

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“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.”**

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MINAS

Presentado por:

**XAVIER ANDRÉS MEDINA VEINTIMILLA
JAVIER ANDRÉS VÁSQUEZ CASTELLANO**

GUAYAQUIL – ECUADOR

2018

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres por ser el pilar más importante y demostrarme su cariño, quienes me enseñaron que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez.

A mi hermano por su apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones.

A los amigos que hice a lo largo de la carrera universitaria, por el apoyo mutuo en nuestra formación profesional.

Finalmente, a Carla, por su apoyo incondicional y confianza. Eres mi inspiración y mi motivación.

Xavier Medina

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres quienes me enseñaron que la mejor herencia que pueden dejarle a un hijo es la educación y por formarme para ser alguien con metas y aspiraciones en la vida. Sé que gracias a ellos no hay obstáculo que se me interponga en la vida para cumplir mis metas.

A mis dos hermanos por su apoyo incondicional.

A los amigos con quienes formé un lazo de amistad tan grande a lo largo de la carrera universitaria, por los bellos y difíciles momentos que superamos para llegar a esta meta.

Javier Vásquez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las empresas mineras Calizas Huayco S.A. y Logimin por la apertura a la realización de la presente investigación.

A nuestro compañero Roberto Noriega por habernos confiado este tema y por haber sido un tutor más para esta investigación.

A nuestros padres y hermanos que con sus consejos, esfuerzo y apoyo incondicional hicieron que esto sea posible.

Al Msc. Jesús Crespo por su predisposición en todo momento.

**Xavier Medina Veintimilla.
Javier Vásquez Castellano**

DECLARACIÓN EXPRESA

Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponden conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Xavier Medina y Javier Vásquez y damos nuestro 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.

Xavier Andrés Medina
Veintimilla

Javier Andrés Vásquez
Castellano

EVALUADORES

Msc. José Moreno-Chávez
PROFESOR DE LA MATERIA

Msc. Jesús Crespo Quintero
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Calizas Huayco S.A. es una cantera ubicada en el Km 12,5 vía a la costa, dedicada a la explotación de caliza. La empresa minera no posee un sistema coordinado de carga y transporte, en ella se explotan dos frentes simultáneamente por día con una flota de siete volquetes y tres excavadoras. Lo que ocasiona una logística complicada para distribuir la maquinaria y evaluar todas las alternativas posibles. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación por eventos discretos para evaluar con un alto grado de confiabilidad el sistema de carga y transporte en base en el ciclo de producción, a partir de los recursos existentes y operativos que la empresa posee, sin tener la necesidad de dimensionar la maquinaria y la creación de nuevas rutas de transporte.

A partir de los datos de tiempos recolectados en campo, se formuló distribuciones probabilísticas de cada actividad minera para simular el modelo en el software Arena Input Analyzer. Se realizó un análisis de vías internas de la mina con la finalidad de simular el movimiento de los volquetes mineros en el ciclo de acarreo, considerando así una variación del proceso en cada ciclo. Adicionalmente, se hizo el análisis matemático para hacer una comparación con el modelo de simulación.

Los resultados de la simulación mostraron que, de los 140 escenarios evaluados, 24 de ellos son óptimos. Mientras que el resultado del análisis matemático muestra que para cada frente de explotación es necesario 4 volquetes para el parque automotor.

Palabras clave: Simulación por eventos discretos, Arena, número óptimo, distribuciones probabilísticas.

ABSTRACT

Calizas Huayco SA is an open pit mine located 12,5 km from the city west exit highway, dedicated to the limestone exploitation. The mining company does not have a coordinated truck-shovel haulage system, in which two fronts are operated simultaneously per day with a fleet of seven trucks and three shovels which causes a complicated logistics to distribute the machinery and evaluate all possible alternatives. The objective of the present investigation is to develop a discrete event simulation model to evaluate with a high degree of reliability truck-shovel haulage system based on the production cycle, using the existing and operative resources that the company acquired, without the need to size the machinery and the creation of new transport routes.

From the data of times collected in the field, probabilistic distributions of each mining activity were formulated to simulate the model in the Arena Input Analyzer software. An analysis of the internal routes was carried out in order to simulate the movement of the mining trucks in the haul cycle, thus considering a variation of the process in each cycle. Additionally, the mathematical analysis was made to make a comparison with the simulation model.

The results of the simulation showed that, of the 140 scenarios evaluated, 24 of them are optimal. While the result of the mathematical analysis shows that for each operation front, 4 trucks are needed for the vehicle fleet.

Keywords: Discrete event simulation, Arena, optimal number, probabilistic distribution

TABLA DE CONTENIDO

EVALUADORES.....	6
RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
SIMBOLOGÍA	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Ubicación del área de estudio.....	2
1.2 Geología regional y local	4
1.2.1 Geología Regional.....	4
1.2.2 Geología Local	4
1.2.2.1 Formación Guayaquil	4
1.2.2.2 Formación San Eduardo.....	4
1.3 Descripción del Problema	5
1.4 Justificación	5
1.5 Objetivos	6
1.5.1 Objetivo General	6
1.5.2 Objetivos Específicos	6
1.6 Alcance del proyecto	6
1.7 Marco Teórico	7
1.7.1 Simulación, sistema y modelo	7
1.7.2 Componentes de la simulación.....	7
1.7.2.1 Entidades	7
1.7.2.2 Atributos	8
1.7.2.3 Actividades	8

1.7.2.4 Eventos	8
1.7.2.5 Variables del estado del sistema	9
1.7.2.6 Filas	9
1.7.3 Simulación para minería	9
1.7.4 Software de Simulación	10
1.7.5 Ventajas y Desventaja de la Simulación	10
1.7.5.1 Ventajas	10
1.7.5.2 Desventajas	10
1.7.6 Maquinaria de carga y transporte en minería a cielo abierto	11
1.7.6.1. Excavadoras hidráulicas	11
1.7.6.2 Volquetes	11
CAPÍTULO 2.....	13
2. METODOLOGÍA	13
2.1 Fases de la Metodología.....	13
2.1.1. Fase I.....	13
2.1.2. Fase II.....	14
2.1.3. Fase III	16
2.2 Procesamiento y análisis de datos	16
2.3 Desarrollo y análisis de resultados del modelo.....	17
CAPÍTULO 3.....	18
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	18
3.1 Recolección de muestras	18
3.2 Tamaño mínimo de muestras.....	19
3.3 Análisis de datos.....	19
3.3.1 Análisis de los tiempos de posicionamiento para volquete Volvo de 32 toneladas en frentes de explotación.	20
3.4 Resultados de las distribuciones probabilísticas	22

3.4.1 Distribuciones en los frentes de explotación.....	22
3.4.2 Resultados de las distribuciones probabilísticas en las zonas de descargas. 24	
3.4.3 Resultados de las distribuciones probabilísticas en las velocidades en la red vial Huayco.....	26
3.5 Análisis de la red vial Huayco	27
3.5.1 Resistencia a la rodadura (RR)	28
3.5.2 Resistencia a la pendiente (GR).....	29
3.5.4 Factor de cambio de velocidad (k).....	29
3.5.5 Dumper Caterpillar de 43 toneladas de capacidad.....	30
3.5.6 Volquete Volvo de 32 toneladas de capacidad	31
3.6 Resultados del análisis vial de la Red Huayco	32
3.7 Identificación de las entidades, atributos, recursos y variables de estado.	34
3.7.1 Entidades	34
3.7.2 Recursos	34
3.7.3 Atributos	35
3.7.4 Filas	35
3.7.5 Red Vial.....	36
3.7.6 Procesos que realizan las entidades en el sistema	36
3.8 Consideraciones previas a la elaboración del modelo.	36
3.9 Construcción del modelo.....	38
3.9.1 Creación de entidades y simulación de llegada de los volquetes al frente de trabajo	40
3.9.2 Simulación de actividades en frentes de explotación y transporte a zonas de descarga	41
3.9.3 Simulación de actividades en zonas de descarga y transporte a frentes de explotación	42
3.9.4 Construcción de la red vial.....	43

3.9.5 Fin de la simulación	44
3.10 Escenarios para evaluar en el modelo.....	44
3.10.1 Combinación de frentes.....	45
3.10.2 Combinación de equipos de transporte	46
3.10.3 Combinación de excavadoras.....	47
3.11.1.1 Estimación del coeficiente de reserva de la excavadora (Kr)	49
3.11.1.2 Coeficiente de reserva que depende de las fluctuaciones de la velocidad y otros imprevistos (Kf)	50
3.11.1.3 Coeficiente de utilización del equipo de transporte (Ku)	50
3.11.1.4 Coeficiente de tiempos improductivos no tecnológicos (Kn).....	51
3.11.1.5 Coeficiente de reserva que toma en cuenta los imprevistos que puede presentar el equipo de excavación (Krn).....	51
3.11.1.6 Coeficiente Kup.....	51
3.11.2 Tiempo de ciclo la excavadora.....	52
3.11.3 Número de cazos.....	52
3.11.4 Tiempo de carga.....	53
3.11.5 Tiempo de viaje de carga (Tvc)	54
3.11.6 Tiempo de viaje de descarga (Td).....	54
3.11.7 Tiempo de viaje de vacío (Tvv).....	54
3.11.8 Tiempo de ciclo del camión (Tcc).....	54
3.11.9. Cálculo de productividad del camión	55
3.11.9.1. Productividad Teórica (Qt)	55
3.11.9.2. Productividad técnica del camión (Qtec).....	55
3.11.9.3. Productividad por explotación (Qe)	55
3.11.9.4. Número de camiones servidos por la excavadora (Nce).....	55
3.11.9.5. Determinación del parque transporte (Nc).....	56
3.11.9.6. Determinación del número de camiones que integran el parque de equipos de transporte. (Ncpc)	56

3.12 Resultados	56
3.12.1 Resultados del modelo de simulación	56
3.12.2 Análisis del cálculo matemático	61
3.12.3 Resultados del cálculo matemático.....	61
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
4.1 Conclusiones.....	63
4.2 Recomendaciones.....	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

SIMBOLOGÍA

σ :	Desviación estándar.
δ	Densidad del material
δ_e	Porcentaje de esponjamiento del material
e :	Error de estimación máximo admisible
m^3	Metro cúbico
Z_α :	Parámetro estadístico que depende del nivel de confianza
%U KTZ1	Porcentaje de utilización de la excavadora Komatsu #1 de capacidad de de 2,8 metros cúbicos de capacidad de cazo.
%U KTZ2	Porcentaje de utilización de la excavadora Komatsu #2 de capacidad de de 2,8 metros cúbicos de capacidad de cazo.
%U CAT1	Porcentaje de utilización de la excavadora Caterpillar de capacidad de 2,6 metros cúbicos de capacidad de cazo.
%U TritHuayco	Porcentaje de utilización de la trituradora Huayco de 650 toneladas por hora de capacidad.
%U TritPrecon	Porcentaje de utilización de la trituradora Precón de 350 toneladas por hora de capacidad.
Ad	Producción promedio diaria de la empresa
C	Combinaciones
D	Distancia
Ec	Capacidad del balde del volquete al ras
Ex	Capacidad volumétrica del cazo de la excavadora
F	Frentes de explotación
h	Hora
k	Factor de cambio de velocidad

km	Kilómetro
kf	Coeficiente de reserva que depende de las fluctuaciones de la velocidad
kllc	Coeficientes de llenado del camión
kllc	Coeficientes de llenado del cazo de la excavadora
kn	Coeficientes de tiempos improductivos no tecnológicos
KPI's	Indicadores de desempeño
Kr	Coeficiente de reserva de la excavadora
krm	Coeficiente de reserva que toma en cuenta los imprevistos que se puedan presentar en la excavadora
ku	Coeficiente de utilización del equipo de transporte
kup	Coeficiente disponibilidad técnica – parque de maquinas
Kw:	Potencia del motor del vehículo
m	Metro
Mc	Tiempo de posicionamiento en el frente de explotación
Md	Tiempo de posicionamiento de descarga
mg	Miligramo
n	Tamaño de la muestra que se desea encontrar.
Nc	Parque de transporte
Nd	Número de días de trabajo
Nce	Número de camiones servidos por la excavadora
NL	Network Links
Np	Número de paladas
Nt	Número de turnos de trabajo

Pe	Permutaciones
Pt	Parque de transporte
Ncpc	Número de camiones que integran el parque de camiones
Qe	Productividad por explotación
Qt	Productividad teórica
Qtec	Productividad técnica
RR	Resistencia a la rodadura
GR	Resistencia a la pendiente
ER	Resistencia equivalente
s	Segundo
Vmax:	Velocidad máxima (Km/h)
t	Tonelada
Tc	Tiempo de carga
Tcc	Tiempo de ciclo total del camión
Tce	Tiempo de ciclo de la excavadora
Td	Tiempo de descarga del camión
Tde	Tiempo de descarga de la excavadora
Tpll	Tiempo promedio de viaje de llegada del camión sin el coeficiente k_u
Tpvr	Tiempo promedio de viaje de regreso del camión sin el coeficiente k_u
Tlle	Tiempo de llenado del cazo de la excavadora
TR	Resistencia total expresada en decimal
TRO	Resistencia total a pendiente igual a cero, expresada en decimal
Tvlle	Tiempo de viaje de llenado de la excavadora

Twe	Tiempo de viaje al vacío de la excavadora
Tt	Tiempo de horas de trabajo productivo
Tvc	Tiempo de viaje cargado del camión
Twv	Tiempo de viaje al vacío del camión

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cantera Calizas Huayco S.A., cantón Guayaquil	2
Figura 1.2. Concesiones de la cantera Calizas Huayco S.A.....	3
Figura 2.3. Metodología usada en el desarrollo de la investigación	13
Figura 2.4. Fase I de la investigación	14
Figura 2.5. Fase II de la investigación	15
Figura 2.6. Fase III de la investigación	16
Figura 3.7. Histograma de tiempos de posicionamiento del volquete Volvo	20
Figura 3.8. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de posicionamiento del volquete Volvo en los frentes de explotación.....	21
Figura 3.9. Información de los errores al cuadrado para cada distribución probabilística mediante Input Analyzer	21
Figura 3.10. Velocidades máximas el vehículo va cargado (L) y vacío (E) en el ábaco del manual Caterpillar	30
Figura 3.11. Representación de la red vial Huaco con sus intersecciones.....	32
Figura 3.12. Representación lógica del modelo creado.....	39
Figura 3.13. Secuencia de bloques para la simulación de creación y llegada de los volquetes a sus respectivos frentes de descarga	40
Figura 3.14. Secuencia de bloques para la simulación actividades en frentes de explotación y transporte a zonas de descarga.	42
Figura 3.15. Secuencia de bloques para la simulación actividades zonas de descarga y transporte a frentes de explotación	43
Figura 3.16. Modelo de la Red Huayco en Arena	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Información detallada por cada concesión minera de estudio.....	2
Tabla 1.2. Descripción de la maquinaria utilizada en el sistema de carga y transporte actualmente	11
Tabla 3.3. Tamaño de muestra mínimo del tiempo de posicionamiento con relación a la maquinaria.....	22
Tabla 3.4. Distribuciones probabilísticas del posicionamiento en los frentes de trabajo en relación con el tipo de camión	22
Tabla 3.5. Distribuciones probabilísticas de tiempo de carga del material en relación con el tipo de maquinaria	23
Tabla 3.6. Probabilidades de espera del camión en los frentes de trabajo	23
Tabla 3.7. Tamaño mínimo de muestras de tiempo de carga del material.....	23
Tabla 3.8. Distribución probabilística de tiempo de carga del material en relación con el tipo de maquinaria	24
Tabla 3.9. Probabilidad del número de paladas	24
Tabla 3.10. Tamaño mínimo de muestra de tiempo de posicionamiento en la zona de descarga.....	24
Tabla 3.11. Distribuciones probabilísticas del posicionamiento en la zona de descarga en relación con el tipo de camión	25
Tabla 3.12. Probabilidad de espera del camión en la zona de descarga	25
Tabla 3.13. Distribución probabilística del tiempo de espera en la zona de descarga ..	25
Tabla 3.14. Tamaño mínimo de muestra del tiempo de descarga	26
Tabla 3.15 Distribución probabilística del tiempo de descarga	26
Tabla 3.16. Tamaño mínimo de muestra para las velocidades de lleno y vacío del camión.....	27

Tabla 3.17. Distribución probabilística de las velocidades de viaje lleno y al vacío del camión.....	27
Tabla 3.18. Tabla de porcentaje de la resistencia a la rodadura.....	28
Tabla 3.19. Network Links de la red vial Huayco con su factor de reducción de velocidad k.....	32
Tabla 3.20. Relación de estaciones con el número de la intersección en la Red Huayco	44
Tabla 3.21. Parámetros a combinar para crear escenarios	44
Tabla 3.22. Combinación de frentes de trabajo en condición normal.....	45
Tabla 3.23. Combinación de frentes de trabajo en condición especial	46
Tabla 3.24. Agrupaciones de los equipos de acarreo para los frentes de trabajo en condición normal	46
Tabla 3.25. Agrupaciones de los equipos de acarreo para los frentes de trabajo en condición especial	47
Tabla 3.26. Combinación de las excavadoras según la condición.....	47
Tabla 3.27. Número de escenarios a evaluar en el modelo de simulación	48
Tabla 3.28. Datos de la capacidad de la maquinaria y las características del material	49
Tabla 3.29. Actividades absorbidas en el coeficiente K_u	50
Tabla 3.30. Actividades absorbidas en el coeficiente K_n	51
Tabla 3.31. Actividades absorbidas en el coeficiente K_{rn}	51
Tabla 3.32. Tiempos de actividades realizadas por la excavadora	52
Tabla 3.33. Resultados de escenarios óptimos para todas las combinaciones de frentes de explotación	58

Tabla 3.34. Resultados del análisis matemático62

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el modelo de simulación por eventos discretos se ha implantado como una herramienta decisiva para la evaluación y diseño de sistemas productivos; incluido minería, plantas industriales y servicios (Cetin, Erarslan, & Okuducu, 2001). En operaciones mineras, al ser cíclicas, la aplicación de modelos de simulación por eventos discretos validados y sincronizados, permiten identificar atascos y congestionamientos en el sistema para valorar alternativas de desarrollo en el sistema de transporte, estructura del trabajo y planes de minado.

La simulación por eventos discretos comienza con la construcción del modelo conceptual del flujo productivo (Tiile, Kaba, Aouad, & Arthur, 2016). En este se establece el nivel de detalle a llegar en el estudio, definiendo además los indicadores de desempeño (KPI's) a valorar. El levantamiento de datos se realiza para identificar los procesos productivos dentro del sistema con el nivel de detalle establecido y modelar con estos, distribuciones probabilísticas que serán ingresadas a la simulación (Dindarloo, Osanloo, & Frimpong, 2015).

Posteriormente se construye el modelo de simulación de la operación minera siguiendo un orden y criterio lógico de las actividades que componen el sistema a evaluar, permitiendo desarrollar un modelo que pueda ser validado en base a los indicadores de desempeño establecidos frente a los datos reales (Dindarloo et al., 2015; Sturgul, 2016; Tiile et al., 2016).

Calizas Huayco S.A. es una empresa dedicada a la extracción y procesamiento de materiales de construcción, caliza y carbonatos. La empresa posee ocho concesiones mineras de materiales no metálicos y dos trituradoras. En la concesión A Guay El Huayco, la de mayor extensión de los ocho concesionadas por la empresa, se encuentra la trituradora primaria con una productividad de 700 t/h. Mientras que la trituradora secundaria se encuentra en el lado opuesto de la cantera en la concesión Ampliación Precón, y tiene una productividad de 350 t/h. Siendo Calizas Huayco S.A. una de las empresas dedicadas a la extracción de caliza con las más altas capacidades del país.

1.1 Ubicación del área de estudio

La empresa minera Calizas Huayco S.A. se encuentra ubicada en la provincia de Guayas, ciudad de Guayaquil, parroquia Chongón, en el sector Cerro Azul, km 12 vía a la costa. La explotación de la mina se realiza a lo largo del tren montañoso Chongón-Colonche en una longitud aproximada de 2,5 km. En la **Figura 1.1** se visualiza la cantera Calizas Huayco (Maxera, 2005; Villacis & Calle, 2000)(Valle Flores, Acosta Vera, Salvatierra Ron, & Santos, 2012).



Figura 1.1: Cantera Calizas Huayco SA, cantón Guayaquil [Google Earth]

El proyecto se desarrolló en las ocho concesiones mineras detalladas en la **Tabla 1.1**, inscritas todas en el catastro minero como concesiones mineras de explotación de no metálicos.

Tabla 1.1 Información detallada por cada concesión minera de estudio [Medina & Vásquez, 2018]

Concesión	Titular	Código catastral	Superficie (ha)	Coordenada X	Coordenada Y
A Guay El Huayco	Mirbet S.A.	124	79,17	612.172*	9.759.877*
Progransa	Progransa Productos de Granito S.A.	66	2	612.067*	9.759.680*
Terraplein	Progransa Productos de Granito S.A	2993	2	612.067*	9.759.480*

Lérída	Estancia Cerro Azul	2417	8	611.966*	9.759.225*
Fraga	Terraplein S.A.	2096.1	9,4	611.727*	9.759.670*
Explosa	Explosa Explotadora de Caliza S.A.	60	10,61	611.727*	9.759.226*
ADecal	Guzman Maspons Jaime Alberto	232	9,98	611.602*	9.759.100*
Ampliación Precón	Dimidium S.A.	59	48	611.002*	9.759.007*

*: Coordenadas en PSAD 56

En la **Figura 1.2** se muestra la geografía de las concesiones y su distribución dentro de la cantera Calizas Huayco S.A. Las concesiones de mayor extensión son: A Guay El Huayco y Ampliación Precón, donde se ubican la trituradora primaria y secundaria respectivamente.



Figura 1.2. Concesiones de la cantera Calizas Huayco S.A. [Noriega, Roberto, 2017]

1.2 Geología regional y local

1.2.1 Geología Regional

La mina Calizas Huayco se encuentra sobre una zona sedimentaria del tipo calcáreo. Las formaciones Guayaquil y San Eduardo son las que predominan en la mina. La formación San Eduardo siendo el principal interés de explotación, posee depósitos en la coronación y laderas del cerro (Añazco, 2017; Mina, 2016; Noriega, 2017).

1.2.2 Geología Local

1.2.2.1 Formación Guayaquil

Los afloramientos se encuentran en la salida Oeste de Guayaquil. Forman una banda paralela al flanco S de la Cordillera Chongón Colonche hasta unos 80 Km al Noreste de Guayaquil (Bristow, 1977). La formación Guayaquil contiene lutitas y arcillas. En la parte superior se concentra más estos tipos de rocas. La formación es de tipo calcáreo y se puede considerar de tipo secundario debido a la presencia de la formación San Eduardo (Thalman, 1946).

En la mina, actualmente se está explotando este tipo de material en la concesión Ampliación Precón. Siendo la única concesión de las ocho en la que se explota el material de la formación Guayaquil.

1.2.2.2 Formación San Eduardo

Se localiza en la cantera San Eduardo por la salida Oeste de la ciudad de Guayaquil a 2 km del cerro San Eduardo bordeando el flanco Sur de la cordillera Chongón – Colonche hasta 40 km al Oeste de Guayaquil. Se han evidenciado afloramientos esporádicos de esta formación en la provincia Manabí llegando incluso a la provincia de Esmeraldas (Añazco, 2017).

La formación está constituida por calcarenita turbídica hasta calc-crudita bien estratificada (Frey & Mills, 1968). Esta formación yace sobre la formación Guayaquil. Buza hacia el Oeste. Su espesor es de aproximadamente 200 m (Bristow, 1977). Es el principal mineral de interés de la empresa Calizas Huayco S.A., explotando en su mayoría el material de esta formación.

1.3 Descripción del Problema

Actualmente, la empresa minera no dispone de un modelo del sistema carga y transporte por software. La maquinaria es adquirida de acuerdo a la disposición de la empresa contratada, es decir que los equipos no están debidamente dimensionados, en consecuencia, los equipos no son utilizados de manera óptima, lo que produce mayor consumo de combustible, mayor desgaste de equipo y mayores horas de trabajo.

La descoordinación de la etapa de carga y transporte desde el frente de trabajo conlleva a realizar la identificación de las deficiencias donde se producen puntos muertos y paradas innecesarias de los equipos, lo cual produce pérdidas económicas.

En adición a esto, la logística de escoger los frentes y las rutas con la maquinaria disponible presenta un reto con el cual no se pueden evaluar todas las alternativas disponibles sin un modelo del sistema de transporte y acarreo que permita escoger la maquinaria y el número óptimo para tener indicadores de desempeño altos.

1.4 Justificación

El proyecto se orienta en generar un modelo de simulación por eventos discretos a partir de la toma de datos generados en campo que serán analizados en el software Arena. De todas las posibles combinaciones ingresadas al programa, se seleccionará los escenarios óptimos con base en el mayor ciclo de producción, dado que esta fase representa aproximadamente el 45% y el 65% de los costos operativos totales de un proyecto minero a cielo abierto.

Con la información entregada por la empresa, se conoce que los equipos de carga y transporte utilizados son de alquiler, es decir, que los equipos que actualmente desarrollan las actividades de carga y transporte varían según la disposición de estos. En respuesta a esta problemática, surge la necesidad de construir un modelo de simulación eficiente con los equipos que actualmente la empresa posee para obtener el tonelaje requerido diario.

Mediante el uso de KPI's propuestos, el modelo de simulación por eventos discretos ayudará a identificar los escenarios en donde los KPI's sean inferiores a lo establecido.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo del sistema de carga y transporte como herramienta para la toma de decisiones y evaluación del sistema de la cantera Calizas Huayco SA.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Esbozar información de la cantera sobre los procesos y construcción de un modelo conceptual del ciclo de producción.
2. Obtener tiempos de los diferentes procesos de producción de la cantera.
3. Construir un modelo estocástico del sistema de carga y transporte con los datos recolectados.
4. Evaluar todos los escenarios posibles en el modelo estocástico desarrollado.

1.6 Alcance del proyecto

El proyecto busca evaluar alternativas de desarrollo del sistema carga y transporte con un alto nivel de confianza el ciclo de producción usando los recursos existentes y operativos que actualmente la empresa posee, para de esa manera no generarle a la empresa costos adicionales por concepto de nuevo dimensionamiento o cambio de maquinaria como alternativa de optimización. Dentro del proyecto tampoco se propondrá el desarrollo de nuevas rutas para el transporte de las operaciones mineras ni se enfocará en la fase de perforación y voladura, se focalizará únicamente en el ciclo de transporte, desde el carguío en el frente de explotación, traslado del mineral hasta la deposición final en la trituración primaria.

Se evaluará y analizará los diferentes escenarios posibles de acuerdo con la variación del número de equipos de carga y transporte en los diferentes frentes de trabajo, las rutas de transporte hacia la planta de beneficio y el tipo de trituradora, teniendo como resultado la productividad total en ese día en el turno de trabajo.

1.7 Marco Teórico

1.7.1 Simulación, sistema y modelo

La simulación es una técnica que nos permite representar, imitar y recrear el funcionamiento de un sistema del mundo real a medida que avanza el tiempo con el objetivo de plantear diversas alternativas que ayuden a mejorar el sistema. Al proceso o caso de estudio que se desea estudiar se lo denomina sistema (Sturgul, 2016; Upadhyay, 2016).

Para poder realizar la simulación de un sistema es necesario disponer previamente de un modelo de éste (J. Sturgul, 2017; J. R. Sturgul, 2017.). Un modelo es la representación de un sistema real que tiene como finalidad ser estudiado y manipulado para la toma de decisiones de alternativas de desarrollo a implementarse en él (Hustrulid, Kuchta, & Martin, 2013).

El modelo debe tener un gran detalle para permitir al modelador evaluar con alto grado de confianza conclusiones a aplicarse en el sistema real. Adicionalmente, debe ser fácil de entender, manipular y controlar por el modelador (Barceló, 1996; Cetin et al., 2001; Dindarloo et al., 2015; Tiile et al., 2016).

1.7.2 Componentes de la simulación

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

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

1.7.2.1 Entidades

Representa un objeto de interés que se mueve, cambia de estado e interacciona con otras entidades. Es sobre este componente que se desea conocer el comportamiento

dentro del sistema real para proponer alternativas de mejora que ayuden al sistema a ser más eficiente.

Hay casos en donde la entidad puede ser ficticia con el objetivo de modelar “artificios” que serán necesarios en la construcción del modelo.

1.7.2.2 Atributos

Los atributos son características que pertenecen a la entidad y son asignados por el modelador. Este componente es el que permite distinguir una entidad de otra. Los atributos son variables locales propias y únicas de la entidad.

1.7.2.3 Actividades

Es un módulo donde la entidad participa en una actividad o proceso específico. Para que la entidad atraviese este proceso, se necesitará que la misma tome un tiempo conocido de antemano para ejecutarlo. Se divide en dos:

- Sin recurso: todas las entidades pueden ingresar a la actividad o proceso, toman su tiempo de demora especificado y salen. (Ej: caminar; todas las personas (entidades) caminan en una zona específica y les tomará un tiempo conocido).
- Con recursos: la entidad ingresa a la actividad, capta un recurso, realiza la actividad en un tiempo conocido y se retira. Si no existen más recursos disponibles, las otras entidades no podrán ingresar a la actividad hasta que se libere uno y formarán una fila o "cola".

La duración de una actividad puede ser una constante, empírica o estocásticas, aunque también se puede asignar una duración ficticia igual a cero.

1.7.2.4 Eventos

Un evento es el cambio de estado del sistema y sus propiedades debido al ingreso o salida de un atributo. Los eventos se pueden clasificar en exógenos y endógenos. En el presente proyecto un evento exógeno sería la llegada de los volquetes con carga a la trituradora primaria y como evento endógeno la descarga del material.

1.7.2.5 Variables del estado del sistema

Son las características globales que son necesarias para definir en detalle los acontecimientos del sistema en un tiempo específico.

Como ejemplo de variables tenemos:

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

1.7.2.6 Filas

Comúnmente conocida como “cola” es el lugar en el sistema donde las entidades se detienen. Por lo general, las filas se producen al inicio de una actividad cuando los recursos están siendo utilizados por una entidad.

El comportamiento de un atributo es la manera de actuar frente a una fila. Estas situaciones pueden ser como saltar la fila, moverse entre filas o simplemente dejándola y evitando la actividad.

1.7.3 Simulación para minería

La aplicación del modelo de simulación en minería es una técnica actualmente usada por medio del avance tecnológico-informático en el campo minero. Se puede realizar estudios de modelos simulación del tipo Continuos y Discretos. La mayoría de las operaciones mineras son ejemplos de sistemas de eventos discretos. *(Bedón, 2005)*

Uno de los primeros proyectos de modelo de simulación en minería publicados fue el de Karsten Rist (1961). Este modelo fue usado para optimizar el número de vagones necesarios en un sistema de acarreo en una mina subterránea de molibdeno en USA. *(Meza, 2011)*

Posteriormente, Madge (1964) fue capaz de simular el transporte en una mina a cielo abierto en Canadá. Un año después, Sanford (1964) construyó un modelo para simular un sistema de cintas transportadoras como tema de tesis en la universidad de Pensilvania. Seguido por Morgan et. all. (1969) que mostraron como realizar una simulación estocástica de una operación minera a cielo abierto *(Meza, 2011)*.

Los principales problemas que ocurren dentro de las operaciones mineras y pueden ser solucionados por modelos de simulación son:

- Modelamiento de cintas transportadoras.
- El carguío y transporte de material de operaciones a cielo abierto.
- Operaciones donde apliquen el método de cámaras y pilares.

Actualmente, los lenguajes de simulación más usados en operaciones mineras son GPSS/H (con la galería PROOF para la animación) y el software Arena. (Meza, 2011)

1.7.4 Software de Simulación

El software seleccionado para llevar a cabo la simulación del proyecto, optimización y de carga y transporte en una mina a cielo abierto a analizar es Arena de Rockwell Software.

1.7.5 Ventajas y Desventaja de la Simulación

1.7.5.1 Ventajas

- Mediante la simulación se puede realizar pruebas comparando modelos alternativos para identificar cuál de ellos cumple de forma adecuada con los objetivos establecidos.
- Existe un mejor control sobre las condiciones del sistema en comparación si se realizara sobre el propio sistema.
- Permite realizar análisis en cuellos de botellas para detectar donde hay filas en un determinado proceso.
- Se puede realizar cambios en el sistema sin tener que detener la operación actual.
- Se ahorra tiempo y se tiene flexibilidad para variar las condiciones.

(García & Ortega, 2006; Meza, 2011)

1.7.5.2 Desventajas

A pesar de ser una técnica que tiene gran utilidad debido a las ventajas que posee, también puede producir inconvenientes. Entre ellos se encuentran:

- Los resultados pueden ser difíciles de interpretar a las interrelaciones inherentes al sistema y a la aleatoriedad de algunas variables.

- Es necesario realizar una serie de repeticiones para evaluar el modelo y tener una muestra representativa del funcionamiento del sistema.
- Requiere el uso de recursos humanos capacitados y equipo de informática aplicada.

(García & Ortega, 2006; Meza, 2011)

1.7.6 Maquinaria de carga y transporte en minería a cielo abierto

1.7.6.1. Excavadoras hidráulicas

Es una máquina que posee una cuchara fijada a un brazo, puede desplazarse sobre ruedas u orugas. Su estructura de soporte le permite girar 360° y descargar el material sin la necesidad de desplazar el equipo (Hustrulid et al., 2013).

En el ciclo de carga utilizan dos excavadoras hidráulicas marca Komatsu PC450LC-8 y una CAT 336. A continuación, se presenta especificaciones generales de cada máquina.

1.7.6.2 Volquetes

Se utiliza 5 volquetes modelo FMX500 8x4R, marca VOLVO y dos volquetes, modelo: 773B, marca CaterPillar.

Tabla 1.2. Descripción de la maquinaria utilizado en el Sistema de carga y transporte actualmente [Medina & Vásquez, 2018]

EQUIPOS			
	Parámetros		
Modelo	Altura	Capacidad del balde/ cucharón	Cantidad
CAT 773B	4,23 m	43 t	2
Modelo	Volquete		
Volvo FMX 8X4R	3,06 m	32 t	5
Modelo	Excavadora		
Komatsu PC450LC-8	3,57 m	2,8 m ³	2

Caterpillar 336	3.57 m	2,6 m ³	1
--------------------	--------	--------------------	---

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Fases de la Metodología

El proyecto se efectuó mediante trabajos realizados en campo y en oficina con el objetivo de lograr la investigación. La metodología que desarrollamos está dividida en tres fases y es de carácter no experimental, por lo que no se hicieron pruebas en campo para corroborar los resultados obtenidos.

La metodología se muestra a continuación en el **Figura 2.3** dividida en tres fases

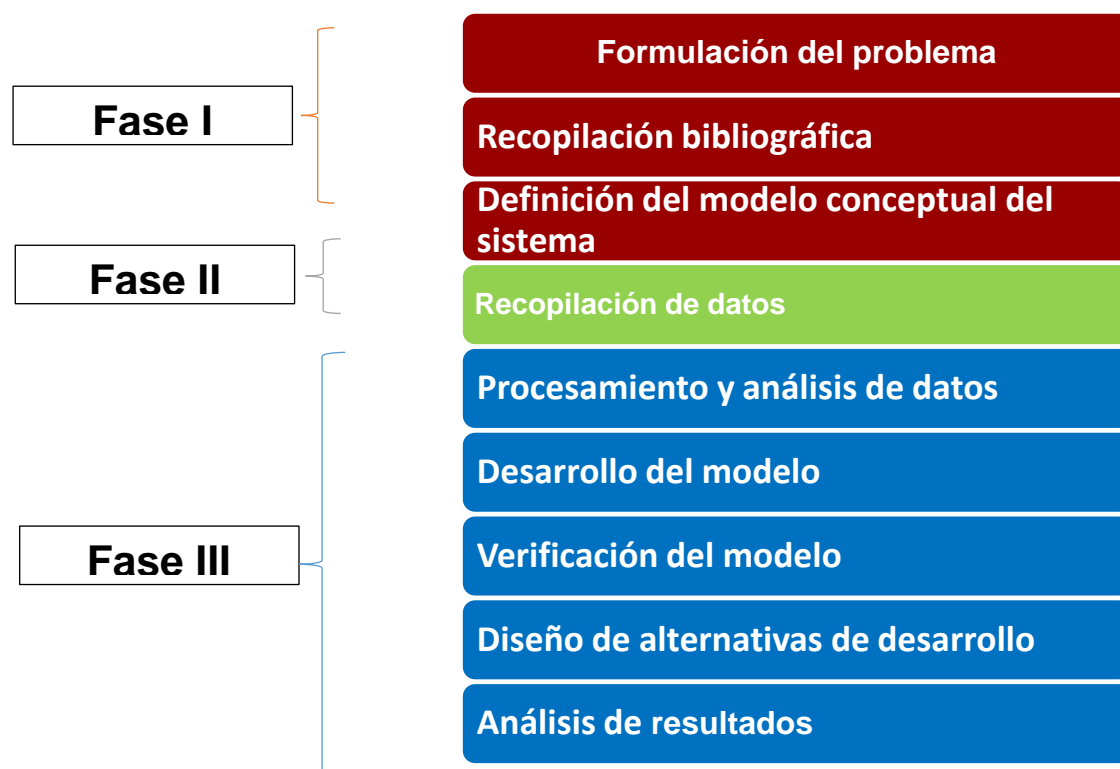


Figura 2.3: Metodología usada en el desarrollo de la investigación [Medina & Vásquez, 2018]

2.1.1. Fase I

Las actividades de la Fase I iniciaron con la investigación de trabajos relacionados en el área de estudio, se realizaron visitas al campo con la finalidad de identificar posibles problemas en ella y verificar si la simulación por eventos discretos podría ser tomada como una herramienta para buscar alternativas de desarrollo que satisfagan estos problemas. Estas inquietudes se resolvieron haciéndose preguntas simples como ¿Se

podrá modelar el sistema?, ¿Los tiempos de desarrollo de la investigación serán adecuados?, ¿Se posee el software y los recursos adecuados para el desarrollo del modelo? Una vez verificado el problema se procede con la formulación del problema y el alcance de la investigación para delimitar el horizonte de estudio. Para mejores resultados, es necesario delimitarlo.

Luego de esto, se recolectó toda la información acerca del área de estudio y sus componentes como: ubicación geográfica, geología del sector, frentes de trabajo, rutas de transporte, maquinaria y del personal operativo que forma parte del área de estudio.

Se concluyó la Fase I con la definición del modelo conceptual del flujo productivo de la mina enfocado al sistema que se estudió, la operación de transporte minero. Se obtuvo un panorama claro acerca del funcionamiento del sistema, sus componentes, sus delimitaciones y la problemática a estudiar. En la **Figura 2.4** se muestra las actividades previas realizadas al trabajo en campo.

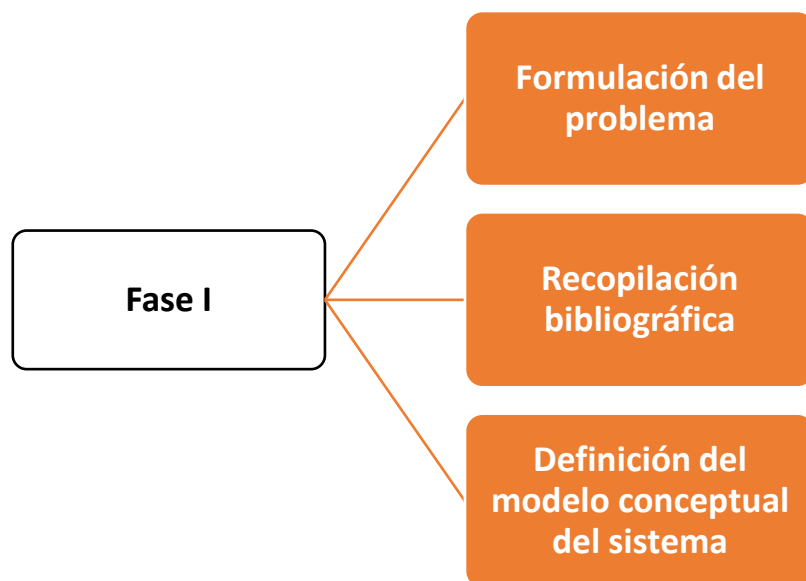


Figura 2.4: Fase I de la investigación [Medina & Vásquez, 2018]

2.1.2. Fase II

La presente fase tuvo como objetivo el levantamiento de datos e información de las operaciones mineras de carga y transporte a ser evaluada en el modelo. La recopilación de datos se realizó en un mes aproximadamente. El número de horas establecidas para la toma de datos se la consideró con relación a la tesis titulada “Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una

operación minera a tajo abierto” escrita por (Meza, 2011), que considera sólo 2 horas de trabajo, para que nuestros datos tengan un mayor grado de confiabilidad, se recolectaron durante 5 horas diarias.

Se registraron los datos posicionándose en las trituradoras y frentes de trabajos, además del empleo de dispositivos de rastreo portátil GPS en la maquinaria de transporte de mineral del frente de trabajo a la trituradora. En la **Figura 2.5** se muestra la actividad planificada en campo.

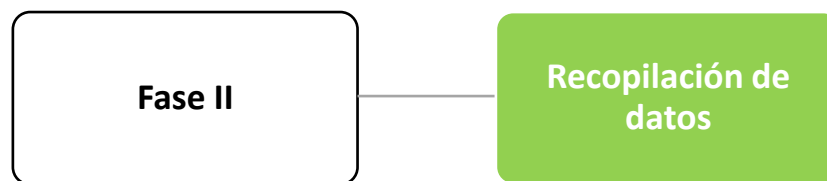


Figura 2.5: Fase II de la investigación [Medina & Vásquez, 2018]

Los datos que se registraron en el ciclo de carguío fueron los siguientes:

- Tipo de volquete que llega al frente de trabajo.
- Tiempo que emplea el volquete para el posicionamiento.
- Tiempo de espera en el frente de trabajo.
- Tiempo de carguío por palada.

Para todas estas variables mencionadas se calculó el tamaño de muestra mínimo a considerar en la etapa de carga y transporte.

Los datos que se registraron en el ciclo de transporte fueron los siguientes datos:

- Tipo de volquete
- Tiempo de llegada a la planta de tratamiento.
- Tiempo de posicionamiento para disponerse a descargar el material
- Tiempo de espera en la trituradora.
- Tiempo de retorno al frente de carguío

Para determinar el tamaño mínimo del número de datos que se debe tomar en consideración para tener una data confiable se realizó el cálculo de tamaño de muestra.

2.1.3. Fase III

La Fase III da inicio al trabajo de gabinete en que se usan los datos e información recopilada, se procesa y analiza hasta obtener el producto final. En la **Figura 2.6** se muestra las actividades planificadas para el desarrollo del modelo.

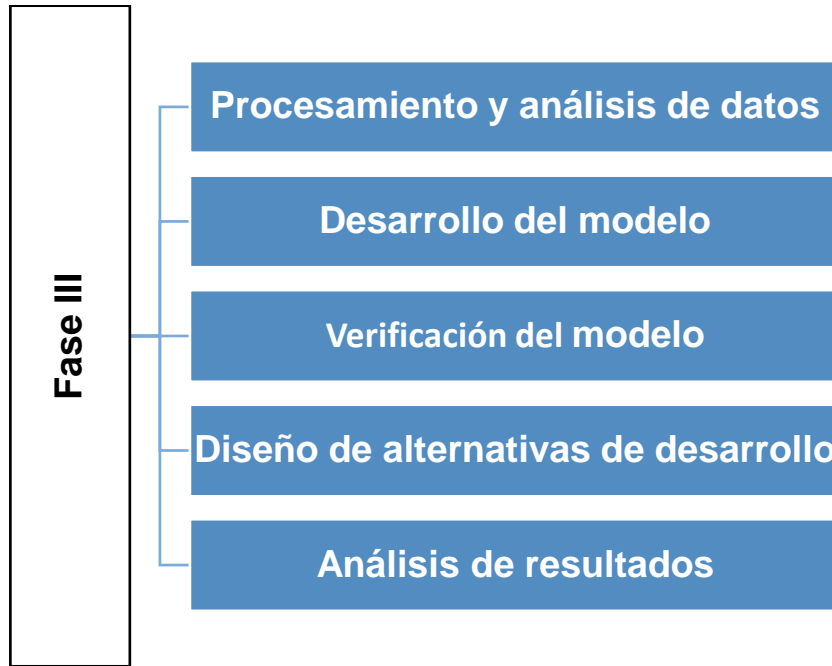


Figura 2.6: Fase III de la investigación [Medina & Vásquez, 2018]

2.2 Procesamiento y análisis de datos

Se empezó a construir con los datos obtenidos en campo, las distribuciones de frecuencias o histogramas pertenecientes a cada grupo de datos para en base a ellas escoger la familia de distribuciones estadísticas adecuadas. El software Arena 12.1 cuenta con una herramienta de análisis de datos llamada Input Analyzer en la que se compararon todas las familias de distribuciones para cada grupo de datos y se escogió la que mostró el error al cuadrado más bajo. (Dindarloo et al., 2015; Sturgul, 2000, 2016; Tiile et al., 2016)

En adición a esto, se evaluó la familia de distribuciones elegida para los grupos de datos con el ajuste de bondad usando los métodos Chi Cuadrado y Kolmogorov-Smirnov. Para validar que los datos se ajustaron a la distribución elegida, revisando los “valores de p” de las dos pruebas de bondad de ajuste y el error al cuadrado de cada distribución probabilística. (Bedon & Omar, 2005; Land, 2004)

Por lo tanto, el criterio de aprobación debe cumplir con dos condiciones:

- El *valor de p* $> 0,05$.
- El menor error al cuadrado.

Si la condición del valor de p no cumple. Se debe rechazar y elegir el siguiente error al cuadrado más bajo, y se debe volver a evaluar las condiciones de aceptación.

2.3 Desarrollo y análisis de resultados del modelo

En esta etapa se representó el modelo real de la mina por medio de bloques en el software. Estos bloques contienen relaciones lógicas, distribuciones estadísticas y actividades del modelo real. Previamente a la construcción del modelo se identificaron:

- Entidades y recursos
- La lógica de los procesos
- Indicadores de desempeño
- Supuestos

En la etapa de verificación se corroboró que los eventos del modelo de simulación fueron procesados correctamente, sin presentar errores en la programación. Luego de aseverar que el modelo desarrollado es válido, se realizó las simulaciones de todas las posibles combinaciones de desarrollo teniendo como resultado las capacidades de producción de cada escenario.

En el análisis de resultados se examinaron los resultados e indicadores de cada escenario además de contrastarlos. Los beneficios de las alternativas se verificaron que sean congruentes al modelo real.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Recolección de muestras

La recolección de datos se realizó durante un mes durante la operación minera. Este proceso se realizó en el primer ciclo de trabajo en un periodo de 5 horas por día.

Se recolectaron 6239 datos en los frentes de explotación y zonas de descarga de la mina Calizas Huayco entre el mes de noviembre y diciembre del 2018.

Los datos que se registraron en los frentes de explotación fueron los siguientes:

- Frente de explotación de que se extrae el material
- Tipo de volquete que llega al frente (Volvo o Caterpillar)
- Tiempo de posicionamiento del volquete
- Tiempo de espera
- Tiempo de carga

Los datos que se registraron en las zonas de descarga fueron los siguientes:

- Tipo de volquete que llega a zona de descarga (Volvo o Caterpillar)
- Tiempo de posicionamiento
- Tiempo de espera
- Tiempo de descarga

Los datos que se registraron en red vial fueron los siguientes:

- Velocidad promedio de volquete Volvo sin carga.
- Velocidad promedio de volquete Volvo con carga.

Los datos de las velocidades de los volquetes Caterpillar no pudieron ser recolectados debido a que este tipo de equipo de transporte no posee GPS integrados.

3.2 Tamaño mínimo de muestras.

Para determinar el tamaño mínimo de muestras que se deben recolectar para obtener una muestra confiable se realizó el tamaño de muestra para cada distribución probabilística.

Se realiza el cálculo con la **Ecuación 3.1**.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * \sigma^2}{e^2} \quad (3.1)$$

Para este proyecto se considera un nivel de confianza del 95% con un error admisible del 10%.

Como se mencionó anteriormente, el parámetro estadístico (Z_{α}) depende del nivel de confianza que hayamos seleccionado, en este caso del 95%. Para determinar Z_{α} nos dirigimos a la tabla de probabilidades de la distribución Normal Estándar donde podemos comprobar que:

$$P(-1.96 < z < 1.96) = 0.95$$

3.3 Análisis de datos.

Luego de recolectar los datos se filtran por categoría y se elabora un documento con formato “.txt” con los datos de una misma categoría. Mostraremos a continuación el análisis de datos para la categoría **posicionamiento de volquete Volvo en frentes de explotación** y obtendremos su distribución.

Luego de filtrar los datos de “posicionamiento” se tuvieron 414 datos para todos los frentes de explotación. Arena cuenta con una herramienta de análisis estadístico llamada **Input Analyzer** en el que se consideró el valor de p y el menor error al cuadrado.

Se mostrarán los pasos usados para obtener la primera distribución probabilística. El resto de distribuciones no se detallarán paso a paso su obtención pero se mostrarán sus resultados en el apartado del **Anexo A**.

3.3.1 Análisis de los tiempos de posicionamiento para volquete Volvo de 32 toneladas en frentes de explotación.

El tiempo de posicionamiento se denomina al tiempo en el que el equipo minero empieza a cuadrarse para colocarse en la ubicación idónea frente a la excavadora, con la finalidad de ser cargado de material y continuar con su ciclo.

Se observaron un total de 414 posicionamientos de este tipo de volquete en todos los frentes de explotación. Estos datos al ser ingresados en el Input Analyzer se generan un histograma al cual debemos ajustar la distribución probabilística con el menor error al cuadrado, Weibull. En la **Figura 3.7** se muestra el histograma del tipo Weibull dado por el programa.

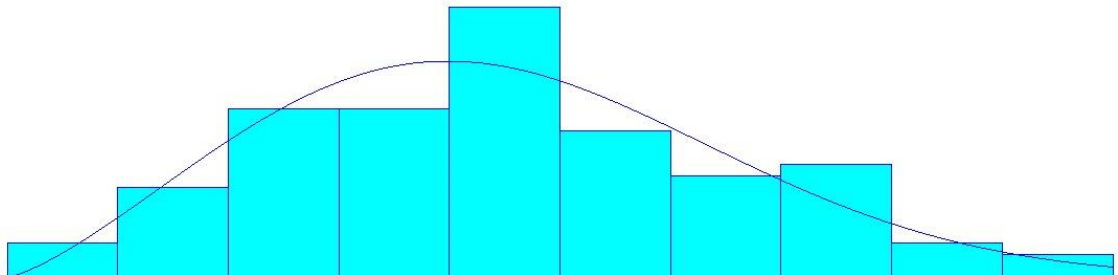


Figura 3.7: Histograma de tiempos de posicionamiento del volquete Volvo en frentes de explotación. [Medina & Vásquez, 2018]

Para tener la confiabilidad de que esta distribución es el mejor ajuste, se realizan las pruebas de bondad de ajuste. Debido a que la muestra es mayor a 90 datos, el análisis se realiza con las pruebas de Chi Cuadrado y Kolmogórov-Smirnov. Para ser aceptada, el valor de p debe ser mayor a 0.05 en ambas pruebas de bondad de ajuste. La **Figura 3.8** presenta el resumen del Histograma de tipo Weibull con sus respectivas pruebas de bondad de ajuste.

```

Distribution Summary
Distribution:      Weibull
Expression:      12 + WEIB(32.9, 2.33)
Square Error:    0.006299

Chi Square Test
Number of intervals = 7
Degrees of freedom  = 4
Test Statistic     = 4.14
Corresponding p-value = 0.403

Kolmogorov-Smirnov Test
Test Statistic     = 0.0418
Corresponding p-value > 0.15

Data Summary
Number of Data Points = 102
Min Data Value       = 12.7
Max Data Value       = 76.9
Sample Mean          = 41.3
Sample Std Dev       = 13.2

Histogram Summary
Histogram Range      = 12 to 77
Number of Intervals = 10

```

Fig. 3.8: Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de posicionamiento del volquete Volvo en los frentes de explotación. [Medina & Vásquez, 2018]

Los valores de p de las pruebas de bondad de ajuste están lejos de acercarse al mínimo requerido. Adicional a esto se tiene que comprobar que la distribución Weibull elegida es la que tenga el menor error al cuadrado.

En la **Figura 3.9** se muestra la información de errores al cuadrado para cada distribución probabilística.

Function	Sq Error
Weibull	0.0063
Beta	0.0073
Triangular	0.00736
Normal	0.00742
Erlang	0.0092
Gamma	0.00984
Lognormal	0.0191
Uniform	0.0405
Exponential	0.0695

Figura 3.9: Información de los errores al cuadrado para cada distribución probabilística mediante Input Analyzer [Medina & Vásquez, 2018]

3.4 Resultados de las distribuciones probabilísticas

A continuación, se muestra las distribuciones por cada dato filtrado por categoría con su respectivo tamaño mínimo de muestra.

3.4.1 Distribuciones en los frentes de explotación.

La primera actividad minera que se presenta en la zona de carga es el posicionamiento del camión. En la **Tabla 3.3** se observa el tamaño mínimo de muestras que deben ser recolectadas en relación con la maquinaria, mientras que la **Tabla 3.4** representa las respectivas distribuciones probabilísticas, con el número total de datos recolectados en campo. Además, la **Tabla 3.5** muestra las distribuciones probabilísticas de los tiempos de posicionamientos en relación con los diferentes frentes de trabajo.

Tabla 3.3. Tamaño de muestra mínimo del tiempo de posicionamiento en relación con la maquinaria [Medina & Vásquez, 2018]

	Posicionamiento en el frente de trabajo	
	VOLQUETE	DUMPER
Tamaño de muestra inicial	80	80
Media	33.18	37.15
Desviación	6.95	12.66
Varianza	48.32	160.34
Z = 1.96	3.84	3.84
Error	3.32	3.72
Tamaño de muestra	17	45

Tabla 3.4. Distribuciones probabilísticas del posicionamiento en los frentes de trabajo en relación con el tipo del camión [Medina & Vásquez, 2018]

	Posicionamiento General	
	VLV	DPR
Distribución	12 + WEIB(32.9, 2.33)	TRIA(13, 31.3, 67)
Square error	Square Error: 0.006299	Square Error: 0.002238
Chi	Chi Square Test(p-value):0.403	Kolmogorov-Smirnov > 0.15
Kolmogorov	Kolmogorov-Smirnov > 0.15	Chi Square Test(p-value):> 0.75
# datos	414	98

Tabla 3.5: Distribuciones probabilísticas del posicionamiento en los frentes de trabajo en relación con el tipo del camión [Medina & Vásquez, 2018]

Distribución de espera				
Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón
27 + WEIB(153, 1.38)	12 + ERLA(45, 2)	17 + GAMM(62.9, 1.16)	16 + WEIB(101, 1.2)	10 + WEIB(108, 0.796)
Square Error: 0.011070	Square Error: 0.029930	Square Error: 0.011218	Square Error: 0.014941	Square Error: 0.017492
Chi Square Test(p-value): < 0.005	Chi Square Test(p-value): 0.382	Chi Square Test(p-value): 0.238	Chi Square Test(p-value): > 0.75	
Kolmogorov-Smirnov : > 0.15	Kolmogorov-Smirnov : > 0.15	Kolmogorov-Smirnov : > 0.15	Kolmogorov-Smirnov : > 0.15	Kolmogorov-Smirnov : > 0.15
22	33	42	51	19

La **Tabla 3.6** muestra las probabilidades del tiempo de espera del camión una vez que llega a cada frente de trabajo.

Tabla 3.6: Probabilidades de espera del camión en los frentes de trabajo [Medina & Vásquez, 2018]

Probabilidad de espera				
Derrumbe	Lérida	Fraga	Explosa	Precón
%ESPERA: 0.6667	%ESPERA: 0.2972	%ESPERA: 0.3589	%ESPERA: 0.2088	%ESPERA: 0.2087
%NO ESPERA: 0.3333	%NO ESPERA: 0.7027	%NO ESPERA: 0.6410	%NO ESPERA: 0.7913	%NO ESPERA: 0.7912
33	111	117	130	91

Tabla 3.7. Tamaño de muestra mínimo del tiempo de carga de material [Medina & Vásquez, 2018]

	Carga de material	
	CAT	KTZ
Tamaño de muestra inicial	80	80
Media	23.41	23.15
Desviación	8.32	11.29
Varianza	69.28	127.66
Z = 1.96	3.84	3.84
Error	2.34	2.31
Tamaño de muestra	49	91

Tabla 3.8. Distribuciones probabilísticas del tiempo de carga del material en

	Carga	
	KTZ	CAT
Distribución	17 + 8 * BETA(0.935, 1.36)	17 + 8 * BETA(0.877, 1.31)
Square error	Square Error: 0.002371	Square Error: 0.008049
Chi	Chi Square Test(p-value):0.354	Chi Square Test(p-value):0.604
Kolmogorov	Kolmogorov-Smirnov : >0.15	Kolmogorov-Smirnov : 0.118
# datos	457	128

relación al tipo de maquinaria [Medina & Vásquez, 2018]

La **Tabla 3.9** muestra las distribuciones discretas del número de paladas con base en el tipo de equipo carga y de transporte.

Tabla 3.9. Distribución del número de paladas [Medina & Vásquez, 2018]

	Número de Paladas	
	VLV	DPR
Komatsu	DISC(0.11,7,0.34,8,0.7,9,0.9,10,0.97,11,1,12)	DISC(0.35,9,0.75,10,1,11)
CAT	DISC(0.08,7,0.28,8,0.42,9,0.6,10,0.74,11,0.91,12,1,13)	DISC(0.17,11,0.5,12,0.67,13,1,14)

3.4.2 Resultados de las distribuciones probabilísticas en las zonas de descargas.

La **Tabla 3.10** muestra el tamaño mínimo de muestra para el tiempo de posicionamiento una vez que llega a la trituradora primaria. Los datos fueron recolectados con base en el tipo de equipo de transporte, la **Tabla 3.11** muestra las respectivas distribuciones probabilísticas

Tabla 3.10. Tamaño de muestra mínimo del tiempo de posicionamiento en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

	Posicionamiento en la trituradora	
	VOLQUETE	DUMPER
Tamaño de muestra inicial	80	80
Media	31.92	31.98
Desviación	6.59	3.97

Varianza	43.46	15.74
Z = 1.96	3.84	3.84
Error	3.19	3.20
Tamaño de muestra	16	6

Tabla 3.11: Distribuciones probabilísticas del posicionamiento en la zona de descarga con relación al tipo del camión [Medina & Vásquez, 2018]

Posicionamiento General		
	VLV	DPR
Distribución	NORM(33.7, 5.57)	19 + 31 * BETA(7.07, 10.2)
Square error	Square Error: 0.006299	Square Error: 0.002238
Chi	Chi Square Test(p-value):0.403	Kolmogorov-Smirnov > 0.15
Kolmogorov	Kolmogorov-Smirnov > 0.15	Chi Square Test(p-value):> 0.75
# datos	414	98

Así como en la zona de carga también se obtuvo la probabilidad de espera del camión en la zona de descarga que se muestra en la **Tabla 3.12**.

Tabla 3.12: Probabilidad de espera del camión en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

Probabilidad de espera	
Trituradora Huayco	Trituradora Precon
% ESPERA: 0.4398	% ESPERA: 0.7851
% NO ESPERA: 0.5601	% NO ESPERA: 0.2148
391	121

La **Tabla 3.13** muestra las distribuciones del tiempo de espera del camión cuando llega a la planta de beneficio.

Tabla 3.13: Distribución probabilística del tiempo de espera en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

Distribución de tiempo de espera		
	Huayco	Precon
Distribución	10+390*BETA(0.768,5.4)	10+ Weib(38,0.652)
Square error	Square Error: 0.001036	Square Error: 0.005460
Chi	Chi Square Test(p-value):0.237	Chi Square Test(p-value):0.0899
Kolmogorov	Kolmogorov-Smirnov > 0.15	Kolmogorov-Smirnov > 0.15
# datos	391	121

La **Tabla 3.14** representa el tamaño mínimo de muestra del tiempo de descarga en relación con el tipo del equipo de transporte. La **Tabla 3.15** contiene las respectivas distribuciones probabilísticas para esa actividad minera

Tabla 3.14. Tamaño mínimo de muestra del tiempo de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

	Descarga del material	
	VOLQUETE	DUMPER
Tamaño de muestra inicial	80	80
Media	45,19	39,39
Desviación	26,01	17,53
Varianza	676,33	307,36
Z = 1.96	3,84	3,84
Error	4,52	3,93
Tamaño de muestra	127	76

Tabla 3.15: Distribución probabilística del tiempo de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

Descarga		
	VLV	DPR
Distribución	NORM(46.6, 7.41)	25 + LOGN(9.26, 7.41)
Square error	Square Error: 0.001761	Square Error: 0.019167
Chi	Chi Square Test(p-value):0.288	Chi Square Test(p-value):0.0694
Kolmogorov	Kolmogorov-Smirnov > 0.15	Kolmogorov-Smirnov > 0.15
# datos	414	98

3.4.3 Resultados de las distribuciones probabilísticas en las velocidades en la red vial Huayco.

Adicionalmente, se determinó el tamaño mínimo de muestra de las velocidades cuando el camión de marca Volvo viaja con carga y sin carga de material, los cuales se muestran en la **Tabla 3.16** mientras que la **Tabla 3.17** contiene las respectivas distribuciones probabilísticas.

Tabla 3.16: Tamaño mínimo de muestra para las velocidades de lleno y vacío del camión [Medina & Vásquez, 2018]

	Velocidades	
	VLV vacío	VLV lleno
Tamaño de muestra inicial	80	80
Media	7,29	7,30
Desviación	3,39	2.46
Varianza	11,52	6,07
Z = 1.96	3,84	3,84
Error	0,73	0,73
Tamaño de muestra	83	44

Tabla 3.17: Distribución probabilística de las velocidades lleno y de vacío [Medina & Vásquez, 2018]

	Posicionamiento General	
	VLV lleno	VLV vacío
Distribución	NORM(6.37, 1.95)	4 + 10 * BETA(1.5, 2.46)
Square error	0.008707	0.006194
Chi	Corresponding (p-value): 0.346	Corresponding (p-value): 0.619
Kolmogorov	Kolmogorov-Smirnov > 0.15	Kolmogorov-Smirnov > 0.15
# datos	385	318

3.5 Análisis de la red vial Huayco

Para el análisis de vías usamos los datos de la topografía proporcionada por la empresa, los cuales fueron ingresados en el programa AutoCAD Civil3D, se creó una superficie con las curvas de nivel y se tomaron el eje de las vías para hacer perfiles con el eje de la vía con respecto a la superficie.

Se tomaron los tramos con pendientes similares y se registraron para hacer el análisis de resistencia equivalente en cada uno de los tramos. La resistencia equivalente en un tramo de la vía se calcula como se indica en la **ecuación 3.2**.

$$RR + GR = ER \quad (3.2)$$

3.5.1 Resistencia a la rodadura (RR)

La resistencia a la rodadura es la fuerza opuesta a la dirección del movimiento del neumático y es uno de los factores más importantes de la productividad del equipo de acarreo.

El RR depende del estado en que se encuentra la superficie de las vías, para ello se asumió que la superficie en todo el trayecto de acarreo tiene las mismas características. Las vías por donde transportan el material poseen una superficie homogénea en la que el neumático se incrusta levemente en la superficie, está en continuo mantenimiento y siendo regado con agua durante todo el periodo de turno, por lo que esta observación de campo se asemeja a la Superficie C que se muestra en la siguiente **Tabla 3.18**.

Tabla 3.18: Tabla de porcentaje de la resistencia a la rodadura [(Caterpillar, 2011-2019)]

Tipo de superficie	Características	Neumático	Neumático (radial)	Pista	Pista & Neumático
A	Superficie dura y lisa. Hormigón, asfalto o suciedad. Sin penetración ni flexión.	1,5%	1,2%	0%	1,0%
B	Firme, liso, rodante Flexión ligeramente bajo carga Mantenido, regado	3,0%	2,50%	0%	1,8%
C	Suciedad. Mantenido, regado. Flexión bajo carga. 25 mm de penetración o flexión.	4,0%	4,0%	0%	2.4%
D	Suciedad. Pequeño mantenimiento, regado. Flexión bajo carga. 50 mm de penetración o flexión.	5.0%	5.0%	0%	3.0%

E	Suciedad revolcada, suave Sin estabilización ni mantenimiento. 100 mm de penetración o flexión.	8.0%	8.00%	0%	4.80%
F	Arena suelta o grava Al menos 150 mm de penetración o flexión.	10.0%	10.0%	2%	7%
G	Suciedad revolcada, suave Sin estabilización ni mantenimiento 200 mm de penetración o flexión.	14.0%	14.0%	5%	10%
H	Muy suave, fangoso, surcado. 300 mm de penetración o flexión.	20.0%	20.0%	8%	15.0%

La superficie de la red Huayco se asemeja a la superficie C por lo tanto nuestra resistencia al rodamiento será del 4%.

3.5.2 Resistencia a la pendiente (GR)

La resistencia a la pendiente se la obtuvo de la pendiente equivalente en un tramo de la vía.

3.5.3 Resistencia equivalente (ER)

Es la suma en porcentaje de la resistencia a la rodadura más la resistencia a la pendiente.

3.5.4 Factor de cambio de velocidad (k)

El factor de cambio de velocidad varía dependiendo del tipo de maquinaria que se usa.

A continuación, se presenta la metodología para determinar el factor k en los dos tipos de volquetes.

3.5.5 Dumper Caterpillar de 43 toneladas de capacidad

Dentro del catálogo del fabricante se encuentra el ábaco Gradeability/ Speed/Rimpull con el cual nos ayuda a determinar el rendimiento de la maquinaria en pendiente, usando la resistencia equivalente.

Para tener conocimiento de cómo se realizó este procedimiento, se tiene a continuación la **Figura 3.10** donde se determina las velocidades máximas cuando el vehículo va cargado (L) y vacío (E) cuando la pendiente es igual a 0 donde la resistencia equivalente es del 4%.

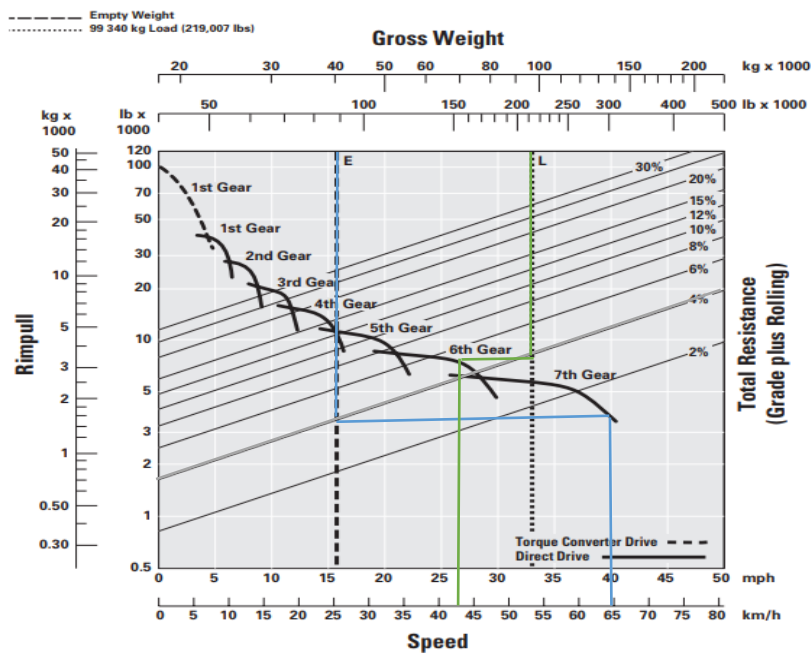


Figura 3.10: Velocidades máximas el vehículo va cargado (L) y vacío (E) (Caterpillar, 2011-2019)

De acuerdo con la gráfica para una pendiente igual a 0 el conductor podrá viajar a una velocidad máxima de 43 km/h en vacío y 65 km/h cuando viaja cargado.

Realizamos el mismo procedimiento para las demás pendientes mayores a 0 y obtenemos el factor K a partir de la **ecuación 3.3**.

$$k = \frac{V_{max \text{ con pendiente } > 0}}{V_{max \text{ con pendiente } = 0}} \quad (3.3)$$

Se calculó el factor k cuando el camión cuando viaja cargado como vacío.

3.5.6 Volquete Volvo de 32 toneladas de capacidad

Debido a que no existe ábaco por parte del fabricante para calcular este factor de reducción de velocidad k , se usa una metodología presentada en la tesis doctoral (Upadhyay, 2016).

“De acuerdo con Bonates (1996), la velocidad máxima que puede obtener cualquier camión puede ser determinada por las curvas de tracción generalmente proporcionadas por los fabricantes. Describe la fuerza de tracción como la fuerza ejercida en el suelo por las ruedas motrices para poner el camión en movimiento. Esta fuerza es generada por el torque que genera el motor y es una función de las relaciones de transmisión.” (Upadhyay, 2016)

La velocidad máxima alcanzable por camión en cualquier segmento del trayecto de acarreo se puede calcular como se indica en la **ecuación 3.4**.

$$V_{max} = \frac{366.97 * kw * Eficiencia}{TR * W} \quad (3.4)$$

La eficiencia del motor expresada en decimal que será de 0.9

Tenemos:

$$k = \frac{V_{max \text{ con pendiente } > 0}}{V_{max \text{ con pendiente } = 0}} \quad (3.3)$$

Reemplazando la ecuación la 4 en 3:

$$k = \frac{\frac{366.97 * Kw * Eficiencia}{TR * W}}{\frac{366.97 * Kw * Eficiencia}{TRo * W}}$$

Se obtiene el valor de k representado por la **ecuación 3.5**.

$$k = \frac{TR}{TR_0} \quad (3.5)$$

3.6 Resultados del análisis vial de la Red Huayco

Para poder interpretar los resultados del análisis, se muestra a continuación en la **Figura 3.11** un mapa de la mina con todos sus frentes, trituradoras y segmentos de las vías.



Figura 3.11: Representación de la red vial Huayco con sus intersecciones. [Google Earth, 2019]

Los resultados de análisis vial de la red Huayco se muestran a continuación en la **Tabla 3.19**.

Tabla 3.19: Network Links de la red vial Huayco con su factor de reducción de velocidad K [Medina & Vásquez, 2018]

	Inicio	Fin	VOLVO		CAT		K factor
			Factor K	Factor K load	Factor K empty		
NL 1	1	2					1,00
NL 2	25	26					1,00
NL 3	25	16	0,44			0,62	0,53
NL 4	17	25					1,00
NL 5	2	3	0,35	0,35			0,35
NL 6	3	4	0,27	0,275			0,27
NL 7	4	5					1,00
NL 8	5	6	0,27	0,275			0,27
NL 9	6	35					1,00

NL 10	35	2				1,00
NL 11	6	10	0,20		0,28	0,24
NL 12	10	6				1,00
NL 13	10	11	0,45		0,62	0,53
NL 14	11	10				1,00
NL 15	11	12	0,29		0,38	0,34
NL 16	12	11				1,00
NL 17	12	13				1,00
NL 18	13	12	0,30	0,25		0,28
NL 19	13	27	0,41		0,52	0,47
NL 20	27	13				1,00
NL 21	27	28	0,18		0,26	0,22
NL 22	28	27				1,00
NL 23	28	14	0,26		0,37	0,31
NL 24	14	28				1,00
NL 25	14	15				1,00
NL 26	15	14	0,24	0,225		0,23
NL 27	15	16	0,32		0,38	0,35
NL 28	16	15				1,00
NL 29	16	17	0,34		0,40	0,37
NL 30	17	16				1,00
NL 31	6	7	0,17		0,25	0,21
NL 32	7	6				1,00
NL 33	7	8	0,24		0,29	0,26
NL 34	8	7				1,00
NL 35	8	9	0,18		0,26	0,22
NL 36	12	32	0,29		0,40	0,34
NL 37	32	12				1,00
NL 38	32	33	0,17		0,28	0,23
NL 39	27	29	0,32		0,38	0,35
NL 40	29	27				1,00
NL 41	29	30				1,00
NL 42	30	29	0,19	0,175		0,18
NL 43	30	31				1,00
NL 44	28	34	0,26		0,38	0,32
NL 45	17	18	0,21		0,29	0,25
NL 46	18	17				1,00
NL 47	18	19				1,00
NL 48	19	18	0,37	0,375		0,37
NL 49	19	20	0,61		0,86	0,73
NL 50	20	19				1,00
NL 51	20	21	0,29		0,38	0,34
NL 52	21	20				1,00
NL 53	21	22	0,14		0,22	0,18
NL 54	22	21				1,00
NL 55	22	23	0,36		0,51	0,44

NL 56	23	22				1,00
NL 57	23	24				1,00
NL 58	35	36				1,00
NL 59	35	36				1,00

Las celdas vacías de la **Tabla 3.19** que no contienen factor K, significan que la pendiente en ese Network Link es de 0 grados, En este caso el factor de reducción de velocidad K será igual a 1, debido a que la velocidad no es reducida,

En otro caso existen celdas vacías en alguno de los factores K del Dumper Volvo, sea en lleno o vacío, Esto corresponde a que el Network Link no transporta al equipo de transporte en esa condición de lleno o vacío,

Un último caso, es cuando Network Link tiene una pendiente negativa, el factor K será igual a 1, Se asume que el conductor del equipo minero realizará buenas prácticas en su labor, mantendrá la velocidad máxima permitida en una pendiente negativa, La velocidad no será reducida,

Para más información sobre todos los cálculos realizados en la obtención del factor K en la red Huayco, avanzar al **Anexo B.21** donde se encontrará la tabla completa disponible para el volquete Volvo y del volquete Caterpillar, el Anexo **B.22**.

3.7 Identificación de las entidades, atributos, recursos y variables de estado.

3.7.1 Entidades

Las entidades que se ha tomado en consideración en nuestro modelo de simulación son los dos tipos de volquetes que transportan el material desde los frentes de trabajo hasta las trituradoras:

- Volquete Volvo de 32 toneladas de capacidad.
- Volquete Caterpillar de 43 toneladas de capacidad.

3.7.2 Recursos

Los recursos en el modelo se encuentran en los frentes de explotación y en las zonas de descarga del material. Los recursos en los frentes de explotación son:

- Excavadora Komatsu #1 de $2,8 m^3$ de capacidad de cazo.

- Excavadora Komatsu #2 de 2,8 m³ de capacidad de cazo.
- Excavadora Caterpillar de 2,6 m³ de capacidad de cazo.

Los recursos de las zonas de descarga del material son:

- Trituradora primaria Huayco de 650 t/h de capacidad.
- Trituradora primaria Precón de 350 t/h de capacidad.

3.7.3 Atributos

Las entidades tienen como atributo el tipo de volquete, para permitir diferenciar el tipo de volquete que se mueve a lo largo del sistema.

- Volquete Volvo de 32 toneladas de capacidad es de TIPO 1.
- Volquete Caterpillar de 43 toneladas de capacidad es de TIPO 2.

Los recursos en los frentes de explotación llevan un atributo para diferenciarlos.

- Excavadora Komatsu de 2,8 m³ de capacidad de cazo es de TIPO 1.
- Excavadora Caterpillar de 2,6 m³ de capacidad de cazo es de TIPO 2.

Los recursos en las zonas de descarga del material llevan un atributo para diferenciarlos,

- Trituradora primaria Huayco de 650 t/h de capacidad es de TIPO 1.
- Trituradora primaria Precón de 350 t/h de capacidad es de TIPO 2.

Los frentes de explotación tienen un atributo para diferenciarlos dentro del sistema.

- Frente #1 Derrumbe perteneciente a la concesión A Guay El Huayco es de TIPO 1.
- Frente #2 perteneciente a la concesión Lérída es de TIPO 2.
- Frente #3 perteneciente a la concesión Fraga es de TIPO 3.
- Frente #4 perteneciente a la concesión Explosa es de TIPO 4.
- Frente #4 perteneciente a la concesión Precón es de TIPO 5.

3.7.4 Filas

Filas en frentes de explotación:

- Fila de espera de carga en la excavadora Komatsu #1.
- Fila de espera de carga en la excavadora Komatsu #2.
- Fila de espera de carga en la excavadora Caterpillar #3.

Filas en zonas de descarga de material:

- Fila de espera de descarga en la trituradora primaria Huayco.
- Fila de espera de descarga en la trituradora primaria Precón.

Todas las filas se operarán de acuerdo con el orden de llegada FIFO.

3.7.5 Red Vial

La red vial por la que se transportan las entidades dentro del sistema se llama **Red vial Huayco**. La red vial conecta todos los frentes de explotación, zonas de descarga y el estacionamiento de los equipos de transporte. En la red se encuentra contenido todos los **network links** por donde circulan las entidades en los viajes de ida y regreso.

3.7.6 Procesos que realizan las entidades en el sistema

Procesos en frentes de explotación en orden:

- Posicionamiento.
- Espera de excavadora.
- Carga

Procesos en zonas de descarga en orden:

- Posicionamiento
- Espera de trituradora
- Descarga

Procesos en red vial:

- Viaje de ida.
- Viaje de regreso.

3.8 Consideraciones previas a la elaboración del modelo.

Se tomó en consideración los siguientes apartados previos a la elaboración del modelo:

- La mina trabaja en un solo turno de 11 horas desde las 07h00 hasta las 18h00. teniendo un cese de las actividades durante una hora para el almuerzo del personal de 12h00 a 13h00. Por lo tanto. Las horas efectivas de trabajo son de 10 horas en el día y este será el tiempo a simular,
- En la simulación se consideró que el equipo de transporte y excavadoras no tienen paradas debido a fallas, desperfectos o mantenimiento. Su disponibilidad es del 100%.

- De igual manera, se consideraron que las trituradoras en las zonas de descarga no paran debido a fallas, desperfectos o mantenimiento. Su disponibilidad es del 100%.
- Las muestras se recolectaron en período seco, estas no han sido influenciadas por el clima.
- Se consideró que la condición de las vías en toda la red vial posee el mismo estado, es homogénea y no cambia por tramos. La resistencia a la rodadura será constante en toda la red vial.
- La resistencia a la pendiente es la única que varía por tramos dentro de la red vial. Por lo tanto, la resistencia equivalente es variable en todos los tramos.
- El número de volquetes Volvo a generar en el modelo es de cinco, Mientras que el número de volquete Caterpillar es de dos. Se usan los siete equipos de transporte en un turno.
- En un turno se trabajan dos frentes constantes a lo largo del turno de los cinco disponibles.
 - Los frentes de explotación #1, #2, #3 y #4 descargan únicamente en la trituradora primaria Huayco.
 - El frente de explotación #5 descarga únicamente en la trituradora primaria Precón.
 - Se asume que los equipos de transporte serán llenados al 100% de su capacidad total, con la finalidad de mostrar resultados sintetizados.
 - En condiciones normales, las excavadoras Komatsu trabajarán una en cada frente de trabajo. La excavadora Caterpillar estará de reserva.

- En condiciones especiales, El frente de explotación #4 trabajarán con las dos excavadoras Komatsu, mientras que la excavadora Caterpillar trabajará en el segundo frente.

3.9 Construcción del modelo.

El modelo se desarrolló en el software de simulación Arena. A continuación, se muestra la lógica del modelo en la **Figura 3.12**. En ella, los bloques azules representan la actividad de transporte de las entidades. Los bloques rojos, representan las estaciones de trabajo en la mina en las que las entidades arriban. Los bloques amarillos representan todas las actividades que se desarrollan dentro de cada estación de trabajo.

En adición a estos bloques, tenemos representado el **Inicio** y **Fin** de la simulación condicionado por un módulo **While** que seguirá corriendo la simulación hasta que no cumpla la condición establecida. La condición es $Tiempo_{simulación} < 10 \text{ horas}$. Cuando esta condición ya no se cumple, la simulación se detiene automáticamente.

El módulo **decisión** representado por un rombo, identifica los atributos de las entidades y las asigna al transporte que le corresponde según sus atributos para ser transportado a su respectivo frente de trabajo.

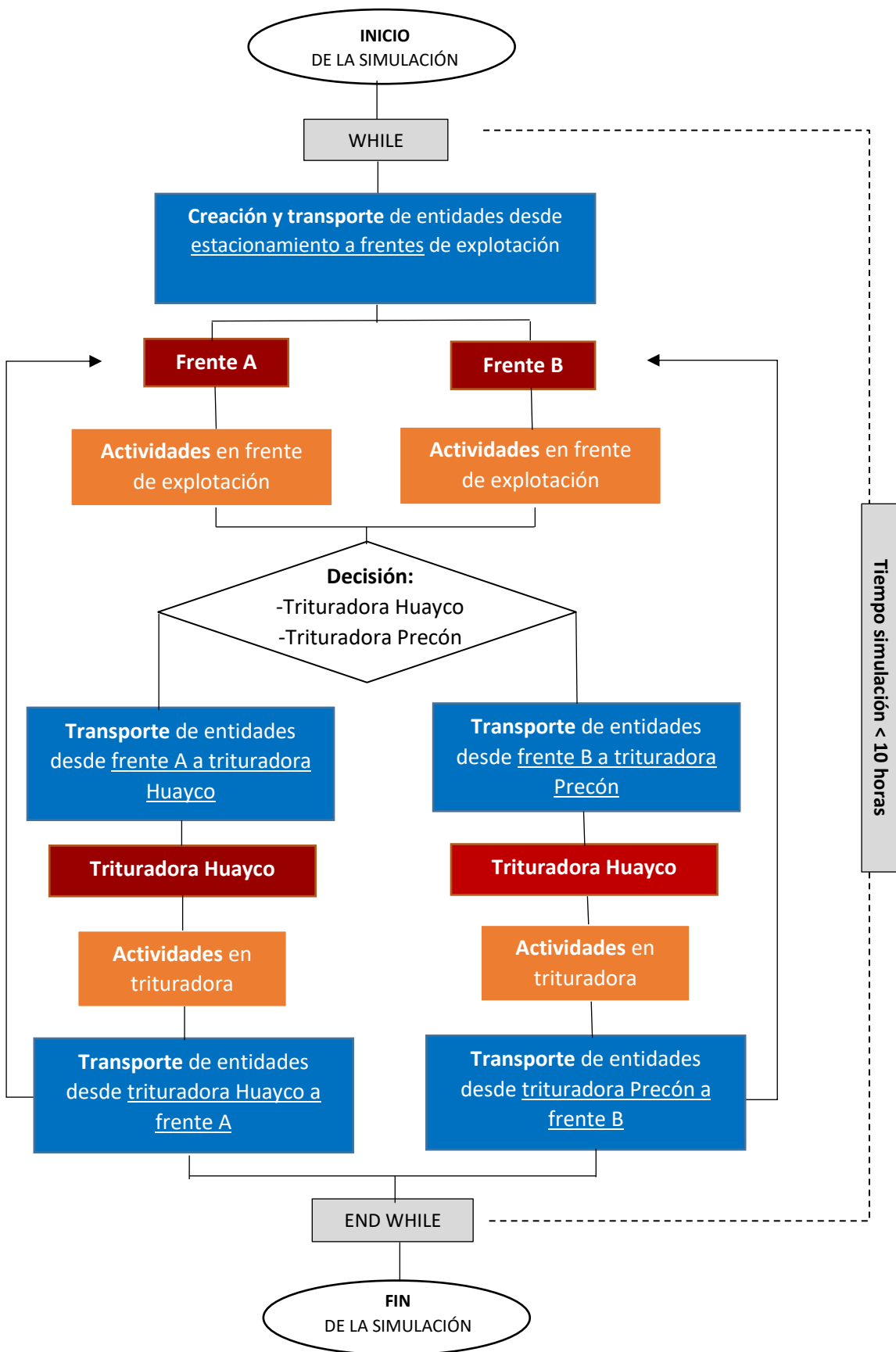


Figura 3.12. Representación lógica del modelo creado, [Medina & Vásquez, 2018]

3.9.1 Creación de entidades y simulación de llegada de los volquetes al frente de trabajo

El modelo inicia con la creación de los dos tipos de entidad. Estas entidades se crean para cada frente de trabajo. Las entidades atraviesan el módulo Asignar donde adquieren todos sus atributos correspondientes para que el software las reconozca: tipo de equipo de transporte, estación de procedencia, estación a la que se dirigen y trituradora a descargar.

Seguidamente, las entidades ingresan al módulo Allocate donde son asignadas a una estación, no de trabajo sino inicial, que en este caso es únicamente el estacionamiento de vehículos. Posteriormente, las entidades ingresan al módulo Transporte el cual las enviará por medio de la Red Huayco a sus respectivos frentes de explotación leyendo previamente sus atributos. Esta actividad de transporte tomará una velocidad de la distribución estadística de velocidades previamente definidas para el tipo de volquete, y la aumentará o reducirá de acuerdo con el Factor de Reducción de Velocidad de cada Network Link de la Red Huayco.

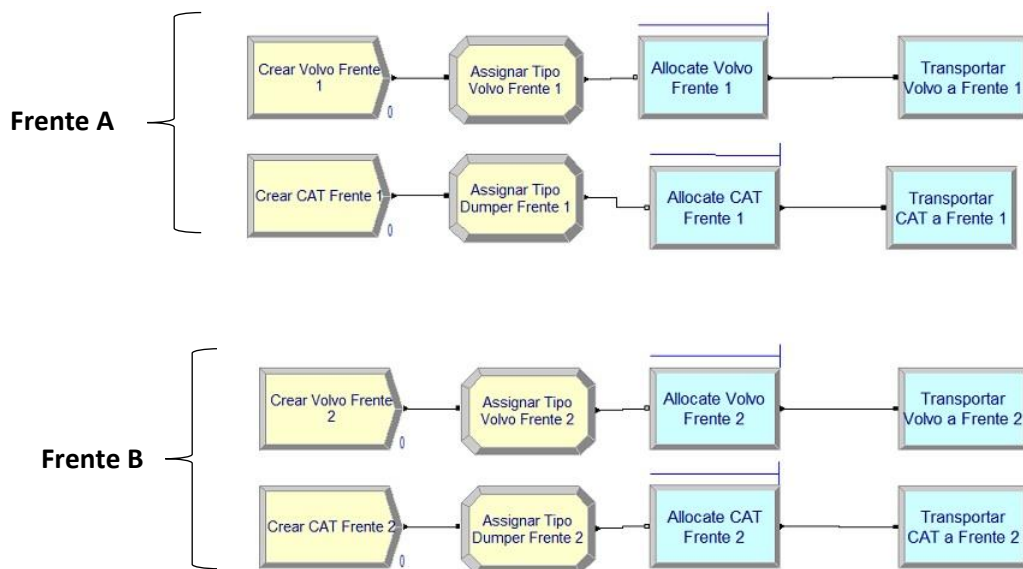


Figura 3.13: Secuencia de bloques para la simulación de creación y llegada de los volquetes a sus respectivos frentes de explotación [Medina & Vásquez, 2018]

3.9.2 Simulación de actividades en frentes de explotación y transporte a zonas de descarga

Con la llegada de las entidades con sus atributos ya definidos a los frentes de explotación, se inician las actividades. Las entidades ejecutan las actividades capturando el recurso disponible en el frente de explotación (es decir, la excavadora definida para aquel frente) y no la libera hasta que acabe todas sus actividades, ocasionando una fila detrás de él. Únicamente una entidad puede acceder a capturar el único recurso y realizar todas las actividades.

La línea sobre el primer módulo amarillo, la actividad de Posicionamiento, nos indica que en ese bloque se formará la fila de espera. El bloque toma un tiempo de la distribución definida y la ejecuta. Luego, en el siguiente bloque determina la probabilidad de que exista una espera o demora en el frente y si existe, vuelve a tomar un tiempo de la distribución de Espera en frente definida; en caso de que no exista espera en frente, pasa siguiente módulo.

La entidad es asignada un número de paladas de una distribución definida de acuerdo con el tipo de volquete y excavadora. Este ingresa a un módulo While del cual repetirá el proceso Carga tantas veces hasta que su número de paladas actuales sea igual al número de paladas asignadas previamente. Cada palada de la actividad Carga es diferente y tomada de una distribución ya definida.

Una vez la entidad deje el módulo de repetición While, libera la pala, y así el próximo volquete en fila accede al recurso. Luego de liberar la pala la entidad pasa por un contador de viajes. Finalmente llega a un módulo decisión en el cual es identificado por sus atributos y determina a cuál trituradora debe dirigirlo. Esta toma una velocidad de la distribución de velocidades definidas, es colocada en la red vial y transportada por todos los Network Links de su ruta, cambiando su velocidad según el tramo hasta llegar a su destino. En la **Figura 3.14** se muestra el diagrama de bloques que representan las actividades mineras en el frente de explotación.

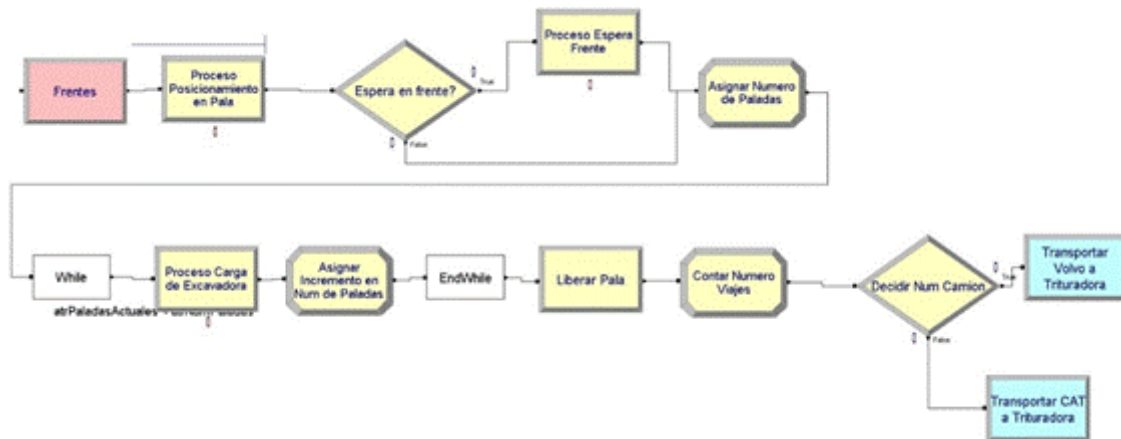


Figura 3.14: Secuencia de bloques para la simulación actividades en frentes de explotación y transporte a zonas de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

3.9.3 Simulación de actividades en zonas de descarga y transporte a frentes de explotación

Las entidades llegan a la zona de descarga correspondiente, captura el recurso presente en la zona (Trituradora Huayco o Trituradora Precón), ejecuta todas las actividades. Cuando las concluya todas, libera el recurso. Mientras la entidad tenga el recurso capturado, se forma una fila de espera detrás de él.

Una vez capturado el recurso la entidad ejecuta la actividad de Posicionamiento demorando un tiempo tomado elegido de la distribución definida. Luego la entidad pasa por una decisión de espera de trituradora de acuerdo con una probabilidad definida; si existe espera pasa a la actividad de espera de trituradora con un tiempo tomado de una distribución definida; en caso de que no exista, se mueve a la siguiente actividad.

En la actividad de descarga la entidad ejecuta una actividad con un tiempo tomado de una distribución definida. Posteriormente la entidad atraviesa un contador de producción para finalmente llegar a la decisión donde es colocado en el transporte a frente adecuado según sus atributos de tipo de volquete y frente de explotación. La entidad es colocada en la red vial correspondiente, toma una velocidad de una distribución de velocidades definidas y recorre todos los network links reduciendo la velocidad según el tramo hasta llegar a su destino; y así el ciclo vuelve a comenzar. En la **Figura 3.15** se muestra el diagrama de bloques que representan las actividades mineras de la zona de descarga

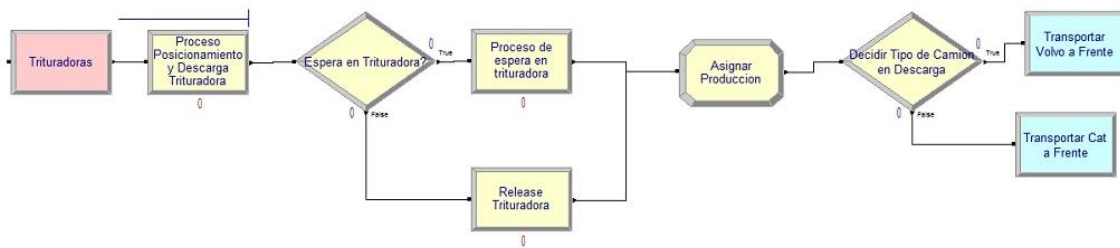


Figura 3.15: Secuencia de bloques para la simulación actividades zonas de descarga y transporte a frentes de explotación [Medina & Vásquez, 2018]

3.9.4 Construcción de la red vial

La red vial llamada Red Huayco se construyó usando la **Tabla 3.19** expuesta en el apartado de **Resultados del análisis vial de la Red Huayco**. Se añadieron gráficamente en Arena todas las intersecciones. Se conectaron las intersecciones con los network links definidos, se añadió la longitud de zona, el número de zonas y el factor de reducción de velocidad k en cada network link.

Los rectángulos rojos representan las estaciones, los rombos de color amarillo verdoso representan las intersecciones y finalmente las líneas son los network links. En la **Figura 3.16** se observa un esquema de la red vial en el software Arena.

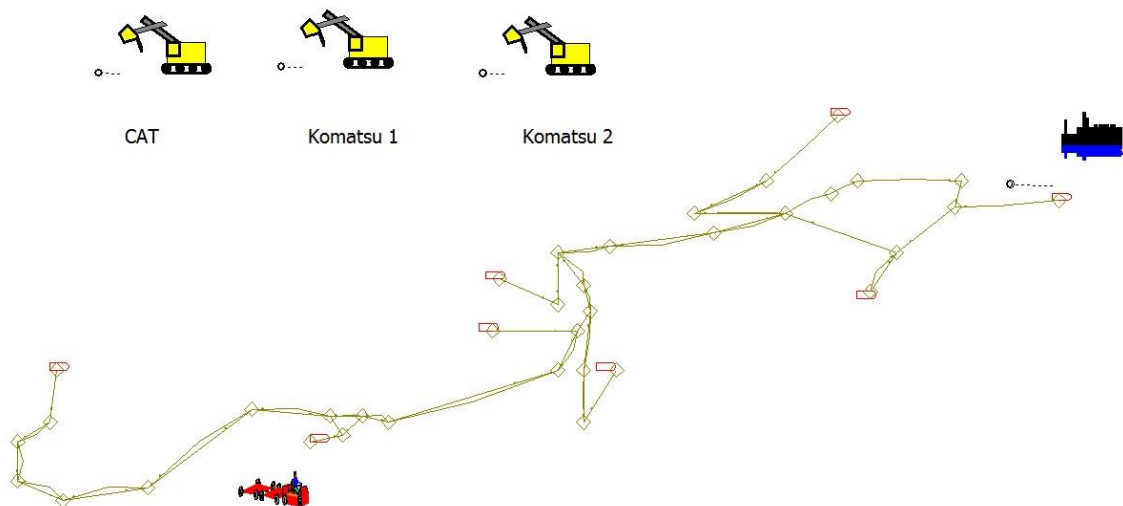


Figura 3.16: Modelo de la Red Huayco en Arena. [Medina & Vásquez, 2018]

Se definieron en Arena las estaciones de los frentes de explotación, zonas de descarga y estacionamiento de vehículos; relacionándolos con el número de la intersección que le corresponde. Se muestra a continuación en la **Tabla 3.20**.

Tabla 3.20. Relación de estaciones con el número de la intersección en la Red Huayco [Medina & Vásquez, 2018]

Estación	# de intersección
Estacionamiento de vehículos	Intersección 36
Frente #1 Derrumbe	Intersección 9
Frente #2 Lérida	Intersección 31
Frente #3 Fraga	Intersección 33
Frente #4 Explosa	Intersección 34
Frente #5 Precón	Intersección 24
Trituradora Huayco	Intersección 1
Trituradora Precón	Intersección 26

3.9.5 Fin de la simulación

La simulación se detendrá cuando el tiempo transcurrido en la simulación sea igual a 10 horas. Mostrando posteriormente los resultados del escenario evaluado.

3.10 Escenarios para evaluar en el modelo

Para determinar los escenarios a evaluar se tomaron en cuenta todas las combinaciones posibles en las condiciones normales y especiales de los frentes de explotación, número de equipo de transporte en cada frente y tipo de excavadora en cada frente. A continuación, se muestra en la **Tabla 3.21** los parámetros a combinar y las condiciones.

Tabla 3.21: Parámetros a combinar para crear escenarios [Medina & Vásquez, 2018]

Frentes	Transporte		Excavadora	
	Volvo	Dumper	Komatsu	Cat
F1	V1	D1	K1	C1
F2	V2	D2	K2	
F3	V3			
F4	V4			
F5	V5			

Condiciones normales:

- Se deben elegir dos frentes de explotación.
- Debe haber mínimo dos equipos de transporte en un frente.
- Se debe utilizar las cinco volquetas Volvo y los dos volquetes Caterpillar en la simulación.
- Las excavadoras Komatsu trabajarán una en cada frente. La excavadora Caterpillar se reserva.

Condiciones especiales:

- Se debe combinar el frente F4 Explosa con otro frente, eligiendo siempre dos frentes para la simulación.
- Debe haber mínimo cuatro equipos de transporte en el F4.
- Se debe utilizar las cinco volquetas Volvo y los dos volquetes Caterpillar en la simulación.
- Las dos excavadoras Komatsu trabajarán en el frente F4 Explosa, mientras que la excavadora Caterpillar trabajará en el segundo frente.

3.10.1 Combinación de frentes

Condición normal: se combinaron los frentes de explotación usando las condiciones normales. Arrojando como resultado 10 combinaciones posibles mostradas en la **Tabla 3.22.**

Tabla 3.22. Combinación de frente en condición normal [Medina & Vásquez, 2018]

Combinaciones	Frentes	
C1	F1	F2
C2	F1	F3
C3	F1	F4
C4	F1	F5
C5	F2	F3
C6	F2	F4
C7	F2	F5
C8	F3	F4
C9	F3	F5
C10	F4	F5

Condición especial: se combinaron los frentes de explotación usando las condiciones especiales. Arrojo como resultado 4 combinaciones posibles mostradas en la **Tabla 3.23**.

Tabla 3.23. Combinación de frente en condición especial [Medina & Vásquez, 2018]

Combinaciones	Frentes	
	C11	F4
C12	F4	F2
C13	F4	F3
C14	F4	F5

3.10.2 Combinación de equipos de transporte

Condición normal: Se permutaron los equipos de transporte usando la condición normal. Como resultado se obtuvieron 12 permutaciones posibles. Mostradas en la **Tabla 3.24**.

Tabla 3.24. Agrupaciones de los equipos de acarreo para los frentes de trabajo en condición normal [Medina & Vásquez, 2018]

Permutaciones	Frente A		Frente B		TOTAL
	Volvo	Caterpillar	Volvo	Caterpillar	
P1	2	0	3	2	7
P2	3	0	2	2	7
P3	4	0	1	2	7
P4	5	0	0	2	7
P5	1	1	4	1	7
P6	2	1	3	1	7
P7	3	1	2	1	7
P8	4	1	1	1	7
P9	0	2	5	0	7
P10	1	2	4	0	7
P11	2	2	3	0	7
P12	3	2	2	0	7

Condición normal: Se permutaron los equipos de transporte usando la condición especial. Como resultado se obtuvieron 5 permutaciones posibles. Mostradas en la **Tabla 3.25**.

Tabla 3.25: Agrupaciones de los equipos de acarreo para los frentes de trabajo en condición especial. [Medina & Vásquez, 2018]

Permutaciones	Frente A		Frente B		TOTAL
	Volvo	Caterpillar	Volvo	Caterpillar	
Pe1	4	0	1	2	7
Pe2	4	1	1	1	7
Pe3	3	1	2	1	7
Pe4	3	2	2	0	7
Pe5	2	2	3	0	7

3.10.3 Combinación de excavadoras

Se obtienen dos combinaciones de excavadoras. La primera para la condición normal y la segunda para la especial. Se muestra en la **Tabla 3.26** a continuación.

Tabla 3.26. Combinación de excavadoras según la condición [Medina & Vásquez, 2018]

Condiciones	Frente A	Frente B
Normal	K1	K2
Especial	K1 y K2	C1

3.10.4 Número total de escenarios a evaluar

Teniendo como resultado final tenemos que debemos evaluar 140 escenarios en el modelo de simulación, 120 de condiciones normales y 20 de condiciones especiales, se muestra en la **Tabla 3.27**.

Tabla 3.27: Número de escenarios a evaluar en el modelo de simulación [Medina & Vásquez, 2018]

Condiciones	Frentes de explotación	Equipos de transporte	Excavadoras
Condición normal:	Combinación de dos frentes sin repetición.	Mínimo dos equipos de transporte en un frente. Usar los siete equipos	Frente A: Komatsu 1 Frente B: Komatsu 2
Condición especial:	Combinación de Frente 4 con otro.	Frente 4: Mínimo cuatro equipos de transporte. Usar los siete equipos de transporte.	Frente 4: Komatsu 1 y Komatsu. Frente B: Excavadora CAT 1
# combinaciones	10	12	1
Combinaciones parciales	120		
Combinación especial	4	5	1
Total Comb. especial	20		
TOTAL escenarios	140		

3.11 Análisis matemático del parque automotor

La fase de carga y transporte de material en Calizas Huayco se lo realiza desde dos frentes de trabajo diferentes, cada frente de trabajo tiene diferentes distancias de separación hasta la planta de tratamiento. Mediante un cálculo matemático se determinará el número de camiones necesarios del parque automotor de manera general, con el objetivo de realizar una comparación con los resultados obtenidos en la simulación.

Se ha tomado las siguientes consideraciones:

- Datos constantes de todas las actividades mineras.

- Se trabaja en un solo frente de trabajo por turno.
- La mayor distancia entre el frente de trabajo por turno
- La producción promedio diaria es de 2506 t/día (un frente).
- 8 horas de efectivas de trabajo.

La **Tabla 3.28** presenta los datos de las características del material, de los equipos de carga y transporte y de la producción los cuales fueron proporcionados por la empresa.

Tabla 3.28: Datos de transporte y material [Medina & Vásquez, 2018]

<i>MATERIAL</i>	<i>AGREGADOS</i>	<i>PIEDRA CALIZA</i>	
Densidad Del Material	2,55	t/m ³	
Porcentaje De Esponjamiento	30	%	
Capacidad Del Camión Al Ras	32	t	
Capacidad Del Cazo De La Excavadora	2,8	m ³	
Productividad Diaria	2506	t	
Número De Días Trabajo	1	día	
Turnos Por Día	1		
Horas De Trabajo	10		7 am a 5 pm

3.11.1 Cálculo de coeficientes

3.11.1.1 Estimación del coeficiente de reserva de la excavadora (Kr)

El coeficiente Kr representa el tiempo de imprevistos que puede ocurrir en el tiempo de la excavadora, debido al aumento del ángulo de giro o a la poca experiencia del trabajador en adaptarse a la maquinaria.

El tiempo promedio de carga es de 15,22 segundos con un margen de error de $\pm 6,73$ segundos.

Por lo tanto el coeficiente de reserva Kr es:

$$\begin{array}{r}
 15,22 \text{ segundos} \quad 100\% \\
 21,95 \text{ segundos} \quad Kr \\
 Kr = \frac{21,95 * 100\%}{15,22} \\
 Kr = 144\%
 \end{array}$$

3.11.1.2 Coeficiente de reserva que depende de las fluctuaciones de la velocidad y otros imprevistos (Kf)

El tiempo que se toma el camión en recorrer la trayectoria de la ruta desde el frente de explotación hasta la planta de beneficio y viceversa cambia debido a la variación de velocidad producida por la diferencia de pendientes en cada tramo de las vía.

Por tal motivo, es necesario castigar los datos del tiempo de llegada del (**tpvl**) y regreso (**tpvr**) del camión mediante el coeficiente Kf con base en la desviación estándar. Los datos tomados en campo muestran que el $tpvl = 326,40 \pm 35,46$ s y $tpvr = 214,48 \pm 32,17$ s.

Por lo tanto el coeficiente Kf es:

$$\begin{array}{r} 236,40 \text{ segundos} \\ 271,86 \text{ segundos} \end{array} \quad \begin{array}{r} 100\% \\ Kf \end{array}$$

$$k_u = \frac{271,86}{236,40}$$

$$Kf = 1,15$$

Realizando el mismo procedimiento para el tiempo de regreso, **Kf**= 1,15

3.11.1.3 Coeficiente de utilización del equipo de transporte (Ku)

El tiempo por turno que la cantera opera es de 10 horas, sin embargo, el camión no es usado en todo ese período por lo que es necesario castigar los datos con el coeficiente ku. La **Tabla 3.29** representa las actividades absorbidas por el coeficiente ku.

Tabla 3.29: Actividades absorbidas en el coeficiente ku [Medina & Vásquez, 2018]

15 min	Revisión del camión
60 min	Almuerzo
30 min	Limpieza del camión
10 min	Imprevistos
115 min	Total

Por lo tanto:

$$\begin{array}{r} 600 \text{ minutos} \\ 485 \text{ minutos} \end{array} \quad \begin{array}{r} 100\% \\ Ku \end{array}$$

$$k_u = \frac{485 * 100\%}{600}$$

$$Ku = 81\%$$

3.11.1.4 Coeficiente de tiempos improductivos no tecnológicos (Kn)

La revisión técnica de los equipos es efectuada los días sábados, los cuales no pertenecen a días laborales.

La **Tabla 3.30** representa los tiempos improductivos considerados:

Tabla 3.30: Actividades absorbidas en el coeficiente Kn [Medina & Vásquez, 2018]

Combustible	15 min
Reserva (Otros usos)	15 min
Total	30 min

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 &485 \text{ minutos} && 100\% \\
 &455 \text{ minutos} && Kn \\
 &kn = \frac{455 * 100\%}{485} \\
 &kn = 93\%
 \end{aligned}$$

3.11.1.5 Coeficiente de reserva que toma en cuenta los imprevistos que puede presentar el equipo de excavación (Krn)

La operación realizada por la excavadora puede ser detenida debido a cualquier inconveniente que se presente. Por tal motivo es necesario obtener un coeficiente que tome en consideración estos imprevistos. La **Tabla 3.31** contiene las actividades absorbidas por el coeficiente Krn.

Tabla 3.31: Actividades absorbidas en el coeficiente Krn [Medina & Vásquez, 2018]

Limpieza de acceso	15 min
Falta de material	15 min
Total	30 min

Por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 &455 \text{ min} && 100\% \\
 &425 \text{ min} && Krn \\
 &kn = \frac{425 * 100\%}{455} \\
 &kn = 93\%
 \end{aligned}$$

3.11.1.6 Coeficiente Kup

La empresa estima que los equipos se encuentran averiados en un periodo de 367 horas, por lo que es necesario determinar el coeficiente kup, que representa disponibilidad técnica del parque de máquinas.

De los 365 días del año, la empresa trabaja 259 días por 10 horas al día, es decir 2590 horas de trabajo al año, de los cuales, 367 horas la maquinaria tendrá disponibilidad técnica

$$\begin{array}{r} 2590 \text{ horas} \\ 2952 \text{ horas} \end{array} \quad \begin{array}{r} 100\% \\ Kup \end{array}$$

Entonces:

$$kup = \frac{2740 * 100\%}{2590}$$

$$Kup = 114\%$$

3.11.2 Tiempo de ciclo la excavadora

La **Tabla 3.32** muestra los tiempos de las actividades realizadas por la excavadora en campo para determinar el tiempo de ciclo de la excavadora.

Tabla 3.32: Tiempos de actividades realizadas por la excavadora [Medina & Vásquez, 2018]

Tiempo de llenado del cazo (Tlle)	4,61 s
Tiempo de viaje con el cazo llenado (Tvlle)	5,80 s
Tiempo de descarga (Tde)	3,24 s
Tiempo de viaje al vacío (Tvve)	1,57 s

La **Ecuación 3.6** representa el tiempo de ciclo de la excavadora

$$Tce = (Tlle + Tvlle + Tde + Tvve) * Kr \quad (3.6)$$

$$Tce = 15,22 * 1,44$$

$$Tce = 21,95 \text{ segundos}$$

3.11.3 Número de cazos

El número de cazos con que la excavadora puede llenar el volquete de 32 t se lo obtiene de la división entre la capacidad al ras del balde del volquete y la capacidad llenado que puede cargar el cazo con relación con la densidad del material.

$$2,55 \text{ t/m}^3 * 0,30 = 1,79 \text{ t/m}^3$$

$$2,8 \text{ m}^3 * 1,79 \text{ t/m}^3 = 5 \text{ toneladas}$$

$$\frac{32}{5} = 6,40 \text{ cucharones}$$

Se debe tener en consideración que no siempre se usa la capacidad total del cazo, por lo que es necesario determinar el coeficiente de llenado de la cuchara (*Klle*). A continuación se muestra cómo obtenerlo.

Dado que

$$6 \text{ cucharones} * 5 = 30 \text{ toneladas}$$

$$7 \text{ cucharones} * 5 = 35 \text{ toneladas}$$

Optaremos que nuestro transporte de carguío tenga 6 cucharones hacia el transporte de carga.

$$6,40 \quad 100\%$$

$$6 \quad Klle$$

$$Klle = \frac{6 * 100\%}{6,4}$$

$$Klle = 94 \%$$

3.11.4 Tiempo de carga

La **ecuación 3.7** muestra tiempo de carga total de la excavadora dada las seis paladas que el volquete necesita para ser llenado

$$Tc = \frac{Ec}{Ex Klle} * tce \quad (3.7)$$

$$Tc = \frac{32 \text{ m}^3}{2,8 \text{ m}^3 (0,94)} * 21,95$$

$$Tc = 12,83 * 31,45$$

$$Tc = 266,87 \text{ segundos}$$

3.11.5 Tiempo de viaje de carga (Tvc)

La **ecuación 3.8** muestra el tiempo de viaje cuando el volquete lleva el material hasta la planta de beneficio, castigado por el coeficiente de fluctuación de velocidad.

$$T_{vc} = \left(\frac{D}{V_{ll}} + Md \right) Kf \quad (3.8)$$

$$md = 30,91s$$

$$T_{vc} = \left(\frac{D}{V_{ll}} + Md \right) Kf$$

$$T_{vc} = (267,82)1,15$$

$$T_{vc} = 307,41 s$$

3.11.6 Tiempo de viaje de descarga (Td)

$$T_d = 34,46 \text{ segundos}$$

3.11.7 Tiempo de viaje de vacío (Tvv)

La **ecuación 3.9** muestra el tiempo de viaje cuando el volquete regresa al frente de explotación sin el material, castigado por el coeficiente de fluctuación de velocidad.

$$T_{vv} = \left(\frac{D}{V_v} + Mc \right) Kf \quad (3.9)$$

$$mc = 41,30s$$

$$T_{vv} = (255,78)1,15$$

$$T_{vv} = 294,15 s$$

3.11.8 Tiempo de ciclo del camión (Tcc)

La **ecuación 3.10** muestra el tiempo de ciclo del camión.

$$T_{cc} = T_c + T_{vc} + T_d + T_{vv} \quad (3.10)$$

$$T_{cc} = 266,86 + 307,41 + 34,46 + 294,15$$

$$T_{cc} = 903,66 \text{ segundos}$$

3.11.9. Cálculo de productividad del camión

3.11.9.1. Productividad Teórica (Qt)

$$Q_t = \frac{3600 * E_c}{T_{cc}} \quad (3.11)$$

$$Q_t = \frac{3600 * 32}{903,66}$$

$$Q_t = 127,48 \text{ t/h}$$

3.11.9.2. Productividad técnica del camión (Qtéc)

$$Q_{tec} = Q_t * K_u * K_{llc} * T_t \quad (3.12)$$

$$Q_{tec} = 127,48 * 0,81 * 0,99 * 8$$

$$Q_{tec} = 807,60 \text{ ton/turno}$$

3.11.9.3. Productividad por explotación (Qe)

$$Q_e = Q_{tec} * k_n \quad (3.13)$$

$$Q_e = 807,60 * 0,93$$

$$Q_e = 767,22 \text{ ton/turno}$$

3.11.9.4. Número de camiones servidos por la excavadora (Nce)

$$N_{ce} = \frac{T_{cc}}{n_p * T_{ce}} * K_{rn} \quad (3.14)$$

$$N_{ce} = \frac{903,66}{6 * 21,22} * 0,93$$

$$N_{ce} = 6,38 \text{ camiones}$$

3.11.9.5. Determinación del parque transporte (Nc).

$$Nc = \frac{Ad}{Qe * Nd * Nt} \quad (3.15)$$

$$Nc = \frac{2506}{767,22 * 1 * 1}$$

$$Nc = 3,27 \text{ camiones por turno}$$

3.11.9.6. Determinación del número de camiones que integran el parque de equipos de transporte. (Ncpc)

$$Ncpc = Nc * kup \quad (3.16)$$

$$Ncpc = 3,27 * 1,14$$

$$Ncpc = 4 \text{ camiones}$$

3.12 Resultados

3.12.1 Resultados del modelo de simulación

Se obtuvieron 12 permutaciones posibles en número de equipos de transporte para cada frente de explotación. Estos se evaluaron en cada una de las 10 combinaciones de frentes de explotación. Dando como resultado los 120 escenarios en condiciones normales para ser evaluados.

Adicionalmente se evaluaron 20 escenarios especiales. Estos escenarios fueron planteados de acuerdo con la observación de la operación minera durante los últimos días mientras registrábamos datos en campo. Se observaron que en el frente #4 Explosa, se operó con las dos excavadoras Komatsu mientras la excavadora Caterpillar operó en el frente #1 Derrumbe. Teniendo un total de 140 escenarios posibles los cuales se encuentra en el **Anexo B.23**, resaltando los escenarios óptimos.

Los escenarios óptimos se sintetizan en la siguiente **Tabla 3.33**. Se muestran todos los escenarios óptimos para todas las configuraciones de frentes en todas las condiciones, las condiciones especiales se encuentran de color verde al final de la tabla de resultados. Estos escenarios se

eligieron principalmente por el KPI de Producción Total. Para más de una configuración existen dos escenarios óptimos con resultados muy cercanos, lo que nos permite tener más de un escenario óptimo.

La primera columna corresponde al número de escenario evaluado en la simulación. La segunda nos muestra el número de la combinación de dos frentes. En la tercera se muestra cuáles son los frentes que se están evaluando; siendo el F1 el frente #1 Derrumbe, F2 el frente #2 Lérica, F3 el frente #3 Fraga, F4 el frente #4 Explosa y F5 el frente #5 Precón,

La cuarta y quinta columna nos indica el número de volquetes mineros de tipo Volvo de 32 toneladas de capacidad y el volquete Caterpillar de 43 toneladas de capacidad ha sido evaluado en el escenario. De la sexta columna en adelante se muestran los indicadores, El indicador principal a usar será la producción total del día.

A continuación, se definen los indicadores mostrados en la **Tabla 3.33**.

- %U KTZ1: Porcentaje de utilización de la excavadora Komatsu #1 de capacidad de 2,8 metros cúbicos de capacidad de cazo.
- %U KTZ2: Porcentaje de utilización de la excavadora Komatsu #2 de capacidad de de 2,8 metros cúbicos de capacidad de cazo.
- %U CAT1: Porcentaje de utilización de la excavadora Caterpillar de capacidad de 2,6 metros cúbicos de capacidad de cazo.
- %U TritHuayco: Porcentaje de utilización de la trituradora Huayco de 650 toneladas por hora de capacidad.
- %U TritPrecon: Porcentaje de utilización de la trituradora Precón de 350 toneladas por hora de capacidad.
- #viajes Huayco: Número de descargas en trituradora Huayco.
- #viajes Precón: Número de descargas en trituradora Precón.
- Producción total: Tonelaje total de mineral descargado en trituradora Huayco y trituradora Precón.

Tabla 3.33. Resultados de escenarios óptimos para todas las combinaciones de frentes y condiciones [Medina & Vásquez, 2018]

			#VL	#DP	%U	%U	%U	%U	%U	#viaje	#viaje	Producci ón total (t)
			V	R	KTZ1	KTZ2	CAT 1	TritHuay co	TritPrec on	s Huayc o	s Precó n	
Esc, #6	C1	F1	2	1	0,527	0,763	0	0,4623	0	185	0	6514
		F2	3	1								
Esc, #10	C1	F1	1	2	0,548	0,641	0	0,4438	0	191	0	6706
		F2	4	0								
Esc, #15	C2	F1	4	0	0,527	0,469	0	0,3517	0	157	0	5530
		F3	1	2								
Esc, #23	C2	F1	2	2	0,557	0,4434	0	0,4127	0	155	0	5433
		F3	3	0								
Esc, #30	C3	F1	2	1	0,544	0,5773	0	0,415	0	167	0	5883
		F4	3	1								
Esc, #34	C3	F1	1	2	0,498	0,5726	0	0,4012	0	165	0	5863
		F4	4	0								
Esc, #38	C4	F1	3	0	0,528	0,941	0	0,2104	0,295	80	131	7467
		F5	2	2								
Esc, #42	C4	F1	2	1	0,532	0,8825	0	0,1818	0,3411	79	136	7551
		F5	3	1								
Esc, #60	C5	F2	3	2	0,821	0,327	0	0,4264	0	184	0	6460
Esc, #67	C6	F2	3	1	0,707	0,5186	0	0,4677	0	186	0	6546
		F4	2	1								
Esc, #74	C7	F2	3	0	0,561	0,9193	0	0,2279	0,3054	90	134	7905
		F5	2	2								
Esc, #86	C8	F3	3	0	0,453	0,618	0	0,382	0	159	0	5583
		F4	2	2								

Esc, #90	C8	F 3 F 4	2 3	1 1	0,428	0,579 6	0	0,4146	0	157	0	5530
Esc, #98	C9	F 3 F 5	3 2	0 2	0,436	0,89	0	0,1801	0,3042	70	132	7190
Esc, #102	C9	F 3 F 5	2 3	1 1	0,462	0,880 5	0	0,1491	0,3409	68	132	7016
Esc, #111	C1 0	F 4 F 5	4 1	0 2	0,470	0,783 1	0	0,1934	0,2604	89	114	7332
Esc, #114	C1 0	F 4 F 5	2 3	1 1	0,489 3	0,891 8	0	0,1972	0,2986	79	129	7316
Esc, #121	C1 1	F 4 F 1	4 1	0 2	0,2829	0,609 3	0,3917	0	168	0	5937	
Esc, #125	C1 1	F 4 F 1	2 3	2 0	0,2977	0,538 8	0,4094	0	166	0	5818	
Esc, #130	C1 2	F 4 F 2	2 3	2 0	2931	0,565 1	0,4538	0	167	0	5817	
Esc, #131	C1 3	F 4 F 3	4 1	0 2	0,2956	0,491 3	0,3818	0	153	0	5358	
Esc, #135	C1 3	F 4 F 3	2 3	2 0	0,2815	0,439 1	0,3749	0	156	0	5476	
Esc, #136	C1 4	F 4 F 5	4 1	0 2	0,283	0,865 4	0,2294	0,2404	88	102	6828	
Esc, #140	C1 4	F 4 F 5	2 3	2 0	0,3055	0,728 1	0,2261	0,2737	88	105	6660	

Como se mencionó en la sección 3.8, el frente #5 Precón descarga únicamente en la trituradora Precón debido a que el material de ese frente es subagregados. Los otros frentes, descargan únicamente en la trituradora Huayco, su material es caliza.

La combinación de frentes con mayor producción entre todos los escenarios posibles son las que tienen al frente #5 Precón, todos estos escenarios sobrepasan el orden de las 7000 toneladas por día, Mencionamos los escenarios y sus tonelajes: escenario #38 F1-F5 7643 toneladas, escenario #42 F1-F5 7551 toneladas, escenario #74 F2-F5 7905 toneladas, escenario #98 F3-F5 7109 toneladas, escenario #102 F3-F5 7016 toneladas, escenario #111 F4-F5 7332 toneladas y escenario #114 F4-F5 7316 toneladas.

Se analizaron las distancias desde los frentes de explotación hasta el lugar de descarga correspondiente y los resultados nos mostraron que viajar desde el frente #5 Precón hasta la trituradora Precón se recorre aproximadamente 897,9 metros, viajar desde los frentes #2 Lérída, #3 Fraga y #4 Explosa hasta la trituradora Huayco se recorre aproximadamente entre 1800 y 2000 metros; y por último, viajar desde el frente #1 Derrumbe hasta la trituradora Huayco se recorre aproximadamente 1008,2 metros.

Por lo tanto, el recorrido más corto desde un frente hasta su zona de descarga correspondiente es el frente #5 Precón, Se pueden ver estas distancias de recorrido en los diferentes frentes de trabajo en el **Anexo B.24** y la velocidad promedio para cada frente en el **Anexo B.25**. Esta es la razón por la que los escenarios óptimos con combinaciones que incluyen al frente #5 Precón, poseen una producción alta pasando las 7000 toneladas.

Obteniendo un tonelaje promedio de todos los escenarios óptimos sin incluir los que tengan resultados con el F5 Precón (los de gran tonelaje por encima de los 7000) para los escenarios normales y especiales, se obtiene que el promedio en los escenarios óptimos normales es de 6004,8 toneladas; mientras que el promedio del tonelaje de los escenarios óptimos especiales se obtuvo un promedio muy cercano de 5984,86 toneladas.

Por último, los escenarios especiales, en los que se usan dos excavadoras en el frente #4 Explosa y una tercera en otro, no mostraron tonelajes muy elevadas con respecto a los escenarios normales donde se usaba una excavadora en cada frente. Analizando el tonelaje promedio en todos sus escenarios especiales se asemejan al tonelaje promedio de los escenarios normales. Usar tres excavadoras en lugar de una aumenta los costos de producción, obteniendo similares resultados usando dos excavadoras.

El propósito de la tabla de resultados de escenarios óptimos es brindar la configuración de número de volquetes mineros que deben ser asignados a cada frente, con la finalidad de obtener la mayor producción posible.

3.12.2 Análisis del cálculo matemático

Para el cálculo matemático fue necesario tomar la distancia con mayor longitud entre los 5 frentes de trabajos, debido que el tiempo de viaje con carga y sin carga del equipo de transporte son los que afectan mayormente al tiempo total de ciclo del camión. Los datos obtenidos fueron castigados mediante los coeficientes determinados debido a que sabemos que el sistema no es perfecto por lo que existen inconvenientes en las diferentes actividades mineras y en consecuencia a eso, el número de horas efectivas con la que se trabajó es de 8 horas por turno. Los 2506 t/día de producción con la que se trabajó fue a partir de la producción promedio de los meses de octubre y noviembre de los 5 frentes de trabajo que se estudió. La producción diaria de los meses de octubre y noviembre se encuentran en el **Anexo B**.

3.12.3 Resultados del cálculo matemático

Los resultados del cálculo matemático nos muestran que usando la capacidad total del cazo de la excavadora de $2,8 \text{ m}^3$ es posible llenar el volquete de 32 toneladas con 6 paladas. El tiempo total del ciclo del camión es de 903,66 *segundos*. A partir de ese dato se obtuvo la productividad teórica (Q_t) que fue de $127,48 \text{ t/h}$ y la productividad de explotación (Q_e) de $767,22 \text{ t/turno}$ la cual ya considera los inconvenientes en esa actividad durante las 8 horas efectivas de trabajo. Considerando que la producción es de 2506 t/día, la empresa el número de camiones del parque de transporte que debería tener la empresa es de 3. Sin embargo, debido a que existen inconvenientes como fallas y mantenimiento del volquete este dato fue castigado con el coeficiente de disponibilidad técnica del parque de máquinas (k_{up}) para tener un número de camiones adicionales en caso que se presente los inconvenientes mencionados por lo que se llega a la conclusión que la empresa necesitaría 4 camiones pero debido a que la empresa explota material de más de un frente de trabajo a la vez, ésta necesitará cuatro camiones por cada frente donde vayan a extraer material.

A continuación, se presenta la **Tabla 3.34** con los resultados obtenidos mediante el cálculo matemático.

Tabla 3.34. Resultados del análisis matemático [Medina & Vásquez, 2018]

Número de cazos	6
Tiempo de ciclo de la excavadora	21,95s
Tiempo de carga	266,87 s
Tiempo de descarga	34,46s
Tiempo de viaje con carga	307,41s
Tiempo de viaje al vacío	294,5s
Tiempo total de ciclo	903,66s
Producción teórica	127,48 t/h
Productividad técnica del camión	807,60 t/turno
Productividad de explotación	767,22 t/turno
Número de camiones servidos por la excavadora	6 camiones
Parque de Transporte	3 camiones
Número de camiones que integran el parque de equipos de transporte	4 camiones

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se desarrolló un modelo de simulación a partir de los datos recopilados en los frentes de explotación, zona de descarga y velocidad de los volquetes que asistió para la toma de decisiones de los escenarios posibles:
 - De los 140 escenarios evaluados en el modelo de simulación se encontró 24 escenarios óptimos.
 - Se proporcionó el número óptimo de volquetes a designar para frente de explotación.
 - Las combinaciones de frentes que obtuvieron un mayor tonelaje producido en los escenarios óptimos fueron todos aquellos donde se extrajo material del frente # 5 Precón, mostrando un tonelaje promedio de 7000.
 - En la condición especial del uso de excavadoras en la que se usaron las dos excavadoras Komatsu de $2,8 m^3$ en el frente # 4 Explosa y la excavadora Caterpillar de $2,6 m^3$ en un segundo frente, se concluye que no muestran mayor tonelaje, en contraste con las condiciones normales en la que se usó una excavadora Komatsu en cada frente. Siendo el tonelaje promedio de ambas condiciones de 6000.
- Con los datos obtenidos se obtuvieron distribuciones probabilísticas que fueron ingresadas al modelo de simulación.
- Además, con los datos de las velocidades promedio de los volquetes se obtuvieron distribuciones probabilísticas para modelar las velocidades de los camiones en la red vial.
- Se realizó un análisis de la red vial de la cantera con la finalidad de obtener factores de reducción de velocidad por cada tramo en la que se consideró la variación del tiempo de ciclo de acarreo.
- Se construyó un modelo de simulación que sigue la lógica del modelo conceptual de producción de la cantera.

- Se tomó un total de 6239 datos en los frentes de explotación y zona de descarga correspondiente a las actividades productivas de cargas y descargas. Además, se recolectaron 414 datos sobre las velocidades de viaje con carga y sin carga correspondiente a la actividad de acarreo.
- Adicional a la construcción del modelo de simulación se realizó un análisis matemático para contrastar los resultados del modelo de simulación. De acuerdo con el análisis matemático se necesitó un total de 4 volquetes de marca Volvo de 32 toneladas por cada frente de explotación, Mientras que mediante el modelo de simulación sólo se necesitó 7 camiones que actualmente la empresa posee.

4.2 Recomendaciones

Con base en la investigación realizada en este proyecto se recomienda lo siguiente:

- Obtener una base de datos de todas las actividades mineras de un año durante todo el día de trabajo para que las muestras sean representativas.
- Recopilar los datos de manera separada de período seco e invernal durante el año.
- Usar sensores en la toma de tiempo de cada actividad minera para así disminuir los errores sistemáticos para que la recopilación de datos sea la más precisa posible para que el modelo de simulación se asemeje al sistema real.
- Se debe realizar una validación del modelo de simulación frente a datos reales, Estos datos reales deben ser recopilados por periodo adicional al periodo de muestreo, estos datos no serán ingresados a la simulación sino para validar el modelo. Debido al corto tiempo de realización de esta investigación no tuvo tiempo para validar el modelo de simulación.
- Tener una base datos de las velocidades con carga y sin carga de todas las entidades que recorren el modelo de simulación. Para esta investigación no existió

una base de datos de velocidad de la entidad del volquete Caterpillar de 43 toneladas.

- Evaluar y modelar estos parámetros para tener una simulación que se asemeje al sistema real. Debido a que no se poseía una base de datos de las fallas, mantenimiento de los equipos de carguío y transporte no fue posible evaluar estos parámetros en el modelo de simulación.
- Modelar dos tramos de vías para cada entidad con su respectivo k . El factor de reducción de velocidad (k) para un tramo de la vía fue el promedio del k de la entidad Volvo y la entidad Caterpillar.
- Continuar con el análisis de vías asignando una resistencia a la rodadura para cada tramo de la red vial. Por motivo de seguridad debido a la presencia de lluvias que afectaban la superficie de las vías se asumió una resistencia a la rodadura constante diferente a cero en todo el tramo de la red vial.

BIBLIOGRAFÍA

- Añazco, L. (2017). *Caracterización Geomecánica y Diseño de Taludes en la Cantera "Calizas Huayco."* Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Barceló, J. (1996). *Simulación de Sistemas Discretos*. Madrid: Isdefe.
- Bedon, M., & Omar, C. (2005). *Aplicación de la Simulación para la Simulación del Acarreo de Mineral*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Cetin, N., Erarslan, K., & Okuducu, A. (2001). Computer simulation of track/shovel system at Tuncbilek coal mine using GPSS/H. *Proceedings of the Seventeenth International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, 0–715.
- Dindarloo, S. R., Osanloo, M., & Frimpong, S. (2015). A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(March), 209–219.
- García, Á., & Ortega, M. (2006). *Introducción a la Simulación de Sistemas Discretos*.
- Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open pit mine. Planning and design. Volume 1* (3rd Editio). Utah: CRC Press.
- Land, M. (2004). *Capítulo 5 . - Simulación en Software Rockwell Arena .*
- Maxera, C. O. (2005). *Aplicación de la Simulación para la Optimización del Acarreo de Mineral* (Universidad Nacional Mayor de San Marcos). Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/978380?origin=crossref>
- Meza, J. E. (2011). *Desarrollo de un Modelo para la Aplicación de Simulación a un Sistema de Carguío y Acarreo de Desmonte en una Operación Minera a Tajo Abierto*.
- Mina, A. (2016). *Propuesta de Optimización del Sistema de Carga y Transporte en una Cantera de Calizas Ubicada en el Km 12 ½ Vía a la Costa*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Noriega, R. (2017). *Aplicación de Modelos Matemáticos para la Predicción de Vibraciones Inducidas por Voladuras en una Explotación de Calizas en Proximidad a Zonas Urbanas*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Sturgul, J. R. (2000). *Mine Design: Examples Using Simulation*. Moscow: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Sturgul, J. R. (2016). *Discrete Simulation and Animation for Mining Engineers*. Boca Raton: CRC Press.
- Tiile, R., Kaba, F., Aouad, N., & Arthur, F. (2016). Shovel-Truck Haulage Analysis Using Stochastic Discrete Event Simulation. *International Journal of Science and Research*

(*IJSR*), 5(11), 495–500. <https://doi.org/10.21275/ART20162683>

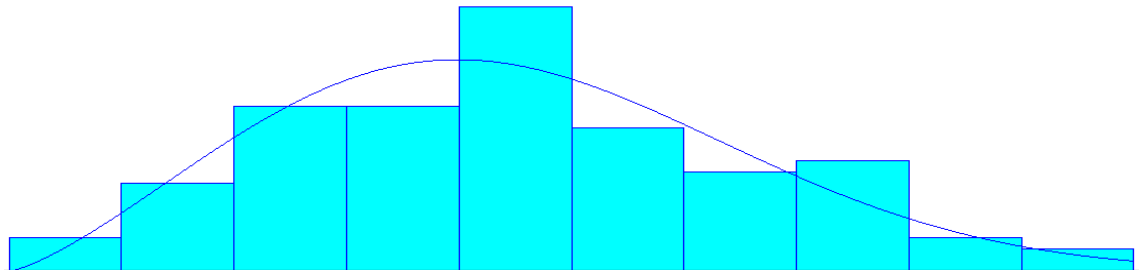
Upadhyay, S. P. (2016). *Simulation Optimización of Mine Operation for Uncertainty Based Short and Operational Planning in Open Pit Mines*. University of Alberta.

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

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

ANEXOS

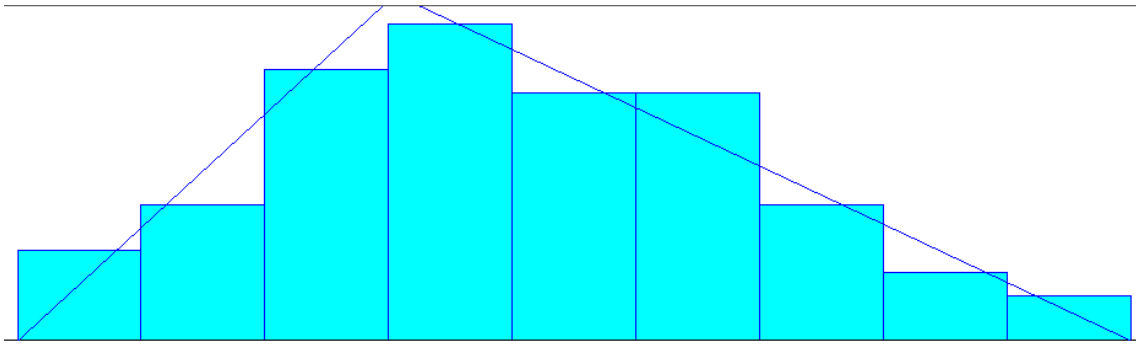
ANEXO A



Anexo A.1. Histograma de tiempos de posicionamiento del volquete Volvo en el frente de explotación [Medina & Vásquez, 2018]

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

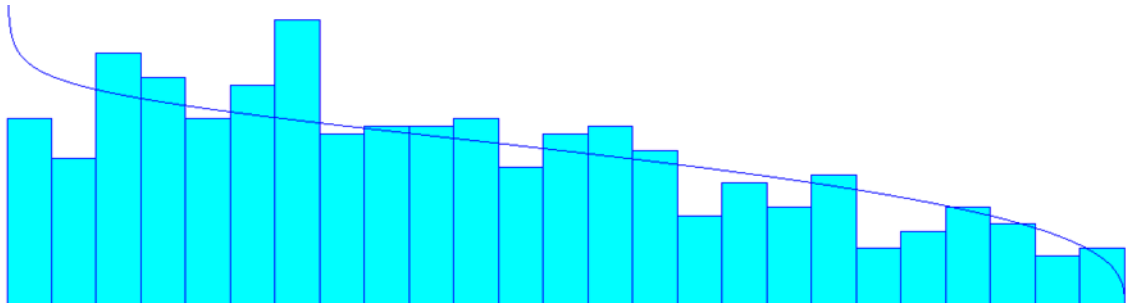
Anexo A.2. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo de posicionamiento del volquete Volvo en el frente de explotación [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A,3: Histograma de tiempo de posicionamiento del dumper en el frente de explotación [Medina & Vásquez, 2018]

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

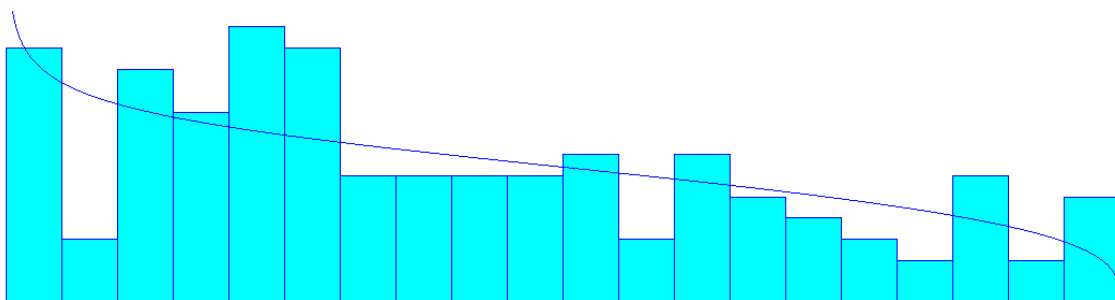
Anexo A.4. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo de posicionamiento del dumper en el frente de explotación [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.5. Histograma de tiempos de carga de la excavadora Komatsu [Medina & Vásquez, 2018]

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

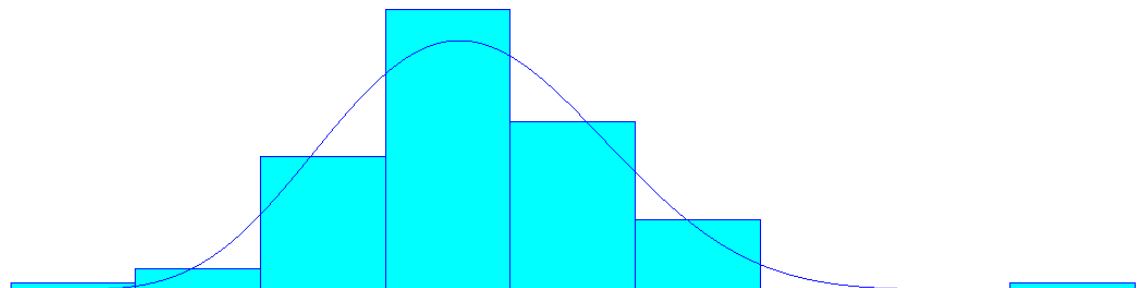
Anexo A.6. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo carga de material de la excavadora Komatsu [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.7. Histograma de tiempos de carga de la excavadora Komatsu [Medina & Vásquez, 2018]

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

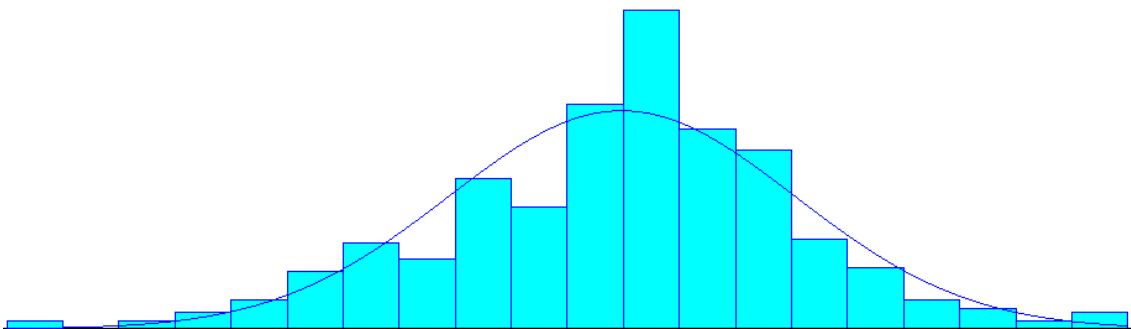
Anexo A.8. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo carga de material de la excavadora CAT [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.9. Histograma de tiempos de posicionamiento del dumper en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

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

Anexo A.10. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de posicionamiento del dumper en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.11. Histograma de tiempos de posicionamiento del Volvo en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

```

Distribution Summary

Distribution: Normal
Expression: NORM(33.7, 5.57)
Square Error: 0.007160

Chi Square Test
Number of intervals = 13
Degrees of freedom = 10
Test Statistic = 30.6
Corresponding p-value < 0.005

Kolmogorov-Smirnov Test
Test Statistic = 0.0743
Corresponding p-value = 0.0207

Data Summary

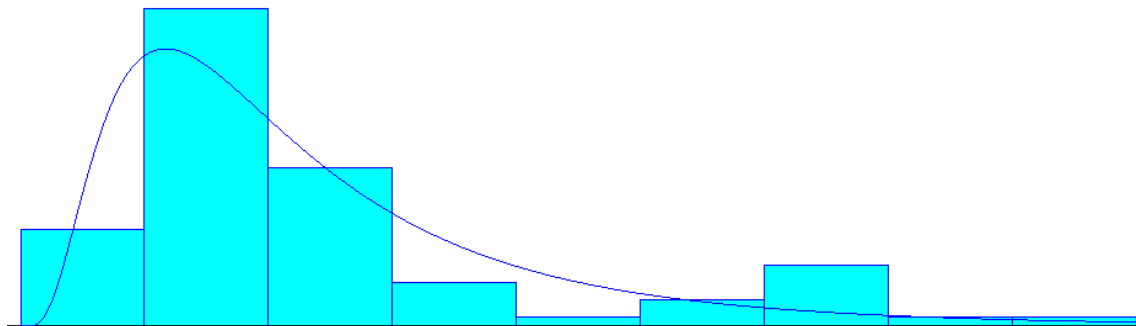
Number of Data Points = 415
Min Data Value = 14.4
Max Data Value = 49.9
Sample Mean = 33.7
Sample Std Dev = 5.58

Histogram Summary

Histogram Range = 14 to 50
Number of Intervals = 20

```

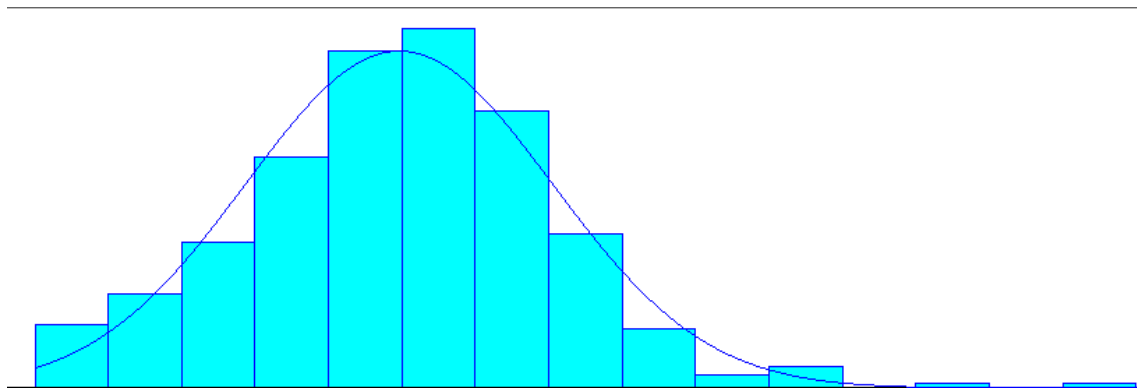
Anexo A.12. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de posicionamiento del volquete Volvo en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.13. Histograma de tiempos de descarga del dumper en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

Distribution Summary	
Distribution:	Lognormal
Expression:	25 + LOGN(9.26, 7.41)
Square Error:	0.019167
Chi Square Test	
Number of intervals	= 5
Degrees of freedom	= 2
Test Statistic	= 5.45
Corresponding p-value	= 0.0694
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.101
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 83
Min Data Value	= 25.9
Max Data Value	= 58.6
Sample Mean	= 34.2
Sample Std Dev	= 7.08
Histogram Summary	
Histogram Range	= 25 to 59
Number of Intervals	= 9

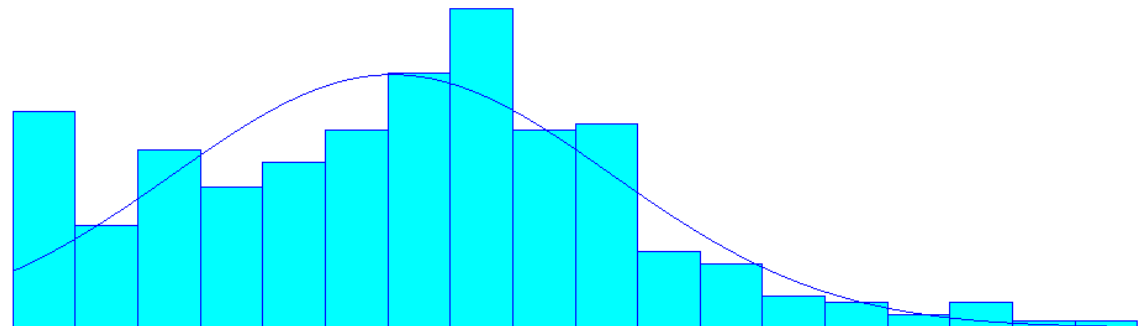
Anexo A.14. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo de descarga de material del dumper en la zona de descarga, [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.15. Histograma de tiempos de descarga del volquete Volvo en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]

Distribution Summary	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(46.6, 7.41)
Square Error:	0.001761
Chi Square Test	
Number of intervals	= 9
Degrees of freedom	= 6
Test Statistic	= 7.46
Corresponding p-value	= 0.288
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 34.1
Corresponding p-value	< 0.01
Data Summary	
Number of Data Points	= 413
Min Data Value	= 29.4
Max Data Value	= 79.4
Sample Mean	= 46.6
Sample Std Dev	= 7.42
Histogram Summary	
Histogram Range	= 29 to 100
Number of Intervals	= 20

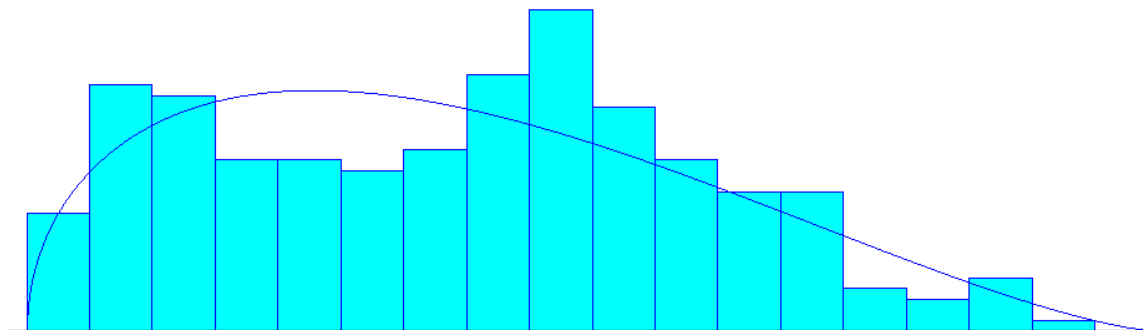
Anexo A.16. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de tiempo de descarga de material del volquete volvo en la zona de descarga [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.17. Histograma de la velocidad con carga del volquete Volvo [Medina & Vásquez, 2018]

Distribution Summary	
Distribution:	Normal
Expression:	NORM(6.37, 1.95)
Square Error:	0.008707
Chi Square Test	
Number of intervals	= 13
Degrees of freedom	= 10
Test Statistic	= 63.2
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 3.07
Corresponding p-value	< 0.01
Data Summary	
Number of Data Points	= 349
Min Data Value	= 3.06
Max Data Value	= 12.8
Sample Mean	= 6.37
Sample Std Dev	= 1.95
Histogram Summary	
Histogram Range	= 3 to 13
Number of Intervals	= 18

Anexo A.18. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de la velocidad con carga del volquete Volvo [Medina & Vásquez, 2018]



Anexo A.19. Histograma de la velocidad sin carga del volquete Volvo [Medina & Vásquez, 2018]

```

Distribution Summary

Distribution:  Beta
Expression:   4 + 10 * BETA(1.5, 2.46)
Square Error: 0.006194

Chi Square Test
Number of intervals = 14
Degrees of freedom = 11
Test Statistic     = 23.9
Corresponding p-value = 0.0144

Kolmogorov-Smirnov Test
Test Statistic     = 3.89
Corresponding p-value < 0.01

Data Summary

Number of Data Points = 250
Min Data Value       = 4.17
Max Data Value       = 13.1
Sample Mean          = 7.85
Sample Std Dev       = 2.16

Histogram Summary

Histogram Range      = 4 to 14
Number of Intervals = 18

```

Anexo A.20. Reporte del análisis de las pruebas de bondad en la distribución de la velocidad sin carga del volquete Volvo [Medina & Vásquez, 2018]

ANEXO B

Anexo B.21. Tabla del factor K del volquete VOLVO [Medina & Vásquez, 2018]

Link	Inicio	Fin	Sentido	Longitud	Zona prueba	Distancia soft	Numero Zonas		Pendiente (%)	Rolling R (%)	Grade R (%)	Equivalent R	VOLVO	
								Longitud Zona					Equivalent R Grade 0	Factor K
Link 1	1	2	Spur	69.2	3.642105263	76	4	19	0	4	0			
Link 2	25	26	Spur	17.4	0.915789474	19	1	19	0	4	0			
Link 3	25	16	Unidirectional	58.4	3.073684211	57	3	19	0	4	0			
Link 4	17	25	Unidirectional	62	3.263157895	57	3	19	5.13	4	5.13	9.13	4	0.44
Link 5	2	3	Unidirectional	48.8	2.568421053	57	3	19	-15.6	4				
Link 6	3	4	Unidirectional	270	14.21052632	266	14	19	7.5	4	7.5	11.5	4	0.35
Link 7	4	5	Unidirectional	53.8	2.831578947	57	3	19	10.7	4	10.7	14.7	4	0.27
Link 8	5	6	Unidirectional	50.4	2.652631579	57	3	19	-5.9	4				
Link 9	6	35	Unidirectional	215	11.31578947	209	11	19	10.9	4	10.9	14.9	4	0.27
Link 10	35	2	Unidirectional	172	9.052631579	171	9	19	-10.2	4				
Link 11	6	10	Unidirectional	109	5.736842105	114	6	19	-2.9	4	-2.9			
Link 12	10	6	Unidirectional	109	5.736842105	114	6	19	15.9	4	15.9	19.9	4	0.20
Link 13	10	11	Unidirectional	256	13.47368421	247	13	19	-15.9	4				
Link 14	11	10	Unidirectional	256	13.47368421	247	13	19	4.9	4	4.9	8.9	4	0.45
Link 15	11	12	Unidirectional	135	7.105263158	133	7	19	-4.9	4				
Link 16	12	11	Unidirectional	135	7.105263158	133	7	19	9.8	4	9.8	13.8	4	0.29
Link 17	12	13	Unidirectional	72.9	3.836842105	76	4	19	-9.8	4				
Link 18	13	12	Unidirectional	72.9	3.836842105	76	4	19	-9.3	4				
Link 19	13	27	Unidirectional	28.7	1.510526316	38	2	19	9.3	4	9.3	13.3	4	0.30
Link 20	27	13	Unidirectional	28.7	1.510526316	38	2	19	5.8	4	5.8	9.8	4	0.41
Link 21	27	28	Unidirectional	48.2	2.536842105	57	3	19	-5.8	4				
Link 22	28	27	Unidirectional	48.2	2.536842105	57	3	19	18.5	4	18.5	22.5	4	0.18
Link 23	28	14	Unidirectional	61.3	3.226315789	57	3	19	-18.5	4				
Link 24	14	28	Unidirectional	61.3	3.226315789	57	3	19	11.4	4	11.4	15.4	4	0.26
Link 25	14	15	Unidirectional	424	22.31578947	418	22	19	-11.4	4				
Link 26	15	14	Unidirectional	424	22.31578947	418	22	19	-12.9	4				
Link 27	15	16	Unidirectional	18.6	0.978947368	19	1	19	12.9	4	12.9	16.9	4	0.24
Link 28	16	15	Unidirectional	18.6	0.978947368	19	1	19	8.5	4	8.5	12.5	4	0.32
Link 29	16	17	Unidirectional	84.3	4.436842105	76	4	19	-8.5	4				
Link 30	17	16	Unidirectional	84.3	4.436842105	76	4	19	7.9	4	7.9	11.9	4	0.34
Link 31	6	7	Unidirectional	208	10.94736842	209	11	19	-7.9	4				
Link 32	7	6	Unidirectional	208	10.94736842	209	11	19	19	4	19	23	4	0.17

Link 33	7	8	Unidirectional	206	10.84210526	209	11													
Link 34	8	7	Unidirectional	206	10.84210526	209	11	19	-19	4										
Link 35	8	9	Spur	138	7.263157895	133	7	19	13	4	13	17	4	0.24						
Link 36	12	32	Unidirectional	69.7	3.668421053	76	4	19	-13	4										
Link 37	32	12	Unidirectional	69.7	3.668421053	76	4	19	18.1	4	18.1	22.1	4	0.18						
Link 38	32	33	Spur	200	10.52631579	209	11	19	9.8	4	9.8	13.8	4	0.29						
Link 39	27	29	Unidirectional	107	5.631578947	114	6	19	-9.8	4										
Link 40	29	27	Unidirectional	107	5.631578947	114	6	19	19	4	19	23	4	0.17						
Link 41	29	30	Unidirectional	73.3	3.857894737	76	4	19	8.41	4	8.41	12.41	4	0.32						
Link 42	30	29	Unidirectional	73.3	3.857894737	76	4	19	-8.41	4										
Link 43	30	31	Spur	82.5	4.342105263	76	4	19	-16.7	4										
Link 44	28	34	Spur	172	9.052631579	171	9	19	16.7	4	16.7	20.7	4	0.19						
Link 45	17	18	Unidirectional	70.8	3.726315789	76	4	19	-2.19	4										
Link 46	18	17	Unidirectional	70.8	3.726315789	76	4	19	11.6	4	11.6	15.6	4	0.26						
Link 47	18	19	Unidirectional	275	14.47368421	266	14	19	14.8	4	14.8	18.8	4	0.21						
Link 48	19	18	Unidirectional	275	14.47368421	266	14	19	-14.8	4										
Link 49	19	20	Unidirectional	172	9.052631579	171	9	19	-6.7	4										
Link 50	20	19	Unidirectional	172	9.052631579	171	9	19	6.7	4	6.7	10.7	4	0.37						
Link 51	20	21	Unidirectional	62.4	3.284210526	57	3	19	2.6	4	2.6	6.6	4	0.61						
Link 52	21	20	Unidirectional	62.4	3.284210526	57	3	19	-2.6	4										
Link 53	21	22	Unidirectional	125	6.578947368	133	7	19	9.9	4	9.9	13.9	4	0.29						
Link 54	22	21	Unidirectional	125	6.578947368	133	7	19	-9.9	4										
Link 55	22	23	Unidirectional	111	5.842105263	114	6	19	24.7	4	24.7	28.7	4	0.14						
Link 56	23	22	Unidirectional	111	5.842105263	114	6	19	-24.7	4										
Link 57	23	24	Spur	64.3	3.384210526	57	3	19	7	4	7	11	4	0.36						
Link 58	35	36	Unidirectional	70.4	3.705263158	95	5	19	-7	4										
Link 59	35	36	Unidirectional	70.4	3.705263158	95	5	19	31.6	4										
								19	0	4										
								19	0	4										
TOTAL				7110.2		7144														
ERROR	0.4731																			

Anexo B.22. Tabla del factor K del Volquete Caterpillar [Medina & Vásquez, 2018]

	inicio	Fin	Sentido	Longitud	Zona prueba	Distancia soft	Numero Zonas	CAT					
								V link Load	V link Empty	Vmax Load	Vmax Empty	Factor K load	Factor K empty
Link 1	1	2	Spur	69.2	3.642105263	76	4						
Link 2	25	26	Spur	17.4	0.915789474	19	1						
Link 3	25	16	Unidirectional	58.4	3.073684211	57	3		40	40	65		0.62
Link 4	17	25	Unidirectional	62	3.263157895	57	3						
Link 5	2	3	Unidirectional	48.8	2.568421053	57	3	14		40	65	0.4	
Link 6	3	4	Unidirectional	270	14.21052632	266	14	11		40	65	0.3	
Link 7	4	5	Unidirectional	53.8	2.831578947	57	3						
Link 8	5	6	Unidirectional	50.4	2.652631579	57	3	11		40	65	0.3	
Link 9	6	35	Unidirectional	215	11.31578947	209	11						
Link 10	35	2	Unidirectional	172	9.052631579	171	9						
Link 11	6	10	Unidirectional	109	5.736842105	114	6		18	40	65		0.28
Link 12	10	6	Unidirectional	109	5.736842105	114	6						
Link 13	10	11	Unidirectional	256	13.47368421	247	13		40	40	65		0.62
Link 14	11	10	Unidirectional	256	13.47368421	247	13						
Link 15	11	12	Unidirectional	135	7.105263158	133	7		25	40	65		0.38
Link 16	12	11	Unidirectional	135	7.105263158	133	7						
Link 17	12	13	Unidirectional	72.9	3.836842105	76	4						
Link 18	13	12	Unidirectional	72.9	3.836842105	76	4						
Link 19	13	27	Unidirectional	28.7	1.510526316	38	2	10		40	65	0.3	
Link 20	27	13	Unidirectional	28.7	1.510526316	38	2		34	40	65		0.52
Link 21	27	28	Unidirectional	48.2	2.536842105	57	3						
Link 22	28	27	Unidirectional	48.2	2.536842105	57	3		17	40	65		0.26
Link 23	28	14	Unidirectional	61.3	3.226315789	57	3						
Link 24	14	28	Unidirectional	61.3	3.226315789	57	3		24	40	65		0.37
Link 25	14	15	Unidirectional	424	22.31578947	418	22						
Link 26	15	14	Unidirectional	424	22.31578947	418	22						
Link 27	15	16	Unidirectional	18.6	0.978947368	19	1	9		40	65	0.2	
Link 28	16	15	Unidirectional	18.6	0.978947368	19	1		25	40	65		0.38
Link 29	16	17	Unidirectional	84.3	4.436842105	76	4						
Link 30	17	16	Unidirectional	84.3	4.436842105	76	4		26	40	65		0.40
Link 31	6	7	Unidirectional	208	10.94736842	209	11			40	65		
Link 32	7	6	Unidirectional	208	10.94736842	209	11		16	40	65		0.25

Link 33	7	8	Unidirectional	206	10.84210526	209
Link 34	8	7	Unidirectional	206	10.84210526	209
Link 35	8	9	Spur	138	7.263157895	133
Link 36	12	32	Unidirectional	69.7	3.668421053	76
Link 37	32	12	Unidirectional	69.7	3.668421053	76
Link 38	32	33	Spur	200	10.52631579	209
Link 39	27	29	Unidirectional	107	5.631578947	114
Link 40	29	27	Unidirectional	107	5.631578947	114
Link 41	29	30	Unidirectional	73.3	3.857894737	76
Link 42	30	29	Unidirectional	73.3	3.857894737	76
Link 43	30	31	Spur	82.5	4.342105263	76
Link 44	28	34	Spur	172	9.052631579	171
Link 45	17	18	Unidirectional	70.8	3.726315789	76
Link 46	18	17	Unidirectional	70.8	3.726315789	76
Link 47	18	19	Unidirectional	275	14.47368421	266
Link 48	19	18	Unidirectional	275	14.47368421	266
Link 49	19	20	Unidirectional	172	9.052631579	171
Link 50	20	19	Unidirectional	172	9.052631579	171
Link 51	20	21	Unidirectional	62.4	3.284210526	57
Link 52	21	20	Unidirectional	62.4	3.284210526	57
Link 53	21	22	Unidirectional	125	6.578947368	133
Link 54	22	21	Unidirectional	125	6.578947368	133
Link 55	22	23	Unidirectional	111	5.842105263	114
Link 56	23	22	Unidirectional	111	5.842105263	114
Link 57	23	24	Spur	64.3	3.384210526	57
Link 58	35	36	Unidirectional	70.4	3.705263158	95
Link 59	35	36	Unidirectional	70.4	3.705263158	95

TOTAL

7110.2

7144

ERROR 0.4731

11									
11		19	40	65					0.29
7									
4		17	40	65					0.26
4		26	40	65					0.40
11									
6		18	40	65					0.28
6		25	40	65					0.38
4									
4	7		40	65			0.2		
9									
4		25	40	65					0.38
4		19	40	65					0.29
4									
14									
14	15		40	65			0.4		
9		56	40	65					0.86
9									
3		25	40	65					0.38
3									
7		14	40	65					0.22
7									
6		33	40	65					0.51
6									
3									
5									
5									

Anexo B.23. Resultados de la evaluación de los 140 escenarios posibles [Medina & Vásquez, 2018]

		#VL	#DP	%U	%U	%U	%U	%U	#viaje	#viaje	Producci	
		V	R	KTZ1	KTZ2	CAT	TritHuay	TritPrec	s	s	ón total	
						1	co	ón	Huayc	Precó	(ton)	
									o	n		
Esc, #1	C1	F1	2	0	0,353	0,842	0	0,4155	0	123	0	4255
		F2	3	2								
Esc, #2	C1	F1	3	0	0,474	0,725	0	0,4296	0	177	0	6225
		F2	2	2								
Esc, #3	C1	F1	4	0	0,570	0,503	0	0,3863	0	170	0	6056
		F2	1	2								
Esc, #4	C1	F1	5	0	0,555	0,398	0	0,3409	0	142	0	5171
		F2	0	2								
Esc, #5	C1	F1	1	1	0,357	0,881	0	0,4337	0	182	0	6418
		F2	4	1								
Esc, #6	C1	F1	2	1	0,527	0,763	0	0,4623	0	185	0	6514
		F2	3	1								
Esc, #7	C1	F1	3	1	0,535	0,535	0	0,3763	0	168	0	5926
		F2	2	1								
Esc, #8	C1	F1	4	1	0,543	0,353	0	0,3392	0	142	0	5061
		F2	1	1								
Esc, #9	C1	F1	0	2	0,419	0,831	0	0,4224	0	121	0	4422
		F2	5	0								
Esc, #10	C1	F1	1	2	0,548	0,641	0	0,4438	0	191	0	6406
		F2	4	0								
Esc, #11	C1	F1	2	2	0,558	0,546	0	0,4019	0	171	0	5934
		F2	3	0								

Esc, #12	C1	F 1 F 2	3 2	2 0	0,571 5	0,386 6	0	0,35	0	143	0	4950
Esc, #13	C2	F 1 F 3	2 3	0 2	0,393 5	0,438 8	0	0,305	0	128	0	4404
Esc, #14	C2	F 1 F 3	3 2	0 2	0,495 6	0,449 3	0	0,3632	0	151	0	5206
Esc, #15	C2	F 1 F 3	4 1	0 2	0,527 9	0,469 3	0	0,3517	0	157	0	5530
Esc, #16	C2	F 1 F 3	5 0	0 2	0,545 1	0,377 2	0	0,3513	0	137	0	4945
Esc, #17	C2	F 1 F 3	1 4	1 1	0,410 8	0,441 1	0	0,2932	0	129	0	4623
Esc, #18	C2	F 1 F 3	2 3	1 1	0,546 8	0,423 5	0	0,3506	0	146	0	5156
Esc, #19	C2	F 1 F 3	3 2	1 1	0,563 3	0,420 7	0	0,3359	0	153	0	5380
Esc, #20	C2	F 1 F 3	4 1	1 1	0,575 7	0,372 6	0	0,3302	0	138	0	4900
Esc, #21	C2	F 1 F 3	0 5	2 0	0,364 8	0,460 3	0	0,2987	0	129	0	4788
Esc, #22	C2	F 1 F 3	1 4	2 0	0,531 1	0,453 6	0	0,3531	0	150	0	5394
Esc, #23	C2	F 1 F 3	2 3	2 0	0,557 8	0,443 4	0	0,4127	0	155	0	5433
Esc, #24	C2	F 1 F 3	3 2	2 0	0,531 2	0,367 6	0	0,3392	0	139	0	4822
Esc, #25	C3	F 1	2	0	0,363 2	0,580 5	0	0,3643	0	148	0	5143

		F 4	3	2								
Esc, #26	C3	F 1 F 4	3 2	0 2	0,498 6	0,574 4	0	0,3949	0	164	0	5721
Esc, #27	C3	F 1 F 4	4 1	0 2	0,553 2	0,470 4	0	0,3702	0	164	0	5820
Esc, #28	C3	F 1 F 4	5 0	0 2	0,547 5	0,423 9	0	0,304	0	143	0	5214
Esc, #29	C3	F 1 F 4	1 4	1 1	0,422 6	0,600 3	0	0,369	0	146	0	5200
Esc, #30	C3	F 1 F 4	2 3	1 1	0,544 3	0,577 3	0	0,415	0	167	0	5883
Esc, #31	C3	F 1 F 4	3 2	1 1	0,533 8	0,524 2	0	0,3985	0	157	0	5530
Esc, #32	C3	F 1 F 4	4 1	1 1	0,540 7	0,413 8	0	0,3662	0	141	0	5007
Esc, #33	C3	F 1 F 4	0 5	2 0	0,373 4	0,162 7	0	0,168	0	138	0	5065
Esc, #34	C3	F 1 F 4	1 4	2 0	0,498 2	0,572 6	0	0,4012	0	165	0	5863
Esc, #35	C3	F 1 F 4	2 3	2 0	0,556 9	0,502 5	0	0,4209	0	163	0	5678
Esc, #36	C3	F 1 F 4	3 2	2 0	0,561 6	0,293	0	0,3116	0	140	0	4854
Esc, #37	C4	F 1 F 5	2 3	0 2	0,388 6	0,938 6	0	0,1575	0,3235	61	139	7016
Esc, #38	C4	F 1 F 5	3 2	0 2	0,528 6	0,941	0	0,2104	0,295	80	131	7467

Esc, #39	C4	F 1 5	4 1	0 2	0,528 5	0,691 5	0	0,204	0,2231	84	103	6743
Esc, #40	C4	F 1 5	5 0	0 2	0,578 4	0,580 1	0	0,2331	0,159	87	74	5966
Esc, #41	C4	F 1 5	1 4	1 1	0,383	0,936 8	0	0,1447	0,348	58	142	7038
Esc, #42	C4	F 1 5	2 3	1 1	0,532 8	0,882 5	0	0,1818	0,3411	79	136	7551
Esc, #43	C4	F 1 5	3 2	1 1	0,563 2	0,718 9	0	0,1998	0,2479	82	109	6750
Esc, #44	C4	F 1 5	4 1	1 1	0,572	0,503 2	0	0,2171	0,1733	85	70	5532
Esc, #45	C4	F 1 5	0 5	2 0	0,462 1	0,904 8	0	0,1236	0,3561	63	140	7189
Esc, #46	C4	F 1 5	1 4	2 0	0,487 1	0,808 5	0	0,166	0,2925	80	128	7250
Esc, #47	C4	F 1 5	2 3	2 0	0,583 7	0,618 7	0	0,2023	0,2572	83	101	6350
Esc, #48	C4	F 1 5	3 2	2 0	0,578 4	0,522	0	0,2192	0,205	87	72	5484
Esc, #49	C5	F 2 3	2 3	0 2	0,349 8	0,474 5	0	0,3389	0	130	0	4479
Esc, #50	C5	F 2 3	3 2	0 2	0,506 9	0,433 1	0	0,3478	0	146	0	5035
Esc, #51	C5	F 2 3	4 1	0 2	0,598 2	0,425 8	0	0,3674	0	161	0	5625
Esc, #52	C5	F 2	5	0	0,811 3	0,420 5	0	0,4429	0	181	0	6375

		F 3	0	2								
Esc, #53	C5	F 2 F 3	1 4	1 1	0,316	0,427 1	0	0,2749	0	126	0	4505
Esc, #54	C5	F 2 F 3	2 3	1 1	0,552 7	0,465 8	0	0,3754	0	152	0	5370
Esc, #55	C5	F 2 F 3	3 2	1 1	0,724 9	0,432 8	0	0,3858	0	172	0	6043
Esc, #56	C5	F 2 F 3	4 1	1 1	0,819 2	0,313 5	0	0,43	0	177	0	6236
Esc, #57	C5	F 2 F 3	0 5	2 0	0,414 4	0,425 4	0	0,2821	0	129	0	4777
Esc, #58	C5	F 2 F 3	1 4	2 0	0,582 6	0,453 8	0	0,3292	0	152	0	5480
Esc, #59	C5	F 2 F 3	2 3	2 0	0,720 1	0,425 8	0	0,4084	0	168	0	5959
Esc, #60	C5	F 2 F 3	3 2	2 0	0,821 8	0,327	0	0,4264	0	184	0	6460
Esc, #61	C6	F 2 F 4	2 3	0 2	0,429 2	0,557 5	0	0,313	0	140	0	4865
Esc, #62	C6	F 2 F 4	3 2	0 2	0,514 9	0,565 4	0	0,4114	0	169	0	5881
Esc, #63	C6	F 2 F 4	4 1	0 2	0,740 3	0,471 5	0	0,4564	0	181	0	6353
Esc, #64	C6	F 2 F 4	5 0	0 2	0,776 9	0,375 5	0	0,4027	0	177	0	6269
Esc, #65	C6	F 2 F 4	1 4	1 1	0,397 3	0,592 4	0	0,3538	0	149	0	5296

Esc, #66	C6	F 2 F 4	2 3	1 1	0,495 5	0,581 8	0	0,4419	0	161	0	5680
Esc, #67	C6	F 2 F 4	3 2	1 1	0,707 6	0,518 6	0	0,4677	0	186	0	6546
Esc, #68	C6	F 2 F 4	4 1	1 1	0,804 9	0,366 6	0	0,4279	0	174	0	6140
Esc, #69	C6	F 2 F 4	0 5	2 0	0,179 6	0,506 2	0	0,2118	0	124	0	4474
Esc, #70	C6	F 2 F 4	1 4	2 0	0,535 2	0,639 5	0	0,4428	0	174	0	6195
Esc, #71	C6	F 2 F 4	2 3	2 0	0,645 1	0,451 2	0	0,349	0	108	0	3764
Esc, #72	C6	F 2 F 4	3 2	2 0	0,867 3	0,343 9	0	0,4282	0	174	0	6096
Esc, #73	C7	F 2 F 5	2 3	0 2	0,409 4	0,908 4	0	0,1695	0,3165	60	124	6438
Esc, #74	C7	F 2 F 5	3 2	0 2	0,561 3	0,919 3	0	0,2279	0,3054	90	134	7905
Esc, #75	C7	F 2 F 5	4 1	0 2	0,732 5	0,727 7	0	0,2885	0,236	110	103	7575
Esc, #76	C7	F 2 F 5	5 0	0 2	0,790 2	0,327 7	0	0,3249	0,094	124	74	7150
Esc, #77	C7	F 2 F 5	1 4	1 1	0,455 2	0,931 8	0	0,1418	0,3452	62	137	7017
Esc, #78	C7	F 2 F 5	2 3	1 1	0,551 4	0,895 9	0	0,213	0,3244	85	130	7562
Esc, #79	C7	F 2	3	1	0,717 9	0,719 5	0	0,2653	0,2392	112	108	7744

		F 5	2	1								
Esc, #80	C7	F 2 F 5	4 1	1 1	0,842 6	0,519 8	0	0,3356	0,1588	128	75	7200
Esc, #81	C7	F 2 F 5	0 5	2 0	0,410 3	0,898 4	0	0,1492	0,3741	62	144	7274
Esc, #82	C7	F 2 F 5	1 4	2 0	0,538 3	0,850 4	0	0,1762	0,3382	82	133	7485
Esc, #83	C7	F 2 F 5	2 3	2 0	0,705 5	0,708 8	0	0,2816	0,2548	106	106	7378
Esc, #84	C7	F 2 F 5	3 2	2 0	0,829 7	0,523 8	0	0,2995	0,2019	127	79	7164
Esc, #85	C8	F 3 F 4	2 3	0 2	0,349 8	0,560 2	0	0,3184	0	143	0	4972
Esc, #86	C8	F 3 F 4	3 2	0 2	0,453 5	0,618	0	0,382	0	159	0	5583
Esc, #87	C8	F 3 F 4	4 1	0 2	0,446 9	0,485 1	0	0,353	0	148	0	5319
Esc, #88	C8	F 3 F 4	5 0	0 2	0,430 2	0,362 4	0	0,2823	0	119	0	4391
Esc, #89	C8	F 3 F 4	1 4	1 1	0,346 7	0,594 2	0	0,3586	0	147	0	5221
Esc, #90	C8	F 3 F 4	2 3	1 1	0,428 6	0,579 6	0	0,4146	0	157	0	5530
Esc, #91	C8	F 3 F 4	3 2	1 1	0,413 2	0,465 3	0	0,3053	0	145	0	5124
Esc, #92	C8	F 3 F 4	4 1	1 1	0,421 2	0,328	0	0,2782	0	121	0	4323

Esc, #93	C8	F 3 F 4	0 5	2 0	0,346 4	0,576 1	0	0,3247	0	146	0	5277
Esc, #94	C8	F 3 F 4	1 4	2 0	0,455 5	0,555 2	0	0,3754	0	154	0	5423
Esc, #95	C8	F 3 F 4	2 3	2 0	0,462 9	0,555 2	0	0,3754	0	151	0	5228
Esc, #96	C8	F 3 F 4	3 2	2 0	0,431 3	0,354 5	0	0,2876	0	127	0	4372
Esc, #97	C9	F 3 F 5	2 3	0 2	0,286 6	0,891 1	0	0,099	0,316	50	141	6739
Esc, #98	C9	F 3 F 5	3 2	0 2	0,436	0,89	0	0,1801	0,3042	70	132	7190
Esc, #99	C9	F 3 F 5	4 1	0 2	0,400 6	0,741	0	0,166	0,2563	68	109	6467
Esc, #100	C9	F 3 F 5	5 0	0 2	0,412 5	0,504 2	0	0,1691	0,1601	70	76	5508
Esc, #101	C9	F 3 F 5	1 4	1 1	0,284 3	0,933 6	0	0,0858	0,3525	50	140	6663
Esc, #102	C9	F 3 F 5	2 3	1 1	0,462 4	0,880 5	0	0,1491	0,3409	68	132	7016
Esc, #103	C9	F 3 F 5	3 2	1 1	0,452 2	0,649 2	0	0,1641	0,245	66	108	6151
Esc, #104	C9	F 3 F 5	4 1	1 1	0,439	0,545 4	0	0,1638	0,181	68	77	5223
Esc, #105	C9	F 3 F 5	0 5	2 0	0,398 3	0,907 9	0	0,1183	0,3879	55	138	6781
Esc, #106	C9	F 3	1	2	0,346	0,816	0	0,123	0,3142	66	132	6820

		F 5	4	0								
Esc, #107	C9	F 3 F 5	2 3	2 0	0,465	0,678 3	0	0,179	0,2467	67	111	6070
Esc, #108	C9	F 3 F 5	3 2	2 0	0,473 1	0,494 3	0	0,1476	0,1726	68	75	4884
Esc, #109	C1 0	F 4 F 5	2 3	0 2	0,371 3	0,920 4	0	0,14	0,3161	59	143	7091
Esc, #110	C1 0	F 4 F 5	3 2	0 2	0,498 6	0,780 4	0	0,2245	0,2697	45	131	6347
Esc, #111	C1 0	F 4 F 5	4 1	0 2	0,470 6	0,783 1	0	0,1934	0,2604	89	114	7332
Esc, #112	C1 0	F 4 F 5	5 0	0 2	0,564 9	0,565 7	0	0,2629	0,1562	90	78	6234
Esc, #113	C1 0	F 4 F 5	1 4	1 1	0,412 5	0,928 3	0	0,1277	0,3465	56	138	6824
Esc, #114	C1 0	F 4 F 5	2 3	1 1	0,489 3	0,891 8	0	0,1972	0,2986	79	129	7316
Esc, #115	C1 0	F 4 F 5	3 2	1 1	0,577	0,745 4	0	0,2386	0,253	86	73	5605
Esc, #116	C1 0	F 4 F 5	4 1	1 1	0,589 9	0,554 1	0	0,2391	0,1789	83	75	5661
Esc, #117	C1 0	F 4 F 5	0 5	2 0	0,405 8	0,933 8	0	0,114	0,3589	59	143	7113
Esc, #118	C1 0	F 4 F 5	1 4	2 0	0,572 1	0,917	0	0,2001	0,3719	46	133	6069
Esc, #119	C1 0	F 4 F 5	2 3	2 0	0,584 8	0,629 7	0	0,2086	0,244	89	106	6735

Esc, #120	C1 0	F 4 F 5	3 2	2 0	0,598 7	0,445 7	0	0,2111	0,1823	90	74	5644
Esc, #121	C1 1	F 4 F 1	4 1	0 2	0,2829	0,609 3	0,3917	0	168	0	5937	
Esc, #122	C1 1	F 4 F 1	4 1	1 1	0,2912	0,429 2	0,328	0	144	0	5121	
Esc, #123	C1 1	F 4 F 1	3 2	1 1	0,2855	0,531 9	0,383	0	166	0	5851	
Esc, #124	C1 1	F 4 F 1	3 2	2 0	0,2879	0,416	0,3395	0	140	0	4854	
Esc, #125	C1 1	F 4 F 1	2 3	2 0	0,2977	0,538 8	0,4094	0	166	0	5818	
Esc, #126	C1 2	F 4 F 2	4 1	0 2	0,2868	0,699 6	0,4288	0	173	0	5141	
Esc, #127	C1 2	F 4 F 2	4 1	1 1	0,2924	0,482	0,3248	0	145	0	5146	
Esc, #128	C1 2	F 4 F 2	3 2	1 1	0,2921	0,529 6	0,3352	0	159	0	5594	
Esc, #129	C1 2	F 4 F 2	3 2	2 0	0,1455	0,006 3	0,1083	0	127	0	4416	
Esc, #130	C1 2	F 4 F 2	2 3	2 0	2931	0,565 1	0,4538	0	167	0	5817	
Esc, #131	C1 3	F 4 F 3	4 1	0 2	0,2956	0,491 3	0,3818	0	153	0	5358	
Esc, #132	C1 3	F 4 F 3	4 1	1 1	0,2901	0,417 8	0,3021	0	141	0	4996	
Esc, #133	C1 3	F 4	3	1	0,2808	0,463 7	0,3745	0	138	0	4856	

Esc, #134		F 3	2	1							
	C1 3	F 4 F 3	3 2	2 0	0,2851	0,326 4	0,3449	0	141	0	4908
Esc, #135	C1 3	F 4 F 3	2 3	2 0	0,2815	0,439 1	0,3749	0	156	0	5476
Esc, #136	C1 4	F 4 F 5	4 1	0 2	0,283	0,865 4	0,2294	0,2404	88	102	6828
Esc, #137	C1 4	F 4 F 5	4 1	1 1	0,2907	0,567 1	0,2213	0,1778	92	73	5896
Esc, #138	C1 4	F 4 F 5	3 2	1 1	0,277	0,831 1	0,2109	0,2477	89	108	6953
Esc, #139	C1 4	F 4 F 5	3 2	2 0	0,3067	0,517	0,1963	0,1684	89	74	5612
Esc, #140	C1 4	F 4 F 5	2 3	2 0	0,3055	0,728 1	0,2261	0,2737	88	105	6660

Anexo B.24. Distancia de recorrido desde los diferentes frentes de explotación hasta la trituradora del equipo de transporte con carga y sin carga [Medina & Vásquez, 2018]

Distancia (m)					
Volquete	Fraga	Derrumbe	Explosa	Lérida	Precón
Con carga	1247,9	1025,7	1497,2	1352,5	1467,9
Sin Carga	1275,9	1053,7	1525,2	1380,5	1495,9

Anexo B.25. velocidades promedio de recorrido desde los diferentes frentes de explotación hasta la trituradora del equipo de transporte con carga y sin carga [Medina & Vásquez, 2018]

Velocidad (m/s)					
Volquete	Fraga	Derrumbe	Explosa	Lérida	Precón
Con carga	4,94	6,53	6,33	6,72	6,69
Sin carga	7,50	8,19	7,11	7,94	8,19

Anexo B.26. Control de toneladas diarias del mes de octubre en Calizas Huayco [Calizas Huayco SA,]

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
LERIDA	0	0	3264	1368	0	2713	1259	0	896	2452	448	0	0	0	0	0	0	0	12400
PRECON	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

Anexo B.27. Control de toneladas diarias del mes de noviembre en Calizas Huayco [Calizas Huayco SA,]

Resumen por concesión	DÍAS DE NOVIEMBRE													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	0	1952	1952
Lérida	0	0	1548	2736	1888	1664	3027	2240	0	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	

