance Handbook, “Caterpillar Performance Handbook 49 Ed,” *Catapillar Inc.*, p. 2264, 2015.