

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Mejoramiento del ciclo de acarreo de la flota de camiones
utilizando la programación lineal para incrementar la
productividad en minas a tajo abierto**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Oscar Yonathan Gallardo Salas

 [0009-0007-3992-7777](https://orcid.org/0009-0007-3992-7777)

Asesor

MBA. Víctor Manuel Hernández Díaz

 [0000-0002-6505-0733](https://orcid.org/0000-0002-6505-0733)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Gallardo Salas [1]
Referencia/Reference	[1] O. Gallardo Salas, " <i>Mejoramiento del ciclo de acarreo de la flota de camiones utilizando la programación lineal para incrementar la productividad en minas a tajo abierto</i> " [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Gallardo, 2024)
Referencia/Reference	Gallardo, O. (2024). <i>Mejoramiento del ciclo de acarreo de la flota de camiones utilizando la programación lineal para incrementar la productividad en minas a tajo abierto</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

El siguiente trabajo lo dedico a mi familia, en especial a mis padres Valentín e Isabel, quienes me brindaron su apoyo incondicional siempre; y a mi hijo Oscar André, quien me motiva a seguir creciendo como profesional y persona cada día.

Agradecimientos

Agradezco a los docentes de la Universidad Nacional de Ingeniería, en especial a los docentes de mi Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica; quienes apoyaron desde el inicio mi formación y desarrollo profesional.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo mejorar el ciclo de acarreo de la flota de camiones durante los turnos de trabajo, disminuir el tiempo que tiene a los equipos de acarreo detenidos y lograr que realicen su trabajo por más tiempo durante los turnos de trabajo, este objetivo se alcanza disminuyendo la demora programada por refrigerio. Se identifican posibles mejoras para incrementar la utilización de los equipos de acarreo y mejorar la productividad de los equipos, se analizan las demoras operativas (periodos de tiempo en los cuales los equipos están operativos y se encuentran detenidos), se tienen dos tipos de demoras operativas, las demoras programadas y demoras no programadas. Demoras programadas (periodos de tiempo planeados donde los equipos se encuentran detenidos; por ejemplo: demora por refrigerio, demora por abastecimiento de combustible y demora por cambio de turno); demoras no programadas (periodos de tiempo no planeados donde los equipos se encuentran detenidos; por ejemplo: demora por espera de equipo de carguío, demora por chancadora no disponible y demora en las zonas de descarga). Con el análisis de las demoras de los equipos de acarreo se determina la demora operativa que más impacta en la utilización y productividad de los equipos de acarreo, se trabaja en la demora programada por refrigerio para identificar los factores que incrementan el periodo de tiempo de esta demora, se identifica que la ubicación del comedor no es la mejor, porque se encuentra alejada de los parqueos de los equipos de acarreo, lo cual genera largos periodos de tiempo durante el traslado de operadores, incrementando el tiempo de la demora por refrigerio de los equipos de acarreo, ocasionando que los equipos se encuentren detenidos por largos periodos de tiempo, lo cual impacta negativamente en la utilización y productividad de los equipos de acarreo.

En el presente trabajo de investigación se analizarán las mejores ubicaciones de comedores utilizando la programación lineal con los datos obtenidos en campo, en base al análisis realizado se obtendrán las mejores ubicaciones de los comedores y la mejor distribución de los equipos de acarreo en los parqueos, para disminuir el periodo de tiempo

del traslado del personal al comedor, con lo cual se reducirá el periodo de tiempo de la demora programada por refrigerio de los equipos de acarreo, se mejorará la utilización y la productividad de los equipos.

Palabras clave — Minería a tajo abierto, programación lineal, productividad de equipos de acarreo, demoras operativas, equipos de acarreo

Abstract

The objective of this research work is to improve the hauling cycle of the truck fleet during work shifts, reduce the time that hauling teams have stopped and ensure that they do their work for longer during work shifts. This objective is achieved by reducing the scheduled refreshment delay. Possible improvements are identified to increase the use of hauling equipment and improve the productivity of the equipment. Operational delays are analyzed (periods of time in which the equipment is operational and is stopped). There are two types of operational delays, scheduled delays and unscheduled delays. Scheduled delays (planned periods of time where the equipment is stopped; for example: delay for refreshments, delay for refueling and delay for shift change); unscheduled delays (unplanned periods of time where the equipment is stopped; for example: delay for waiting for loading equipment, delay for unavailable crusher and delay in unloading areas). By analyzing the delays of the hauling equipment, the operational delay that has the greatest impact on the utilization and productivity of the hauling equipment is determined. We work on the scheduled delay for refreshments to identify the factors that increase the time period of this delay. It is identified that the location of the dining room is not the best, because it is far from the parking lots of the hauling equipment, which generates long periods of time during the transfer of operators, increasing the time of the delay for refreshments of the hauling equipment, causing the equipment to be stopped for long periods of time, which negatively impacts the utilization and productivity of the hauling equipment. In this research work, the best locations for dining rooms will be analyzed using linear programming with the data obtained in the field. Based on the analysis carried out, the best locations for dining rooms and the best distribution of hauling equipment in the parking lots will be obtained, to reduce the time period for the transfer of personnel to the dining room, which will reduce the time period of the scheduled delay for the hauling equipment's refreshment and improve the utilization and productivity of the equipment.

Keywords — Open pit mining, linear programming, hauling equipment productivity, operational delays, hauling equipment

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vii
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación	2
1.3 Objetivos del Estudio	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Hipótesis	5
1.4.1 Hipótesis general.....	5
1.4.2 Hipótesis específicas.....	5
1.5 Antecedentes Investigativos	5
1.5.1 Antecedentes internacionales.....	6
1.5.2 Antecedentes nacionales	7
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	11
2.1 Marco Teórico	11
2.1.1 Minería a tajo abierto.....	11
2.1.2 Sistema Dispatch	14
2.1.3 Programación Lineal.....	22
2.2 Marco Conceptual	24
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	26
3.1 Recolección de datos	26
3.1.1 Recolección de datos de las demoras de camiones	26
3.1.2 Recolección de datos de campo.....	26
3.2 Procesamiento de la información.....	26

3.2.1	Procesamiento de datos de las demoras de camiones.....	27
3.2.2	Procesamiento de datos de campo	30
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	48
4.1	Análisis de resultados de las demoras de camiones.....	48
4.2	Análisis de resultados de los datos de campo.	48
4.2.1	Caso base	48
4.2.2	Caso 1.....	49
4.2.3	Caso 2.....	49
4.2.4	Comparación de Caso base (situación actual) con el Caso 1 (primera opción) ...	51
4.2.5	Comparación de Caso base (situación actual) con el Caso 2 (segunda opción) ..	52
	Conclusiones	55
	Recomendaciones	56
	Referencias bibliográficas.....	57
	Anexos	59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Actividades del PARQUEO SUR al COMEDOR SUR	28
Tabla 2: Actividades del PARQUEO NORTE al COMEDOR SUR	29
Tabla 3: Actividades del PARQUEO OESTE al COMEDOR SUR.....	29
Tabla 4: Caso base (situación actual)	30
Tabla 5: Tiempo de traslado de los parqueos al comedor SUR	31
Tabla 6: Capacidad de parqueos	32
Tabla 7: Capacidad de comedor	32
Tabla 8: Variables iniciales que serán utilizadas en la función objetivo	33
Tabla 9: Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo	34
Tabla 10: Resultados del SOLVER para el primer ciclo	34
Tabla 11: Resultados del SOLVER para el segundo ciclo.....	35
Tabla 12: Caso 1 (primera opción).....	35
Tabla 13: Tiempo de traslado de los parqueos al comedor SUR	36
Tabla 14: Tiempo de traslado de los parqueos al comedor NORTE.....	37
Tabla 15: Capacidad de parqueos	37
Tabla 16: Capacidad de comedores	37
Tabla 17: Variables iniciales que serán utilizadas en la función objetivo	39
Tabla 18: Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo	39
Tabla 19: Resultados del SOLVER para el primer ciclo	40
Tabla 20: Resultados del SOLVER para el segundo ciclo.....	40
Tabla 21: Caso 2 (segunda opción)	41
Tabla 22: Tiempo de traslado de los parqueos al comedor SUR	42
Tabla 23: Tiempo de traslado de los parqueos al comedor NORTE.....	42
Tabla 24: Tiempo de traslado de los parqueos al comedor OESTE	43
Tabla 25: Capacidad de parqueos	43
Tabla 26: Capacidad de comedores	43

Tabla 27: Variables iniciales que serán utilizadas en la función objetivo	45
Tabla 28: Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo	46
Tabla 29: Resultados del SOLVER para el primer ciclo	47
Tabla 30: Resultados del SOLVER para el segundo ciclo.....	47
Tabla 31: Resultados de los Casos analizados.....	49
Tabla 32: Resultados y mejoras de los Casos analizados	53
Tabla 33: Resultados de reducción de costos por año de los Casos analizados.....	53
Tabla 34: Datos para la evaluación económica.....	53
Tabla 35: Resultados de la evaluación económica caso 1	54
Tabla 36: Resultados de la evaluación económica caso 2	54

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Sistema Dispatch automatizado.....	15
Figura 2: Modelo del ciclo de carguío y acarreo.....	19
Figura 3: Estados del sistema Dispatch	20
Figura 4: Demoras programadas y no programadas de camiones.....	27
Figura 5: Ubicación de parqueos y comedor sur.....	31
Figura 6: Rutas de los parqueos al comedor sur.....	32
Figura 7: Ubicación de parqueos, comedores sur y norte	36
Figura 8: Rutas de los parqueos a los comedores sur y norte.....	38
Figura 9: Ubicación de parqueos, comedores sur, norte y oeste.....	42
Figura 10: Rutas de los parqueos a los comedores sur, norte y oeste	44
Figura 11: Cuadro comparativo del tiempo de traslado	50
Figura 12: Cuadro comparativo del tiempo de traslado (Caso base y Caso 1).....	51
Figura 13: Cuadro comparativo del tiempo de traslado (Caso base y Caso 2).....	52

Introducción

El presente trabajo de investigación se desarrolla en una mina a tajo abierto ubicada en el departamento de Arequipa, la cual produce cátodos de cobre, concentrados de cobre y molibdeno, el yacimiento del cual se extrae el mineral es un yacimiento de baja ley; por esta razón es necesario el uso eficiente de los equipos, para hacer el negocio rentable y asegurar la continuidad de la empresa. Se identifican posibles mejoras para incrementar la utilización de los equipos de acarreo y mejorar la productividad de los equipos, el presente trabajo de investigación tiene por objetivo mejorar el ciclo de acarreo de la flota de camiones durante los turnos de trabajo, disminuir el tiempo que tienen a los equipos detenidos y lograr que realicen su trabajo por más tiempo durante los turnos de trabajo, este objetivo se alcanza disminuyendo la demora programada por refrigerio.

El desarrollo del trabajo de investigación se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se describe el alcance del trabajo de investigación, se plantea el problema a solucionar y la finalidad de la investigación, se detalla la problemática de las empresas mineras a tajo abierto, se describen las causas de la problemática y las consecuencias que provocan, se plantea el problema a solucionar en la investigación en forma de pregunta y se definen los objetivos del trabajo de investigación. En el segundo capítulo se detalla y describen el marco teórico y marco conceptual, el cual representa las bases teóricas que serán utilizadas en el desarrollo del trabajo de investigación. En el tercer capítulo se desarrolla el trabajo de investigación, se procesan los datos obtenidos, se realizan los cálculos y se muestran los resultados de los casos planteados. En el cuarto capítulo se interpretan, analizan y comparan los resultados del trabajo de investigación.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En las empresas mineras a tajo abierto el costo de acarreo es uno de los más significativos de la operación minera, representando alrededor del 50% del costo total de la operación, razón por la cual las empresas tienen por objetivo optimizar la utilización de los equipos de acarreo, para mejorar la productividad de los equipos; disminuyendo el periodo de tiempo de las demoras operativas (periodos de tiempo en los cuales los equipos están operativos y se encuentran detenidos), se utilizan herramientas de alta tecnología como el Sistema Dispatch, el cual tiene por objetivo optimizar la utilización de los equipos de acarreo, llevando un control detallado de las demoras programadas (periodos de tiempo planeados donde los equipos se encuentran detenidos; por ejemplo: demora por refrigerio, demora por abastecimiento de combustible y demora por cambio de turno) y demoras no programadas (periodos de tiempo no planeados donde los equipos se encuentran detenidos; por ejemplo: demora por espera de equipo de carguío, demora por chancadora no disponible y demora en las zonas de descarga), con los datos obtenidos del Sistema Dispatch se identifican las demoras más significativas las cuales impactan de forma negativa en la utilización de los equipos de acarreo y en la productividad de los equipos, generando un incremento de los costos e impactando negativamente en la productividad de los equipos de acarreo.

En las empresas mineras a tajo abierto se presenta el problema de baja productividad de los equipos de acarreo, debido a las demoras programadas y no programadas de los equipos, periodos de tiempo en los cuales los equipos de acarreo están detenidos, esto afecta a la producción diaria y afecta el abastecimiento de mineral a las chancadoras, eleva los costos operativos de los equipos de acarreo, siendo los costos de acarreo uno de los más altos de la operación minera.

Las empresas mineras tienen por objetivo disminuir las demoras operativas para aumentar la utilización y la productividad de los equipos, analizando las principales causas

que generan el incremento de los periodos de tiempo de las demoras operativas y de esta forma mejorar la operación minera, para optimizar la utilización de los equipos de acarreo y mejorar la productividad de los equipos.

1.2 Descripción del Problema de Investigación

En la gran minería a nivel mundial el sistema de acarreo con camiones es el más utilizado para el transporte de material hacia los diferentes destinos de la operación minera, el costo de acarreo es el más significativo dentro del proceso de minería, representando alrededor del 50% del costo total de la operación. La baja productividad de los equipos incrementa los costos de la operación minera, las principales causas que impactan a la productividad son: la baja utilización de los equipos, equipos operativos que están detenidos sin producir; la baja disponibilidad de los equipos, equipos malogrados por largos periodos de tiempo; la baja confiabilidad y mantenimiento del sistema de acarreo, equipos detenidos frecuentemente por fallas mecánicas. (INAPAC Universidad Tecnológica de Chile (2015). "Extracción mina II: Apuntes carguío y transporte".)

El sistema de acarreo constituye el mayor costo de la operación, debido a la gran cantidad de equipos que se requieren para trasladar la gran cantidad de material, mineral y desmonte, que se producen a diario; la baja utilización de los equipos de acarreo genera una baja productividad de los equipos e incrementa los costos de la operación minera.

En América latina debido a la situación de vulnerabilidad económica, las empresas mineras enfrentan el desafío de mejorar las operaciones unitarias. La baja productividad de los equipos se produce por los largos periodos de tiempo de las demoras programadas en las tareas críticas del proceso.

Las operaciones mineras a cielo abierto en el largo plazo reducen su productividad, esto se genera por la profundización de las operaciones, por lo que necesitan mejorar la baja eficiencia y productividad de los equipos de acarreo, debido a que su costo operativo es alto y por la cantidad de equipos utilizados. (Orellana, F. (2018). "Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de corto plazo en minería a cielo abierto")

En el Perú existen diferentes unidades mineras a tajo abierto, en las cuales la utilización de los camiones gigantes no alcanza el 90%, debido a muchos aspectos entre los cuales se encuentran la selección de equipos de carguío y/o acarreo, vías de acarreo que no presentan condiciones óptimas, diseño inadecuado de las vías de acarreo para los camiones y bermas, falta de liderazgo, etc; que generan demoras y mantienen detenidos a los equipos de acarreo sin producir. El costo más alto en minería a tajo abierto es el costo de acarreo, debido a la dimensión y la cantidad de camiones que una unidad minera requiere, para alcanzar la producción mensual, trimestral y anual. La utilización de los camiones de acarreo involucra el consumo de llantas gigantes, repuestos y combustible, por lo tanto, es un punto muy crítico de la operación minera. (Mauricio, G. (2015). “Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca”)

Las empresas mineras a tajo abierto del Perú presentan una baja productividad de los equipos, debido a las demoras programadas que tienen las tareas unitarias de la operación, como el acarreo, tienen periodos de tiempo en los cuales los equipos están detenidos sin producir, lo cual incrementa los costos, disminuye la producción y generan pérdidas en el negocio. Las demoras programadas de los equipos de acarreo causan un impacto negativo en la productividad. (Chura, W. (2019). “Propuesta de un plan de control de utilización para flotas de acarreo de una mina a tajo abierto”)

Los altos costos de las operaciones mineras, el decrecimiento de las leyes de los minerales en los yacimientos de las minas a tajo abierto y los conflictos sociales complican aún más el panorama para las empresas mineras en el Perú; tener los equipos de acarreo detenidos sin producir impacta de forma negativa en la productividad de los equipos, incrementando los costos de la operación minera. (Campos, M. (2017). “Impacto de la programación lineal con el uso de solver en la optimización de las operaciones de carguío – acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, La Libertad, 2017”)

En las minas a tajo abierto del Perú, la baja productividad de los equipos de acarreo incrementa los costos de la operación y disminuye la producción. La causa principal para la baja productividad de los equipos de acarreo son los periodos largos de tiempo de las demoras programadas, entre las principales tenemos: las demoras por cambio de turno, demoras por refrigerio, demoras por voladura, demoras por inspección de equipos y demoras por abastecimiento de combustible. Se tienen zonas de refrigerio para operadores alejadas de las zonas de parqueos de los equipos de acarreo lo cual incrementa el tiempo de traslado de operadores, incrementándose la demora programada por refrigerio de los equipos de acarreo, parqueos con poca capacidad cercanos a las chancadoras o al lugar del cambio de turno, lo que genera largos periodos de tiempo de las demoras programadas, reduciendo la productividad de los equipos de acarreo.

Problema general

¿En qué medida el ciclo de acarreo de la flota de camiones influye en la baja productividad en minas a tajo abierto?

Problemas específicos

- ¿En qué medida los tiempos de traslado del personal hacia los comedores influye en la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo?
- ¿En qué medida la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo influye en el ciclo de acarreo?

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1 Objetivo General

Mejorar el ciclo de acarreo de la flota de camiones utilizando la programación lineal para incrementar la productividad en minas a tajo abierto.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Reducir los tiempos de traslado del personal hacia los comedores aplicando programación lineal para reducir la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo.

- Reducir la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo para mejorar el ciclo de acarreo.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La mejora del ciclo de acarreo de la flota de camiones utilizando programación lineal incrementará la productividad en minas a tajo abierto.

Variable independiente (V.I.):

Ciclo de acarreo.

Variable dependiente (V.D.):

Productividad de la flota de camiones.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La reducción de tiempos de traslado del personal hacia los comedores aplicando programación lineal reducirá la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo.

Variable independiente (V.I.):

Tiempos de traslado.

Variable dependiente (V.D.):

Demora programada.

- La reducción de la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo mejorará el ciclo de acarreo.

Variable independiente (V.I.):

Demora programada.

Variable dependiente (V.D.):

Ciclo de acarreo.

1.5 Antecedentes Investigativos

A continuación, se describen los antecedentes relacionados al tema de investigación, realizados en los ámbitos internacionales y nacionales.

1.5.1 Antecedentes internacionales

De acuerdo con Barrientos, V. (2014) en la tesis “Análisis de factores operacionales en demoras y productividad de sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto”. En el estudio se estableció como principal objetivo encontrar los cambios operacionales que mejoren resultados sobre las demoras programadas de cambio de turno y refrigerio, y cómo afectan en la productividad diaria del sistema de carguío y acarreo. La metodología del estudio consiste en la evaluación de los datos disponibles siguiendo restricciones físicas, desarrolla un análisis exploratorio descriptivo y analítico, modelando la relación entre las demoras en estudio y la productividad diaria. Se realiza un modelo de simulación dinámica de eventos discretos que simula la realidad del sistema en estudio, el cual es validado y calibrado con la información que se obtiene del sistema en tiempo real. Los resultados indican que los días de mayor productividad son aquellos que tienen la menor duración de las demoras en estudio, entre otros factores. El modelo permite construir nuevos escenarios a partir del caso base, donde se agregan cambios operacionales que agregan la posibilidad de que los camiones cargados realicen cambios de turno y que determine la posición adecuada del parqueo de camiones respecto a la chancadora. Los escenarios con cambio de turno con los camiones cargados y donde el parqueo está más cerca a la chancadora, aumentan la productividad diaria y disminuyen el total de las demoras en estudio. Finalmente, se recomienda realizar la implementación en la cual el camión realice el cambio de turno cargado y además reducir la distancia del parqueo a la chancadora, el resultado de un escenario combinando ambas estrategias logran un aumento de un 4.2% en la productividad diaria y disminuye en un 10.6% la duración de las demoras. Asimismo, el resultado genera un aumento del beneficio económico de 4.07 MUS\$ mensualmente y aumenta la productividad agregando valor a un sistema que está en funcionamiento.

Orellana, F. (2018) en la tesis “Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de corto plazo en minería a cielo abierto”. Indica que, el sistema pala-camión corresponde al sistema más utilizado para la actividad de transporte de material en

minería a cielo abierto a nivel mundial, debido a su flexibilidad de operación, el bajo costo de inversión inicial comparado con los otros sistemas de manejo de materiales; sin embargo, el costo operativo es alto, debido a la cantidad de equipos utilizados, representando alrededor de 50% a 60% de los costos operacionales totales, como concluyeron varios autores: Alarie & Gamache (2002), Ercelebi & Bascetin (2009) y Upadhyay & Askari-Nasab (2016). Con el objetivo de minimizar los costos, maximizar la eficiencia y debido a la incertidumbre asociada a los equipos y a las interacciones existentes, resulta complejo analizar este sistema; resultando uno de los principales problemas que enfrenta la utilización de la flota de carguío y acarreo. Los métodos deterministas no son apropiados para analizar este tipo de sistemas, debido a que poseen interacciones internas entre equipos que fallan de manera aleatoria (Torkamani, 2013), la utilización de herramientas como simulación de eventos discretos resultan apropiadas para determinar dichas interacciones, incluso cuando tiene la limitante de que no optimiza y sólo simula la operación (Banks, 1984).

La minería a cielo abierto tiende a obtener una productividad menor a largo plazo debido a la profundización de la extracción del mineral, por lo tanto, mejorar la eficiencia y productividad de los equipos resulta fundamental. Sin embargo, estos sistemas son complejos de analizar, como resultado de la incertidumbre operacional existente, así como la interacción interna que poseen los equipos. En este trabajo se propone un modelo integrado de simulación y optimización que maximiza la productividad en la extracción de material, lo cual se logra optimizando el despacho de camiones durante la simulación, sujeto a las condiciones de operación en tiempo real. Se presentan y comparan distintas estrategias de despacho y los resultados muestran que al aplicar este enfoque integrado se obtienen mejores resultados de operación, respecto a métodos determinísticos y simulación tradicional.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Escarcena, R. (2019) en la tesis “Evaluación de las operaciones de carguío y transporte para el mejoramiento de la productividad en la unidad minera Tacaza –

CIEMSA". Indica que, su trabajo de investigación se encuentra aplicado a las actividades operativas de carguío y acarreo para la extracción de mineral y desmonte. Identifica un bajo rendimiento de productividad a causa de una inadecuada interacción de los equipos de la flota, propuso como objetivo evaluar las operaciones de carguío y transporte para mejorar la productividad, específicamente a tres excavadoras y seis volquetes de terceros.

La metodología utilizada para este estudio es de tipo descriptivo y se evaluará la producción requerida y el tiempo de ciclo de carguío y acarreo, determinándose el rendimiento horario de los equipos. Además, se relaciona con la carga útil de los equipos de carguío y transporte, posteriormente, se aplica el modelo del factor de acoplamiento para determinar la cantidad de equipos de acarreo necesarios por cada equipo de carguío.

De acuerdo con la evaluación se determinó que el ciclo de transporte de mineral del Tajo José María y el Tajo Central a la cancha de gruesos es de 38.5 minutos y 25.2 minutos respectivamente, por lo tanto, el factor de acoplamiento actual es de 0.83 y 1.27 respectivamente. Para mejorar la actual situación e incrementar la productividad, se requiere distribuir 1 excavadora con 8 volquetes para el traslado de mineral en el Tajo José María y 5 volquetes con 1 excavadora en el Tajo Central.

Apaza, E. (2017) en la tesis "Disminución de tiempos improductivos para incrementar la utilización de los equipos de carguío y acarreo en la mejora continua de la productividad en el tajo Chalarina en minera Shahuindo S.A.C.". Indica que, en la empresa minera "Shahuindo" el carguío, así como el acarreo de material (mineral y desmonte) son operaciones unitarias de importancia para el minado, los cuales tienen que desarrollarse en tiempos óptimos sin generar demoras y mejorar la producción.

Minera Shahuindo, se enfrenta a problemas por el exceso de colas de los equipos de acarreo en los frentes de carguío y en las zonas de descargas; el carguío y el acarreo son las actividades más significativas, y se busca obtener los mejores resultados que se acerquen a lo planificado.

Durante las actividades de carguío y acarreo, las demoras, no operativas y operativas presentan un problema en los KPI's (Key Performance Indicator) operativos, la

baja utilización de los equipos afecta la productividad y no logran el cumplimiento de la producción mensual.

El estudio se basó en la identificación de tiempos improductivos y pérdidas operacionales en las actividades de carguío y acarreo, para generar un plan de acción con la finalidad de estandarizar y mantener la mejora continua en cada una de las actividades. Para mejorar la productividad, con la reducción de tiempos improductivos se obtendrá una mejor utilización y también una mejor productividad en base al costo de los equipos de carguío y acarreo, permitiendo el cumplimiento de la producción mensual planeada.

En base al análisis de los reportes de producción se observó que el incremento de las demoras operativas eran las más significativas durante la operación, debido a ciertos factores que generan demoras tales como: área reducida en carguío, área reducida en descarga, abastecimiento de combustible, cambio de frente, etc.

Se obtuvieron como resultados una reducción del 65.6% en las horas de demora para carguío y de 47.8% para las horas de demora en acarreo. Se incrementó la producción de mineral enviado al PAD en un 12.5% y de 67.6% para el stock pile. La producción mensual comparado con lo presupuestado se incrementó en 60%.

Chura, M. (2018) en la tesis "Reducción de demoras operativas por cambio de turno con la implementación de módulo de cambio de guardia en la unidad minera Cuajone". Indica que, el sector minero en el Perú y en el mundo enfrenta grandes desafíos en términos de competitividad y productividad en los que se trabajará, debido a que las ventajas frente a la competencia, en el caso de producir un metal como el cobre, está relacionada principalmente por el buen manejo y la minimización de los costos, los cuales se relacionan directamente con la productividad de la operación.

En el trabajo de investigación se presenta la optimización del proceso de Cambio de Guardia, el cual tiene mayor oportunidad de mejorar la productividad en mina Cuajone. El exceso de demoras operativas de las actividades en la primera hora de cada guardia demandaba mucho tiempo y generaba tiempos prolongados debido a la espera de la llegada de los operadores a los equipos.

Se solucionó la problemática, para reducir las demoras operativas y obtener mayor producción en la primera hora de guardia, se implementó un módulo de Cambio de Guardia al sistema de despacho MineOps, sistematizando este proceso y haciéndolo más rápido; se implementaron pantallas grandes que hacían los programas operativos más dinámicos y entendibles para el relevo de personal. Los resultados fueron favorables, se redujeron las demoras operativas por cambio de guardia en la primera hora de cada turno, reduciendo el tiempo de espera inicial de las actividades, incrementándose el tonelaje producido en la primera hora de guardia.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Minería a tajo abierto

Estudios mineros del Perú SAC (2000) “Manual de minería”. Es un método de minado en superficie que extrae en franjas horizontales el material, desmonte o mineral, denominados bancos o niveles; en forma descendente a partir del banco que está en la superficie. Normalmente para el minado de un banco de mineral es necesario extraer el material estéril (desmonte) que lo cubre, lo que se denomina desbroce y expresa una relación de tonelaje de desmonte a mineral, esta ratio es totalmente variable entre las unidades mineras debido a que dependen netamente de la posición y tipo de yacimiento, que es totalmente variable. Este tipo de método de minado es de gran volumen y se aplica en yacimientos masivos de gran tamaño, que se encuentran cerca de la superficie, puesto que a mayor profundidad aumentará la cantidad de material estéril a remover (ratio de desbroce) aumentando en consecuencia el costo de producción. Este método de minado permite acceder a la extracción de depósitos metálicos con leyes que decrecen en el tiempo. Para este método de minado es necesario la utilización de sistemas mecanizados, con equipos de producción masivo; como, por ejemplo: palas eléctricas, camiones mineros, perforadoras y equipos auxiliares.

Rojas, S. (2006) “Mejoramiento de la performance y gestión del Dispatch en Cerro Verde” .Debido a la gran cantidad de material que se traslada en este método de minado, es necesario el uso de una gran cantidad de equipos de carguío, equipos de acarreo y equipos auxiliares (equipos de soporte en las operaciones mineras), para lograr un uso óptimo de estos equipos es necesario el uso de nuevas tecnologías, sistemas de alta precisión, como por ejemplo el sistema Dispatch, que emplea tecnología aplicada al negocio de la minería, este sistema realiza una interacción en tiempo real, haciendo uso de herramientas matemáticas, informáticas, posicionamiento global, comunicaciones y redes, lo que permite realizar asignaciones óptimas y automáticas en forma dinámica para

la flota de los equipos de carguío y acarreo, logrando aumentar el tiempo efectivo de trabajo de los equipos y de esta manera aumentar la productividad de los equipos de carguío y acarreo.

Las actividades unitarias o procesos que comprenden este método de explotación las podemos clasificar en: perforación, voladura, carguío y acarreo.

Perforación

Esta actividad consiste en perforar pozos o taladros en el macizo rocoso, en zonas de mineral y desmonte, con perforadoras las cuales utilizan barrenos y brocas de diferentes diámetros. Los taladros perforados son cargados con explosivos y disparados para fragmentar la roca.

En la mina a tajo abierto, donde se realiza el trabajo de investigación, se realizan taladros con profundidades de 15.0 m a 16.5 m, con un diámetro de 10 5/8 pulgadas, en proyectos de control y proyectos de producción, los equipos de perforación utilizados para este tipo de proyectos son los siguientes: Pit Viper 275 y Pit Viper 275 XC. Se realizan también proyectos de precorte, los cuales son necesarios para el cuidado de la estabilidad de los taludes, los taladros de este tipo de proyectos son de una profundidad de 32.0 m a 33.0 m con un diámetro de 5 pulgadas, los equipos utilizados para este tipo de proyectos son las Roc L8 y Smart Roc L8.

Voladura

Posterior a la perforación de taladros, estos son cargados con explosivos usualmente ANFO (nitrato de amonio + petróleo Diesel), los cuales fragmentan grandes volúmenes de material, resultando rocas de diferentes dimensiones. Si el material fragmentado fuera de gran tamaño que dificultan el carguío o tienen la dimensión inadecuada para el chancado primario, se ejecuta un segundo disparo que tiene por finalidad fragmentar las rocas grandes en rocas más pequeñas para facilitar su carguío y posterior chancado.

Esta actividad es muy importante dentro del proceso de la operación minera, depende de los resultados de la fragmentación (tamaño) del material obtenido posterior a

las voladuras, si la fragmentación del material es buena se tendrán tiempos óptimos en el carguío de material en los equipos de acarreo, se debe hacer un seguimiento continuo de los resultados de las voladuras del material, para obtener resultados óptimos de fragmentación y de esta manera optimizar el uso de los equipos de carguío.

Carguío

Es la actividad que consiste en cargar material, mineral o desmonte, a camiones de acarreo y se realiza con equipos de gran capacidad generalmente palas eléctricas y cargadores frontales. El material cargado a los camiones es trasladado a las chancadoras y stocks si es mineral y a los botaderos si es material estéril (desmonte).

En la gran minería a cielo abierto para incrementar la producción se utilizan por lo general palas eléctricas, que son de dos tipos, palas eléctricas de corriente alterna y palas eléctricas de corriente continua, siendo las palas eléctricas de corriente alterna las más productivas, debido a la mayor velocidad que desarrollan sus motores de giros y al menor tiempo de izaje del cucharón que desarrollan, mejorando los tiempos de carguío de material hacia los equipos de acarreo. Para lograr una mayor productividad de las palas eléctricas se utiliza un sistema de control de flota de equipos como por ejemplo el “Sistema Dispatch” el cual entrega información al operador de pala eléctrica de las toneladas que está cargando en los equipos de acarreo.

En la mina a tajo abierto, donde se realiza el trabajo de investigación, se utilizan los siguientes equipos de carguío: palas eléctricas P&H 2800, palas eléctricas P&H 4100, palas eléctricas P&H 4100 XPC y cargadores frontales CAT994.

Transporte o acarreo

La actividad unitaria de acarreo es muy importante, puesto que su función es trasladar el material desde la zona de carguío hacia los distintos puntos de descarga, de manera segura y eficiente para cumplir con los requerimientos de producción, sobre todo cuando se trata de abastecer de mineral a la planta, que es un punto crítico en la toma de decisiones.

En la gran minería a tajo abierto el sistema de acarreo de material es el que genera mayores costos, aproximadamente el 50 %, a la operación minera y por tal motivo es importante tener una óptima utilización de los equipos de acarreo, se hace uso de sistemas de control de flota de equipos como el “Sistema Dispatch” el cual hace una distribución óptima de los equipos de acarreo hacia los equipos de carguío y hacia sus destinos de descarga, también genera base de datos de los tiempos en los ciclos de los equipos de acarreo y de esta manera tener un mejor control de las demoras que se generan en los equipos de acarreo. Para incrementar la utilización y productividad de los equipos de acarreo es importante controlar las demoras que se generan durante el ciclo de acarreo de la flota de camiones, para de esta manera tener a los equipos de acarreo trabajando el mayor tiempo posible durante cada turno.

Para disminuir las demoras que se generan en los equipos de acarreo es importante analizar las demoras que más impacto tienen en el ciclo de acarreo para buscar alternativas de mejoras. Por ejemplo; tener parqueos de los equipos de acarreo cerca de las chancadoras y cerca a los comedores del personal que operan los equipos de acarreo.

En la mina a tajo abierto, donde se realiza el trabajo de investigación, se utilizan los siguientes equipos de acarreo: camiones Caterpillar 793 y camiones Komatsu 930, estos equipos son el objetivo de estudio en este trabajo de investigación, donde se incrementará la utilización y productividad de la flota de camiones, disminuyendo la demora programada por refrigerio.

2.1.2 Sistema Dispatch

Modular Mining Systems (2008) “Conociendo el sistema Dispatch”. Dispatch es un sistema de administración minera a gran escala, que utiliza lo último en la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), comunicaciones de datos y computación para proporcionar asignaciones óptimas y automáticas para camiones de acarreo en minas a tajo abierto.

Dispatch es una herramienta de gestión que busca optimizar la asignación de camiones a equipos de carguío (palas o cargadores frontales) y/o botaderos y/o

chancadoras (destino), maximizando la utilización del tiempo y minimizando las demoras, en tiempo real.

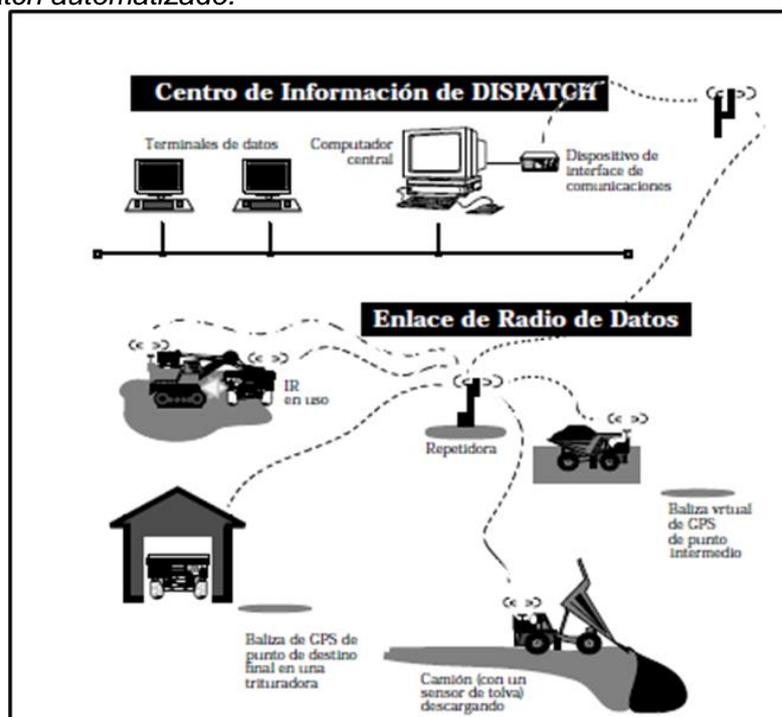
Dispatch tiene varios objetivos como, por ejemplo:

- Automatizar y optimizar asignaciones de camiones.
- Archivar datos para equipos de carguío, acarreo y auxiliares.
- Asignación de combustible automáticamente.
- Recolector de datos para mantenimiento.
- Mezclar minerales.
- Reportabilidad propia y a través de PowerView según la necesidad del cliente.
- Aumentar productividad.
- Aumentar la utilización de los equipos.
- Reducir costos de operación.

La Figura 1, a continuación, muestra un sistema Dispatch totalmente automatizado, utilizando sus componentes para proporcionar asignaciones óptimas para los camiones de acarreo, en forma automática.

Figura 1

Sistema Dispatch automatizado.



Fuente: Modular Mining Systems (1999) "Utilizando Dispatch"

2.1.2.1 Dispatch como herramienta de producción. El sistema Dispatch es una herramienta de producción muy útil para la administración de la flota de camiones y tiene varias funciones importantes, entre las cuales se tienen las siguientes:

Como un recolector de información

El sistema Dispatch está continuamente recibiendo, enviando y almacenando información. Usa tanto información histórica como información en tiempo real para actualizar registros, tomar decisiones de asignaciones y generar informes. El sistema Dispatch recoge información de dos maneras. Las cuales son las siguientes:

- Recolección pasiva de información.
- Recolección interactiva de información.

Como herramienta de almacenamiento de información

El sistema Dispatch almacena toda la información que recibe en tres bases de datos: base de datos de la mina, base de datos del turno y base de datos de resumen.

Como solucionador de problemas en tiempo real

El sistema Dispatch está configurado para funcionar de forma dinámica y opera como un solucionador de problemas en tiempo real usando un modelo de tres algoritmos, los cuales son: Modelo de la Mejor Ruta (Best Path), Modelo de la Programación Lineal (PL) y Modelo de la Programación Dinámica (PD).

- Modelo de la Mejor Ruta (Best Path)

Este subsistema es determinado mediante el menor tiempo de viaje de acarreo (tiempo – distancia), para lo cual usa el algoritmo de “Dijktras”. Este algoritmo calcula el tiempo mínimo de un nodo a otro (puntos virtuales de ubicación), mediante una red de nodos que describen un árbol direccionado. Una vez realizado el cálculo de la Mejor Ruta, se entrega al segundo subsistema (PL) la siguiente información acerca de las rutas de acarreo:

- Distancia total mínima.
- Estimación del tiempo de viaje.

- Puntos intermedios de viaje (los nodos virtuales por donde el camión debe pasar)
- Modelo de la Programación Lineal (PL)

Este algoritmo del sistema Dispatch usa el método “Simplex” que resuelve un conjunto de ecuaciones lineales con restricciones para minimizar la utilización de camiones de acarreo, sujeto a una función de prioridades y exigencias. El modelo de PL tiene como variable la tasa de alimentación del objetivo en toneladas por hora (ton/h) o en metros cúbicos por hora (m³/h) para cada ruta, tanto de equipo de carguío como de zonas de descarga. La PL calcula la razón de alimentación que minimiza el total de camiones requeridos para cubrir las necesidades de las palas, sujeto a las restricciones de la Mina. La información emitida es la siguiente:

- Continuidad de pala y puntos de descarga.
- Tasa de excavación máxima de cada equipo de carguío.
- Capacidad máxima de descarga en los puntos de destino.
- Equipos disponibles.
- Tipo de material.
- Ley de mineral.

Con esta información, el sistema Dispatch utiliza las soluciones entregadas por la PL para generar asignaciones óptimas de equipos en tiempo real. Uno de los problemas que se genera al despachar camiones de acarreo en una mina a tajo abierto es la gran cantidad de variables que existen y que se interrelacionan entre sí. Para solucionar este inconveniente, la PL incluye una cantidad de variables relacionadas a un cierto número de ecuaciones matemáticas denominadas “Restricciones” y “Función Objetivo”. Este subsistema resuelve las ecuaciones lineales de restricciones programadas en base a prioridades de carguío, tasas de producción, capacidad de descarga y restricciones de material y/o mezclas.

- Modelo de la Programación Dinámica (PD)

Como se mencionó anteriormente, la PL entrega una solución en cuanto al flujo de alimentación de cada ruta en (ton/h), pero no lo hace para el problema de las asignaciones de los equipos.

Este inconveniente es resuelto al utilizar la estrategia de la PD, la cual es un proceso de optimización basado en el principio optimizante de Bellman's.

Su principio consiste en entregar una importancia y modalidad dinámica de cálculo para las variables operacionales que se presentan, como variaciones en la disponibilidad de los equipos (cambio de estados), flujos de alimentación (punto de carga y/o descarga), prioridad de palas, distancias de acarreo, etc. Para generar la solución, el sistema Dispatch en lugar de asignar camiones a las palas que más lo requieren, decide por asignar camiones a los equipos de carguío más necesitados en cualquier momento, en caso requieran asignación o estén asignados. Para este proceso el sistema genera dos listas; una en base a la PL incluyéndose rutas ordenadas por prioridad de tiempo y una lista de camiones que requieran asignación a través del tiempo. Es así como la PD establece las necesidades de camiones óptimos sobre la base de los que requerirían asignación de carguío o bien puedan variar esta durante la ruta.

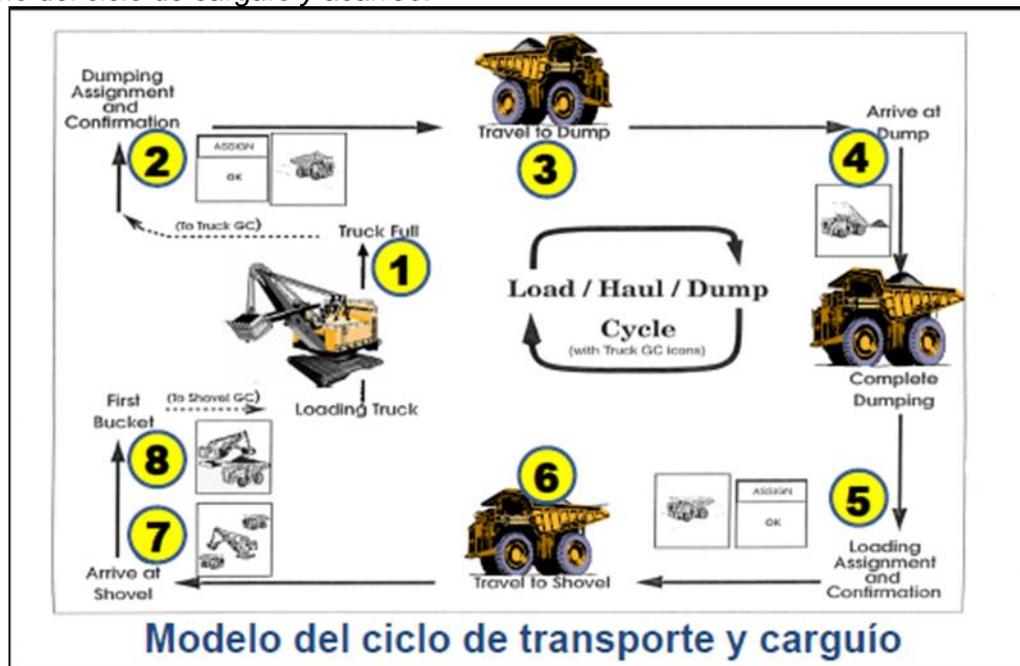
El sistema Dispatch está continuamente recibiendo información y actualizando sus bases de datos (en primer lugar, la base de datos de la mina). Continuamente calcula información como, por ejemplo:

- Tiempos de viaje de los camiones
- Tiempos de carguío
- Tiempos de espera en cola
- Tiempos de cuadro de los camiones
- Tiempos de abastecimiento de combustible
- Conteos de carga

La Figura 2, a continuación, muestra un modelo del ciclo de carguío y acarreo.

Figura 2

Modelo del ciclo de carguío y acarreo.



Fuente: Modular Mining Systems (2008) "Conociendo el sistema Dispatch"

Basado en la información de la base de datos de la mina, el sistema Dispatch está permanentemente revisando sus imágenes (o modelo) de la mina y calculando la mejor opción de asignación de camiones de manera que busca optimizar la producción y utilización de los equipos. El objetivo de Dispatch es optimizar la producción de la mina y utilización de los equipos, basado en información en tiempo real.

Como un controlador de tiempos y costos

Usando la información almacenada en las bases de datos, una mina es capaz de hacer seguimiento, catalogar eventos específicos durante los turnos de producción y midiendo el tiempo de cada evento. Entonces se aplicará consideraciones de costos contra estos eventos de tiempo, permitiendo a la mina medir en forma exacta y predecir el desempeño del negocio. Dispatch es una herramienta muy poderosa para el negocio, que tiene como objetivo manejar, medir e informar acerca del desempeño de la mina.

2.1.2.2 Estados y categorías de tiempo en el sistema Dispatch. En la Figura 3, se muestra la relación de tiempos y la categoría de estado que tiene el sistema Dispatch.

Figura 3

Estados del sistema Dispatch

TIEMPO CALENDARIO (TIEMPO EN EL CUAL EL EQUIPO ESTÁ EN EL SISTEMA)				
TIEMPO DISPONIBLE			TIEMPO MANTENIMIENTO	
TIEMPO OPERATIVO		DEMORAS OPERACIONALES		RESERVA
LISTO PRODUCTIVO	LISTO NO PRODUCTIVO	DEMORAS PROGRAMADAS	DEMORAS NO PROGRAMADAS	DETENCIÓN PROGRAMADA
				DETENCIÓN NO PROGRAMADA

Fuente: Modular Mining Systems (2008) "Conociendo el sistema Dispatch"

Tiempo calendario

Espacio de tiempo en el cual se realiza la medición (espacio muestral). Éste dependerá del tiempo de continuidad en la cual la mina se encuentra operativa y en producción.

Tiempo en mantenimiento

Espacio de tiempo en el cual el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, en caso sea, por un mantenimiento programado o no programado (imprevistos de tipo mecánico o eléctrico).

Tiempo disponible

Espacio de tiempo en el cual el equipo se encuentra mecánicamente habilitado para operar.

Reserva

Espacio de tiempo en el cual el equipo estando en condiciones mecánicas de operación, no es utilizado en labores productivas, sea por falta de operador o por una condición específica de la operación no pueda ser operado.

Tiempo operativo

Espacio de tiempo en el cual el equipo se encuentra operando en la mina (con operador).

Demoras programadas

Espacio de tiempo en el cual el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, tales como refrigerio o cambio de turno.

Demoras no programadas

Espacio de tiempo en el cual el equipo no opera, debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de ésta, tales como abastecimiento de combustible, limpieza de piso de pala, etc.

Listo no productivo

Espacio de tiempo en el cual el equipo no es operado, debido a la espera de equipo complementario, camión esperando en piso de pala, camión esperando en chancadora, pala esperando camión, etc.

Listo productivo

Espacio de tiempo en el cual el equipo se encuentra realizando aquellas tareas para las cuales fue adquirido y diseñado.

2.1.2.3 Clasificación de tiempos en el sistema Dispatch. La gestión y clasificación de tiempos es de suma importancia en un sistema Dispatch. La gestión de los estados de tiempo en el sistema Dispatch de Modular para la correcta asignación de equipos es como sigue:

Operativo

Hace referencia al tiempo que el equipo está realizando un trabajo y donde el operador ha ingresado la acción de operativo seguido de su registro y el horómetro del equipo. Este tiempo es en sí el que debería acumular el tiempo de ciclo del equipo. Este tiempo es incluido en el cálculo de la asignación. Se crean como operativos tiempos que se asignan a trabajos especiales o a proyectos que se quiere controlar mediante asignaciones automáticas de tiempo.

Demora

Hace referencia a las demoras operativas, las cuales son demoras programadas y demoras no programadas. Este tiempo es tomado en cuenta para el cálculo de asignación dinámica debido que a cada demora se le coloca tiempos estimados, de tal forma que la PL toma en cuenta este equipo como operativo una vez que ha pasado el tiempo estimado colocado. Se suele clasificar un tiempo de inspección de equipos que es en sí un tiempo

corto por inspección de mantenimiento, como demora, para lograr que el sistema tome en cuenta el equipo en inspección luego que pase el tiempo estimado. Claro que este tiempo se asigna en la misma pantalla de estatus para que se cargue al cálculo de los KPIs que afectarán a mantenimiento.

Reserva

Ocurre cuando un equipo no es programado para trabajar estando disponible por mantenimiento. También se asignan en Dispatch algunos tiempos operativos y demoras que no se deben tomar en cuenta para la asignación.

Malogrado

Hace referencia a los tiempos que son asignados para que mantenimiento realice la gestión de soporte preventiva o correctiva en los equipos. Este tiempo no se incluye en el cálculo de las asignaciones.

2.1.3 Programación Lineal

Orellana, F. (2018). "Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de corto plazo en minería a cielo abierto". La programación lineal es una técnica de modelamiento matemático diseñada para optimizar el empleo de recursos limitados. Se basa en la maximización o minimización de una función lineal de múltiples variables, lo cual está sujeto a una serie de restricciones que se expresan en forma de inecuaciones y/o ecuaciones lineales. El problema se considera lineal si es que tanto la función objetivo y las restricciones son lineales, es decir, cumplen con las propiedades de proporcionalidad y aditividad.

Taha, H. (2004) "Investigación de operaciones, 7ª edición". La proporcionalidad requiere que la contribución de cada variable de decisión en la función objetivo, y sus requerimientos en las restricciones, sea directamente proporcional al valor de la variable.

La aditividad considera que la contribución total de todas las variables en la función objetivo y sus requerimientos en las restricciones, sean la suma directa de las contribuciones o requerimientos individuales de cada variable.

Los elementos básicos que un problema de programación lineal (PL) debe incluir son los siguientes:

Variables:

Lo que se busca determinar.

Objetivo:

Lo que se busca optimizar.

Restricciones:

Lo que se debe cumplir.

Quiroz, E. (2019) "Programación por objetivos para el dimensionamiento y la asignación de una flota de camiones en una empresa minera". A continuación, se presenta la teoría fundamental de la programación lineal:

Ecuaciones lineales

Todas las ecuaciones y desigualdades en un programa lineal deben, por definición, ser lineales.

Una función lineal tiene la siguiente forma (1):

$$a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n = 0$$

(1) Forma de una función lineal

En general, las "a" son los llamados coeficientes de la ecuación; también conocidos como parámetros. Lo importante de los coeficientes es que son valores fijos, basados en la naturaleza subyacente del problema que se está resolviendo. Las "x" son las variables de la ecuación; se les permite tomar un rango de valores dentro de los límites definidos por las restricciones.

Las variables de decisión

Las variables en la programación lineal son un conjunto de valores que deben determinarse para resolver el problema; es decir, el problema se resuelve cuando se han identificado los mejores totales de las variables. Típicamente, las variables representan la cantidad de un recurso a usar o el nivel de alguna actividad.

La función objetivo

El objetivo de un problema de programación lineal será maximizar o minimizar algún valor numérico. La función objetivo indica cómo cada variable contribuye al valor que se optimizará para resolver el problema.

La función objetivo toma la siguiente forma general (2):

$$\text{maximizar o minimizar } Z = \sum_{i=1}^n c_i X_i$$

(2) Forma de la función objetivo

En donde c_i = coeficiente de la función objetivo correspondiente a la $i^{\text{ésima}}$ variable y $X_i = i^{\text{ésima}}$ variable de decisión.

Los coeficientes de la función objetivo indican la contribución al valor de la función objetivo de una unidad de la variable correspondiente.

Las restricciones

Las restricciones definen los valores posibles que tomarán las variables de un problema de programación lineal. Típicamente representan restricciones de recursos, o el nivel mínimo o máximo de alguna actividad o condición.

Toman la siguiente forma general (3):

$$\text{Sujeto a } \sum_{i=1}^n a_{ij} X_i \leq b_j \quad j = 1, 2, \dots, m$$

(3) Forma general de una restricción de programación lineal

En donde, $X_i = i^{\text{ésima}}$ variable de decisión

a_{ij} = el coeficiente en la restricción j

b_j = el coeficiente del lado derecho en la restricción j

2.2 Marco Conceptual

Banco:

Niveles en que se divide el minado a tajo abierto para facilitar el trabajo de los equipos de perforación, carguío y acarreo; en una mina de tajo abierto.

Desmante:

Material estéril que es minado del tajo abierto y que no tiene ley.

Ley:

Contenido de mineral valioso en un yacimiento, expresado generalmente en porcentaje o en gramos de metal por tonelada de material.

Mineral:

Material que es minado del tajo abierto y el cual tiene ley.

Taladro:

Perforación de pozo que se realiza en los bancos.

Voladura:

Proceso posterior que se realiza a la perforación, cuyo objetivo es fragmentar la roca.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 Recolección de datos de las demoras de camiones

Se recolectaron datos numéricos mediante registros de la base de datos del sistema Dispatch, los datos recolectados son las diferentes demoras programadas y no programadas de los camiones de acarreo, como por ejemplo demora por refrigerio, demora por cambio de turno, demora por voladura, entre otras; los datos recolectados corresponden a los camiones de acarreo Caterpillar 793 y Komatsu 930, de los meses de los años 2022 y 2023.

Estos datos son procesados para determinar cuál es la demora operativa que más impacta en el ciclo de acarreo de la flota camiones y poder evaluar posibles soluciones para disminuir los periodos de tiempo de las demoras operativas.

3.1.2 Recolección de datos de campo

Se recolectaron datos numéricos mediante mediciones de los tiempos de traslado del personal de los parqueos de equipos de acarreo a la zona de refrigerio actual (Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3) y se registraron tiempos de traslado de los parqueos de los equipos de acarreo a las posibles nuevas zonas de refrigerio (Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 9), los que se ubicaron en el lado norte y oeste de la mina a tajo abierto.

Se recolectaron datos numéricos de las capacidades de los diferentes parqueos, cantidad de bahías para camiones de acarreo (Anexo 11) y las capacidades de las zonas de refrigerio, cantidad de personas que pueden ingresar (Anexo 10).

3.2 Procesamiento de la información

El presente trabajo de investigación utiliza como herramienta para el procesamiento de los datos numéricos, al programa MS Office Excel y uno de sus complementos el SOLVER. Utilizando los programas mencionados, se obtienen gráficos, tablas, cálculos y otras relaciones para procesar los datos numéricos registrados.

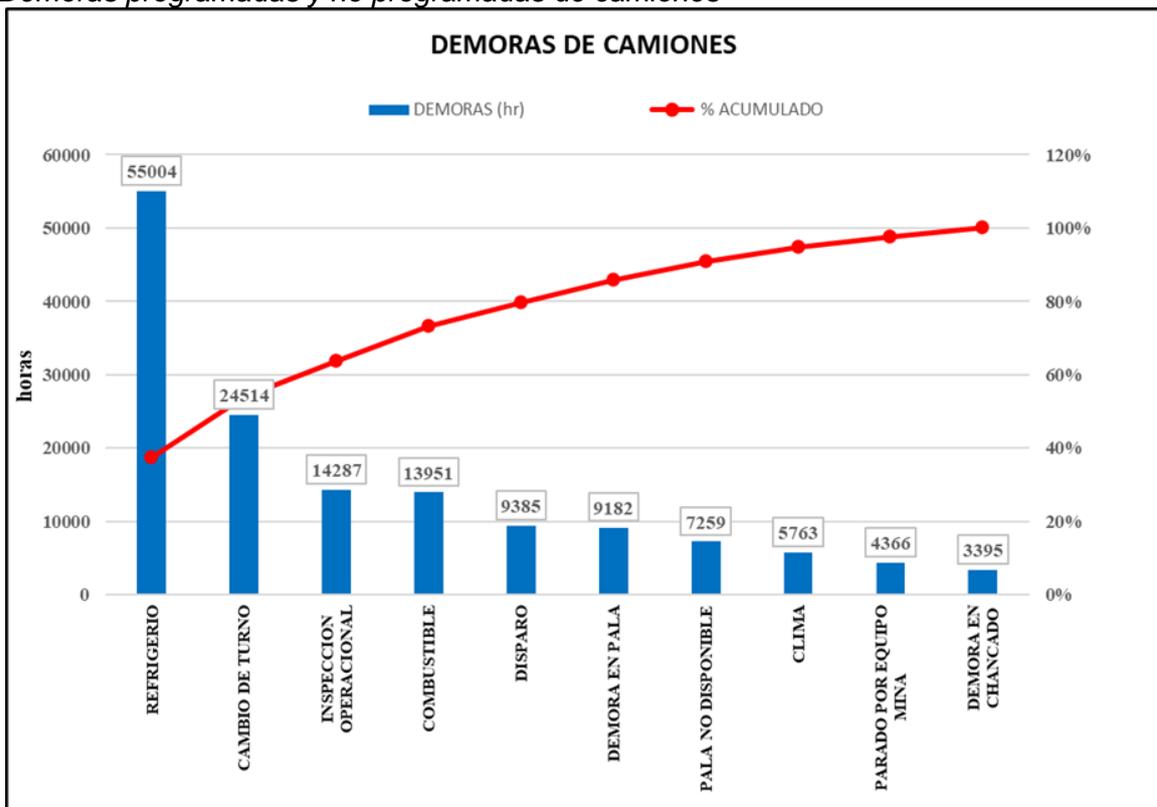
3.2.1 Procesamiento de datos de las demoras de camiones

Los datos numéricos de las demoras programadas y no programadas, de los equipos de acarreo, obtenidos de la base de datos del sistema Dispatch son procesados mediante hojas de cálculo en MS Office Excel para obtener gráficas, como el diagrama de Pareto, y evaluar las causas que generan la baja productividad de los camiones de acarreo, la gráfica mostrará cual de todas las demoras impacta a la utilización y productividad de los camiones de acarreo para evaluar posibles mejoras que disminuyan dicha demora.

En la Figura 4 se muestra el gráfico de las demoras programadas y demoras no programadas de los camiones, de los datos obtenidos de los años 2022 y 2023, donde se tienen la cantidad de horas acumuladas de las demoras de los camiones.

Figura 4

Demoras programadas y no programadas de camiones



Fuente: Elaboración propia

En el gráfico, de la Figura 4, se observa que la demora por REFRIGERIO es la que más tiempo acumulado tiene durante los años 2022 y 2023, la demora por REFRIGERIO

es la que más impacta en la utilización y productividad de los camiones de carreo. Se evalúan mejoras para disminuir los periodos de tiempo de esta demora.

El refrigerio de los operadores de camiones en el turno día consta de 45 minutos y en el turno noche consta de 55 minutos, los cuales son efectivos, a este tiempo de refrigerio se le adiciona el tiempo de traslado de los operadores de los parqueos a los comedores, los tiempos de refrigerio de los operadores más el tiempo de traslado de los operadores suman el tiempo de la demora por REFRIGERIO de los camiones de acarreo, que se registra en la base de datos del sistema Dispatch, dependiendo de la ubicación de los parqueos el tiempo de traslado tiene diferentes valores, que después de analizarlos se observan periodos de tiempos considerables, ocasionando que los camiones estén detenidos por periodos largos de tiempo.

En la mina a tajo abierto se tiene solo un comedor, el cual se denominará “COMEDOR SUR” y se tienen tres zonas de parqueos los cuales se denominarán “PARQUEO SUR”, “PARQUEO NORTE” y “PARQUEO OESTE”. En las tablas que se muestran a continuación se detallan las actividades que se realizan durante el periodo de refrigerio de los operadores de camiones y el periodo de tiempo de cada actividad.

En la Tabla 1, se detallan las actividades y periodos de tiempo de cada actividad, que se realizan para trasladar a los operadores del PARQUEO SUR hacia el COMEDOR SUR.

Tabla 1

Actividades del PARQUEO SUR al COMEDOR SUR

ACTIVIDADES PARA EL REFRIGERIO (PARQUEO SUR AL COMEDOR SUR)	
ACTIVIDADES	TIEMPO (min)
Camión llega al parqueo, operador apaga el equipo, desciende y se dirige a la movilidad	5
Operador es trasladado al comedor	7
Operador ingresa al comedor para refrigerio	45
Operador es trasladado al parqueo de camiones	7
Operador se dirige a su equipo, enciende el equipo y sale del parqueo	5
TIEMPO TOTAL QUE REGISTRA EL SISTEMA PARA LA DEMORA REFRIGERIO DE CAMIONES	69

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2, se detallan las actividades y periodos de tiempo de cada actividad, que se realizan para trasladar a los operadores del PARQUEO NORTE hacia el COMEDOR SUR.

Tabla 2

Actividades del PARQUEO NORTE al COMEDOR SUR

ACTIVIDADES PARA EL REFRIGERIO (PARQUEO NORTE AL COMEDOR SUR)	
ACTIVIDADES	TIEMPO (min)
Camión llega al parqueo, operador apaga el equipo, desciende y va a la movilidad	5
Operador es trasladado al comedor	12
Operador ingresa al comedor para refrigerio	45
Operador es trasladado al parqueo de camiones	12
Operador se dirige a su equipo, enciende el equipo y sale del parqueo	5
TIEMPO TOTAL QUE REGISTRA EL SISTEMA PARA LA DEMORA REFRIGERIO DE CAMIONES	79

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3, se detallan las actividades y periodos de tiempo de cada actividad, que se realizan para trasladar a los operadores del PARQUEO OESTE hacia el COMEDOR SUR.

Tabla 3

Actividades del PARQUEO OESTE al COMEDOR SUR

ACTIVIDADES PARA EL REFRIGERIO (PARQUEO OESTE AL COMEDOR SUR)	
ACTIVIDADES	TIEMPO (min)
Camión llega al parqueo, operador apaga el equipo, desciende y va a la movilidad	5
Operador es trasladado al comedor	15
Operador ingresa al comedor para refrigerio	45
Operador es trasladado al parqueo de camiones	15
Operador se dirige a su equipo, enciende el equipo y sale del parqueo	5
TIEMPO TOTAL QUE REGISTRA EL SISTEMA PARA LA DEMORA REFRIGERIO DE CAMIONES	85

Fuente: Elaboración propia

De las actividades que se detallan en las tablas 1,.2 y 3; la actividad donde se evalúa realizar mejoras para reducir los periodos de tiempo es la actividad de traslado de operadores de los parqueos al comedor, para reducir los periodos de tiempo de la demora por REFRIGERIO de los camiones de acarreo y de esta forma mejorar el ciclo de acarreo

de la flota de camiones. El principal problema es que solo se tiene un comedor (COMEDOR SUR) se evaluarán ubicar uno o dos comedores en la zona norte y oeste de la mina a tajo abierto; este análisis se realiza aplicando la Programación Lineal, para obtener tiempos de traslado óptimos y una buena distribución de los operadores hacia los comedores.

3.2.2 *Procesamiento de datos de campo*

Los datos recolectados de los tiempos de traslado de los parqueos a los posibles lugares de las nuevas zonas de comedor se analizarán mediante programación lineal, empleando la herramienta SOLVER el cual es un complemento de MS Office Excel. Para buscar la distribución óptima de camiones de acarreo en los parqueos y la distribución óptima de los operadores de los equipos en los comedores, con el objetivo de disminuir el tiempo de traslado de los operadores desde los diferentes parqueos a las zonas de refrigerio, y verificar cuanto tiempo disminuirá el traslado hacia las nuevas zonas de refrigerio.

Se tomará como Caso base la situación actual, en la que se tiene solo un comedor; luego se analiza el siguiente caso con dos comedores, Caso 1 (primera opción), comedor sur y comedor norte; y luego se analiza el caso con tres comedores, Caso 2 (segunda opción), comedor sur, comedor norte y comedor oeste.

Caso base (situación actual):

Tabla 4

Caso base (situación actual)

	PARQUEOS	COMEDOR
	Parqueo SUR	Comedor SUR
Caso base (situación actual)	Parqueo NORTE	
	Parqueo OESTE	

Fuente: Elaboración propia

Para el Caso base, se presenta la situación actual en la que se tiene solo un comedor (COMEDOR SUR), se calcularán los tiempos para este primer caso. La mina en estudio cuenta con 129 camiones de acarreo de los cuales por guardia se tienen operativos

en promedio 115 camiones; la detención de camiones se hace por grupos y se trabajará de la siguiente forma:

Número de camiones detenidos por ciclo o por parada:

- Primer ciclo = 50 camiones
- Segundo ciclo = 50 camiones

El resto de los camiones se ponen operativos con operadores que no tienen equipos u operadores que estuvieron asignados a camiones malogrados.

En la Figura 5 se muestra la distribución actual de los parqueos y el comedor con el que se cuenta actualmente.

Figura 5

Ubicación de parqueos y comedor sur



Fuente: Elaboración propia

Se presentan las siguientes tablas con los datos que serán utilizados.

En la Tabla 5, se detallan los tiempos de traslado del personal de los parqueos al comedor SUR.

Tabla 5

Tiempo de traslado de los parqueos al comedor SUR

	COMEDOR SUR		Tiempo total
	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	
PQ SUR	7	7	14
PQ NORTE	12	12	24
PQ OESTE	15	15	30

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6, se detallan la capacidad que tienen los parqueos, cantidad de camiones que pueden estacionarse al mismo tiempo.

Tabla 6

Capacidad de parqueos

	Nº camiones
PQ SUR	20
PQ NORTE	20
PQ OESTE	20

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7, se detalla la capacidad del comedor SUR, cantidad de personas que pueden ingresar al mismo tiempo.

Tabla 7

Capacidad de comedor

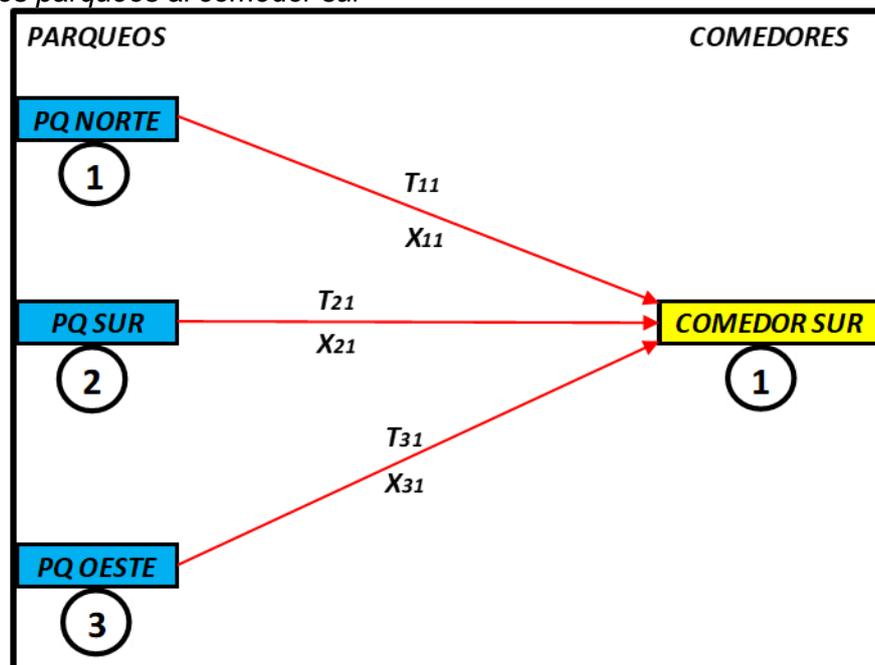
	Nº operadores
COMEDOR SUR	55

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 se muestran las rutas que se toman para trasladar a los operadores de los parqueos al comedor.

Figura 6

Rutas de los parqueos al comedor sur



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta el modelo matemático para aplicar la Programación Lineal y lograr una distribución óptima de los operadores a los comedores.

Variables:

- X_{ij}** = Cantidad de operadores del parqueo i al comedor j
- T_{ij}** = Tiempo de traslado de operadores del parqueo i al comedor j
- Z** = Tiempo total de traslado

Donde: **X_{ij} >= 0**

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = T_{11} * X_{11} + T_{21} * X_{21} + T_{31} * X_{31}$$

Restricciones:

- Número de camiones por parqueo

$$\begin{aligned} X_{11} &\leq 20 \\ X_{21} &\leq 20 \\ X_{31} &\leq 20 \end{aligned}$$

- Número de operadores por comedor

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \leq 55$$

- Número de camiones por ciclo

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} = 50$$

En la Tabla 8, se muestran y ordenan las variables que serán utilizadas en las ecuaciones.

Tabla 8

Variables iniciales que serán utilizadas en la función objetivo

	COMEDOR SUR		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	X ₁₁	T ₁₁	X ₁₁ *T ₁₁
PQ NORTE	X ₂₁	T ₂₁	X ₂₁ *T ₂₁
PQ OESTE	X ₃₁	T ₃₁	X ₃₁ *T ₃₁

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 5, se obtienen los tiempos de traslado de los parqueos al comedor sur.

$$\begin{aligned} T_{11} &= 14 \\ T_{21} &= 24 \\ T_{31} &= 30 \end{aligned}$$

En la Tabla 9 se muestran las variables finales que serán utilizadas en la función objetivo, después de reemplazar los datos de los tiempos de traslado y quedaría como se muestra continuación:

Tabla 9

Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo

	COMEDOR SUR		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	X_{11}	14	$X_{11} * 14$
PQ NORTE	X_{21}	24	$X_{21} * 24$
PQ OESTE	X_{31}	30	$X_{31} * 30$

Fuente: Elaboración propia

La función objetivo quedaría como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= T_{11} * X_{11} + T_{21} * X_{21} + T_{31} * X_{31} \\ \text{Min } Z &= 14 * X_{11} + 24 * X_{21} + 30 * X_{31} \end{aligned}$$

Las restricciones serían las siguientes:

Número de camiones por parqueo

$$\begin{aligned} X_{11} &\leq 20 \\ X_{21} &\leq 20 \\ X_{31} &\leq 20 \end{aligned}$$

Número de operadores por comedor

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \leq 55$$

Número de camiones por ciclo

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} = 50$$

En la Tabla 10 y Tabla 11, se muestran los resultados que se obtuvieron mediante el SOLVER, que es una herramienta de MS Office Excel, se obtiene los siguientes resultados para los 2 ciclos:

Tabla 10

Resultados del SOLVER para el primer ciclo

	COMEDOR SUR		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	20	14	280
PQ NORTE	20	24	280
PQ OESTE	10	30	300
	50		1060

Nota: Tiempo total (min) = 1060. Tiempo total (hr) = 17.7

Tabla 11*Resultados del SOLVER para el segundo ciclo*

	COMEDOR SUR		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	20	14	280
PQ NORTE	20	24	280
PQ OESTE	10	30	300
	50		1060

Nota: Tiempo total (min) = 1060. Tiempo total (hr) = 17.7

Resultados del Caso base, de la suma de los tiempos de traslado de los dos ciclos se obtiene el tiempo de traslado total:

$$\begin{aligned}
 \text{Tiempo total de traslado por refrigerio} &= \text{Tiempo del primer ciclo} \\
 &+ \text{Tiempo del segundo ciclo} \\
 \text{Tiempo total de traslado por refrigerio (min)} &= \mathbf{2120} \\
 \text{Tiempo total de traslado por refrigerio (hr)} &= \mathbf{35.3}
 \end{aligned}$$

En total de tiempo de traslado de operadores por refrigerio por turno, contando con un solo comedor, es de 2120 minutos o 35.3 horas.

Caso 1 (primera opción):

Tabla 12*Caso 1 (primera opción)*

	PARQUEOS	COMEDORES
	Parqueo SUR	Comedor SUR
Caso 1 (primera opción)	Parqueo NORTE	Comedor NORTE
	Parqueo OESTE	

Fuente: Elaboración propia

Para el Caso 1, se presenta la situación en la que se tendría el comedor actual (COMEDOR SUR) y un segundo comedor (COMEDOR NORTE), se calcularán los tiempos para este segundo caso. La mina en estudio cuenta con 129 camiones de acarreo de los cuales por guardia se cuentan en promedio con 115 camiones operativos; la detención de camiones se hace por grupos y se trabajará de la siguiente forma:

Número de camiones detenidos por ciclo o por parada:

- Primer ciclo = 50 camiones
- Segundo ciclo = 50 camiones

El resto de los camiones se ponen operativos con operadores que no tienen equipos u operadores que estuvieron asignados a camiones malogrados.

En la Figura 7 se muestra la distribución actual de los parqueos, el comedor con el que se cuenta actualmente y la ubicación que tendrá el segundo comedor.

Figura 7

Ubicación de parqueos, comedores sur y norte



Fuente: Elaboración propia

Se presentan las siguientes tablas con los datos que serán utilizados.

En la Tabla 13 y Tabla 14, se detallan los tiempos de traslado del personal de los parqueos al comedor SUR y al comedor NORTE.

Tabla 13

Tiempo de traslado de los parqueos al comedor SUR

	COMEDOR SUR		
	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
PQ SUR	7	7	14
PQ NORTE	12	12	24
PQ OESTE	15	15	30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14*Tiempo de traslado de los parqueos al comedor NORTE*

	COMEDOR NORTE		
	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
PQ SUR	11	11	22
PQ NORTE	8	8	16
PQ OESTE	13	13	26

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15, se detallan la capacidad que tienen los parqueos, cantidad de camiones que pueden estacionarse al mismo tiempo.

Tabla 15*Capacidad de parqueos*

	Nº camiones
PQ SUR	20
PQ NORTE	20
PQ OESTE	20

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16, se detalla la capacidad del comedor SUR y comedor NORTE, cantidad de personas que pueden ingresar al mismo tiempo.

Tabla 16*Capacidad de comedores*

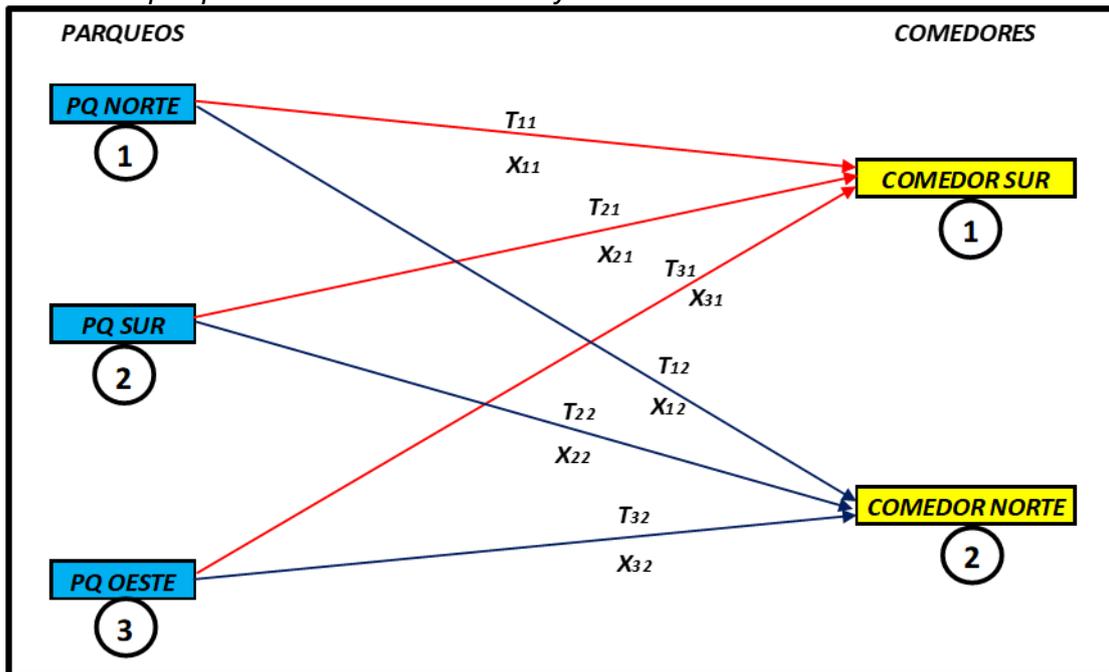
	Nº operadores
COMEDOR SUR	55
COMEDOR NORTE	15

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 se muestran las rutas que se toman para trasladar a los operadores de los parqueos a los comedores.

Figura 8

Rutas de los parqueos a los comedores sur y norte



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta el modelo matemático para aplicar la Programación Lineal y lograr una distribución óptima de los operadores a los comedores.

Variables:

- X_{ij} = Cantidad de operadores del parqueo i al comedor j
- T_{ij} = Tiempo de traslado de operadores del parqueo i al comedor j
- Z = Tiempo total de traslado

Donde: $X_{ij} \geq 0$

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = T_{11} * X_{11} + T_{21} * X_{21} + T_{31} * X_{31} + T_{12} * X_{12} + T_{22} * X_{22} + T_{32} * X_{32}$$

Restricciones:

- Número de camiones por parqueo

$$X_{11} + X_{12} \leq 20$$

$$X_{21} + X_{22} \leq 20$$

$$X_{31} + X_{32} \leq 20$$

- Número de operadores por comedor

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \leq 55$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} \leq 15$$

- Número de camiones por ciclo

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{12} + X_{22} + X_{32} = 50$$

En la Tabla 17, se muestran y ordenan las variables que serán utilizadas en las ecuaciones.

Tabla 17

Variables iniciales que serán utilizadas en la función objetivo

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	X_{11}	T_{11}	X_{12}	T_{12}	$X_{11} * T_{11} + X_{12} * T_{12}$
PQ NORTE	X_{21}	T_{21}	X_{22}	T_{22}	$X_{21} * T_{21} + X_{22} * T_{22}$
PQ OESTE	X_{31}	T_{31}	X_{32}	T_{32}	$X_{31} * T_{31} + X_{32} * T_{32}$

Fuente: Elaboración propia

De las Tablas 13 y 14, se tienen los tiempos de traslado de los parqueos a los comedores sur y norte.

$$\begin{aligned} T_{11} &= 14 \\ T_{21} &= 24 \\ T_{31} &= 30 \\ T_{12} &= 22 \\ T_{22} &= 16 \\ T_{32} &= 26 \end{aligned}$$

En la tabla 18 se muestran las variables finales que serán utilizadas en la función objetivo, después de reemplazar los datos de los tiempos de traslado y quedaría como se muestra a continuación:

Tabla 18

Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	X_{11}	14	X_{12}	22	$X_{11} * 14 + X_{12} * 22$
PQ NORTE	X_{21}	24	X_{22}	16	$X_{21} * 24 + X_{22} * 16$
PQ OESTE	X_{31}	30	X_{32}	26	$X_{31} * 30 + X_{32} * 26$

Fuente: Elaboración propia

La función objetivo quedaría como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z &= T_{11} * X_{11} + T_{21} * X_{21} + T_{31} * X_{31} + T_{12} * X_{12} + T_{22} * X_{22} + T_{32} * X_{32} \\ \text{Min } Z &= 14 * X_{11} + 24 * X_{21} + 30 * X_{31} + 22 * X_{12} + 16 * X_{22} + 26 * X_{32} \end{aligned}$$

Las restricciones serían las siguientes:

Número de camiones por parqueo

$$X_{11} + X_{12} \leq 20$$

$$X_{21} + X_{22} \leq 20$$

$$X_{31} + X_{32} \leq 20$$

Número de operadores por comedor

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \leq 55$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} \leq 15$$

Número de camiones por ciclo

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{12} + X_{22} + X_{32} = 50$$

En la Tabla 19 y Tabla 20, se muestran los resultados que se obtuvieron mediante el SOLVER, que es una herramienta de MS Office Excel, se obtiene los siguientes resultados para los 2 ciclos:

Tabla 19

Resultados del SOLVER para el primer ciclo

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		Tiempo total (min)	
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado	Capacidad usada
PQ SUR	20	14	0	22	280	20
PQ NORTE	5	24	15	16	360	20
PQ OESTE	10	30	0	26	300	10
	35		15		940	50

Nota: Tiempo total (min) = 940. Tiempo total (hr) 15.7

Tabla 20

Resultados del SOLVER para el segundo ciclo

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		Tiempo total (min)	
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado	Capacidad usada
PQ SUR	20	14	0	22	280	20
PQ NORTE	5	24	15	16	360	20
PQ OESTE	10	30	0	26	300	10
	35		15		940	50

Nota: Tiempo total (min) = 940. Tiempo total (hr) 15.7

Resultados del Caso 1, de la suma de los tiempos de traslado de los dos ciclos se obtiene el tiempo de traslado total:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo total de traslado por refrigerio} &= \text{Tiempo del primer ciclo} + \text{Tiempo del segundo ciclo} \\ \text{Tiempo total de traslado por refrigerio (min)} &= 1880 \\ \text{Tiempo total de traslado por refrigerio (hr)} &= 31.3 \end{aligned}$$

En total de tiempo de traslado de operadores por refrigerio por turno, contando con dos comedores, es de 1880 minutos o 31.3 horas.

Caso 2 (segunda opción):

Tabla 21

Caso 2 (segunda opción)

	PARQUEOS	COMEDORES
	Parqueo SUR	Comedor SUR
Caso 2 (primera opción)	Parqueo NORTE	Comedor NORTE
	Parqueo OESTE	Comedor OESTE

Fuente: Elaboración propia

Para el Caso 2, se presenta la situación en la que se tendría el comedor actual (COMEDOR SUR), un segundo comedor (COMEDOR NORTE) y un tercer comedor (COMEDOR OESTE), se calcularán los tiempos para este segundo caso. La mina en estudio cuenta con 129 camiones de acarreo de los cuales por guardia se cuentan en promedio con 115 camiones operativos; la detención de camiones se hace por grupos y se trabajará de la siguiente forma:

Número de camiones detenidos por ciclo o por parada:

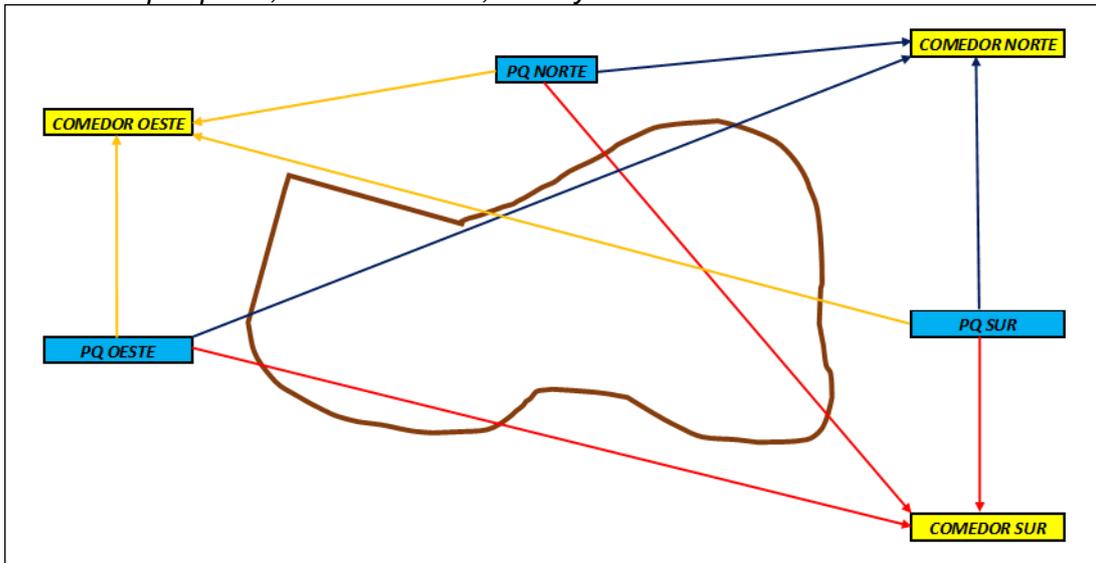
- Primer ciclo = 50 camiones
- Segundo ciclo = 50 camiones

El resto de los camiones se ponen operativos con operadores que no tienen equipos u operadores que estuvieron asignados a camiones malogrados.

En la Figura 9 se muestran la distribución actual de los parqueos, el comedor con el que se cuenta actualmente y las ubicaciones que tendrán el segundo y tercer comedor.

Figura 9

Ubicación de parqueos, comedores sur, norte y oeste



Fuente: Elaboración propia

Se presentan las siguientes tablas con los datos que serán utilizados.

En la Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24, se detallan los tiempos de traslado del personal de los parqueos al comedor SUR, al comedor NORTE y al comedor OESTE.

Tabla 22

Tiempo de traslado de los parqueos al comedor SUR

	COMEDOR SUR		
	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
PQ SUR	7	7	14
PQ NORTE	12	12	24
PQ OESTE	15	15	30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

Tiempo de traslado de los parqueos al comedor NORTE

	COMEDOR NORTE		
	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
PQ SUR	11	11	22
PQ NORTE	8	8	16
PQ OESTE	13	13	26

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24*Tiempo de traslado de los parqueos al comedor OESTE*

COMEDOR OESTE			
	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
PQ SUR	16	16	32
PQ NORTE	12	12	24
PQ OESTE	6	6	12

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 25, se detallan la capacidad que tienen los parqueos, cantidad de camiones que pueden estacionarse al mismo tiempo.

Tabla 25*Capacidad de parqueos*

	Nº camiones
PQ SUR	20
PQ NORTE	20
PQ OESTE	20

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 26, se detalla la capacidad del comedor SUR, comedor NORTE y comedor OESTE, cantidad de personas que pueden ingresar al mismo tiempo.

Tabla 26*Capacidad de comedores*

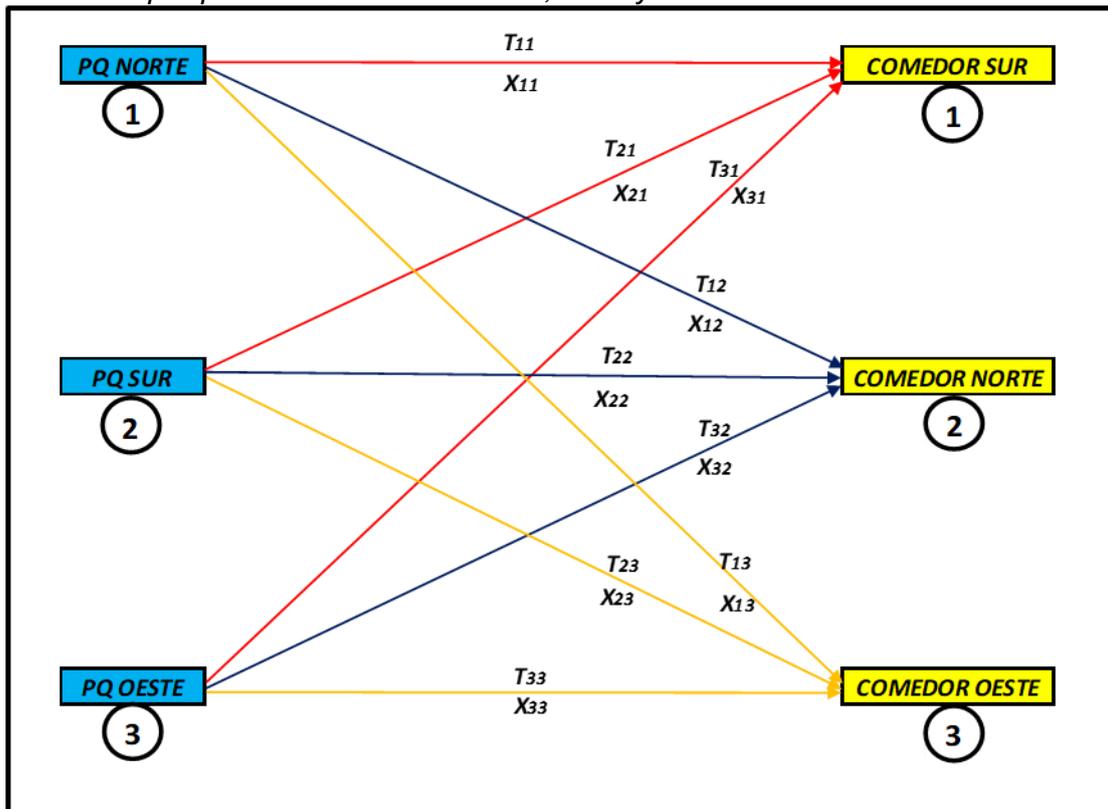
	Nº operadores
COMEDOR SUR	55
COMEDOR NORTE	15
COMEDOR OESTE	15

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 10 se muestran las rutas que se toman para trasladar a los operadores de los parqueos a los comedores.

Figura 10

Rutas de los parqueos a los comedores sur, norte y oeste



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta el modelo matemático para aplicar la Programación Lineal y lograr una distribución óptima de los operadores a los comedores.

Variables:

- X_{ij} = Cantidad de operadores del parqueo i al comedor j
- T_{ij} = Tiempo de traslado de operadores del parqueo i al comedor j
- Z = Tiempo total de traslado

Donde: $X_{ij} \geq 0$

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = T_{11} * X_{11} + T_{21} * X_{21} + T_{31} * X_{31} + T_{12} * X_{12} + T_{22} * X_{22} + T_{32} * X_{32} + T_{13} * X_{13} + T_{23} * X_{23} + T_{33} * X_{33}$$

Restricciones:

- Número de camiones por parqueo

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} + X_{13} &\leq 20 \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} &\leq 20 \\ X_{31} + X_{32} + X_{33} &\leq 20 \end{aligned}$$

- Número de operadores por comedor

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \leq 55$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} \leq 15$$

$$X_{13} + X_{23} + X_{33} \leq 15$$

- Número de camiones por ciclo

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{13} + X_{23} + X_{33} = 50$$

En la Tabla 27, se muestran y ordenan las variables que serán utilizadas en las ecuaciones.

Tabla 27

Variables iniciales que serán utilizadas en la función objetivo

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		COMEDOR OESTE		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	X_{11}	T_{11}	X_{12}	T_{12}	X_{13}	T_{13}	$X_{11} * T_{11} + X_{12} * T_{12} + X_{13} * T_{13}$
PQ NORTE	X_{21}	T_{21}	X_{22}	T_{22}	X_{23}	T_{23}	$X_{21} * T_{21} + X_{22} * T_{22} + X_{23} * T_{23}$
PQ OESTE	X_{31}	T_{31}	X_{32}	T_{32}	X_{33}	T_{33}	$X_{31} * T_{31} + X_{32} * T_{32} + X_{33} * T_{33}$

Fuente: Elaboración propia

De las Tablas 23, 24 y 25, se tienen los tiempos de traslado de los parqueos a los comedores sur, norte y oeste.

$$\begin{aligned} T_{11} &= 14 \\ T_{21} &= 24 \\ T_{31} &= 30 \\ T_{12} &= 22 \\ T_{22} &= 16 \\ T_{32} &= 26 \\ T_{13} &= 32 \\ T_{23} &= 24 \\ T_{33} &= 12 \end{aligned}$$

En la Tabla 28 se muestran las *Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo* después de reemplazar los datos de los tiempos de traslado y quedaría como se muestra a continuación:

Tabla 28

Variables finales que serán utilizadas en la función objetivo

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		COMEDOR OESTE		Tiempo total (min)
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado
PQ SUR	X_{11}	14	X_{12}	22	X_{13}	32	$X_{11} * 14 + X_{12} * 22 + X_{13} * 32$
PQ NORTE	X_{21}	24	X_{22}	16	X_{23}	24	$X_{21} * 24 + X_{22} * 16 + X_{23} * 24$
PQ OESTE	X_{31}	30	X_{32}	26	X_{33}	12	$X_{31} * 30 + X_{32} * 26 + X_{33} * 12$

Fuente: Elaboración propia

La función objetivo quedaría como se muestra a continuación:

$$\text{Min } Z = T_{11} * X_{11} + T_{21} * X_{21} + T_{31} * X_{31} + T_{12} * X_{12} + T_{22} * X_{22} + T_{32} * X_{32} + T_{13} * X_{13} + T_{23} * X_{23} + T_{33} * X_{33}$$

$$\text{Min } Z = 14 * X_{11} + 24 * X_{21} + 30 * X_{31} + 22 * X_{12} + 16 * X_{22} + 26 * X_{32} + 32 * X_{13} + 24 * X_{23} + 12 * X_{33}$$

Las restricciones serían las siguientes:

Número de camiones por parqueo

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} \leq 20$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} \leq 20$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{33} \leq 20$$

Número de operadores por comedor

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \leq 55$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} \leq 15$$

$$X_{13} + X_{23} + X_{33} \leq 15$$

Número de camiones por ciclo

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{13} + X_{23} + X_{33} = 50$$

En la Tabla 27 y Tabla 28, se muestran los resultados que se obtuvieron mediante el SOLVER, que es una herramienta de MS Office Excel, se obtiene los siguientes resultados para los 2 ciclos:

Tabla 29*Resultados del SOLVER para el primer ciclo*

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		COMEDOR OESTE		Tiempo total (min)	
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado	Capacidad usada
PQ SUR	20	14	0	22	0	32	280	20
PQ NORTE	0	24	15	16	0	24	240	15
PQ OESTE	0	30	0	26	15	12	180	15
	20		15		15		700	50

Nota: Tiempo total (min) = 700. Tiempo total (hr) = 11.7

Tabla 30*Resultados del SOLVER para el segundo ciclo*

	COMEDOR SUR		COMEDOR NORTE		COMEDOR OESTE		Tiempo total (min)	
	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Capacidad	Tiempo de traslado (min)	Nº camiones x tiempo traslado	Capacidad usada
PQ SUR	20	14	0	22	0	32	280	20
PQ NORTE	0	24	15	16	0	24	240	15
PQ OESTE	0	30	0	26	15	12	180	15
	20		15		15		700	50

Nota: Tiempo total (min) = 700. Tiempo total (hr) = 11.7

Resultados del Caso 2, de la suma de los tiempos de traslado de los dos ciclos se obtiene el tiempo de traslado total:

$$\text{Tiempo total de traslado por refrigerio} = \text{Tiempo del primer ciclo} + \text{Tiempo del segundo ciclo}$$

$$\text{Tiempo total de traslado por refrigerio (min)} = 1400$$

$$\text{Tiempo total de traslado por refrigerio (hr)} = 23.3$$

El total de tiempo de traslado de operadores por refrigerio por turno, contando con tres comedores, es de 1400 minutos o 23.3 horas.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Análisis de resultados de las demoras de camiones.

De la evaluación de los tiempos de las demoras operativas de los camiones de acarreo, demoras programadas y no programadas, se evidencia que la demora que más afecta el ciclo de acarreo de la flota de camiones es la demora por refrigerio. Se evaluarán alternativas para disminuir el traslado de los operadores, lo cual disminuirá el tiempo de la demora por refrigerio de los equipos de acarreo.

Las alternativas son evaluar la implementación de 2 nuevas zonas de comedor para disminuir el tiempo de traslado de los operadores, de esta manera reducir el tiempo de la demora por refrigerio y mejorar el ciclo de acarreo de la flota camiones.

Para este trabajo de investigación se plantea disminuir la demora por refrigerio, las demoras que también tienen impacto en la utilización de los equipos de acarreo, como la demora por cambio de turno y demora por abastecimiento de combustible podrían ser analizadas para buscar reducirlas, lograr que los equipos trabajen más eficientemente e incrementar la utilización de los equipos de acarreo.

4.2 Análisis de resultados de los datos de campo.

Se analizan los resultados de los datos de campo obtenidos en los tres casos planteados:

4.2.1 Caso base

De los resultados obtenidos del Caso base, situación actual donde se cuenta con un solo comedor, da un resultado total de tiempo de traslado de operadores de los parqueos al comedor, igual a 2120 min (35.3 hr). Se plantea este caso, en el cual no se ha hecho ninguna implementación de comedores, nos servirá para compararlo con los otros casos, Caso 1 y Caso 2, donde se implementarán nuevos comedores.

4.2.2 Caso 1

De los resultados obtenidos del Caso 1, donde se propone hacer un comedor en la zona norte, nos da un resultado total de tiempo de traslado de operadores de los parqueos a los comedores igual a 1880 min (31.3 hr).

4.2.3 Caso 2

De los resultados obtenidos del Caso 2, donde se propone hacer un comedor en la zona norte y un comedor en la zona oeste, nos da un resultado total de tiempo de traslado de operadores de los parqueos a los comedores igual a 1400 min (23.3 hr).

En la Tabla 31, se muestran los resultados del tiempo de traslado de los operadores de los 3 casos analizados.

Tabla 31

Resultados de los Casos analizados.

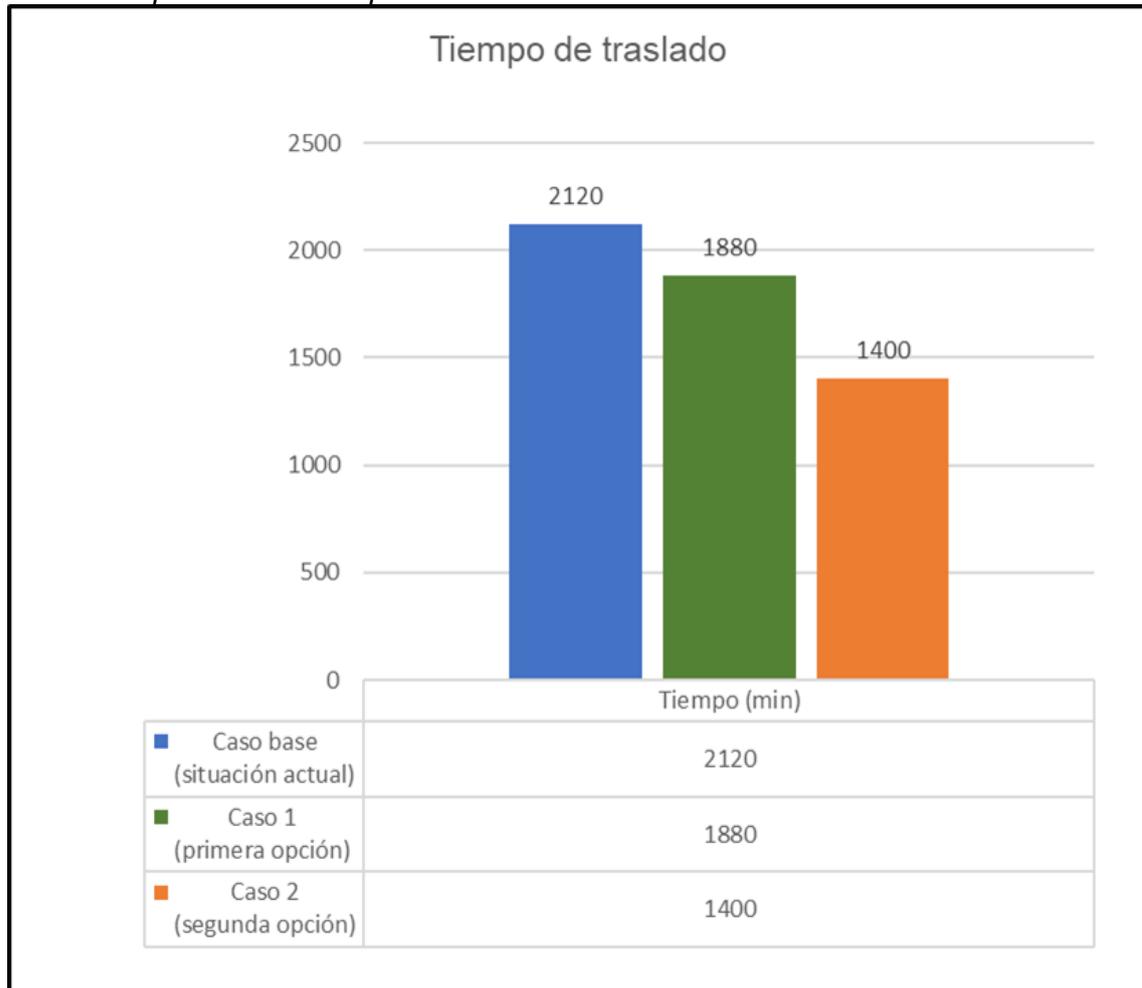
	Tiempo (min)	Tiempo (hr)
Caso base (situación actual)	2120	35.3
Caso 1 (primera opción)	1880	31.3
Caso 2 (segunda opción)	1400	23.3
Diferencia (Caso base – Caso 1)	240	4
Diferencia (Caso base – Caso 2)	720	12

Fuente: Elaboración propia

En la figura 11 se muestran los resultados de los tiempos totales de traslados de operadores, de los 3 casos analizados.

Figura 11

Cuadro comparativo del tiempo de traslado



Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos de los tiempos totales de traslado de los operadores de los parqueos de los equipos de acarreo a los comedores, en el Caso 1 y Caso 2 se obtienen tiempos menores comparados con el Caso base.

Se compararán los casos analizados, Caso 1 y Caso 2, con el Caso base. Para evaluar las mejoras que se obtienen de los casos propuestos, verificamos cuanto se reduce el tiempo total de traslado de operadores, que sería el tiempo que se reduciría la demora por refrigerio de los equipos de acarreo, verificamos en cuanto se incrementa la utilización de los equipos de acarreo debido a esta disminución de la demora por refrigerio y en qué medida se incrementaría la productividad de la flota de camiones de la mina a tajo abierto.

4.2.4 Comparación de Caso base (situación actual) con el Caso 1 (primera opción)

En la Figura 12, se muestra la comparación de los resultados de los tiempos totales de traslados de operadores, del Caso base y el Caso 1 analizados.

Figura 12

Cuadro comparativo del tiempo de traslado (Caso base y Caso 1)



Fuente: Elaboración propia

De la comparación del Caso base y el Caso 1, se obtiene una diferencia de tiempo de traslado total de 240 min (4 hr) en un turno, lo que representa un 11% menos del tiempo utilizado actualmente para el traslado del personal que opera los equipos de acarreo. Lo que representa un incremento de la utilización de los camiones de 0.33 % por turno, obteniendo una utilización del 86.33 %. La productividad con esta mejora aumentaría de 434.66 tn/hr a 436.33 tn/hr, la producción por turno aumentaría aproximadamente en 3484 toneladas.

4.2.5 Comparación de Caso base (situación actual) con el Caso 2 (segunda opción)

En la Figura 13, se muestra la comparación de los resultados de los tiempos totales de traslados de operadores, del Caso base y el Caso 2 analizados.

Figura 13

Cuadro comparativo del tiempo de traslado (Caso base y Caso 2)



Fuente: Elaboración propia

De la comparación del Caso base y el Caso 2, se obtiene una diferencia de tiempo de traslado total de 720 min (12 hr) en un turno, lo que representa un 34% menos del tiempo utilizado actualmente para el traslado del personal que opera los equipos de acarreo. Lo que representa un incremento de la utilización de los camiones de 1.00 % por turno, obteniendo una utilización del 87.00 %. La productividad con esta mejora aumentaría de 434.66 tn/hr a 439.69 tn/hr, la producción por turno aumentaría aproximadamente en 10492 toneladas.

Tabla 32*Resultados y mejoras de los Casos analizados.*

	Tiempo de traslado (min)	Tiempo de traslado (hr)	Utilización (%)	Productividad (tn/hr)	Toneladas (turno)
Caso base	2120	35.3	86.0	434.7	450,000.0
Caso 1	1880	31.3	86.3	436.33	453,484,0
Caso2	1400	23.3	87.0	439.69	460,492.2

Fuente: Elaboración propia

El ahorro por año para los casos planteados se muestra en la siguiente tabla, tomando un costo horario del camión de 400 \$/hr.

Tabla 33*Resultados de reducción de costos por año de los Casos analizados.*

	Horas de camión ahorradas	Ahorro por año (\$)
Caso 1	4	1,168,000
Caso2	12	3,504,000

Fuente: Elaboración propia

Se realiza la evaluación económica de los casos planteados, se estima un costo de implementación para un comedor de \$ 200,000, para el Caso 1 se implementará un comedor y para el Caso 2 se implementarán dos comedores, se asumirá una tasa de descuento anual del 12 % y un gasto adicional de \$ 20,000 anual por cada comedor, para estimar el Valor Actual Neto (VAN) de cada caso.

Tabla 34*Datos para la evaluación económica.*

	Ahorro por año (\$)	Costo de inversión (\$)	Gastos adicionales por año (\$)
Caso 1	1,168.000	200,000	20,000
Caso2	3,504,000	400,000	40,000

Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica Caso 1

Tabla 35

Resultados de la evaluación económica caso 1.

	Costo de inversión (\$)	Ahorro año 1 (\$)	Ahorro año 2 (\$)	Ahorro año 3 (\$)
Caso 1	200,000	1,148,000	1,148,000	1,148,000
Tasa de descuento	12 %			
VAN (1 año)	825,000			
VAN (2 años)	1,740,179			
VAN (3 años)	2,557,302			

Fuente: Elaboración propia

Evaluación económica Caso 2

Tabla 36

Resultados de la evaluación económica caso 2.

	Costo de inversión (\$)	Ahorro año 1 (\$)	Ahorro año 2 (\$)	Ahorro año 3 (\$)
Caso 2	400,000	3,464,000	3,464,000	3,464,000
Tasa de descuento	12 %			
VAN (1 año)	2,692,857			
VAN (2 años)	5,454,337			
VAN (3 años)	7,919,944			

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El incremento de comedores ayudará a disminuir el tiempo de traslado de los operadores de equipos de acarreo hacia los comedores.

Una ubicación óptima de los comedores ayudará a disminuir el tiempo de traslado de los operadores de equipos de acarreo hacia los comedores.

La distribución óptima de los operadores de los equipos de acarreo hacia los distintos comedores ayudará a reducir el tiempo de traslado hacia los comedores.

Ubicar una zona de comedor más en la zona norte del tajo reducirá el tiempo de traslado de operadores de los equipos de acarreo en 240 min por turno, mejorará la utilización en 0.33%, de 86.00% a 86.33% y mejorará la productividad de los camiones de 434.66 tn/hr a 436.33 tn/hr.

Ubicar dos zonas de comedor más, uno en la zona norte y otra en la zona oeste del tajo reducirá el tiempo de traslado de operadores de los equipos de acarreo en 720 min por turno, mejorará la utilización en 1.00%, de 86% a 87.00% y mejorará la productividad de los camiones de 434.66 a 439.69 tn/hr.

Una correcta distribución de envío de los equipos de acarreo hacia los diferentes parqueos ayudará a reducir el tiempo de demora por refrigerio.

Recomendaciones

Evaluar constantemente ubicaciones óptimas de zonas de parqueos para el equipo de acarreo.

Evaluar ubicaciones óptimas de zonas de comedor, para el personal que opera los equipos de acarreo.

Hacer un adecuado envío de camiones hacia los parqueos a la hora de refrigerio, para disminuir la hora de espera de operadores que serán recogidos para ser trasladados hacia los comedores.

Determinar las mejores rutas de traslado de operadores de los parqueos de los equipos de acarreo hacia los comedores.

Hacer una distribución adecuados de los equipos que trasladan a los operadores de los equipos de acarreo hacia los comedores.

Hacer un seguimiento del tiempo que toman los operadores en la hora de refrigerio.

No disminuir el abastecimiento de mineral en la hora de refrigerio, hacer una correcta distribución y envío de los equipos de acarreo hacia los comedores.

Mantener en buenas condiciones las rutas que se utilizan para trasladar a los operadores de los equipos de acarreo hacia los comedores.

Referencias bibliográficas

- Apaza, E. (2017). *“Disminución de tiempos improductivos para incrementar la utilización de los equipos de carguío y acarreo en la mejora continua de la productividad en el tajo Chalarina en minera Shahuindo S.A.C.”*
- Campos, M. (2017). *“Impacto de la programación lineal con el uso de solver en la optimización de las operaciones de carguío – acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, La Libertad, 2017.”*
- Chura, M. (2018). *“Reducción de demoras operativas por cambio de turno con la implementación de módulo de cambio de guardia en la unidad minera Cuajone.”*
- Chura, W. (2019). *“Propuesta de un plan de control de utilización para flotas de acarreo de una mina a tajo abierto.”*
- Escarcena, R. (2019). *“Evaluación de las operaciones de carguío y transporte para el mejoramiento de la productividad en la unidad minera Tacaza – CIEMSA.”*
- Estudios mineros del Perú SAC (2000) *“Manual de minería”*.
- Barrientos, V. (2014). *“Análisis de factores operacionales en demoras y productividad de sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto.”*
- INAPAC Universidad Tecnológica de Chile (2015). *“Extracción mina II: Apuntes carguío y transporte.”*
- Mauricio, G. (2015). *“Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca.”*
- Modular Mining Systems (2008) *“Conociendo el sistema Dispatch”*
- Modular Mining Systems (1999) *“Manual-utilizando Dispatch”*
- Orellana, F. (2018). *“Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de corto plazo en minería a cielo abierto.”*
- Pájaro Huertas, David (2002). *La Formulación de Hipótesis*, México.
- Rojas, S. (2006). *Mejoramiento de la performance y gestión del Dispatch en Cerro Verde.*

Taha, H. (2004). *Investigación de operaciones*, 7ª edición.

Taha, H. (2012). *Investigación de operaciones*, Pearson Education, México.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Tabla de tiempos de traslados del parqueo sur al comedor sur.	1
Anexo 2: Tabla de tiempos de traslados del parqueo norte al comedor sur.	1
Anexo 3: Tabla de tiempos de traslados del parqueo oeste al comedor sur.....	2
Anexo 4: Tabla de tiempos de traslados del parqueo sur al comedor norte.	2
Anexo 5: Tabla de tiempos de traslados del parqueo norte al comedor norte.	3
Anexo 6: Tabla de tiempos de traslados del parqueo oeste al comedor norte.....	3
Anexo 7: Tabla de tiempos de traslados del parqueo sur al comedor oeste.....	4
Anexo 8: Tabla de tiempos de traslados del parqueo norte al comedor oeste.	4
Anexo 9: Tabla de tiempos de traslados del parqueo oeste al comedor oeste.	5
Anexo 10: Tabla de capacidad de comedores.	5
Anexo 11: Tabla de capacidad de parqueos.	5
Anexo 12: Tabla de demoras operativas, que tienen mayor tiempo acumulado, de los años 2022 y 2023.	6
Anexo 13: Tabla de demoras operativas de los años 2022 y 2023.	7
Anexo 14: Tabla de demoras operativas de los años 2022 y 2023, flota de camiones Caterpillar 793.....	8
Anexo 15: Tabla de demoras operativas de los años 2022 y 2023, flota de camiones Komatsu 930	9
Anexo 16: Matriz de consistencia	10

Anexo 1: Tabla de tiempos de traslados del parqueo sur al comedor sur.

PARQUEO SUR - COMEDOR SUR			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	7.6	6.4	14.0
2	6.6	6.9	13.5
3	6.1	7.9	14.0
4	8.1	5.9	14.0
5	7.1	6.4	13.5
6	7.1	6.4	13.5
7	6.6	7.4	14.0
8	7.6	7.9	15.5
9	6.1	7.9	14.0
10	8.1	5.9	14.0
Tiempo promedio (min)			14.0

Anexo 2: Tabla de tiempos de traslados del parqueo norte al comedor sur.

PARQUEO NORTE - COMEDOR SUR			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	12.7	11.5	24.2
2	11.7	12.0	23.7
3	11.2	13.0	24.2
4	13.2	11.0	24.2
5	12.2	11.5	23.7
6	12.0	11.3	23.3
7	11.5	12.3	23.8
8	12.5	12.8	25.3
9	11.0	12.8	23.8
10	13.0	10.8	23.8
Tiempo promedio (min)			24.0

Anexo 3: Tabla de tiempos de traslados del parqueo oeste al comedor sur.

PARQUEO OESTE - COMEDOR SUR			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	15.3	14.5	29.8
2	14.3	15.0	29.3
3	13.8	16.0	29.8
4	15.8	14.0	29.8
5	14.8	14.5	29.3
6	15.0	14.7	29.7
7	14.5	15.7	30.2
8	15.5	16.2	31.7
9	14.0	16.2	30.2
10	16.0	14.2	30.2
Tiempo promedio (min)			30.0

Anexo 4: Tabla de tiempos de traslados del parqueo sur al comedor norte.

PARQUEO SUR - COMEDOR NORTE			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	11.5	10.8	22.3
2	10.5	11.3	21.8
3	10.0	12.3	22.3
4	12.0	10.3	22.3
5	11.0	10.8	21.8
6	10.7	10.5	21.2
7	10.2	11.5	21.7
8	11.2	12.0	23.2
9	9.7	12.0	21.7
10	11.7	10.0	21.7
Tiempo promedio (min)			22.0

Anexo 5: Tabla de tiempos de traslados del parqueo norte al comedor norte.

PARQUEO NORTE - COMEDOR NORTE			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	8.7	7.5	16.2
2	7.7	8.0	15.7
3	7.2	9.0	16.2
4	9.2	7.0	16.2
5	8.2	7.5	15.7
6	8.0	7.3	15.3
7	7.5	8.3	15.8
8	8.5	8.8	17.3
9	7.0	8.8	15.8
10	9.0	6.8	15.8
Tiempo promedio (min)			16.0

Anexo 6: Tabla de tiempos de traslados del parqueo oeste al comedor norte.

PARQUEO OESTE - COMEDOR NORTE			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	13.5	12.5	26.0
2	12.5	13.0	25.5
3	12.0	14.0	26.0
4	14.0	12.0	26.0
5	13.0	12.5	25.5
6	13.0	12.5	25.5
7	12.5	13.5	26.0
8	13.5	14.0	27.5
9	12.0	14.0	26.0
10	14.0	12.0	26.0
Tiempo promedio (min)			26.0

Anexo 7: Tabla de tiempos de traslados del parqueo sur al comedor oeste.

PARQUEO SUR - COMEDOR OESTE			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	16.4	15.6	32.0
2	15.4	16.1	31.5
3	14.9	17.1	32.0
4	16.9	15.1	32.0
5	15.9	15.6	31.5
6	15.9	15.6	31.5
7	15.4	16.6	32.0
8	16.4	17.1	33.5
9	14.9	17.1	32.0
10	16.9	15.1	32.0
Tiempo promedio (min)			32.0

Anexo 8: Tabla de tiempos de traslados del parqueo norte al comedor oeste.

PARQUEO NORTE - COMEDOR OESTE			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	12.8	11.5	24.3
2	11.8	12.0	23.8
3	11.3	13.0	24.3
4	13.3	11.0	24.3
5	12.3	11.5	23.8
6	12.0	11.2	23.2
7	11.5	12.2	23.7
8	12.5	12.7	25.2
9	11.0	12.7	23.7
10	13.0	10.7	23.7
Tiempo promedio (min)			24.0

Anexo 9: Tabla de tiempos de traslados del parqueo oeste al comedor oeste.

PARQUEO OESTE - COMEDOR OESTE			
Datos	Tiempo de ida (min)	Tiempo de vuelta (min)	Tiempo total (min)
1	6.5	5.5	12.0
2	5.5	6.0	11.5
3	5.0	7.0	12.0
4	7.0	5.0	12.0
5	6.0	5.5	11.5
6	6.0	5.5	11.5
7	5.5	6.5	12.0
8	6.5	7.0	13.5
9	5.0	7.0	12.0
10	7.0	5.0	12.0
Tiempo promedio (min)			12.0

Anexo 10: Tabla de capacidad de comedores.

Comedores	Capacidad (número de personas)
Comedor sur	55
Comedor norte	15
Comedor oeste	15

Anexo 11: Tabla de capacidad de parqueos.

Parqueos	Capacidad (número de camiones)
Parqueo sur	20
Parqueo norte	20
Parqueo oeste	20

Anexo 12: Tabla de demoras operativas, que tienen mayor tiempo acumulado, de los años 2022 y 2023.

Demoras	Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Porcentaje de tiempo total (%)	Porcentaje acumulado de tiempo total (%)
REFRIGERIO	3300267.7	55004.5	37%	37%
CAMBIO DE TURNO	1470841.8	24514.0	17%	54%
INSPECCION OPERACIONAL	857214.3	14286.9	10%	64%
COMBUSTIBLE	837089.4	13951.5	9%	73%
DISPARO	563125.3	9385.4	6%	80%
DEMORA EN PALA	550892.4	9181.5	6%	86%
PALA NO DISPONIBLE	435549.4	7259.2	5%	91%
CLIMA	345804.6	5763.4	4%	95%
PARADO POR EQUIPO MINA	261955.8	4365.9	3%	98%
DEMORA EN CHANCADO	203670.1	3394.5	2%	100%
Total	8826410.6	147106.8		

Anexo 13: Tabla de demoras operativas de los años 2022 y 2023.

Demoras	Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Porcentaje de tiempo total (%)
REFRIGERIO	3300267.7	55004.5	34.8580%
CAMBIO DE TURNO	1470841.8	24514.0	15.5353%
INSPECCION OPERACIONAL	857214.3	14286.9	9.0540%
COMBUSTIBLE	837089.4	13951.5	8.8415%
DISPARO	563125.3	9385.4	5.9478%
DEMORA EN PALA	550892.4	9181.5	5.8186%
PALA NO DISPONIBLE	435549.4	7259.2	4.6003%
CLIMA	345804.6	5763.4	3.6524%
PARADO POR EQUIPO MINA	261955.8	4365.9	2.7668%
DEMORA EN CHANCADO	203670.1	3394.5	2.1512%
RECESO OPERADOR	134675.3	2244.6	1.4225%
CAMBIO DE OPERADOR	89337.2	1489.0	0.9436%
UNA VIA	80743.2	1345.7	0.8528%
ENTRENAMIENTO	78173.9	1302.9	0.8257%
TRABAJOS EN LA RUTA	72238.0	1204.0	0.7630%
FALTA OPERADOR	60395.2	1006.6	0.6379%
SOBRECARGA	50328.2	838.8	0.5316%
DEMORA EN BOTADERO	36800.7	613.3	0.3887%
LIMPIEZA DE TOLVA	13577.4	226.3	0.1434%
DETENIDO POR DISPATCH	5735.1	95.6	0.0606%
INESTABILIDAD DE TALUD	5312.3	88.5	0.0561%
PIEDRA BAJO LLANTA	4326.5	72.1	0.0457%
RECESO POR FATIGA	3490.0	58.2	0.0369%
TORMENTA ELECTRICA	2953.2	49.2	0.0312%
EMERGENCIA	1115.3	18.6	0.0118%
REFRIGERIO-OPERADOR A BORDO	1044.4	17.4	0.0110%
REINDUCCION POR FATIGA	492.1	8.2	0.0052%
CHANCADO NO DISPONIBLE	325.3	5.4	0.0034%
CHARLAS COMUNICACIONES	122.9	2.0	0.0013%
MEDIO AMBIENTE	98.3	1.6	0.0010%
BOTADERO/STOCK NO DISPONIBL	46.0	0.8	0.0005%
STOCKPILE LLENO	8.6	0.1	0.0001%
BOTADERO/STOCK NO DISPONIBLE	7.5	0.1	0.0001%
BOLONES	0.2	0.0	0.0000%
Total	9467757.3	157796.0	

Anexo 14: Tabla de demoras operativas de los años 2022 y 2023, flota de camiones Caterpillar 793.

Demoras	Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Porcentaje de tiempo total (%)
REFRIGERIO	2549579.9	42493.0	36.8563%
CAMBIO DE TURNO	1132675.9	18877.9	16.3738%
INSPECCION OPERACIONAL	600669.0	10011.2	8.6832%
COMBUSTIBLE	502592.7	8376.5	7.2654%
DISPARO	392813.9	6546.9	5.6785%
DEMORA EN PALA	392155.3	6535.9	5.6689%
PALA NO DISPONIBLE	322868.9	5381.1	4.6673%
CLIMA	227835.0	3797.2	3.2935%
PARADO POR EQUIPO MINA	169128.1	2818.8	2.4449%
DEMORA EN CHANCADO	149962.3	2499.4	2.1678%
RECESO OPERADOR	86228.1	1437.1	1.2465%
CAMBIO DE OPERADOR	80312.6	1338.5	1.1610%
ENTRENAMIENTO	67995.6	1133.3	0.9829%
UNA VIA	65306.1	1088.4	0.9441%
FALTA OPERADOR	50328.7	838.8	0.7275%
TRABAJOS EN LA RUTA	40857.1	681.0	0.5906%
SOBRECARGA	31681.6	528.0	0.4580%
DEMORA EN BOTADERO	28023.2	467.1	0.4051%
LIMPIEZA DE TOLVA	10151.2	169.2	0.1467%
INESTABILIDAD DE TALUD	3519.5	58.7	0.0509%
PIEDRA BAJO LLANTA	3371.7	56.2	0.0487%
DETENIDO POR DISPATCH	2970.0	49.5	0.0429%
TORMENTA ELECTRICA	2339.4	39.0	0.0338%
RECESO POR FATIGA	1936.8	32.3	0.0280%
EMERGENCIA	890.9	14.8	0.0129%
REFRIGERIO-OPERADOR A BORDO	719.1	12.0	0.0104%
REINDUCCION POR FATIGA	247.9	4.1	0.0036%
CHANCADO NO DISPONIBLE	207.7	3.5	0.0030%
CHARLAS COMUNICACIONES	103.5	1.7	0.0015%
MEDIO AMBIENTE	97.2	1.6	0.0014%
BOTADERO/STOCK NO DISPONIBL	46.0	0.8	0.0007%
STOCKPILE LLENO	7.6	0.1	0.0001%
BOLONES	0.2	0.0	0.0000%
Total	6917622.5	115293.7	

Anexo 15: Tabla de demoras operativas de los años 2022 y 2023, flota de camiones Komatsu 930.

Demoras	Tiempo (min)	Tiempo (hr)	Porcentaje de tiempo total (%)
REFRIGERIO	750687.8	12511.5	29.4372%
CAMBIO DE TURNO	338165.9	5636.1	13.2607%
COMBUSTIBLE	334496.7	5574.9	13.1168%
INSPECCION OPERACIONAL	256545.3	4275.8	10.0601%
DISPARO	170311.3	2838.5	6.6785%
DEMORA EN PALA	158737.1	2645.6	6.2247%
CLIMA	117969.6	1966.2	4.6260%
PALA NO DISPONIBLE	112680.6	1878.0	4.4186%
PARADO POR EQUIPO MINA	92827.6	1547.1	3.6401%
DEMORA EN CHANCADO	53707.8	895.1	2.1061%
RECESO OPERADOR	48447.2	807.5	1.8998%
TRABAJOS EN LA RUTA	31380.9	523.0	1.2306%
SOBRECARGA	18646.7	310.8	0.7312%
UNA VIA	15437.1	257.3	0.6053%
ENTRENAMIENTO	10178.3	169.6	0.3991%
FALTA OPERADOR	10066.5	167.8	0.3947%
CAMBIO DE OPERADOR	9024.6	150.4	0.3539%
DEMORA EN BOTADERO	8777.4	146.3	0.3442%
LIMPIEZA DE TOLVA	3426.2	57.1	0.1344%
DETENIDO POR DISPATCH	2765.0	46.1	0.1084%
INESTABILIDAD DE TALUD	1792.8	29.9	0.0703%
RECESO POR FATIGA	1553.2	25.9	0.0609%
PIEDRA BAJO LLANTA	954.8	15.9	0.0374%
TORMENTA ELECTRICA	613.8	10.2	0.0241%
REFRIGERIO-OPERADOR A BORDO	325.3	5.4	0.0128%
REINDUCCION POR FATIGA	244.2	4.1	0.0096%
EMERGENCIA	224.4	3.7	0.0088%
CHANCADO NO DISPONIBLE	117.6	2.0	0.0046%
CHARLAS COMUNICACIONES	19.5	0.3	0.0008%
BOTADERO/STOCK NO DISPONIBLE	7.5	0.1	0.0003%
MEDIO AMBIENTE	1.1	0.0	0.0000%
STOCKPILE LLENO	1.0	0.0	0.0000%
Total	2550134.8	42502.2	

Anexo 16: Matriz de consistencia

MEJORAMIENTO DEL CICLO DE ACARREO DE LA FLOTA DE CAMIONES UTILIZANDO LA PROGRAMACIÓN LINEAL PARA INCREMENTAR LA PRODUCTIVIDAD EN MINAS A TAJO ABIERTO				
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Independiente	Dependiente
¿En qué medida el ciclo de acarreo de la flota de camiones influye en la baja productividad en minas a tajo abierto?	Mejorar el ciclo de acarreo de la flota de camiones utilizando la programación lineal para incrementar la productividad en minas a tajo abierto.	La mejora del ciclo de acarreo de la flota de camiones utilizando programación lineal incrementará la productividad en minas a tajo abierto	CICLO DE ACARREO	PRODUCTIVIDAD DE LA FLOTA DE CAMIONES
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Independiente	Dependiente
¿En qué medida los tiempos de traslado del personal hacia los comedores influye en la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo?	Reducir los tiempos de traslado del personal hacia los comedores aplicando programación lineal para reducir la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo.	La reducción de tiempos de traslado del personal hacia los comedores aplicando programación lineal reducirá la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo.	TIEMPOS DE TRASLADO	DEMORA PROGRAMADA
¿En qué medida la demora programada de los camiones de acarreo influye en el ciclo de acarreo?	Reducir la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo para mejorar el ciclo de acarreo.	La reducción de la demora programada por refrigerio de los camiones de acarreo mejorará el ciclo de acarreo.	DEMORA PROGRAMADA	CICLO DE ACARREO