

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MINERO POR
MEDIO DE UN MODELO MATEMÁTICO EN UNA CANTERA UBICADA
EN EL CANTÓN GUAYAQUIL, PROVINCIA DEL GUAYAS.”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERA DE MINAS

Presentado por:

MARÍA JOSÉ NOGALES MIELES

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

A Dios.

A mi familia, Daniel E. Nogales Torres, Ma. De Lourdes Mieles Ycaza, Daniel E. Nogales Miles y María Rosalía Avilés Carranza (Ata); por ser mi fortaleza y darme tanto amor.

A mis abuelitos, Jaime M. Nogales Izurieta (Nane) y Dolores H. Torres Pesantes (Nona), por ser tan incondicionales.

Sin todos ellos este logro no hubiera sido posible.

María José Nogales Mieles

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Dra. Silvia C. Loaiza Ambuludi, quien fue mi guía para culminar este proyecto y además una persona incondicional en todo momento formando parte fundamental de mi enseñanza a lo largo de la carrera.

Adicionalmente, a mis compañeros Javier A. Vásquez Castellano y Xavier A. Medina Veintimilla por haber proporcionado la información necesaria para realizar el proyecto.

Finalmente, a ESPOL por ser mi segunda casa en estos 5 años.

María José Nogales Mieles

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *María José Nogales Mieles* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

María José Nogales Mieles

EVALUADORES

Msc. Samantha Tamara Jiménez O.

PROFESOR DE LA MATERIA

Dra. Silvia Catalina Loaiza A.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El modelamiento matemático puede ser empleado en diferentes áreas de la ingeniería que requieran soluciones a un problema específico. En este caso, como objetivo principal del proyecto se plantea optimizar la producción de la flota de transporte, según sus capacidades por medio del diseño de un modelo matemático en una herramienta informática. Se considera utilizar la programación lineal para generar y analizar el mejor escenario de la flota de transporte en una empresa minera a cielo abierto. Al alcanzar la optimización de los sistemas de producción diferentes empresas mineras se benefician diariamente.

La metodología empleada se dividió en tres fases. Se inició con revisión bibliográfica, posteriormente se diseñó el modelo matemático en Microsoft Excel con ayuda del complemento Solver y finalmente se validó el modelo matemático el software de simulación Flexsim.

Los resultados obtenidos por medio del modelo matemático generado en Microsoft Excel con la ayuda del complemento Solver corresponden a un valor óptimo produciendo 7701.0 [ton/día], que se obtienen de los frentes de explotación Derrumbe y Lérica. Por otro lado, en el software de simulación Flexsim el valor es de 7537.4 [ton], de los mismos frentes de explotación.

En conclusión, el valor óptimo representa el 30.35%, más de lo que se manejaba en la empresa tomada para el caso de estudio según registros. Además, el uso de Microsoft Excel para generar el modelo matemático es 40 veces menos costoso que otros softwares de simulación.

Palabras Clave: modelo matemático, optimización, flota de transporte, software de simulación

ABSTRACT

Mathematical modeling can be used in different areas of engineering that require solutions to a specific problem. In this case, the main objective of the project is to optimize the production of the transport fleet, according to its capacities by means of the design of a mathematical model in a computer tool. The possibility of using linear programming to generate and analyze the best scenario of the transport fleet in an open-pit mining company is proposed. By achieving the optimization of production systems, different mining companies benefit daily.

The methodology used was divided into three phases. First, is done the bibliographic review; then, mathematical model was designed in Microsoft Excel with the help of the Solver, and finally the mathematical model was validated using the Flexsim simulation software.

The results obtained in the mathematical model generated in Microsoft Excel with the help of the Solver correspond to an optimal value producing 7701.0 [ton / day], which are obtained from the Derrumbe and Lérida exploitation fronts. On the other hand, in the Flexsim simulation software the value is 7537.4 [ton], from the same exploitation fronts.

In conclusion, the optimal value represents 30.35%, more than what was handled in the company taken for the case study according to records. Furthermore, the use of Microsoft Excel to generate the mathematical model is 40 times less expensive than other simulation software.

Keywords: *mathematical model, optimization, transport fleet, simulation software*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES	5
RESUMEN	6
<i>ABSTRACT</i>	7
ÍNDICE GENERAL.....	8
ABREVIATURAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
ÍNDICE DE TABLAS	13
CAPÍTULO 1	15
1. Introducción.....	15
1.1 Descripción del problema	16
1.2 Justificación del problema.....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 Marco teórico.....	18
1.4.3 Programación lineal.....	18
1.4.4 Solver Microsoft Excel.....	20
1.4.4.1 Método Simplex	20
1.4.5 Software de simulación	21
1.4.5.1 Flexsim	21
□ Ventajas	22
□ Desventajas	22
1.4.6 Transporte minero	23

□	Excavadora hidráulica	23
□	Dumpers y volquetes	23
1.4.7	Aplicaciones en la minería	24
CAPÍTULO 2	25
2.	Metodología.....	25
2.1	Fase I.....	25
2.2	Fase II.....	27
2.2.1	Condiciones limitantes del modelo	27
2.2.2	Matriz de tiempos de recorrido de los volquetes y dumper	28
2.2.3	Tiempos de carga y descarga de los volquetes y dumpers.....	29
2.2.4	Condiciones referentes al turno de trabajo	31
2.2.5	Matriz de decisión.....	32
2.2.6	Matriz resultante de Toneladas producidas	34
2.3	Fase III.....	34
CAPÍTULO 3	35
3.	Resultados y análisis	35
3.1	Diseño del modelo matemático en Microsoft Excel con la herramienta solver	35
	Coeficiente de reserva que toma en cuenta los imprevistos que puede presentar el equipo de excavación (Krn)	38
3.1.3.	Matriz de decisión	39
3.1.4.	Matriz resultante de toneladas producidas diarias	40
3.2.	Validación del modelo matemático en el software de simulación Flexsim	41
3.2.1.	Identificación de componentes del sistema de simulación	42
CAPÍTULO 4	46
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	46
4.1.	Conclusiones	46

4.2. Recomendaciones.....	47
Bibliografía	49
ANEXOS	51

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

SIMBOLOGÍA

m	metro
m/s	metro por segundo
s	segundos
h	hora
min	minutos
t	tiempo
v	velocidad
prob	probabilidad
prom	promedio
ton	toneladas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ventana de resultados de Solver en Excel	20
Figura 1.2 Diagrama de flujo de Flexsim (Zhu et al., 2014)	22
Figura 3.1 Gráfico de tiempos de recorrido de volquetes y dumpers (s)	36
Figura 3.2 Diagrama de flujo del caso de estudio simulado en Flexsim	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Matriz de distancias volquetes/ dumpers [m] (Medina & Vásquez, 2018)	28
Tabla 2.2 Matriz de velocidades volquetes/ dumpers [m/s] (Medina & Vásquez, 2018)	28
Tabla 2.3 Excavadora Komatsu a volquetes Volvo	29
Tabla 3.1 Matriz de tiempos de recorrido de volquetes y dumpers [s]	36
Tabla 3.2 Datos de los valores de posicionamiento en los frentes	37
Tabla 3.3 Datos de los valores de posicionamiento en la trituradora y descarga	37
Tabla 3.4 Turno de trabajo especificaciones	38
Tabla 3.5 Matriz de decisión	39
Tabla 3.6 Matriz resultante de toneladas producidas diariamente de manera óptima ..	40
Tabla 3.7 Matriz resultante de toneladas producidas diariamente de manera pésima .	41
Tabla 3.8 Componentes del sistema de Flexsim	42
Tabla 3.9 Resultados de producción obtenidos en un tiempo determinado en Flexsim	44
Tabla 0.1 Actividades consideradas en el coeficiente Ku (Medina & Vásquez, 2018) ..	51
Tabla 0.2 Actividades consideradas en el coeficiente Kn (Medina & Vásquez, 2018) ..	51
Tabla 0.3 Actividades consideradas en el coeficiente Krn (Medina & Vásquez, 2018) .	51

Tabla 0.4 Control de toneladas diarias del mes de octubre en Calizas Huayco S.A.	54
Tabla 0.5 Control de toneladas diarias del mes de noviembre en Calizas Huayco S.A.	54
Tabla 0.6 Posibles escenarios [Medina & Vásquez, 2018]	55

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La modelación o modelamiento se expone como la representación de problemas cotidianos en los cuales se proponen soluciones o explicaciones gracias los datos disponibles (Villa & Ruiz, 2009). Existen diferentes tipos de modelamiento como: analógicos, físicos, gráficos, esquemáticos y matemáticos (Lucía et al., 2011). La perspectiva general que se obtiene al hablar de modelamiento es estipularlo como complicado y dificultoso (Kartal et al., 2016), debido al reconocimiento de las variables disponibles y/o relevantes con las que se debe trabajar y a las suposiciones que se deben de hacer (Wijaya et al., 2014). Un modelo para ser de mayor confiabilidad es necesario que se someta a una verificación o validación (Bassanezi, 1997).

El desarrollo de métodos de optimización en base a modelos matemáticos para la resolución de problemáticas y planificación, se manifiesta en distintas áreas de la ingeniería como indispensable con el fin de potenciar los resultados (Brea, 2013). Adicionalmente, para la elaboración y ejecución de un modelo matemático no es fundamental u obligatorio realizar gastos en equipos o componentes, basta utilizar una herramienta informática para poder llevar a cabo la modelación en poco tiempo en comparación a otros medios más antiguos (Lucía et al., 2011).

La optimización se aplica con la técnica de programación lineal, de tal forma que la función objetivo puede ser maximizada o minimizada según los requerimientos del problema. Es posible implementar esta técnica matemática en diferentes áreas de la ingeniería, en este caso se la utilizará en el área de la minería y específicamente en el sistema de transporte y al aplicarla se lograría una mayor producción diaria de material de interés de la empresa minera.

Este trabajo se encuentra fundamentado en el proyecto integrador de la Escuela Superior Politécnica del Litoral denominado "Evaluación de la Operación de Transporte Minero Usando Simulación por Eventos Discretos en la Cantera Calizas Huayco S.A. Ubicada

en el Cantón Guayaquil, Provincia del Guayas - Ecuador” presentado por Xavier Medina y Javier Vásquez en el año 2018. Entre los datos en los que se basa el proyecto se encuentran aspectos de la maquinaria como: distancia recorrida, velocidades, capacidades, entre otros parámetros para poder analizar la optimización del sistema de transporte de la empresa minera Calizas Huayco S.A. dedicada a la explotación y procesamiento de materiales de construcción, calizas y carbonatos (Medina & Vásquez, 2018).

El propósito del proyecto es generar una herramienta informática la cual será de fácil acceso y utilización por medio de Microsoft Excel, para así promover la aplicación de instrumentos digitales en el área de la minería. Gracias a la revisión de bibliografía, diseño del modelo matemático y validación del modelo por medio de un software de simulación; se espera obtener resultados de efecto positivo en el área de transporte minero.

1.1 Descripción del problema

La tecnología forma parte de nuestro día a día, facilitando las tareas que tenemos. Esta se encuentra en un avance constante y es necesario adaptarnos a ella y a sus nuevas aplicaciones. El área de transporte de minerales no es la excepción, debido a que es posible implementar en sus procesos herramientas informáticas, para aplicarlas en la reducción de costos, en el aumento de la producción y en el análisis de diferentes escenarios, entre otros. La necesidad de brindar una solución al sistema de transporte para diferentes empresas mineras a cielo abierto se justifica debido a los altos costos monetarios que representan tanto los programas de simulación para este sistema como para la capacitación del personal.

En este proyecto integrador, se formula una alternativa para incrementar la producción en el sistema diario de transporte y carguío en una cantera de materiales de construcción, calizas y carbonatos, ubicada en Vía a la Costa de la ciudad de Guayaquil, con la finalidad de que alcance el valor óptimo de acuerdo con las características técnicas de operación de este lugar. Cabe señalar que en esta propuesta no se considera posibles cambios que podrían implementarse en el sistema de maquinaria de transporte y carguío. Lo particular de esta propuesta consiste en desarrollar un modelo matemático de optimización del sistema de transporte por medio de la herramienta informática Microsfot

Excel, de fácil uso y administración, por lo que un profesional minero está en la capacidad de usarla sin dificultades

1.2 Justificación del problema

En la actualidad, los costos unitarios en el sistema de transporte y carguío en una empresa minera alcanzan entre un 45% y 65% del valor total de los costos operativos (Seguridad Minera, 2017). Además, se hace hincapié en la repercusión que tiene el desconocimiento de la capacidad real de la flota de transporte y la presencia de los contratiempos o tiempos improductivos que se dan en el sistema de transporte y carguío de las empresas mineras a cielo abierto, al no considerar todos los aspectos que representan un tiempo determinado en este sistema, lo que obstaculiza que sea óptimo. Al producirse este tipo de problemas como consecuencia se genera una producción menor a la esperada, es decir se produce una menor ganancia, lo que interfiere en el ámbito económico de la empresa minera.

Por este motivo, se vuelve indispensable reflexionar acerca de las operaciones en el sistema de transporte minero, que se están llevando a cabo y preguntarse ¿mantenerlas de esta forma es más costoso que cambiarlas? ¿es posible optimizarlas? ¿existe una herramienta informática de fácil acceso para implementar en mi sistema de transporte minero? La herramienta informática Microsoft Excel basada en un modelo matemático previamente diseñado se toma como instrumento principal en el presente proyecto, para ayudar a obtener un modelo de optimización funcional para las empresas mineras a cielo abierto. El modelo matemático evalúa las restricciones del sistema y de esta forma brindar un valor óptimo para la producción diaria del material extraído en la empresa minera a cielo abierto.

Para verificar la funcionalidad del modelo, surge la necesidad de validar los resultados obtenidos en Microsoft Excel por medio de software de simulación llamado FlexSim. El resultado obtenido tendrá el fin de aportar en la toma de decisiones en las empresas mineras a cielo abierto que deseen optimizar el sistema de transporte.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar el sistema de transporte minero de una cantera, por medio de la implementación de un modelo matemático para la toma de decisiones en proyectos mineros.

1.3.2 Objetivos Específicos

Generar una base de datos de información de velocidades, tiempos y distancias a partir de revisiones de trabajos previos.

Diseñar una herramienta informática de fácil acceso a partir de parámetros técnicos del sistema de transporte minero.

Validar el modelo matemático creado, por medio de un software de simulación que permita corroborar su correcta funcionalidad.

1.4 Marco teórico

1.4.3 Programación lineal

La programación lineal a manera de un modelo matemático se trata de la optimización de un sistema, ya sea de manera mínima o máxima de una función objetivo (Eppen et al., 2000; y Jerez et al., 2010). Esta técnica se encuentra conformada por tres elementos: la función objetivo lineal, un grupo de desigualdades lineales, las cuales cumplen el papel de restricciones y las variables de decisión las cuales se desea encontrar el valor para de esta manera resolver el problema de programación lineal previamente planteado (Sullivan, 2020). Estas condiciones limitan el intervalo de decisiones permisibles para así plantear soluciones factibles del problema (Eppen et al., 2000; y Garcia & Smith, 2019) La programación lineal se establece de la siguiente manera (Garcia & Smith, 2019; Ricra & Campos, 2017; Santiago-Alvarado, 2004; y Sullivan, 2020):

1. Se determina las variables de decisión
2. Se determina las restricciones
3. Se formula la función objetivo

Para resolver un problema de maximización, se establece de la siguiente manera según (Ricra & Campos, 2017):

Maximizar la función objetivo:

$$c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Donde:

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ = función objetivo

x_n : variables de decisión

C_n : rendimientos directos unitarios de los procesos j (1, 2, ..., n)

Sujeto a:

Restricción de no-negatividad

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (2)$$

Donde:

x_n : variables de decisión

Restricciones explícitas

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

.

.

.

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \quad (3)$$

Donde:

x_n : variables de decisión

$a_{i,j}$: Cantidad de recursos i consumidos por cada unidad de la actividad j

b_i : Cantidad de recursos disponibles para la asignación de la actividad j

1.4.4 Solver Microsoft Excel

Solver es una herramienta incorporada en Microsoft Excel que, sirve para resolver problemas de optimización en diferentes áreas de manera más simple e intuitiva (Briones & Escola, 2018). Romero, 2020 menciona que existen tres tipos de métodos:

- GRG (Generalized Reduced Gradient) Nonlinear
- Simplex LP (Linear Programming)
- Evolutionary

Se agrega la función objetivo y restricciones con las que se va a trabajar y al encontrar una solución óptima al problema establecido, entonces en Solver se abrirá una ventana con la opción de aceptar la solución propuesta, como se muestra en la figura 1.1.

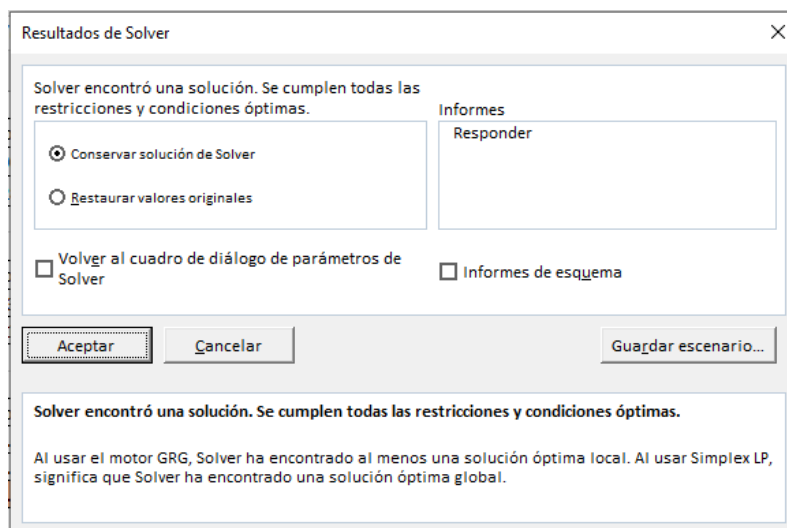


Figura 1.1 Ventana de resultados de Solver en Excel

1.4.4.1 Método Simplex

El método simplex o también llamado algoritmo primal simplex, fue establecido en 1946 por el matemático George Dantzig (Sullivan, 2020). Es un método analítico basado en un procedimiento iterativo para problemas que tienen de tres a más variables (Martín, 2010), utilizado para realizar una búsqueda directa en donde la respuesta sea óptima (máxima o mínima) conforme se vaya avanzando, hasta encontrar la mejor opción para el problema establecido (Deibel & Wegener, 2013).

1.4.5 Software de simulación

La diferencia entre un modelo de optimización y un modelo de simulación se enfoca en las variables de decisión, ya que en el modelo de optimización son variables que brindan un resultado expresado de forma máxima o mínima de la función objetivo. Por otro lado, en el modelo de simulación las variables de decisión son entradas y no resultados, es decir que la función objetivo se evalúa en dependencia de un grupo de valores (Eppen et al., 2000).

1.4.5.1 Flexsim

Flexsim es un software de simulación en 3D de eventos discretos y/o continuos, utilizado principalmente para el área de logística de las empresas en diferentes campos laborales, es decir, producción/ manufactura, almacenamiento/ entregas, sistema de transporte y otras actividades (Cantú González et al., 2016; y Zhu et al., 2014). Su enfoque se encuentra orientado a una actividad u objeto, por lo que la funcionalidad de la simulación será enfocada a esta actividad u objeto (Pongjetanapong et al., 2018). Adicionalmente, el software de simulación permite la modificación de datos originales, entrada de modelado, elaboración de modelos gráficos, experimentos de simulación en donde se ejecuta el modelo, optimización en base a resultados previos, entre otros (Chen et al., 2013). En la Figura 1.2. se encuentra un diagrama de flujo de los pasos que se deben seguir para la utilización de Flexsim.

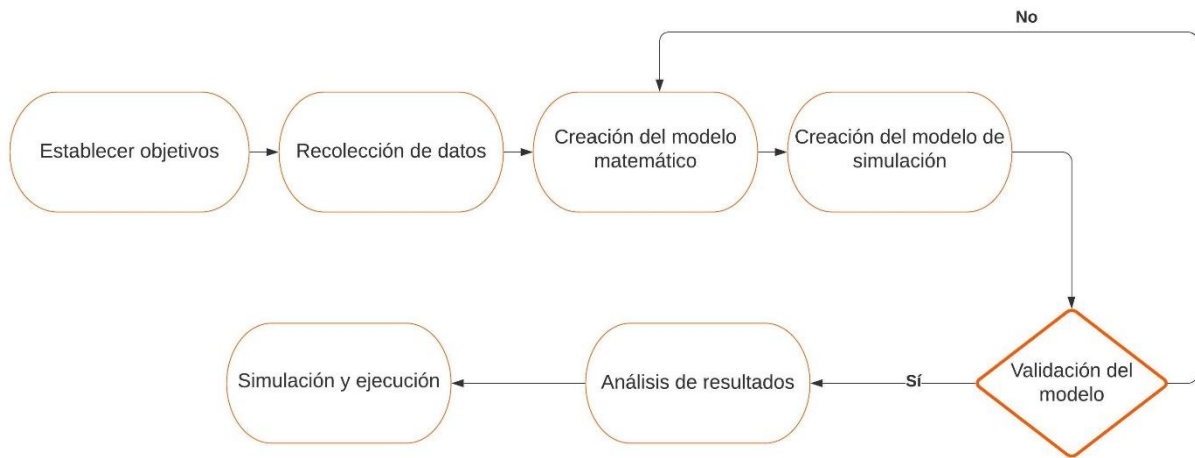


Figura 1-2 Diagrama de flujo de Flexsim [Zhu et al., 2014]

- **Ventajas**

Las siguientes ventajas se encuentran basadas en justificaciones sobre el uso de Flexsim según Chen et al., 2013; y Simón-marmolejo et al., 2013:

- Es posible trabajar con Microsoft Excel y Experfit, para los datos de entrada, así como los de salida y parámetros operativos modificados dinámicamente. Experfit se lo utiliza para las distribuciones de probabilidad.
- Admite exportar datos de reportes resultantes y datos estadísticos.
- Brinda la oportunidad de escoger y mostrar una simulación tanto en 3D como en 2D.
- Permite la importación de objetos creados en otros softwares de diseño o extensiones de archivos “.t”.
- Consta con una facilidad de programación para diferentes escenarios que se pueden considerar y según las condiciones que se presenten en cada escenario.

- **Desventajas**

Las siguientes desventajas se encuentran basadas en justificaciones sobre el uso de softwares de simulación según Cantú González et al., 2016 y; Pinto, 2013:

- No genera soluciones óptimas para los escenarios propuestos.

- Es necesario que el operador tome en cuenta todas las condiciones y restricciones que afectan a la actividad u objeto, ya que no se generan solas.
- Indispensable un computador en el cual Flexsim pueda ser utilizado sin ningún inconveniente.
- Es fundamental un usuario que tenga conocimiento acerca del software de simulación y entendimiento del área estadística.
- Los estudios para la recolección de datos pueden llegar a tomar mucho tiempo.

1.4.6 Transporte minero

El transporte y carguío minero para cielo abierto se encuentra conformado principalmente de excavadoras hidráulicas, volquete y/o dumpers. Además, este sistema tiene como principal objetivo realizar sus actividades de manera económicamente rentable para la empresa y con una producción óptima a lo largo de la vida de la mina a cielo abierto (Sonhi et al., 2019).

- ***Excavadora hidráulica***

Las excavadoras hidráulicas tienen como función principal retirar material de interés del frente y ubicarlo en un sitio determinado, en el caso que se está analizando es en los dumpers o volquetes. Esta actividad se puede efectuar gracias a su brazo principal con cucharón al final y la cualidad que tiene de girar 360° sólo la sección superior, es decir, las ruedas u orugas quedan inmóviles (Warring, 2014).

- ***Dumpers y volquetes***

En la minería a cielo abierto los dumpers o volquetes son indispensables para transportar material de un punto a otro (Abad & Juan, 2011). En el presente caso, el acarreo de material ocurre desde el frente de explotación, conocido como zona de carga hasta la trituradora que se encuentra en la zona de descarga. La capacidad del balde y la cantidad de dumpers o volquetes, son principales factores para considerar para la producción de una empresa minera.

1.4.7 Aplicaciones en la minería

En la minería también es posible implementar herramientas informáticas que forman parte del avance tecnológico que estamos viviendo, estas herramientas pueden aportar de forma positiva a las empresas mineras. Un ejemplo de implementación de las herramientas informáticas se dio en la propuesta para contribuir específicamente para el sistema de transporte y carguío en Minas Laguna Norte, La Libertad, Perú. Donde Ricra & Campos, 2017 proponen ejecutar un modelo matemático de programación lineal planteado por ellos, el cual se resuelve por medio del método simplex con la herramienta Solver incorporado como suplemento en Microsoft Excel, para de esta forma lograr maximizar el sistema de transporte y carguío y así lograr obtener la mejor producción por medio de un flujo más dinámico. Los resultados finales que se obtuvieron reflejaron ahorros operativos de \$18,533.00 lo que representa el 12.5% de los costos del proceso de transporte y carguío. Lo que demuestra que por medio de una herramienta informática accesible se pueden lograr grandes cambios en las empresas mineras.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Este proyecto se encuentra dividido en tres fases, las cuales fueron basadas en una metodología científica de investigación aplicada, es decir con un enfoque cuantitativo (Cortés & Iglesias, 2004). Por ende, el resultado obtenido puede ser utilizado en el campo de minería a cielo abierto en el sistema de transporte. En la figura 1.1. se muestra las actividades desarrolladas en cada fase.

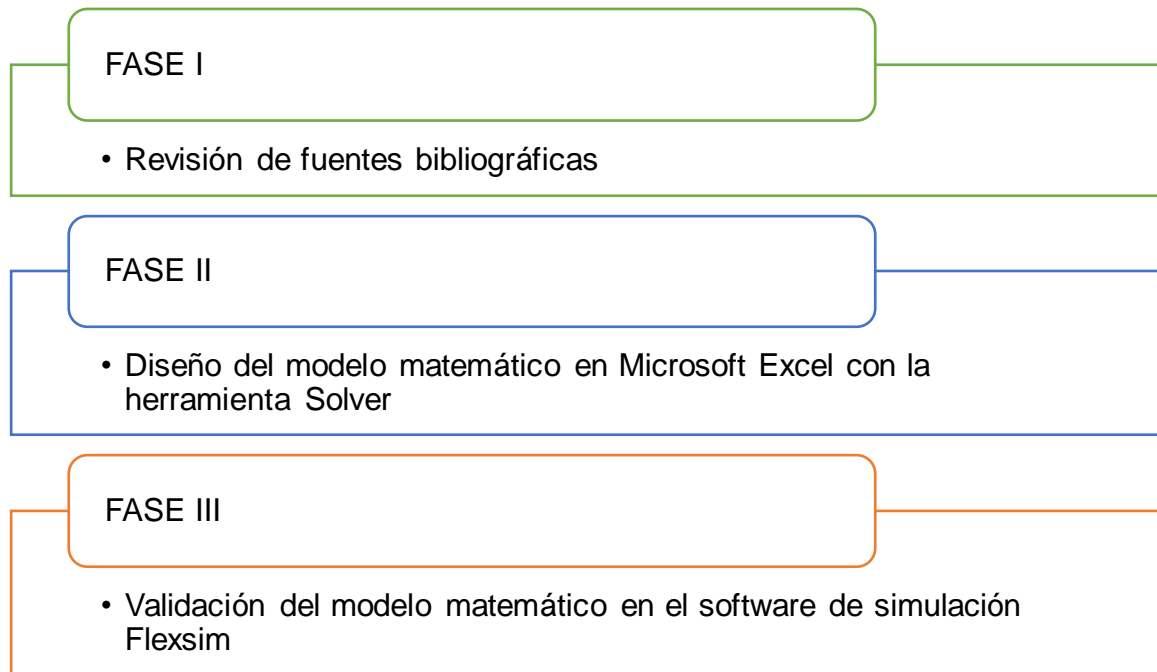


Figura 2.1 Fases de la metodología empleada

2.1 Fase I

En esta fase se realizó la actividad de revisión de fuentes bibliográficas. Inició con la revisión completa del proyecto integrador de la Escuela Politécnica del Litoral denominado “Evaluación de la Operación de Transporte Minero Usando Simulación por Eventos Discretos en la Cantera Calizas Huayco S.A. ubicada en el Cantón Guayaquil,

Provincia del Guayas – Ecuador” (Medina & Vásquez, 2018). Como datos necesarios para la elaboración del presente proyecto se considera indispensable la información de volquetes, dumpers y excavadoras hidráulicas. Los datos tomados fueron los siguientes:

Para obtener la matriz de tiempos volquetes y dumpers

- Distancias recorridas de las maquinarias
- Velocidades de las maquinarias al realizar sus actividades

Para construir la tabla de tiempos de carga y descarga

- Tipo de maquinaria y su capacidad de balde
- Tiempo de ciclo de la excavadora
- Datos acumulados de las paladas de los cazos
- Tiempo de posicionamiento del volquete o dumper

Para el tiempo trabajado por turno se consideró

- Horas trabajadas
- Coeficiente de utilización de equipo (ku)
- Coeficiente de tiempos improductivos (kn)
- Coeficiente de reserva donde se considera los contratiempos (krn)

Las especificaciones de la maquinaria utilizada para el sistema de transporte y carguío se encuentran en la Tabla 1.1 y Tabla 1.2

Tabla 2.1 Descripción de las excavadoras hidráulicas utilizadas en la cantera [Medina & Vásquez, 2018]

Equipo	Excavadora hidráulica	
Modelo	Komatsu PC450LC-8	Caterpillar 336
Capacidad del cucharón [m³]	2.8	2.6
Cantidad	2	1

Tabla 2.2 Descripción de los volquetes y dumpers utilizados en la cantera [Medina & Vásquez, 2018]

Equipo	Dumper	Volquete
Modelo	CAT 773B	Volvo FMX 8X4R
Capacidad del balde [ton]	43	32
Cantidad	2	5

Adicionalmente, se recolectó información acerca del modelo matemático de programación lineal y su funcionamiento. Ya que de esta forma se logró una mejor comprensión acerca de su aplicación en el problema planteado.

2.2 Fase II

En la Fase II del proyecto se llevó a cabo la actividad del diseño del modelo matemático en Microsoft Excel, adicionalmente se utilizó la herramienta complementaria Solver. Esto fue posible gracias a la información obtenida de la empresa Huayco S.A. en el proyecto integrador de (Medina & Vásquez, 2018).

2.2.1 Condiciones limitantes del modelo

Para la creación del modelo se tomó en consideración los siguientes parámetros basados en (Medina & Vásquez, 2018):

- Se tienen en cuenta 5 concesiones de la empresa minera a cielo abierto con las siguientes denominaciones: Derrumbe, Lérida, Fraga, Explosa y Precón.
- El turno de trabajo es de 10 horas en un horario de 07:00am a 05:00pm, donde se incluye un periodo de 1 hora destinada para almorzar.
- La maquinaria de transporte y carguío, al igual que las trituradoras se consideran que no existen desperfectos en el tiempo establecido de uso. Lo cual indica que tiene una disponibilidad del 100%.

- Se asume una característica de homogeneidad a lo largo de toda la vía en la simulación. Por lo que, la resistencia a la rodadura se mantiene constante en la red vial.
- Se considera que el número total de maquinaria de transporte es de 7, es decir 5 volquetes Volvo y 2 dumpers Caterpillar. Se considera que la maquinaria transporta el máximo de su capacidad, en otras palabras, el balde se llena al 100%.

2.2.2 Matriz de tiempos de recorrido de los volquetes y dumper

En primer lugar, se realizó la matriz de distancias y la matriz de velocidades de volquetes y dumpers En la tabla 2.1 y 2.2 se presentan los datos mencionados.

Tabla 2.1 Matriz de distancias volquetes/ dumpers [m] [Medina & Vásquez, 2018]

	Concesiones				
Volquete/ dumper	Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón
Con carga [m]	1025.7	1352.5	1247.9	1497.2	1467.9
Sin carga [m]	1053.7	1380.5	1275.9	1525.2	1495.9

Tabla 2.2 Matriz de velocidades volquetes/ dumpers [m/s] [Medina & Vásquez, 2018]

	Concesiones				
Volquete/ dumper	Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón
Con carga [m/s]	6.53	6.72	4.94	6.33	6.69
Sin carga [m/s]	8.19	7.94	7.5	7.11	8.19

Los datos fueron analizados siendo posible obtener los tiempos en los que tardan en cada uno de los frentes los volquetes y dumpers con carga y sin carga. Por medio de la ecuación (4), se obtuvieron los resultados.

$$t_r = \frac{d}{V} \quad (4)$$

Donde:

t_r : tiempo de recorrido del frente a la trituradora

d : distancia de recorrido del frente a la trituradora

V : velocidad de recorrido del frente a la trituradora

2.2.3 Tiempos de carga y descarga de los volquetes y dumpers

Los tiempos de carga y descarga de volquetes y dumpers se obtuvieron al multiplicar el tiempo de ciclo de la excavadora, los datos acumulados de las paladas de los cazos y sumar el tiempo de posicionamiento del volquete o dumper. En la tabla 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se muestra las probabilidades acumuladas, probabilidades puntuales y las paladas con las cuales se calcula el promedio de paladas necesarias para llenar cada volquete o dumper.

Tabla 2.3 Excavadora Komatsu a volquetes Volvo

Volquete		
Probabilidad Acumulada	Probabilidad Puntual	Paladas
0.11	0.11	7
0.34	0.23	8
0.7	0.36	9
0.9	0.2	10
0.97	0.07	11
1	0.03	12

Tabla 2.4 Excavadora Komatsu a dumpers Caterpillar

Dumper		
Probabilidad Acumulada	Probabilidad Puntual	Paladas
0.35	0.35	9
0.75	0.4	10
1	0.25	11

Tabla 2.5 Excavadora Caterpillar a volquetes Volvo

Volquete		
Probabilidad Acumulada	Probabilidad Puntual	Paladas
0.08	0.08	7
0.28	0.2	8
0.42	0.14	9
0.6	0.18	10
0.74	0.14	11
0.91	0.17	12
1	0.09	13

Tabla 2.6 Excavadora Caterpillar a dumpers Caterpillar

Dumper		
Probabilidad Acumulada	Probabilidad Puntual	Paladas
0.17	0.17	11
0.5	0.33	12
0.67	0.17	13
1	0.33	14

Para el apartado de carga se consideran las ecuaciones del 5 al 7. Para empezar, se tomaron los datos de probabilidad acumulada del proyecto integrador de Medina & Vásquez, 2018. Luego, se calculó la probabilidad puntual por medio de la ecuación (5), el promedio de paladas se resuelve utilizando la ecuación (6) y para el tiempo total de carga se emplea la ecuación (7).

$$Probabilidad\ puntual = Probabilidad\ acumulada\ 2 - probabilidad\ acumulada\ 1 \quad (5)$$

$$Prom\ de\ paladas = \frac{\sum(prob\ puntual\ Komat.*paladas) + \sum(prob\ puntual\ Cat*paladas)}{2} \quad (6)$$

$$Tiempo\ total\ carga = (tiempo\ de\ ciclo\ de\ la\ excavadora * prom\ paladas) + tiempo\ de\ posicionamiento\ en\ el\ frente \quad (7)$$

La probabilidad puntual ayuda a tener un dato más certero acerca de las paladas que pueden darse al llenar un volquete o dumper, mientras que el promedio de paladas va a ser imprescindible para calcular el tiempo de carga y descarga de los volquetes y dumpers.

Para el apartado de descarga se consideran la ecuación (8).

$$\textit{Tiempo total descarga} = \textit{tiempo de posicionamiento en la trituradora} + \textit{tiempo de descarga} \quad (8)$$

Para obtener el producto final de la sección de Tiempo de carga y descarga de volquetes y dumpers, se aplica la ecuación (9).

$$\textit{Tiempo total} = \textit{tiempo de carga} + \textit{tiempo de descarga} \quad (9)$$

2.2.4 Condiciones referentes al turno de trabajo

Para el tiempo trabajado por turno se consideran los siguientes valores (Medina & Vásquez, 2018):

- 10 horas de turno de trabajo
- Coeficiente de utilización de equipo (k_u) igual a 0.81
- Coeficientes de tiempos improductivos (k_n) igual a 0.93
- Coeficiente de reserva donde se considera los contratiempos (k_{rn}) igual a 0.93

Las consideraciones de cada uno de los coeficientes se encuentran detallados en el apartado de Anexos A, en donde especifican los tiempos absorbidos de cada coeficiente. Para obtener el resultado se multiplica los valores mencionados previamente como se muestra en la ecuación (10)

$$\textit{Turno} = \frac{\textit{segundos}}{\textit{hora}} * \textit{horas trabajadas} * k_u * k_n * k_{rn} \quad (10)$$

2.2.5 Matriz de decisión

Se obtuvo la optimización del problema propuesto por medio de Solver, el cual trabaja con el modelo matemático de programación lineal que tiene como objetivo maximizar los resultados de un problema. Esta herramienta informática aplica como técnica de resolución el método simplex, el cual se menciona previamente.

Para la creación del modelo matemático se definió previamente cuales serían los parámetros por considerar para que el modelo se asemeje a la realidad del sistema de transporte de la empresa minera a cielo abierto. Se detalla a continuación los parámetros:

Parámetros:

i : frentes Derrumbe, Lérida, Fraga, Explosa y Precón (1,2,3,4,5 respectivamente)

j : volquetes Volvo y Caterpillar (1,2 respectivamente)

m_i : tiempos de ida y regreso a trituradora desde frente i

C_j : capacidad en toneladas de volquete j

t_j : tiempo de carga y descarga (adicional posicionamiento) de volquete j

Las variables de decisión son las incógnitas que deben ser encontradas, por medio de la solución que se ha propuesto para el modelo matemático.

Variables de decisión:

x_{ij} : Cantidad de volquetes tipo j que se asignan a frente i

$y_i = \begin{cases} 1, & \text{Si la excavadora está asignada al frente} \\ 0, & \text{Si la excavadora no está asignada al frente} \end{cases}$

La función objetivo y restricciones se especificaron en el complemento Solver, el cual se lo encontró en la pestaña de Datos – Análisis – Solver – Parámetros de Solver.

Función objetivo:

$$z = \max \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 \frac{x_{ij} * Turno * C_j}{m_i + t_j} \quad (11)$$

Restricciones:

$$\sum_{i=1}^5 x_{i1} = 5$$

Utilizar 5 volquetes Volvo

$$\sum_{i=1}^5 x_{i2} = 2$$

Utilizar 2 dumper Caterpillar

$$\sum_{j=1}^2 x_{ij} \leq 5, \quad \forall i$$

No se asignan más de 5 vehículos a cada frente, así mínimo 2 van al otro frente.

$$\sum_{j=1}^2 x_{ij} \leq y_i * M, \quad \forall i$$

Se enlazan las variables enteras a las variables binarias.

$$\sum_{i=1}^5 y_i = 2$$

Se escogen 2 frentes.

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j$$

Las variables son mayores que cero, por lo que son positivas.

$$x_{ij} \in Z$$

Las variables deben ser con valores enteros.

$$M \gg 0$$

M es un número muy grande.

Por lo que, de esa manera se creó una matriz de decisión en la cual gracias a las variables binarias (0,1) se muestra el frente que fue escogido y de esta manera se asignan según el valor requerido de maquinaria en cada frente. Adicionalmente, se tiene

una fila de restricción de existencia, la cual mostrará con un número entero muy alto que hay presencia en el frente escogido.

2.2.6 Matriz resultante de Toneladas producidas

El resultado final de la producción diaria fue obtenido por medio de la ecuación (12), en donde se consideró la maquinaria de transporte utilizada según los datos obtenidos previamente de los frentes y maquinaria escogidos en la matriz de decisión, el total de tiempo que se tarda un volquete en su ciclo, la capacidad y el turno.

$$Producción\ total\ por\ día = \frac{turno * capacidad * número\ de\ maquinaria}{Tiempo\ total\ recorrido + tiempo\ total\ de\ caga\ y\ descarga} \quad (12)$$

2.3 Fase III

En la Fase III se realizó la validación del modelo matemático el software de simulación FlexSim. Los componentes empleados en la simulación de eventos discretos son conceptos generales aplicados en los diferentes softwares de simulación que brindan esta alternativa, a continuación se los detalla bajo el criterio de Cabrera, 2009:

- Estado: determinado por el conjunto de parámetros necesarios utilizados para describir el sistema en cualquier instante temporal, en relación con los objetivos del estudio.
- Evento: suceso instantáneo que puede cambiar el estado de un sistema.
- Entidad: representación de los flujos de entrada a un sistema.
- Locaciones: lugares en los que la entidad puede detenerse para ser transformada o espera serlo.
- Recursos: dispositivos necesarios para llevar a cabo una operación, estos pueden moverse.
- Atributos: características de una entidad.
- Variables: condiciones cuyos valores se crean y se modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados y análisis de resultados se muestran según el respectivo orden en el que fueron obtenidos. Adicionalmente, se presentan comparaciones con el proyecto integrador previamente mencionado de Medina & Vásquez, 2018.

3.1 Diseño del modelo matemático en Microsoft Excel con la herramienta Solver

En el siguiente apartado se dividió de forma secuencial según los valores resultantes de las matrices en la herramienta informática, Microsoft Excel. Las matrices que fueron obtenidas son las siguientes:

- Matriz de tiempos de recorrido de volquetes y dumpers [s]
- Matriz de tiempos de carga y descarga de volquetes y dumpers [s]
- Matriz de decisión
- Matriz resultante de toneladas producidas diarias

Adicionalmente en Anexos B, se puede encontrar los cálculos realizados para obtener los resultados de esta sección.

3.1.1. Matriz de tiempos de recorrido de volquetes/ dumpers [s]

En la siguiente matriz se tomó en cuenta el tiempo de recorrido que se tarda la flota de transporte del frente a la trituradora. Para obtener el resultado de cada uno de los frentes se utilizó la ecuación (4).

Tabla 3.1 Matriz de tiempos de recorrido de volquetes y dumpers [s]

Equipo de transporte	Concesiones				
	Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón
Tiempo con carga [s]	157.1	201.3	252.6	236.5	219.4
Tiempo sin carga [s]	128.7	173.9	170.1	214.5	182.6
Tota [s]	285.7	375.1	422.7	451.0	402.1

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos de cada concesión con los valores de tiempos de volquetes/dumpers con carga, así como con sin carga. En donde se puede apreciar que la concesión que menos tiempo toma en recorrer del frente a la trituradora es Derrumbe.

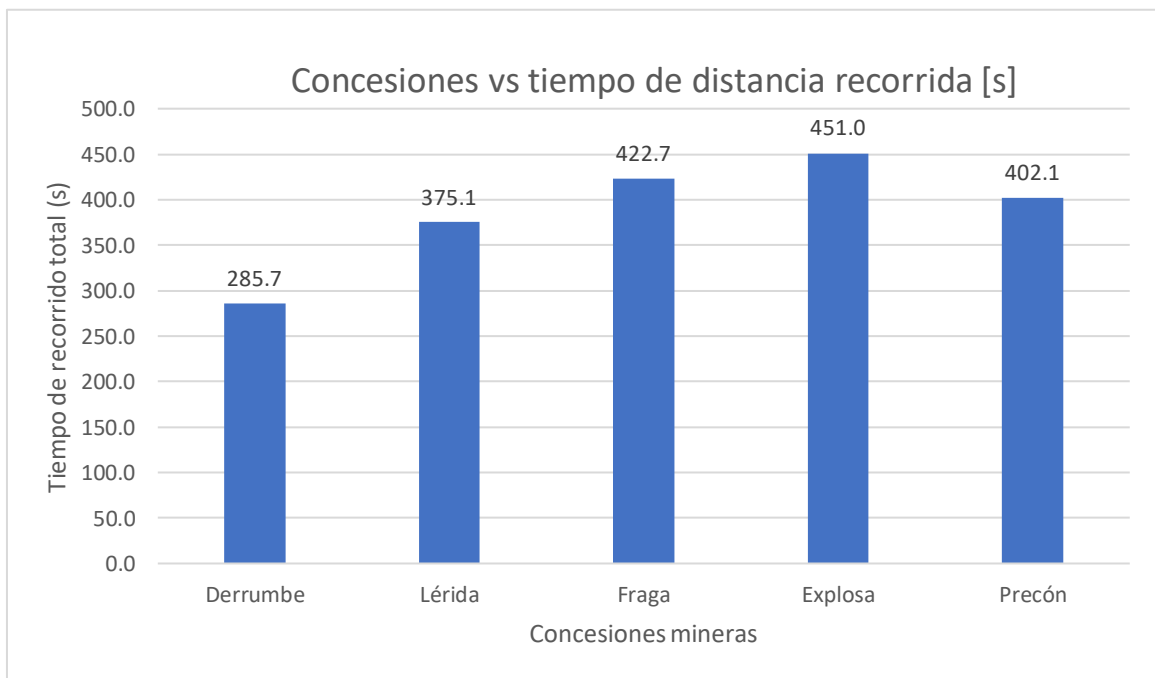


Figura 3.1 Gráfico de tiempos de recorrido de volquetes y dumpers [s]

En la figura 3.1 se muestran los resultados obtenidos de cada una de las áreas mineras de la empresa minera Calizas Huayco S.A. En donde se puede apreciar de una forma más visual que los resultados de tiempo más bajos son de Derrumbe y de Lérida, con 285.7 segundos lo que representa 4.76 minutos y 375.1 segundos lo que representa 6.25

minutos, respectivamente. Este resultado depende de la distancia y velocidad promedio que tiene cada una de las maquinarias cuando estas se encuentran con carga y sin carga.

3.1.2. Matriz de tiempos de carga y descarga de volquetes y dumpers [s]

Para obtener los resultados de los tiempos de carga y descarga se empleó las ecuaciones 5 y 9.

Carga

Se consideró para el tiempo de ciclo de la excavadora un valor de 21.95 [s] y para el posicionamiento en el frente los valores de la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Datos de los valores de posicionamiento en los frentes [Medina & Vásquez, 2018]

Equipos de transporte	Tiempo con carga [s]	Tiempo sin carga [s]
Volquete	41.3	46.6
Dumper	37.1	34.2

Descarga

Se consideró para el posicionamiento del equipo de transporte en la trituradora y el tiempo de descarga de volquete y dumper respectivamente los valores detallados en la tabla 3.3:

Tabla 3.3 Datos de los valores de posicionamiento en la trituradora y descarga [Medina & Vásquez, 2018]

Equipos de transporte	Tiempo de posicionamiento en la trituradora [s]	Tiempo de descarga [s]
Volquete	33.7	46.6
Dumper	31.7	34.2

Total

El tiempo de carga y descarga tanto de volquetes como de dumpers en promedio tiene un valor de 340.5 [s], lo que en minutos representa un valor de 5.68 [min]. Los cuales son bastantes precisos debido a las diferentes consideraciones de tiempos absorbidos que se toman en cuenta para poder obtener el valor final mencionado.

Turno de trabajo

El resultado de turno de trabajo se obtuvo gracias a la ecuación (10) y los datos mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Turno de trabajo especificaciones

Datos	Descripción
0.81	Coeficiente de utilización del equipo de transporte (K_u)
0.93	Coeficiente de tiempos improductivos no tecnológicos (K_n)
0.93	Coeficiente de reserva donde se considera los contratiempos que puede presentar el equipo de excavación (K_{rn})
10	Horas de turno
7	Horas efectivas

Este resultado indicó un valor de 7 horas de trabajo efectivas en un turno de 10 horas, ya que existen tiempos en los que el sistema de transporte no es productivo. En un periodo de 10 horas de trabajo se consideraron como tiempo absorbido según Medina & Vásquez, 2018: 1 [h] de almuerzo, 30 [min] de limpieza de camión, 10 [min] de

imprevistos, 15 [min] combustible, 15 [min] otros usos, 15 [min] limpieza de acceso y 30 [min] falta de material. Por este motivo, se obtiene el valor de 7 horas de trabajo efectivas para la empresa minera a cielo abierto.

3.1.3. Matriz de decisión

Para la matriz de decisión se utilizó la herramienta Solver de Microsoft Excel, la cual trabaja con las restricciones mencionadas en el Capítulo 2.

Tabla 3.5 Matriz de decisión

	Concesiones					Total:	Requerido:
	Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón		
Frente escogido	1	1	0	0	0	2	2
Volquete	3	2	0	0	0	5	5
Dumper	2	0	0	0	0	2	2
Total	5	2	0	0	0	7	7
Restricción de existencia	99999	99999	0	0	0		

Los resultados mostrados en la tabla 3.5 involucran variables binarias para la fila de frentes escogidos y números enteros para las demás filas. En las columnas de Total y Requerido se comprobó que los datos concuerdan mutuamente, ya que fueron obtenidos en base a las condiciones limitantes del caso estudiado y como se mostró ambos valores de las filas concuerdan. Para la fila de restricción de existencia el valor 99999 representa a un número muy grande, lo que significa que existen maquinarias presentes en el frente escogido para trabajar.

3.1.4. Matriz resultante de toneladas producidas diarias

Para la matriz resultante de toneladas producidas se utilizó la ecuación (12).

Tabla 3.6 Matriz resultante de toneladas producidas diariamente de manera óptima

Equipo de transporte	Concesiones					
	Derrumbe	Lérída	Fraga	Explosa	Precón	
Producción del volquete [ton/día]	3145.1	1830.9	0.0	0.0	0.0	
Producción del dumper [ton/día]	2725.0	0.0	0.0	0.0	0.0	Total [ton/día]
Total por frente [ton/día]	5870.1	1830.9	0.0	0.0	0.0	7701.0

Lo que se obtiene en la tabla 3.6 son los resultados que demuestran que ha sido posible obtener un valor máximo en la producción diaria según las restricciones establecidas previamente en la herramienta Solver de Microsoft Excel. El valor total de producción por día de 7701.0 [ton] en donde los frentes Derrumbe y Lérída son en los que se trabaja. Al analizar este resultado podemos concluir que el tiempo es un factor determinante al resultado obtenido, como se puede apreciar en la figura 3.1.

Esta producción representó la capacidad máxima según la flota de transporte con la que se está trabajando, específicamente con cinco volquetes Volvo con capacidad de 32 [ton] y dos dumpers Catterpillar con capacidad de 43 [ton].

Según las tablas 0.4 y 0.5 en el Anexo C se logró realizar una comparación de los resultados obtenidos con la producción diaria en dos frentes de la empresa minera de los meses de octubre y noviembre, en donde se obtiene un promedio de 5899 [ton] producidas diariamente, es decir que los resultados obtenidos de la propuesta de optimización superan al promedio de producción diaria por 1802 [ton]. Es posible que los resultados obtenidos tengan un gran margen de diferencia, ya que en este caso de estudio no se consideró factores como: voladura, operadores mineros disponibles, reservas, demanda de la producción, entre otros.

Tabla 3.7 Matriz resultante de toneladas producidas diariamente de manera pésima

Equipos de transporte	Concesiones					Total por día:
	Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón	
Producción del volquete [ton/día]	0.0	0.0	1715.2	2479.5	0.0	
Producción del dumper [ton/día]	0.0	0.0	0.0	2163.4	0.0	
Total por frente [ton/día]	0.0	0.0	1715.2	4642.9	0.0	6358.1

Por otro lado, la tabla 3.7 demuestran que ha sido posible obtener un valor mínimo como resultado final la producción según las restricciones establecidas (las mismas consideradas previamente) en la herramienta Solver de Microsoft Excel y una determinada flota de transporte. El valor total de producción diaria es de 6358.1 [ton], en donde los frentes de explotación a diferencias del resultado anterior son los frentes Fraga y Explosa. De la misma forma en la figura 3.1 se evidencia que los frentes escogidos son los que toman más tiempo de recorrido del frente a la trituradora para el sistema de transporte.

Adicionalmente, en las tablas 0.4 y 0.5 en el Anexo C se muestra las toneladas producidas diariamente por la empresa Calizas Huayco SA, al analizar dichas tablas, se encuentran valores menores a 6358.1 [ton]. Es decir, que la producción diaria en la empresa minera a cielo abierto está obteniendo un valor menor (5899 [ton] producidas diariamente en promedio) del mínimo que puede producir la flota de transporte con la que se trabaja. Esta diferencia es posible (al igual que en el resultado óptimo obtenido), debido a que existen procesos que no fueron considerados como: voladura, operadores mineros disponibles, reservas, demanda de la producción, entre otros.

3.2. Validación del modelo matemático en el software de simulación Flexsim

En el siguiente apartado se dividió de forma secuencial según los valores resultantes de las matrices en la herramienta informática, Microsoft Excel. Las matrices que fueron obtenidas son las siguientes:

- Identificación de componentes del sistema de sistema de simulación
- Diagrama de flujo para Flexsim

- Resultados obtenidos en la simulación

3.2.1. Identificación de componentes del sistema de simulación

En la tabla 3.8 se especifica los componentes tomados de (Medina & Vásquez, 2018) adaptados a la simulación realizada en Flexsim. Lo cual ayuda a entender la función de cada elemento en la simulación.

Tabla 3.8 Componentes del sistema de Flexsim [Medina & Vásquez, 2018]

Componentes	Descripción			
Entidades	Volquetes			
	Frente de explotación hasta trituradora	Volquete Volvo - 32 [ton]	Volquete Caterpillar - 43 [ton]	
Recursos	Excavadoras			
	Frente de explotación	Excavadora Komatsu #1 - 2.8 [m3]	Excavadora Komatsu #2 - 2.8 [m3]	Excavadora Caterpillar – 2.6 [m3]
	Zonas de descargas	Trituradora primaria Huayco de 650 [ton/h]		
Atributos	Volquetes			
	Tipo de Volquete	Volquete Volvo - 32 [ton]	Volquete Caterpillar - 43 [ton]	
	Excavadoras			
	Tipo de Excavadora	Excavadora Komatsu - 2.8 [m3]	Excavadora Caterpillar - 2,6 [m3]	
	Trituradora			
	Tipo de trituradora	Trituradora primaria Huayco de 650 [ton/h]		
	Frentes			

	Tipos de frentes	Frente #1 Derrumbe (Guay El Huayco)	Frente #2 Lérída	
Filas	En frente de explotación	Fila de espera para cargar con la excavadora Komatsu #1	Fila de espera para cargar con la excavadora Komatsu #2	Fila de espera para cargar con la excavadora Caterpillar #3
	En zonas de descargas	Fila de espera de descarga en la trituradora primaria Huayco de 650 [ton/h]		

3.2.2. Diagrama de flujo para Flexsim

En la figura 3.2 se presenta el diagrama de flujo que se utilizó en Flexsim para poder realizar la simulación del caso de estudio con los componentes mencionados en tabla 3.8.

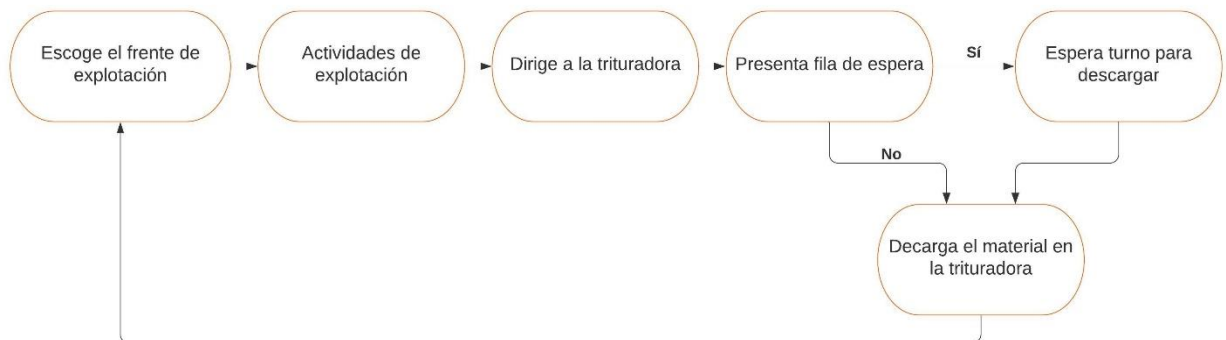


Figura 3.2 Diagrama de flujo del caso de estudio simulado en Flexsim

Este diagrama representa cual va a ser la secuencia que va a seguir el sistema de transporte en el caso de estudio analizado. En este caso se considera que existe un tiempo de espera, para descargar el material en la trituradora.

3.2.3. Resultados obtenidos en la simulación

En la simulación realizada en el software de simulación Flexsim se obtuvieron los resultados.

Tabla 3.9 Resultados de producción obtenidos en un tiempo determinado en Flexsim

Días	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Prom
Toneladas	7422	7527	7568	7566	7555	7597	7518	7564	7515	7542	7537.4

Los resultados mostrados en la tabla 3.9 son el producto de 4800 [min] (equivalente a 10 días) corridos en la simulación de Flexsim. Estos valores reflejan un promedio de una producción diaria de 7537.4 [ton], los cuales demuestran que se mantiene una diferencia de 163.6 [ton] con el valor óptimo mencionado en la tabla 3.6. En la simulación se consideraron los mismos parámetros y restricciones que en el modelo matemático desarrollado en Microsoft Excel con la herramienta Solver, con un adicional de tiempo de espera en una fila que se crea antes de la descarga en la trituradora. Por lo que, se puede concluir que los resultados obtenidos tanto como para un valor óptimo como para un valor pésimo son confiables y muestran concordancia.

3.3. Comparación de resultados

Se realizó una comparación considerando el resultado obtenido en la tabla 3.6 con los datos previamente revisados de Medina & Vásquez, 2018 y mostrados en la sección de Anexos D; con el objetivo de corroborar si existe el valor de producción diaria igual o similar al obtenido. Estos datos evalúan diferentes escenarios y al mismo tiempo se tomaron en consideración distintas combinaciones de frentes.

Se analizó la tabla 0.6 que se ubica en la sección del Anexo D, donde se observó que entre 140 escenarios el 79 muestra similitud con el valor óptimo resultante de 7744 [ton], presentando una diferencia de 43 [ton]. Donde los frentes de explotación son Lérída y Precón, mientras que los frentes escogidos en la tabla 3.5 son Lérída y Derrumbe, en este caso se presenta una coincidencia con la concesión Lérída, la cual está posicionada en el segundo puesto en tiempos de recorrido de los volquetes y dumpers. Mientras que, la concesión Precón está posicionada en el tercer lugar en tiempos de recorrido de volquetes y dumpers. Lo que brinda un resultado aceptable.

Por otro lado, en la misma tabla 0.6 en Anexos D se realiza una comparación del escenario 1 al 12 en los cuales se trabajan con los frentes Derrumbe y Lérída, la misma

combinación de frentes del resultado óptimo alcanzado. Se puede observar en la tabla 0.6 en Anexos D, el valor más cercano a nuestro valor óptimo con la misma combinación de frentes es de 6406 [ton], con una diferencia de 1295 [ton]. Esta desigualdad se presenta debido a que entre las consideraciones que se realizan en el proyecto integrador de Medina & Vásquez, 2018 se toma en cuenta el tiempo de espera en la fila para realizar la descarga del material en la trituradora, mientras que en el modelo matemático propuesto no se consideró.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las siguientes conclusiones y recomendaciones son presentadas en función a la metodología detalla en el Capítulo 2. La herramienta empleada Microsoft Excel con el complemento Solver para la solución del modelo matemático y el software de simulación Flexsim para corroborar los datos por medio de una simulación del caso de estudio.

4.1. Conclusiones

El desarrollo de modelo matemático del sistema de transporte de la empresa minera a cielo abierto Calizas Huayco S.A. por medio de la herramienta informática Microsoft Excel y el complemento Solver, fue ejecutado gracias a los datos del proyecto integrador de Medina & Vásquez, 2018. Este modelo fue corroborado por un modelo de simulación creado en Flexsim en donde se obtuvieron resultados semejantes al valor óptimo resultante de la propuesta de optimización.

- Se generó una base de datos que contienen información de velocidades, tiempos y distancias las cuales podrían ser empleadas en futuros proyectos. Siendo la concesión Derrumbe la que emplea menor tiempo de recorrido desde el frente de trabajo hasta la trituradora equivalente a 285.7 [s], mientras que la concesión Lériida es la segunda concesión que toma menos tiempo en recorrer con un resultado de 375.1 [s].
- Para el diseño del modelo matemático fue utilizada la herramienta de Microsoft Excel junto con el complemento Solver. Lo que brindó la posibilidad de introducir las restricciones del caso de estudio y que sea evaluado de forma particular. Como resultado óptimo de la producción diaria se obtuvo un valor de 7701.0 [ton] según las capacidades de la maquinaria y las horas efectivas de trabajo calculadas. Al brindar tal resultado la herramienta informática complementaria se concluye que es posible obtener un valor óptimo con las restricciones dadas del sistema.

- Al realizar una comparación de forma porcentual de los resultados obtenidos para el valor óptimo del modelo matemático (creado en Microsoft Excel) vs el promedio de toneladas producidas diariamente en la empresa Calizas Huayco S.A., se obtiene como resultado un 30.35% más de la producción registrada. Mientras que al comparar con el valor mínimo de capacidad de la flota se obtiene un 8.65% mayor que el promedio mencionado de la cantera.
- Al realizar las comparaciones con las producciones diarias de Calizas Huayco S.A. se obtienen valores muy distantes, lo que tiene como explicación que es posible que sea porque es el mejor escenario presentado, en el cual no se presentan fallas y los equipos trabajan en con su capacidad máxima.
- Por otro lado, las comparaciones realizadas con los 140 escenarios expuestos por Medina & Vásquez, 2018 no se obtienen los mismos valores para la alternativa óptima o la alternativa mínima, lo cual puede ser considerado por el tiempo que toma en cola el volquete o dumper en descargar el material en la trituradora el cual no se consideró para el modelo matemático.
- La utilización de la herramienta Microsoft Excel para generar el modelo matemático es 40 veces más económica que otros softwares de simulación.
- Se creó un modelo de simulación para la corroboración del modelo matemático. Los resultados conseguidos se analizan en promedio de 10 días, dando un valor de 7537.4 [ton], el cual es comparable con el valor óptimo obtenido.
 - Al realizar una comparación de forma porcentual de los resultados obtenidos para el valor óptimo en el modelo de simulación vs el promedio de toneladas producidas diariamente en la empresa Calizas Huayco S.A., se obtiene como resultado un 27.77% más de la producción registrada.

4.2. Recomendaciones

A continuación, se detallan las recomendaciones para posibles trabajos a realizar en un futuro:

- Elaborar otro modelo matemático con consideraciones y restricciones de una empresa minera a cielo abierto determinada, para de esta forma corroborar la posibilidad del uso de la herramienta informática Microsoft Excel junto con el complemento Solver.
- Recopilar información en diferentes épocas del año, puesto que van a variar los datos de velocidad en la época de invierno en donde la precipitación es concurrente y el camino se ve afectado. Por este motivo, los volquetes y dumpers tomarán en consideración medidas de seguridad que involucre el decrecimiento de la velocidad de estos.
- Analizar los costos de producción, de esta forma junto con la propuesta de optimización, se podrá examinar de forma minuciosa los porcentajes de costos que se reducen por medio de la aplicación de la optimización del sistema de transporte de la empresa minera a cielo abierto.
- Presentar una variación de la disponibilidad de las máquinas para un valor menor que el 100% (se recomienda considerar un 80% de disponibilidad), al igual que la capacidad de los baldes de los volquetes y dumpers, y las trituradoras donde se deposita el material extraído.
- Añadir el tiempo de espera en fila para descargar en la trituradora en el modelo matemático. Lo cual generará un valor final de optimización de la producción diaria con una mayor veracidad para la cantera.
- Considerar los factores que puedan tener variaciones y por ende sean potenciales a la afectación de la planificación, ya que es posible que de la misma forma repercutan de manera negativa a los costos de la empresa minera a cielo abierto.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, A., & Juan, S. (2011). *Maquinaria Dumper* (Tornapunta Ediciones (ed.); Primera, Issue No.1). Fundación Laboral de la Construcción.
- Bassanezi, R. (1997). Modelación matemática: Una antigua forma de investigación- un nuevo método de enseñanza. *Revista de Didáctica de Las Matemáticas*, 32, 13–25.
- Brea, E. (2013). Una extensión del método de Neider Mead a problemas de optimización no lineales enteros mixtos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 29(3), 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.06.005>
- Brones, L., & Escola, J. M. (2018, October). Application of the Microsoft Excel Solver Tool in the Solution of Optimization Problems of Heat Exchanger Network Systems. *Education for Chemical Engineers*, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2018.10.003>
- Cabrera, M. C. (2009). *Propuesta de Manual de Prácticas de Simulación de Sistemas Discretos con Promodel, para el Desarrollo de Ejercicios Aplicados en Diferentes Asignaturas de la Carrera de Ingeniería Industrial en la Pontificia Universidad Javeriana*. Universidad Javeriana.
- Cantú González, J. R., Guardado García, M. del C., & Balderas Herrera, J. L. (2016). Simulación de procesos , una perspectiva en pro del desempeño operacional. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 4.
- Chen, L., Hu, D., & Xu, T. (2013). Highway freight terminal facilities allocation based on flexsim. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96(Cictp), 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.044>
- Cortés, M., & Iglesias, M. (2004). *Generalidades sobre metodología de la investigación* (U. A. del Carmen (ed.)). Colección Material Didáctico. http://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- Deibel, K. R., & Wegener, K. (2013). Methodology for shape optimization of ultrasonic amplifier using genetic algorithms and simplex method. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 32, Issue 4). The Society of Manufacturing Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.05.010>
- Eppen, G. D., Gould, F. j., Schmidt, C. P., Moore, J. H., & Weatherford, L. R. (2000). Investigación de operaciones en la ciencia de la administración. In *Parte 2: Optimización* (Quinta, pp. 106-507–508). Prentice Hall Hispanoamericana S. A. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- García, P., & Smith, K. J. (2019). Algebra and Trigonometry with Analytic Geometry. In *The Mathematical Gazette* (12th ed., Vol. 72, Issue 459). <https://doi.org/10.2307/3618010>
- Jerez, M., Quintero, M. A., & Ablan, M. (2010). *Métodos heurísticos en la planificación del manejo forestal : Un ejemplo de aplicación*. 54(2), 183–194.
- Kartal, O., Dunya, B. A., Diefes-Dux, H. A., & Zawojewski, J. S. (2016). The relationship between students' performance on conventional standardized mathematics assessments and complex mathematical modeling problems. *International Journal of Research in Education and Science*, 2(1), 239–252. <https://doi.org/10.21890/ijres.07616>
- Lucía, M., Vallina, B., Romero, I. A., Guerra, E. F., Luís, J., García, P., Irene, R., & Tapia, A. De. (2011). *Artículo Original Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros Introducción*. 14(2), 129–139.
- Medina, X., & Vásquez, J. (2018). *Evaluación de la Operación de Transporte Minero Usando Simulación por Eventos Discretos en la Cantera Calizas Huayco S.A. Ubicada en el Cantón Guayaquil, Provincia*

del Guayas - Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- Pinto, W. (2013). *Implementación de Talleres Basados en el Software de Simulación Flexsim para la Asignatura Técnicas Modernas de Optimización*. Universidad Industrial de Santander.
- Pongjetanapong, K., O'Sullivan, M., Walker, C., & Furian, N. (2018). Implementing complex task allocation in a cytology lab via HCCM using Flexsim HC. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 86(May), 139–154. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.05.007>
- Ricra, R., & Campos, M. (2017). *Impacto de la Prgramación 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*.
- Romero, G. (2020). Excel VBA, solver, and other advanced worksheet tools. In *Elements of Numerical Mathematical Economics with Excel* (First, pp. 3–44). Brian Romer. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817648-1.00001-3>
- Santiago-Alvarado, A. (2004). *Uso de programación lineal para conocer los parámetros geométricos de superficies cónicas convexas*. 50(4), 358–365.
- Seguridad Minera. (2017). *Cómo se relaciona el carguío y transporte con el resto de actividades para la extracción del mineral. Seguridad Minera*.
- Simón Marmolejo, I., Santana Robles, F., Granillo Macías, R., & Piedra Mayorga, V. M. (2013). La simulación con FlexSim , una fuente en las operaciones de un sistema híbrido. *Científica*, 17(1), 39–49.
- Sonhi, M., Polanco, R., & Legrá, A. (2019). Optimización económica de la transportación con camiones en una mina a cielo abierto profunda. *Minería & Geología*, 35(1), 1–16. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/2235/223557636009/html/index.html>
- Sullivan, M. (2020). *Álgebra y trigonometría*. In *Álgebra y Trigonometría* (Novena, p. 1176). Pearson.
- Villa, J., & Ruiz, H. (2009). *Modelación en educación matemática : una mirada desde los lineamientos y estándares curriculares colombianos* (Issue 27).
- Wijaya, A., van den Heuvel-Panhuizen, M., Doorman, M., & Robitzsch, A. (2014). Difficulties in solving context-based PISA mathematics tasks: An analysis of students' errors. *Mathematics Enthusiast*, 11(3), 555–584.
- Zhu, X., Zhang, R., Chu, F., He, Z., & Li, J. (2014). A flexsim-based optimization for the operation process of cold-chain logistics distribution centre. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(2), 270–278. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)72343-0](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)72343-0)

ANEXOS

Anexo A

Tabla 0.1 Actividades consideradas en el coeficiente Ku [Medina & Vásquez, 2018]

Tiempos [min]	Actividades
15	Revisión de la maquinaria
60	Tiempo para almorzar
30	Limpieza del camión
10	Contratiempos
115	Total

Tabla 0.2 Actividades consideradas en el coeficiente Kn [Medina & Vásquez, 2018]

Tiempos [min]	Actividades
15	Combustible
15	Otros usos
30	Total

Tabla 0.3 Actividades consideradas en el coeficiente Krn [Medina & Vásquez, 2018]

Tiempos [min]	Actividades
15	Limpieza del acceso
15	Falta de material
30	Total

Anexos B

Para la matriz de tiempos de recorrido de volquetes/ dumpers [s]

Con carga

$$\text{Tiempo de recorrido} = \frac{1025.7[m]}{6.53[m/s]}$$

$$\text{Tiempo de recorrido} = 157.1 \text{ [s]}$$

Sin carga

$$\text{Tiempo de recorrido} = \frac{1053.7}{8.19}$$

$$\text{Tiempo de recorrido} = 128.7 \text{ [s]}$$

Total tiempo recorrido

$$\text{Total tiempo de recorrido} = 157.1 + 128.7$$

$$\text{Total tiempo de recorrido} = 285.7 \text{ [s]}$$

Para la matriz de tiempos de carga y descarga de volquetes y dumpers (s)

Carga

$$\text{Probabilidad puntual} = 0.34 - 0.11$$

$$\text{Probabilidad puntual} = 0.23$$

$$\text{Probabilidad puntual} = 0.75 - 0.35$$

$$\text{Probabilidad puntual} = 0.40$$

$$\text{Promedio de paladas volquetes} = \frac{9+10}{2}$$

$$\text{Promedio de paladas volquetes} = 9.5$$

$$\text{Tiempo total carga} = (21.95 * 9.5) + 41.3$$

$$Tiempo\ total\ carga = 249.83 [s]$$

Descarga

$$Tiempo\ total\ descarga = 33.7 + 46.4$$

$$Tiempo\ total\ descarga = 80.3 [s]$$

Total de carga y descarga

$$Tiempo\ total = 249.83 + 80.3$$

$$Tiempo\ total = 330.13 [s]$$

Turno de trabajo

$$Turno = \frac{3600\ s}{1\ h} * 10\ h * 0.81 * 0.93 * 0.93$$

$$Turno = 25,220.48 [s]$$

Para la matriz resultante de toneladas producidas diariamente

$$Producción\ total\ por\ día = \frac{20176*32*3}{285.7+330}$$

$$Producción\ total\ por\ día = \frac{1936896}{615.7}$$

$$Producción\ total\ por\ día = 3145.1[ton]$$

Anexos C

Tabla 0.4 Control de toneladas diarias del mes de octubre en Calizas Huayco S.A.

Resumen por concesión	Días																		Total Tonelaje
	1	2	3	4	5	9	10	11	15	16	17	18	22	23	24	25	29	30	
Derrumbe	0	0	0	0	0	0	0	1920	0	3255	2251	1517	3329	2123	0	0	0	0	14395
Lérída	0	0	3264	1368	0	2713	1259	0	896	2452	448	0	0	0	0	0	0	0	12400
Precón	1536	2496	0	0	0	2272	3264	0	2368	2656	0	0	2688	0	0	0	0	0	17280
Fraga	0	640	0	1477	2368	0	0	4054	2472	0	0	0	672	0	2368	2522	2624	2737	21934
Explosa	4263	4540	2464	2368	3616	2144	3921	561	2126	0	2594	3853	0	2560	2762	2400	0	0	40172

Tabla 0.5 Control de toneladas diarias del mes de noviembre en Calizas Huayco S.A.

Resumen por concesión	Días													Total Tonelaje
	5	6	7	12	13	14	19	20	21	22	26	27	28	
Derrumbe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1952	1952
Lérída	0	0	1548	2736	1888	1664	3027	2240	0	0	0	0	0	13103
Precón	2048	2528	2624	0	0	0	1184	0	2336	1888	2656	2592	2624	20480
Fraga	2752	2176	2304	2560	2532	2525	2656	3239	5536	0	5120	2796	0	34196
Explosa	0	0	817	0	0	0	0	0	0	0	0	2400	2636	5853

Anexo D

A continuación, se definen los indicadores mostrados en la Tabla 3.33. según Medina & Vásquez, 2018:

- %U KTZ1: Porcentaje de utilización de la excavadora Komatsu #1 - 2.8 [m3]
- %U KTZ2: Porcentaje de utilización de la excavadora Komatsu #2 - 2.8 [m3]
- %U CAT1: Porcentaje de utilización de la excavadora Caterpillar - 2,6 [m3]
- #viajes Huayco: Número de descargas en trituradora Huayco
- Producción total: Tonelaje total de mineral descargado en trituradora Huayco y trituradora Precón

Por otro lado, los frentes de la empresa minera Calizas Huayco S.A. se los designó con la siguiente codificación:

- F1 el frente #1 Derrumbe
- F2 el frente #2 Lérica
- F3 el frente #3 Fraga
- F4 el frente #4 Explosa
- F5 el frente #5 Precón

Tabla 0.6 Posibles escenarios [Medina & Vásquez, 2018]

			#VLV	#DPR	%U	%U	%U	#viajes	Producción
					KTZ1	KTZ2	CAT1	Huayco	total [ton]
Esc. #1	C1	F1	2	0	0.353	0.8423	0	123	4255
		F2	3	2					
Esc. #2	C1	F1	3	0	0.4748	0.7258	0	177	6225
		F2	2	2					
Esc. #3	C1	F1	4	0	0.5702	0.5031	0	170	6056
		F2	1	2					
Esc. #4	C1	F1	5	0	0.5556	0.3986	0	142	5171
		F2	0	2					
Esc. #5	C1	F1	1	1	0.3575	0.881	0	182	6418

		F2	4	1					
Esc. #6	C1	F1	2	1	0.5271	0.7633	0	185	6514
		F2	3	1					
Esc. #7	C1	F1	3	1	0.5356	0.5356	0	168	5926
		F2	2	1					
Esc. #8	C1	F1	4	1	0.5434	0.3539	0	142	5061
		F2	1	1					
Esc. #9	C1	F1	0	2	0.4196	0.8311	0	121	4422
		F2	5	0					
Esc. #10	C1	F1	1	2	0.5484	0.641	0	191	6406
		F2	4	0					
Esc. #11	C1	F1	2	2	0.5581	0.546	0	171	5934
		F2	3	0					
Esc. #12	C1	F1	3	2	0.5715	0.3866	0	143	4950
		F2	2	0					
Esc. #13	C2	F1	2	0	0.3935	0.4388	0	128	4404
		F3	3	2					
Esc. #14	C2	F1	3	0	0.4956	0.4493	0	151	5206
		F3	2	2					
Esc. #15	C2	F1	4	0	0.5279	0.4693	0	157	5530
		F3	1	2					
Esc. #16	C2	F1	5	0	0.5451	0.3772	0	137	4945
		F3	0	2					
Esc. #17	C2	F1	1	1	0.4108	0.4411	0	129	4623
		F3	4	1					
Esc. #18	C2	F1	2	1	0.5468	0.4235	0	146	5156
		F3	3	1					
Esc. #19	C2	F1	3	1	0.5633	0.4207	0	153	5380

		F3	2	1						
Esc. #20	C2	F1	4	1	0.5757	0.3726	0	138	4900	
		F3	1	1						
Esc. #21	C2	F1	0	2	0.3648	0.4603	0	129	4788	
		F3	5	0						
Esc. #22	C2	F1	1	2	0.5311	0.4536	0	150	5394	
		F3	4	0						
Esc. #23	C2	F1	2	2	0.5578	0.4434	0	155	5433	
		F3	3	0						
Esc. #24	C2	F1	3	2	0.5312	0.3676	0	139	4822	
		F3	2	0						
Esc. #25	C3	F1	2	0	0.3632	0.5805	0	148	5143	
		F4	3	2						
Esc. #26	C3	F1	3	0	0.4986	0.5744	0	164	5721	
		F4	2	2						
Esc. #27	C3	F1	4	0	0.5532	0.4704	0	164	5820	
		F4	1	2						
Esc. #28	C3	F1	5	0	0.5475	0.4239	0	143	5214	
		F4	0	2						
Esc. #29	C3	F1	1	1	0.4226	0.6003	0	146	5200	
		F4	4	1						
Esc. #30	C3	F1	2	1	0.5443	0.5773	0	167	5883	
		F4	3	1						
Esc. #31	C3	F1	3	1	0.5338	0.5242	0	157	5530	
		F4	2	1						
Esc. #32	C3	F1	4	1	0.5407	0.4138	0	141	0	5007
		F4	1	1						
Esc. #33	C3	F1	0	2	0.3734	0.1627	0	138	0	5065

		F4	5	0						
Esc. #34	C3	F1	1	2	0.4982	0.5726	0	165	0	5863
		F4	4	0						
Esc. #35	C3	F1	2	2	0.5569	0.5025	0	163	0	5678
		F4	3	0						
Esc. #36	C3	F1	3	2	0.5616	0.293	0	140	0	4854
		F4	2	0						
Esc. #37	C4	F1	2	0	0.3886	0.9386	0	61	139	7016
		F5	3	2						
Esc. #38	C4	F1	3	0	0.5286	0.941	0	80	131	7467
		F5	2	2						
Esc. #39	C4	F1	4	0	0.5285	0.6915	0	84	103	6743
		F5	1	2						
Esc. #40	C4	F1	5	0	0.5784	0.5801	0	87	74	5966
		F5	0	2						
Esc. #41	C4	F1	1	1	0.383	0.9368	0	58	142	7038
		F5	4	1						
Esc. #42	C4	F1	2	1	0.5328	0.8825	0	79	136	7551
		F5	3	1						
Esc. #43	C4	F1	3	1	0.5632	0.7189	0	82	109	6750
		F5	2	1						
Esc. #44	C4	F1	4	1	0.572	0.5032	0	85	70	5532
		F5	1	1						
Esc. #45	C4	F1	0	2	0.4621	0.9048	0	63	140	7189
		F5	5	0						
Esc. #46	C4	F1	1	2	0.4871	0.8085	0	80	128	7250
		F5	4	0						
Esc. #47	C4	F1	2	2	0.5837	0.6187	0	83	101	6350

		F5	3	0						
Esc. #48	C4	F1	3	2	0.5784	0.522	0	87	72	5484
		F5	2	0						
Esc. #49	C5	F2	2	0	0.3498	0.4745	0	130	0	4479
		F3	3	2						
Esc. #50	C5	F2	3	0	0.5069	0.4331	0	146	0	5035
		F3	2	2						
Esc. #51	C5	F2	4	0	0.5982	0.4258	0	161	0	5625
		F3	1	2						
Esc. #52	C5	F2	5	0	0.8113	0.4205	0	181	0	6375
		F3	0	2						
Esc. #53	C5	F2	1	1	0.316	0.4271	0	126	0	4505
		F3	4	1						
Esc. #54	C5	F2	2	1	0.5527	0.4658	0	152	0	5370
		F3	3	1						
Esc. #55	C5	F2	3	1	0.7249	0.4328	0	172	0	6043
		F3	2	1						
Esc. #56	C5	F2	4	1	0.8192	0.3135	0	177	0	6236
		F3	1	1						
Esc. #57	C5	F2	0	2	0.4144	0.4254	0	129	0	4777
		F3	5	0						
Esc. #58	C5	F2	1	2	0.5826	0.4538	0	152	0	5480
		F3	4	0						
Esc. #59	C5	F2	2	2	0.7201	0.4258	0	168	0	5959
		F3	3	0						
Esc. #60	C5	F2	3	2	0.8218	0.327	0	184	0	6460
		F3	2	0						
Esc. #61	C6	F2	2	0	0.4292	0.5575	0	140	0	4865

		F4	3	2						
Esc. #62	C6	F2	3	0	0.5149	0.5654	0	169	0	5881
		F4	2	2						
Esc. #63	C6	F2	4	0	0.7403	0.4715	0	181	0	6353
		F4	1	2						
Esc. #64	C6	F2	5	0	0.7769	0.3755	0	177	0	6269
		F4	0	2						
Esc. #65	C6	F2	1	1	0.3973	0.5924	0	149	0	5296
		F4	4	1						
Esc. #66	C6	F2	2	1	0.4955	0.5818	0	161	0	5680
		F4	3	1						
Esc. #67	C6	F2	3	1	0.7076	0.5186	0	186	0	6546
		F4	2	1						
Esc. #68	C6	F2	4	1	0.8049	0.3666	0	174	0	6140
		F4	1	1						
Esc. #69	C6	F2	0	2	0.1796	0.5062	0	124	0	4474
		F4	5	0						
Esc. #70	C6	F2	1	2	0.5352	0.6395	0	174	0	6195
		F4	4	0						
Esc. #71	C6	F2	2	2	0.6451	0.4512	0	108	0	3764
		F4	3	0						
Esc. #72	C6	F2	3	2	0.8673	0.3439	0	174	0	6096
		F4	2	0						
Esc. #73	C7	F2	2	0	0.4094	0.9084	0	60	124	6438
		F5	3	2						
Esc. #74	C7	F2	3	0	0.5613	0.9193	0	90	134	7905
		F5	2	2						
Esc. #75	C7	F2	4	0	0.7325	0.7277	0	110	103	7575

Esc. #76	C7	F5	1	2	0.7902	0.3277	0	124	74	7150
		F2	5	0						
Esc. #77	C7	F5	0	2	0.4552	0.9318	0	62	137	7017
		F2	1	1						
Esc. #78	C7	F5	3	1	0.5514	0.8959	0	85	130	7562
		F2	2	1						
Esc. #79	C7	F5	2	1	0.7179	0.7195	0	112	108	7744
		F2	3	1						
Esc. #80	C7	F5	1	1	0.8426	0.5198	0	128	75	7200
		F2	4	1						
Esc. #81	C7	F5	5	0	0.4103	0.8984	0	62	144	7274
		F2	0	2						
Esc. #82	C7	F5	4	0	0.5383	0.8504	0	82	133	7485
		F2	1	2						
Esc. #83	C7	F5	3	0	0.7055	0.7088	0	106	106	7378
		F2	2	2						
Esc. #84	C7	F5	2	0	0.8297	0.5238	0	127	79	7164
		F2	3	2						
Esc. #85	C8	F4	3	2	0.3498	0.5602	0	143	0	4972
		F3	2	0						
Esc. #86	C8	F4	2	2	0.4535	0.618	0	159	0	5583
		F3	3	0						
Esc. #87	C8	F4	1	2	0.4469	0.4851	0	148	0	5319
		F3	4	0						
Esc. #88	C8	F4	0	2	0.4302	0.3624	0	119	0	4391
		F3	5	0						
Esc. #89	C8	F3	1	1	0.3467	0.5942	0	147	0	5221

		F4	4	1						
Esc. #90	C8	F3	2	1	0.4286	0.5796	0	157	0	5530
		F4	3	1						
Esc. #91	C8	F3	3	1	0.4132	0.4653	0	145	0	5124
		F4	2	1						
Esc. #92	C8	F3	4	1	0.4212	0.328	0	121	0	4323
		F4	1	1						
Esc. #93	C8	F3	0	2	0.3464	0.5761	0	146	0	5277
		F4	5	0						
Esc. #94	C8	F3	1	2	0.4555	0.5552	0	154	0	5423
		F4	4	0						
Esc. #95	C8	F3	2	2	0.4629	0.5552	0	151	0	5228
		F4	3	0						
Esc. #96	C8	F3	3	2	0.4313	0.3545	0	127	0	4372
		F4	2	0						
Esc. #97	C9	F3	2	0	0.2866	0.8911	0	50	141	6739
		F5	3	2						
Esc. #98	C9	F3	3	0	0.436	0.89	0	70	132	7190
		F5	2	2						
Esc. #99	C9	F3	4	0	0.4006	0.741	0	68	109	6467
		F5	1	2						
Esc. #100	C9	F3	5	0	0.4125	0.5042	0	70	76	5508
		F5	0	2						
Esc. #101	C9	F3	1	1	0.2843	0.9336	0	50	140	6663
		F5	4	1						
Esc. #102	C9	F3	2	1	0.4624	0.8805	0	68	132	7016
		F5	3	1						
Esc. #103	C9	F3	3	1	0.4522	0.6492	0	66	108	6151

Esc. #104	C9	F5	2	1	0.439	0.5454	0	68	77	5223
		F3	4	1						
		F5	1	1						
Esc. #105	C9	F3	0	2	0.3983	0.9079	0	55	138	6781
		F5	5	0						
Esc. #106	C9	F3	1	2	0.346	0.816	0	66	132	6820
		F5	4	0						
Esc. #107	C9	F3	2	2	0.465	0.6783	0	67	111	6070
		F5	3	0						
Esc. #108	C9	F3	3	2	0.4731	0.4943	0	68	75	4884
		F5	2	0						
Esc. #109	C10	F4	2	0	0.3713	0.9204	0	59	143	7091
		F5	3	2						
Esc. #110	C10	F4	3	0	0.4986	0.7804	0	45	131	6347
		F5	2	2						
Esc. #111	C10	F4	4	0	0.4706	0.7831	0	89	114	7332
		F5	1	2						
Esc. #112	C10	F4	5	0	0.5649	0.5657	0	90	78	6234
		F5	0	2						
Esc. #113	C10	F4	1	1	0.4125	0.9283	0	56	138	6824
		F5	4	1						
Esc. #114	C10	F4	2	1	0.4893	0.8918	0	79	129	7316
		F5	3	1						
Esc. #115	C10	F4	3	1	0.577	0.7454	0	86	73	5605
		F5	2	1						
Esc. #116	C10	F4	4	1	0.5899	0.5541	0	83	75	5661
		F5	1	1						
Esc. #117	C10	F4	0	2	0.4058	0.9338	0	59	143	7113

Esc. #118	C10	F5	5	0	0.5721	0.917	0	46	133	6069
		F4	1	2						
		F5	4	0						
Esc. #119	C10	F4	2	2	0.5848	0.6297	0	89	106	6735
		F5	3	0						
Esc. #120	C10	F4	3	2	0.5987	0.4457	0	90	74	5644
		F5	2	0						
Esc. #121	C11	F4	4	0	0.2829	0.6093	168	0	5937	
		F1	1	2						
Esc. #122	C11	F4	4	1	0.2912	0.4292	144	0	5121	
		F1	1	1						
Esc. #123	C11	F4	3	1	0.2855	0.5319	166	0	5851	
		F1	2	1						
Esc. #124	C11	F4	3	2	0.2879	0.416	140	0	4854	
		F1	2	0						
Esc. #125	C11	F4	2	2	0.2977	0.5388	166	0	5818	
		F1	3	0						
Esc. #126	C12	F4	4	0	0.2868	0.6996	173	0	5141	
		F2	1	2						
Esc. #127	C12	F4	4	1	0.2924	0.482	145	0	5146	
		F2	1	1						
Esc. #128	C12	F4	3	1	0.2921	0.5296	159	0	5594	
		F2	2	1						
Esc. #129	C12	F4	3	2	0.1455	0.0063	127	0	4416	
		F2	2	0						
Esc. #130	C12	F4	2	2	2931	0.5651	167	0	5817	
		F2	3	0						
Esc. #131	C13	F4	4	0	0.2956	0.4913	153	0	5358	

		F3	1	2					
Esc. #132	C13	F4	4	1	0.2901	0.4178	141	0	4996
		F3	1	1					
Esc. #133	C13	F4	3	1	0.2808	0.4637	138	0	4856
		F3	2	1					
Esc. #134	C13	F4	3	2	0.2851	0.3264	141	0	4908
		F3	2	0					
Esc. #135	C13	F4	2	2	0.2815	0.4391	156	0	5476
		F3	3	0					
Esc. #136	C14	F4	4	0	0.283	0.8654	88	102	6828
		F5	1	2					
Esc. #137	C14	F4	4	1	0.2907	0.5671	92	73	5896
		F5	1	1					
Esc. #138	C14	F4	3	1	0.277	0.8311	89	108	6953
		F5	2	1					
Esc. #139	C14	F4	3	2	0.3067	0.517	89	74	5612
		F5	2	0					
Esc. #140	C14	F4	2	2	0.3055	0.7281	88	105	6660
		F5	3	0					

