

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO-CHILE



INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍA
DISRUPTIVA EN EL PROCESO DE CARGUÍO Y
TRANSPORTE DE MINERA SPENCE

Presentado por

MARÍA IGNACIA HENRÍQUEZ REBELLO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS

Profesor guía

ING. VÍCTOR ENCINA MONTENEGRO

Miembro de la Comisión

ING. CARLOS HUNT RECABARREN

SANTIAGO, ENERO 2021

Resumen Ejecutivo

La mina Spence, propiedad del grupo BHP Pampa Norte, es una operación a cielo abierto que produce tanto cátodos como concentrados de cobre. La compañía está constantemente buscando nuevas soluciones tecnológicas para mantener el costo en las cifras actuales. Esto se debe a que los costos de operación de la mina deberían aumentar a medida que la operación minera profundiza su explotación.

Una de las iniciativas para reducir los costos es la introducción de una tolva móvil para mejorar el proceso de manejo de materiales. La tolva móvil recibe y almacena el material de la pala mientras entrega un flujo regulado a los camiones. Con esta máquina, se espera aumentar la tasa de transporte de material y reducir el tiempo del ciclo de carga.

En este trabajo, el sistema de tolva móvil se comparó con el sistema de carga y transporte convencional de la mina Spence, considerando su adaptación al proceso general de manejo de materiales y cuantificando sus efectos operativos y económicos. Con el fin de evaluar el máximo potencial de producción del nuevo sistema, se eligió una fase de la mina completamente ubicada en estéril para desarrollar el estudio. De esa forma no hay limitaciones derivadas de la capacidad de trituración, como es el caso cuando se trabaja en mineral.

Para ello, el proceso de carga y transporte fue simulado con el software Arena, representando una pala que funciona durante 25 días con una de las dos flotas de camiones existentes en la mina Spence. Para configurar el caso base, se utilizaron los datos reales de las distribuciones de tiempo y las capacidades de carga tanto de la pala como de las flotas de camiones. A su vez, para la tolva móvil, los parámetros de funcionamiento se ajustaron a las condiciones del caso base.

Los resultados de la simulación indican: que con el nuevo sistema se requiere un camión menos de cualquiera de las flotas para transportar el material, que la tasa de producción del sistema de manejo de materiales aumenta, que crece el índice de utilización de la pala y que se reduce el tiempo de carga de los camiones. Sin embargo, desde el punto de vista económico, una comparación del valor presente de los costes durante un período de 10 años no mostró ninguna ventaja significativa de la tolva móvil sobre el sistema convencional,

probablemente porque en esos primeros 10 años, los ahorros en los costos de operación apenas son suficientes para cubrir la inversión en la tolva móvil.

Abstract

The Spence mine, owned by the BHP Pampa Norte Group, is an open pit operation that produces both cathodes and concentrates of copper. Company is constantly searching new technological solutions to keep the cost on current figures. This is because operating costs of the mine should increase as the mining operation goes deeper in its exploitation.

One of the initiatives to reduce costs is the introduction of a mobile hopper to improve the material handling process. The mobile hopper receives and stores shovel material while delivering regulated flow to trucks. With this machine, it is expected to increase the material transport rate and reduce the loading cycle time.

In this work, the mobile hopper system was compared with the Spence mine's conventional loading and transport system, considering its adaptation to the overall material handling process and quantifying its operational and economic effects. To assess the maximum production potential of the new system, a phase of the mine completely located in waste was chosen to carry out the study. This way there are not limitations due to crushing capacity, as is the case when working in ore.

To do this, the loading and transport process was simulated with Arena software, representing a shovel working for 25 days with one of the two fleets of trucks existing in the Spence mine. To configure the base case, the actual data of the time distributions and loading capacity of both the shovel and truck fleets were used. In turn, for the mobile hopper, the operating parameters were adjusted to the conditions of the base case.

Simulation results indicates: that with the new system one less truck of any of the fleets is required to transport the material, that the production rate of the material handling system increases, that the utilization index of the shovel grows and that loading time of trucks is reduced. However, from an economic point of view, a comparison of present value of costs over a 10-year period did not show any significant advantage of the mobile hopper over the conventional system, probably because in those first 10 years, the savings in operating costs are barely enough to cover the investment in the mobile hopper.

Agradecimientos

Este trabajo es el cúlmine de una etapa que no pudo haber terminado sin el apoyo de mi familia, perros, chicas RIM y amigos. Especial mención a mi mamá María Angélica Rebello y a mi papá Marcelo Henríquez, mi tío Rodrigo, mis perritas Martina, Dominga, Lemebel y Memé y mis amigos Milka C, Catalina Z, Camila O, Pablo V, Matías E, Enzo V, Marcelo L, Cristian S y Cristian A. Todos fueron grandes aportes e hicieron llevaderos y entretenidos los seis años de universidad. Y por último y no menos importante, a mí, que con esfuerzo, dedicación y perseverancia, logré finalizar esta etapa.

También, le agradezco a la empresa BHP por haberme dado la oportunidad de realizar mi memoria en su compañía, y conocer un área distinta como lo es el Material Handling en Spence. Y mi profesor guía, Víctor Encina, que me entregó las herramientas necesarias para convertirme en una profesional de excelencia.

Este año diría que ha sido el más extraño y distinto de mí vida, pero lo agradezco mucho ya que se convirtió en la posibilidad perfecta para retroceder y reflexionar. Entender que lo único constante es el cambio y que sólo queda agradecer todo lo que me ha pasado, porque sin eso no podría ser la mujer que soy ahora.

Índice:

1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	8
1.2	OBJETIVOS	9
1.2.1	Objetivo general.....	9
1.2.2	Objetivo específico.....	9
1.3	ALCANCES	9
2	ANTECEDENTES	10
2.1	CARACTERIZACIÓN MINA SPENCE.....	10
2.2	PROPUESTA MMD: TOLVA MÓVIL (“SURGE LOADER”)	11
2.2.1	Ventajas productivas.....	13
2.2.2	Ventajas de producción adicionales	14
2.2.3	Ventajas de seguridad.....	14
2.2.4	Nueva configuración.....	15
2.2.5	Escenarios de carguíos y ganancias.....	15
2.2.6	Control del sistema e identificación.....	17
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	PROCESO DE CARGUÍO Y TRANSPORTE	17
3.2	NORMA ASARCO.....	20
3.3	INDICADORES OPERACIONALES	21
3.4	SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS.....	23
3.4.1	Modelo Estocástico.....	25
3.5	EVALUACIÓN DE PROYECTOS	26
3.5.1	Valor presente (VP) y Valor Actual Neto (VAN)	26
3.5.2	Valor Actual de Costos (VAC).....	27
4	METODOLOGÍA	28
4.1	DEFINICIÓN ZONA DE ESTUDIO	28
4.2	ETAPAS DEL DESARROLLO DEL ESTUDIO	29
4.2.1	Recolección, gestión y limpieza de datos	29
4.2.2	Modelamiento del Caso Base	29
4.2.3	Modelación del proceso retador: Tolva Móvil.....	29
4.2.4	Propuesta de valor.....	29

5	DESARROLLO.....	30
5.1	RECOLECCIÓN, PROCESAMIENTO Y GESTIÓN DE DATOS.....	30
5.1.1	<i>Datos de la mina.....</i>	30
5.1.2	<i>Limpieza de datos.....</i>	31
5.1.3	<i>Distribución de tiempos.....</i>	31
5.2	DISEÑO DE APLICACIÓN DE LA TOLVA MÓVIL.....	34
5.3	SIMULACIÓN DEL CASO.....	37
5.3.2	<i>Parámetros y variables de entrada.....</i>	39
5.3.3	<i>Parámetros y variables de salida.....</i>	41
5.4	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	42
5.4.1	<i>Pala.....</i>	42
5.4.2	<i>Camiones.....</i>	42
5.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OPERATIVOS.....	51
5.5.1	<i>Producción y Rendimiento.....</i>	51
5.5.2	<i>Ciclos.....</i>	52
5.5.3	<i>Cola.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
5.6	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	53
6	CONCLUSIONES.....	57
7	RECOMENDACIONES.....	58
8	ANEXOS.....	59
8.1	DISTRIBUCIONES DE TIEMPO.....	59
8.1.1	<i>Tiempo del Ciclo.....</i>	59
8.1.2	<i>Tiempo de Acuatamiento.....</i>	60
8.1.3	<i>Tiempo de Carguío.....</i>	60
8.1.4	<i>Tiempo de Viaje Lleno.....</i>	61
8.1.5	<i>Tiempo de Viaje Vacío.....</i>	61
8.1.6	<i>Tiempo de Descarga.....</i>	62
8.2	INFORME EXCEL ARENA.....	62
8.3	SIMULADOR ARENA.....	64
8.4	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	66
9	REFERENCIAS.....	67

Índice de Figuras

FIGURA 3.1: TOLVA MÓVIL ENTRE LA PALA Y EL CAMIÓN, PUESTA EN MARCHA EN UNA OPERACIÓN MINERA...	12
FIGURA 3.2: NUEVA FORMA DE CARGAR MATERIAL, USANDO LA TOLVA MÓVIL;¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 3.3: ELIMINACIÓN DEL TIEMPO DE ACULATAMIENTO, DADA LA FORMA EN QUE OPERA ESTE EQUIPO. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 3.4: DISTINTAS CONFIGURACIONES QUE PUEDE ADOPTAR LA TOLVA MÓVIL, DONDE SE REQUIERE DE FRENTE CARGUÍO MÍNIMO 25 METROS JUNTO CON BANCO DE 60 METROS DE ALTO, COMO MÍNIMO. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 3.5: ESCENARIO DE CARGUÍO USANDO LA TOLVA MÓVIL.....	16
FIGURA 3.6: SISTEMA DE CONTROL E IDENTIFICACIÓN DE LA TOLVA MÓVIL CON EL CAMIÓN. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 2.1: OPERACIONES UNITARIAS EN MINERÍA A CIELO ABIERTO (NUMAAN, 2016);¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 2.2: DIAGRAMA DEL CICLO DE TRANSPORTE DE UNA MINA A CIELO ABIERTO. (FUENTE DE ELABORACIÓN PROPIA) ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 2.3: NORMA ASARCO, ESQUEMA GENERAL USADO DE BASE EN MINERÍA.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 2.4: NORMA ASARCO, USADO EN SPENCE	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5.1: MODELO DEL CASO BASE DEL CICLO DE CARGUÍO Y TRANSPORTE DE UN CAMIÓN EN SPENCE, PUESTO EN MARCHA EN ARENAS.	39

Índice de Tablas

TABLA 5.3: PROGRAMA DE PRODUCCIÓN DE LAS FASES ACTIVAS PARA EL AÑO 2020, FAENA SPENCE.....	10
TABLA 5.4: INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL ESTUDIO DE AMBAS FLOTAS DE CAMIONES.	11
TABLA 3.1: CICLO DE CARGUÍO UTILIZADO POR LA EMPRESA MMD PARA REALIZAR SU ESTUDIO CON LA TOLVA MÓVIL.....	16
TABLA 3.2: SECUENCIA DE CARGA USANDO LA TOLVA MÓVIL, CASO ESTÁNDAR.	16
TABLA 5.1: TIEMPOS DESGLOSADOS SIN LIMPIAR PROVENIENTES DE “DISPATCH” DEL CICLO DEL CAMIÓN DURANTE EL AÑO 2019.....	30
TABLA 5.2: DATOS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS POSTERIOR A LA LIMPIEZA DE LOS TIEMPOS DE CAMIÓN DURANTE EL AÑO 2019.	31
TABLA 5.5 COMPARATIVA DE TIEMPOS ENTRE LO QUE PROPONE EL FABRICANTE Y LA REALIDAD EN SPENCE, PARA CAMIONES CATERPILLAR.....	36
TABLA 5.6:COMPARATIVA DE TIEMPOS ENTRE LO QUE PROPONE EL FABRICANTE Y LA REALIDAD EN SPENCE, PARA CAMIONES KOMATSU.	36
TABLA 5.7: VARIABLES DE ESTUDIO USADAS EN LA SIMULACIÓN DE CADA CASO.	38
TABLA 5.8: VARIABLES DE INTERÉS OCUPADAS EN LA SIMULACIÓN DE LOS CAMIONES.....	40
TABLA 5.9: PARÁMETROS DE ESTUDIO QUE SE MANTUVIERON CONSTANTE.	40
TABLA 5.10: PARÁMETROS DE SALIDA DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS.....	41
TABLA 5.11: COSTOS DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS EN ESTUDIO.	53
TABLA 5.12: COSTO ANUAL DE LOS CASOS CATERPILLAR.	53
TABLA 5.13: COSTO ANUAL DE LOS CASOS KOMATSU.....	54
TABLA 5.14: COSTO ANUAL PALA.	54
TABLA 18:RESUMEN DE LAS VARIABLES DE SALIDA ENTREGADA POR EL SOFTWARE ARENA.	63

Índice de Gráficos

GRÁFICO 5.1: DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE COLA DURANTE EL AÑO 2019.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
GRÁFICO 5.2: DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE ACULATAMIENTO DURANTE EL AÑO 2019.....	32
GRÁFICO 5.3: DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE CARGUÍO DURANTE EL AÑO 2019.	33
GRÁFICO 5.4: DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE VIAJE LLENO DURANTE EL AÑO 2019.¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
GRÁFICO 5.5: DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE VIAJE VACÍO DURANTE EL 2019.	34
GRÁFICO 5.6: DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO DE DESCARGA DURANTE EL AÑO 2019.	34
GRÁFICO 5.7: DISTRIBUCIÓN DEL CICLO DE TIEMPO COMPLETO DEL CAMIÓN EN SPENCE DURANTE EL AÑO 2019, TANTO PARA LASTRE, COMO PARA MINERAL.	35
GRÁFICO 5.8: DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DEL CICLO DE LA PALA. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
GRÁFICO 5.9: RENDIMIENTO OBTENIDO DE LAS SIMULACIONES PARA EL CASO CATERPILLAR.	43
GRÁFICO 5.10: TONELAJE ANUAL OBTENIDO EN AMBOS ESCENARIOS SIMULADOS PARA EL CASO CATERPILLAR.	44
GRÁFICO 5.11: RENDIMIENTO OBTENIDO DE LAS SIMULACIONES PARA EL CASO KOMATSU.....	47
GRÁFICO 5.12: TONELAJE ANUAL OBTENIDO EN AMBOS ESCENARIOS SIMULADOS PARA EL CASO KOMATSU....	48
GRÁFICO 5.13: VAC DEL CASO CATERPILLAR, EN UN PERÍODO DE 10 AÑOS.	55
GRÁFICO 5.14: VAC DEL CASO KOMATSU, EN UN PERÍODO DE 10 AÑOS.....	55

1 Introducción

Compañía Minera Spence S.A. es una empresa 100% propiedad de BHP Billiton, ubicada en la comuna de Sierra Gorda, a un costado de la carretera 25, entre Antofagasta (150 kilómetros noreste) y Calama (50 kilómetros sur oeste). Es una operación a tajo abierto que, a grandes rasgos, se compone de dos etapas: la extracción y el procesamiento de minerales. El primero, básicamente, corresponde a remover el mineral de la mina, cargarlo en equipos de transporte y llevarlo hacia la planta de procesamiento. El segundo, corresponde a la separación del material valioso del que no tiene valor económico y comprende entre otros, los procesos de chancado, molienda y tratamientos químicos o físico-químicos adecuados para la obtención del material valioso.

El objetivo de Spence como la mayoría de las compañías mineras es maximizar las ganancias de sus activos. Para alcanzarlo, el capital es invertido en proyectos que generarán utilidades en el futuro. En vista de lo anterior y considerando que los recursos minerales no son renovables, las compañías mineras deben desarrollar proyectos permanentemente y como parte de la ingeniería de prefactibilidad se requiere tomar decisiones respecto de la incorporación, o no, de nuevas tecnologías a los procesos productivos.

El aumento de la competitividad en el sector minero y la inminente baja del precio de los “commodities”, ha generado incertidumbre respecto a la rentabilidad las compañías mineras. Entre los desafíos económicos clave de la mina Spence, se encuentran el agotamiento gradual de las reservas de mineral y el aumento de las distancias de transporte debido a la profundización del tajo. Los recorridos más largos implican un aumento de cantidad de camiones mineros con el consiguiente aumento de emisiones de polvo y gases de efecto invernadero, todo lo cual se refleja en una paulatina pérdida de la posición competitiva de Spence en la industria.

“Las operaciones de carguío y transporte en minas a cielo abierto han sido motivo de estudio desde que las operaciones mineras comenzaron a trabajar a gran escala, momento en el que

surgió el problema de asignar de manera eficiente grandes recursos económicos, los cuales son siempre escasos. Cuando se habla de uso eficiente de recursos escasos en minería a cielo abierto, se hace referencia a la capacidad de carguío y de transporte asociada a la cantidad de equipos en operación, debido especialmente a que el principal recurso son los camiones mineros de gran tonelaje, los cuales tienen un alto costo de inversión y generalmente son el cuello de botella en el proceso productivo minero” (Carvajal, 2015).

Se espera que los costos de transporte aumenten, y con ello, que el costo mina se eleve en más de 28% de aquí al año 2028, para compensar esto Spence está estudiando alternativas de manejo de materiales. Entre estas iniciativas se encuentra la Tolva Móvil, equipo que se quiere integrar a la operación entre la pala y el camión con el fin de regularizar el flujo de material y reducir los tiempos muertos de ciclo del camión, para así disminuir costos operacionales en base a la idea de producir lo mismo en menos tiempo.

En este trabajo se realizará el estudio de ingeniería de comparación de los sistemas de manejo de material: convencional y con tecnología de Tolva Móvil. El estudio incluye un análisis técnico-económico para tomar la decisión de incorporar, o no, la nueva tecnología al proceso minero a tajo abierto en mina Spence.

1.1 Descripción del problema

El área de operaciones de la mina Spence busca reducir sus costos y así compensar el decaimiento de las leyes y profundización del rajo. Dentro de las iniciativas propuestas, se encuentra la de incorporar un nuevo equipo llamado Tolva Móvil, que opera como un acopio que se interpone entre la pala y el camión; sirve de regulador del proceso de carguío, con lo cual se espera disminuir tiempos muertos tanto de la pala como de los camiones.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la propuesta de negocio Tolva Móvil, comparándola con el sistema convencional en mina Spence.

1.2.2 Objetivo específico

- Demostrar que la tecnología Tolva Móvil es compatible con la operación de mina Spence.
- Cuantificar los aportes económicos y operacionales derivados del uso de Tolva Móvil respecto del sistema convencional que opera en la actualidad en mina Spence.

1.3 Alcances

Es un estudio de ingeniería de comparación (*trade off study*) que forma parte de la Ingeniería de Prefactibilidad de las inversiones en Mina Spence. No considera efectuar pruebas de la tecnología Tolva Móvil en terreno. Y se enmarca en el sistema de transporte por camiones en el tajo abierto de mina Spence, por lo que se interpone entre pala y camiones.

2 Antecedentes

2.1 Caracterización Mina Spence

Spence es una faena minera que extrae 250.000 [ton] de material diario, a una razón de 2,5 estéril/mineral. La ley promedio es del mineral es de 0,9% y anualmente producen 200.000 [ton] de cobre fino. Presenta una vida de 50 años y tiene 4 fases activas, las cuales son: F18, F17, F11s y F11n. El proceso de carguío y transporte es el mismo que en cualquier faena a cielo abierto. Con respecto al transporte, cuenta con una flota de 40 camiones Caterpillar flota 793 y 15 Komatsu 980-E, 4 palas P&H 4100 XPC y otros equipos accesorios usados para el correcto desarrollo de la mina.

Cada fase tiene asignada una pala para explotar una determinada cantidad de estéril y mineral (Tabla 2.1). A su vez, cada pala cuenta con cerca de 20 camiones, cuya distribución varía dependiendo del plan, el que está sujeto a constantes modificaciones.

Tabla 2.1: Programa de producción de las fases activas para el año 2020, faena Spence.

Fase	Unidad	Mineral	Estéril
11 n	MTon	3.8	0.7
11 s	MTon	8.5	23.4
18	MTon	13.4	19.9
17	MTon	0,0	40.9

Este año se espera lograr una producción de 110.3 Millones de toneladas de material, con los siguientes rendimientos: 433 [Ton/h] para los camiones Caterpillar y 641 [Ton/h] para los Komatsu. Con respecto a las palas, se tiene un rendimiento se describe en la Tabla 2.2 . Esto es así, considerando los ciclos de tiempo que involucran a cada equipo, con sus respectivos factores de utilización y disponibilidad. También, se debe tener en cuenta que la mina presenta un chancador que procesa 5300 [ton/h].

Tabla 2.2: Información necesaria para el estudio de ambas flotas de camiones.

		Pala		Camión	
Modelo	Unidades	P&H 4100 XPC		793	980-E
Tonelada corta	Toneladas	120		263	400
Tonelada nominal	Toneladas	109		240	363
Toneladas medias	Toneladas			220	315
Baldadas	-	2	3		
Rendimiento Real	Toneladas/hora	4662	5401	432	641
Tiempo de aculatamiento	Segundos	56	56	56	56
Tiempo de carguío	Segundos	50	75	50	75
Tiempo de excavación	Minutos	1,77	2,18	30,50	29,50
Disponibilidad Spence	%	78	78	85	85
Utilización Spence	%	80	80	80	80

2.2 Propuesta MMD: Tolva Móvil (“Surge Loader”)

En abril del 2018, la compañía australiana “Mining Machinery Developments” (MMD) firmó un importante contrato para suministrar la primera Tolva Móvil del mundo a una compañía minera de alcance mundial. Proyecto todo menos que ordinario, que reunió a un equipo de expertos para redefinir el rendimiento de la pala y el camión en operaciones mineras.

La Tolva Móvil busca transformar la forma en que operan las minas, brindando aumentos instantáneos en la productividad sin la necesidad de invertir en más camiones. La génesis del proyecto se vio hace varios años, en minas en Colombia y China, cuando MMD instaló un alimentador de placas en una mina de carbón colombiana, que aceptaba cargas directamente de una dragalina. La mina no pudo invertir en una pala, ya que habría llevado demasiado tiempo conseguir el equipo en el sitio. El nuevo sistema vio los camiones haciendo cola bajo una unidad de alimentación hidráulica controlada, que cargaba los camiones con mucha más precisión (a veces hasta el 98%) y más rápidamente (generalmente en 75 [segundos]).

Durante las primeras pruebas de aceptación en el sitio, MMD vio la transformación en la forma en que trabajaba el operador de la pala: las tolvas podían cargarse fácilmente sin necesidad de detenerse. De hecho, se vieron cargas de 12.000 a 14.000 [ton/h], un logro increíble dado que las palas que esperan que los camiones regresen y se ubiquen típicamente alcanzan menos de 6.000 [ton/h].

A partir de esta experiencia, nació el concepto de la Tolva Móvil, donde la unidad trabaja de forma independiente, entre la pala y los camiones (perfecto para mover grandes volúmenes de desechos). Además, dado que está montado sobre orugas, la Tolva Móvil puede avanzar donde quiera que vaya la pala (Figura 2.1).

La Tolva Móvil estándar está diseñada para ser cargada por palas de cable tipo P&H 4100 XPC / CAT 7495 y camiones tipo CAT 793, 794 y Komatsu 930, 960 y 980. El borde superior de la tolva se encuentra a 8 metros respecto al suelo y la altura de descarga del eje del cabezal alimentador es de 10,7 [m]. La pala P&H 4100 XPC tiene una altura de descarga 9,5 [m]. Los camiones más grandes de la flota Caterpillar (797) y Komatsu (980-E) tienen una altura que no supera los 8,0 [m] (Ltd, 2020)



Figura 2.1: Tolva móvil entre la pala y el camión, puesta en marcha en una operación minera.

La disponibilidad y utilización mínimas del equipo son 91% y 95%, respectivamente. Es importante destacar que la adición de este equipo mejora la utilización efectiva de las palas. Éstas últimas representan costos significativos de Costo de Capital (CAPEX) y Costo de Operación (OPEX), sin embargo, la eficiencia de una pala rara vez excede mucho más de la mitad de su capacidad. En este caso, no tendrá que esperar a que los camiones regresen y se vean, el operador de la pala puede continuar cargando material en la tolva receptora. La Tolva Móvil alimenta los camiones más rápido que una pala, y también de manera más segura, con menos desgaste en la flota de camiones.

El camión y la pala son dos de los equipos menos utilizados de forma efectiva en una mina a cielo abierto. MMD ha cambiado esto al desacoplar la pala del camión. Este equipo busca mejorar la operación, en específico, el proceso de carguío y transporte a través de los siguientes aspectos:

2.2.1 Ventajas productivas

1. Aumento en las tasas de producción minera, normalmente del 15 al 40%.
2. Utilización prevista del 95% de la pala.

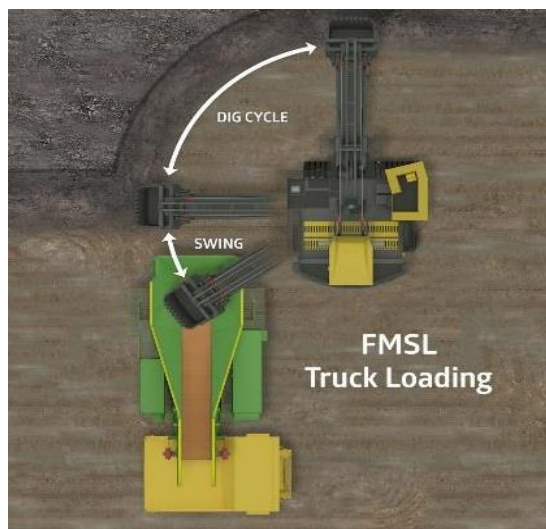


Figura 2.2: Nueva forma de cargar material, usando la Tolva Móvil

2.2.2 Ventajas de producción adicionales

1. Reducción de las esperas y colas de los camiones. (Figura 2.3).
2. La Tolva Móvil puede cargar un camión en 95 [seg] en el caso más extremo, y uno más conservador en un tiempo de 104 [seg] . El método actual tarda aproximadamente 190 [seg], lo que genera una reducción del tiempo de ciclo superior al 50%. (Figura 2.2).



Figura 2.3: Eliminación del tiempo de acuatamiento, dada la forma en que opera este equipo.

2.2.3 Ventajas de seguridad

1. Reducción del riesgo de lesiones a los conductores de camiones al alejarlos del balde de la pala.
2. Prevención del desgaste de neumáticos debido a la carga uniforme y precisa de los camiones.
3. Simplificación de la localización (adelante, atrás), ya que no se requieren maniobras de reversa.

2.2.4 Nueva configuración

La carga de la pala-camión es un cuello de botella en la producción. Para un rendimiento óptimo, no debería haber retrasos en el proceso de la pala. Es por ello por lo que se hace esencial maximizar la detección del camión para minimizar el ciclo de detección y descarga. Este equipo presenta configuraciones de instalación versátiles y, como resultado de una excelente maniobrabilidad y tamaño compacto, puede operar en un banco mínimo de 60 metros (Figura 2.4).

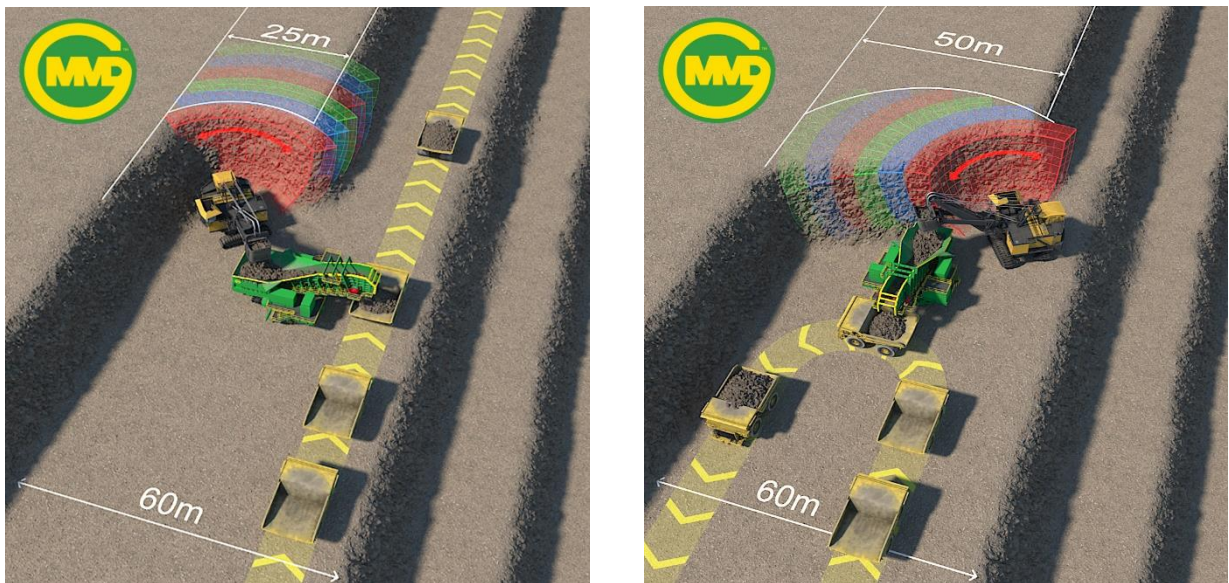


Figura 2.4 Distintas configuraciones que puede adoptar la Tolva Móvil, donde se requiere de frente carguío mínimo 25 metros junto con banco de 60 metros de alto, como mínimo.

2.2.5 Escenarios de carguíos y ganancias

La capacidad de diseño estándar está hecha para 15 mil toneladas/hora y carga un camión de 360 toneladas en 84 segundos. La puesta en marcha del equipo en Kennecott ha logrado realizar 27 mil toneladas por hora, cargando un camión 360 toneladas en 45 segundos.

Tabla 2.3: Ciclo de carguío utilizado por la empresa MMD para realizar su estudio con la Tolva Móvil.

Disciplina	Unidad	Carguío
Carguío (3 Pases)	Segundos	120
Aculatamiento	Segundos	60
Ciclo total	Segundos	180



Figura 2.5: Escenario de carguío usando la Tolva Móvil.

La secuencia de carga de camiones de 360 [ton], corresponde a la siguiente (Tabla 2.4):

Tabla 2.4: Secuencia de carga usando la Tolva Móvil, caso estándar.

Disciplina	Unidad	Tolva Móvil
Carguío (15000 toneladas la hora)	Segundos	84
Entrada/ Salida del camión	Segundos	20
Ciclo Total	Segundos	104 segundos

2.2.6 Control del sistema e identificación

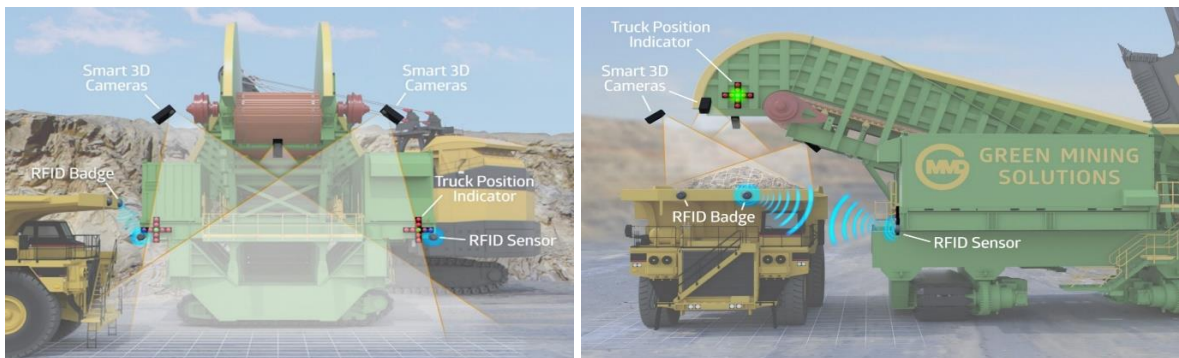


Figura 2.6: Sistema de control e identificación de la Tolva Móvil con el camión.

Este equipo puede trabajar de forma totalmente autónoma (Figura 2.6), o sea, puede identificar camiones, alinearlos al inicio/final de cada carga y monitorear la carga útil y control volumétrico. El operador puede reposicionar la pala sin detener la carga del camión, y los conductores disfrutan de entornos de trabajo más seguros y controlados al estar separados del balde de la pala oscilante. Utilizando la última tecnología de cámara 3D y sensores RFID. La Tolva Móvil puede guiar a los camiones a su posición de forma rápida y fácil y sus sensores, también permiten la entrega automática de inicio/parada del material, lo que aumenta el factor de llenado de cada camión.

Otra ventaja clave es la capacidad de cargar con precisión una carga útil específica. La Tolva Móvil se puede implementar de forma remota por un solo operador, con control remoto instantáneo y datos en tiempo real que se retroalimentan a la pala. El equipo se construye en función de los requerimientos del comprador, por lo que puede configurarse para adaptarse a múltiples dispositivos de carga.

3 Revisión bibliográfica

3.1 Proceso de carguío y transporte

La minería a cielo abierto es un método de explotación que busca extraer el mineral de manera descendente desde la superficie y tal como lo muestra la Figura 3.1, consta de las

operaciones de perforación (1), tronadura (2), carguío (3) y transporte (4); dependiendo del mineral y la concentración de la sustancia de interés, este puede ser destinado a chancado (5), stock o botadero.

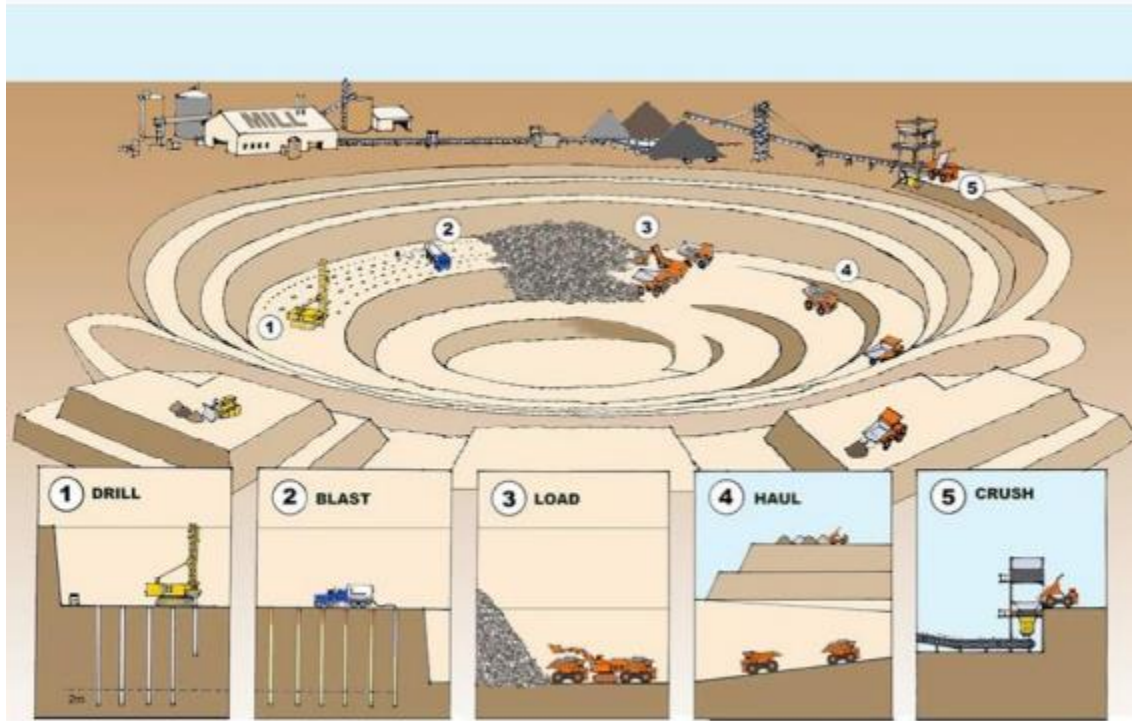


Figura 3.1: Operaciones unitarias en minería a cielo abierto (Numaan, 2016)

El uso de camiones es el método de transporte más utilizado en minería a cielo abierto, estando presente en el 95% de las minas al ser por lejos el más confiable y flexible (Soofastaei, 2015). Este método de explotación comienza a enfrentar desafíos a medida que pasa el tiempo, el agotamiento de los minerales superficiales, provoca que los rajes se profundicen, lo que trae consigo mayores distancias y tiempos de transporte, esto provoca un aumento también en la flota de transporte si se quiere mantener o aumentar la tasa de producción y, por ende, mayores costos capitales y productivos.

En la Figura 3.2 se muestra el ciclo típico de transporte de un camión, en particular, esta operación puede llegar a representar hasta un 60% del costo operativo total (Alarie & Gamache, 2002), lo que hace que se enfoquen los esfuerzos en su optimización.

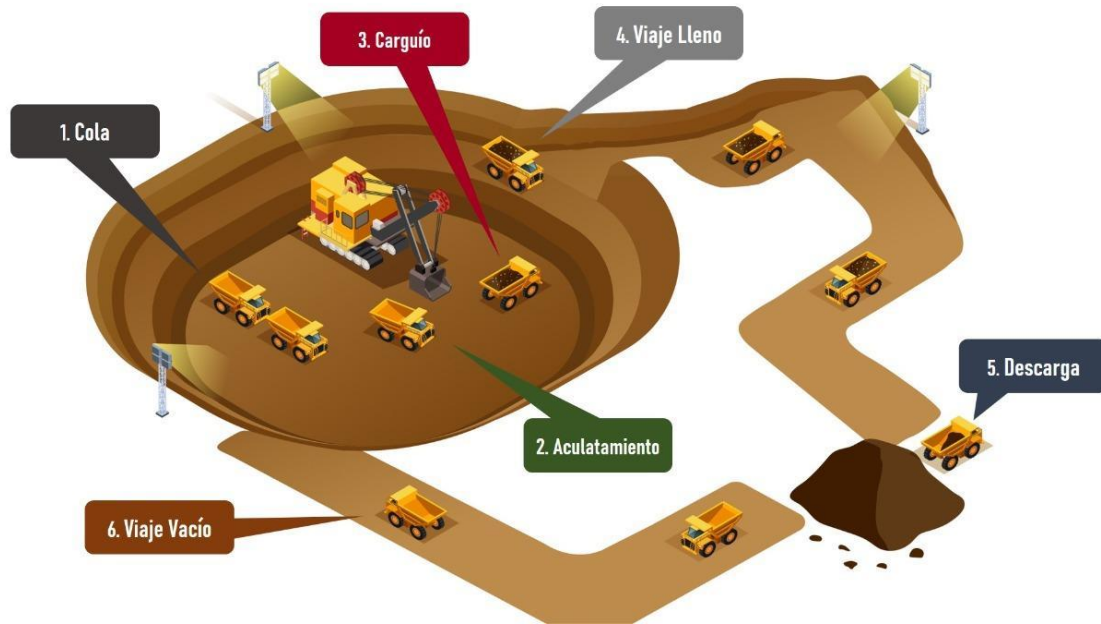


Figura 3.2: Diagrama del ciclo de transporte de una mina a cielo abierto. (Fuente de elaboración propia)

Un ciclo normal comienza cuando el camión recibe su carga. Luego, este se desplaza por una ruta designada en dirección al lugar de descarga, el que puede ser un acopio, un botadero o un chancador. Una vez que ésta ha sido vaciada, el camión retorna hacia el equipo de carguío. La acción de maniobrar este equipo para ser cargado y de acomodarse para vaciar la carga en lugar de descarga, se llama acuatamiento.

Por lo tanto, el tiempo de ciclo de transporte comprende: tiempo de carguío, tiempo de viaje cargado (ida), tiempo de descarga, tiempo de viaje vacío (retorno), tiempos de acuatamiento y demoras asociadas a las colas y a la congestión. En la Ecuación 1, se entregan las variables que componen el ciclo de carguío en una mina a cielo abierto:

$$T_C = T_{COLA} + T_{ACULATAMIENTO} + T_{CARGUÍO} + T_{IDA} + T_{VUELTA} + T_{DESCARGA} \quad (1)$$

Cuando se habla de cola, se hace alusión al tiempo de espera de los camiones en el destino ya sea para ser cargado o para descargar. Los tiempos de viaje (ida y retorno) incluyen demoras por congestión, que es el tiempo de demoras debidas a la interacción de los camiones

con otros vehículos a lo largo de los caminos mineros y esperas debidas a la señalética existente dentro de la mina.

3.2 Norma ASARCO

La Norma ASARCO (“American Smelting & Refining Company”) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina o instalación incurren durante la operación. Con los adecuados ajustes a la realidad operacional de la mina, pondera una serie de variables y proporciona indicadores del comportamiento y rendimiento de los equipos empleados en la extracción, beneficio e industrialización de los minerales. La descripción gráfica de los tiempos acorde a esta norma se presenta a continuación en la Figura 3.3 (González, 2018)

Tiempo Nominal				
Tiempo Disponible				Fuera de Servicio
				Programado Imprevisto
Tiempo Operativo			Reservas	
Tiempo Efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras		
		Programado	No Programado	

Figura 3.3: Norma ASARCO, esquema general usado de base en minería.

Como es habitual en la industria minera, cada compañía define su propia nomenclatura de medición de los tiempos de operación basado en la Norma ASARCO. En la Figura 3.4, se muestra la diferenciación de tiempos para Spence.



Figura 3.4: Norma ASARCO, usado en Spence.

La explotación se hace por polígonos definidos por las áreas de Planificación y Perforación y Tronadura. Los polígonos son una subdivisión del banco y reciben su nombre del orden en el que serán tronados. A continuación, se presenta la definición de tiempos para ASARCO de minera Spence:

- **Tiempo Nominal:** espacio de tiempo en que se realiza la medición (espacio muestral). Esto dependerá del tiempo de continuidad de la faena productiva.
- **Fuera de Servicio:** espacio de tiempo en que el equipo no se encuentra disponible, ya sea por una mantención programada o por imprevistos de tipo mecánico o eléctrico. También puede llamársele “tiempo en panne”.
- **Tiempo Disponible:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra electromecánicamente habilitado para operar.
- **Reserva:** espacio de tiempo en que el equipo, estando en condiciones electromecánicas para la operación, no es utilizado en labores productivas ya sea por falta de operador o superávit de equipos en ese momento.
- **Tiempo Operativo:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra operando en faena (con operador).
- **Demoras Programadas:** espacio de tiempo en que el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, tales como hora de colación o cambio de turno.
- **Demoras No Programadas:** espacio de tiempo en que el equipo no opera debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de ésta, tales como carga de combustible de los equipos, acomodo o limpieza de algún lugar de la faena (sitios de carguío, rampas, vías de tránsito), entre otras.
- **Pérdidas Operacionales:** espacio de tiempo en que el equipo no puede operar debido a la espera de un equipo complementario. Por ejemplo, los sistemas de cámaras de televisión.
- **Tiempo Efectivo:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra realizando aquellas tareas para las cuales fue adquirido y diseñado.

3.3 Indicadores operacionales

Según González (2008), los Indicadores Clave de Desempeño o KPIs (“Key Performance Indicators”) son índices de medición que se utilizan para dar seguimiento y evaluar el

desempeño de una operación. Estos parámetros usualmente comparan el desempeño actual y el estimado en términos de eficiencia, eficacia y calidad.

Por otro lado, estos indicadores permiten determinar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora de la actividad en cuestión. Estos parámetros se consideran entradas para el modelo de cálculo de equipos, excepto por el rendimiento operativo del equipo el cual es un resultado de ésta. Los indicadores operacionales relevantes para este trabajo son los siguientes:

- a) **Disponibilidad:** Es el porcentaje de horas nominales en que la flota, equipo, maquila o instalación, estuvo en condiciones mecánicas y/o eléctricas de ser operado. Sirve para establecer la capacidad de mantención en el marco de referencia funcional que deberá enfrentar la operación.

$$Disponibilidad(\%) = \frac{Tiempo\ disponible(h)}{Tiempo\ nominal\ (h)} * 100 \quad (2)$$

- b) **Utilización (base nominal):** Es el porcentaje sobre las horas nominales en que la flota, equipo o instalación, realiza tareas efectivas. Corresponde a la división entre el número de horas efectivas y horas nominales. Sirve para establecer la eficacia de la operación mina respecto del uso eficiente que se le da a la flota, equipo, máquina o instalación.

$$Utilización(\%) = \frac{Tiempo\ efectivo\ (h)}{Tiempo\ nominal\ (h)} * 100 \quad (3)$$

- c) **Utilización Operativa:** Es el porcentaje del tiempo disponible en el cual dicho equipo se encuentra operativo, vale decir, que no está en Reserva ni en Demora Programada. Cabe mencionar que el tiempo operativo está compuesto por el Tiempo Efectivo más las Demoras No Programadas.

$$Utilización\ Operativa(\%) = \frac{Tiempo\ operativo\ (h)}{Tiempo\ disponible\ (h)} * 100 \quad (4)$$

- d) **Factor de Utilización:** Es el porcentaje sobre las horas operativas en que el equipo realiza tareas efectivas.

$$Factor\ Utilización(\%) = \frac{Tiempo\ efectivo\ (h)}{Tiempo\ disponible\ (h)} * 100 \quad (5)$$

- e) **Producción del Equipo de Carguío:** corresponde a cuánto puede cargar el equipo de carguío. Se obtiene como combinación de las tres ecuaciones anteriores.

$$Producción\ [tph] = DF[\%] * UO[\%] * ROP \left[\frac{ton}{H_{OP}} \right] * tiempo\ nominal[h] \quad (6)$$

- f) **Rendimiento Operativo (Rop.):** corresponde a cuánto se produce por hora. Como es rendimiento “operativo”, corresponde a la producción del turno dividido en las horas operativas del turno (abreviación: Hop.) El rendimiento operativo de la flota será la suma del tonelaje total del turno dividido por la suma de las horas operativas de todos los camiones. Cabe mencionar que la producción está definida por la multiplicación entre la disponibilidad física, la utilización y el rendimiento operativos.

$$\frac{Toneladas}{Horas\ Operativas} = \frac{Producción(t)}{\sum_1^n Tiempo\ Operativo(h)} \quad (7)$$

- g) **Flota de Camiones:** corresponde a la cantidad de camiones que se necesitan para transportar cierta cantidad de material.

Se define a continuación:

$$Flota\ de\ camiones[-] = \frac{Tonelaje\ a\ transportar(tpd)}{rendimiento\ camión(tpd)} \quad (8)$$

3.4 Simulación de eventos discretos

La simulación es una técnica numérica que utiliza relaciones matemáticas y lógicas para describir la estructura y comportamiento de sistemas de la vida real en un ordenador. (Banks, 1999). Se estudian a través de evaluaciones numéricas usando softwares que permiten

realizar corridas simuladas del proceso real bajo distintas condiciones. A pesar de que esta no es la única herramienta para modelar procesos, con frecuencia es la más elegida. Esto se debe a que el modelo de simulación admite una gran complejidad para representar el sistema con exactitud.

Existen distintos tipos de simulación, pero si se habla de un proceso minero, generalmente se utilizan modelos estocásticos de eventos discretos. La simulación de eventos discretos presenta ventajas y desventajas las cuales se listarán a continuación:(García, & Cárdenas, 2006)

Ventajas:

1. Bajo costo de implementación, en contraste con el que implica llevar a cabo los experimentos en la realidad.
2. Genera conocimiento al mostrar el comportamiento del sistema bajo condiciones distintas a las que se dan en la realidad.
3. Ayuda a tomar decisiones, ya muestra lo que puede pasar con ellas de antemano.
4. Permite ver el impacto que tienen distintas variables de la operación en una variable global de interés.
5. Facilidad de uso por el desarrollo de softwares en la actualidad.
6. Su interfaz gráfica permite ver de una manera fácil lo que está ocurriendo.

Desventajas:

1. Alto costo si el proceso simulado es relativamente sencillo.
2. Requiere una gran inversión de trabajo en implementación y búsqueda de información
3. Requiere un dominio estadístico y del software por parte de quien lo aplica.
4. No está diseñada para optimizar, pese a que pueda utilizar optimizadores que mejoren los escenarios simulados.

Su funcionamiento depende de aspectos clave tales como:

1. Número de réplicas.
2. Duración de las réplicas.
3. Relación entre variables.
4. Distribución de las variables.
5. Calidad de la información de entrada.

3.4.1 Modelo Estocástico

Un modelo es estocástico cuando una o más de sus variables de entrada es aleatoria. Las variables del modelo calculadas a partir de variables aleatorias también son aleatorias. Por ello, la evolución de este tipo de sistemas debe estudiarse en términos probabilísticos.

Eventos Discretos

La simulación de eventos discretos se basa en el uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas. Consiste en relacionar los distintos eventos que pueden cambiar el estado del sistema por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas. Las variables del modelo cambian únicamente en determinados instantes de tiempo y en el caso de eventos discretos no existe restricción, el tiempo que transcurre entre eventos consecutivos puede ser cualquiera.

Software Arenas es una plataforma que provee un entorno de trabajo integrado para construir modelos de simulación de una amplia variedad de campos; integra, en un ambiente fácilmente comprensible, todas las funciones necesarias para el desarrollo de una simulación exitosa. Es necesario basarse en los fundamentos de la simulación, que son especificados a continuación:

- **Entidades:** Puede ser un objeto o persona que se mueve a través de un proceso y que causa cambios en las variables de respuesta.

- **Recurso:** Es un elemento estacionario que puede ser ocupado por una entidad. Los recursos se emplean cuando se requiere representar actividades claves del proceso, las cuales restringen el flujo de entidades.
- **Atributo:** Es una característica propia de cada entidad y se pueden definir tantos atributos como lo requiera el usuario para el modelamiento del proceso en estudio.
- **Variables:** Representan características de carácter global del proceso. Pueden ser predeterminadas por el usuario o definidas por el programa.
- **Proceso:** Es un conjunto de componentes interrelacionadas que, en una forma organizada, recibe entradas y las procesa y emite salidas para obtener una meta común.
- **Modelo:** Es una representación de la realidad que se desarrolla con el propósito de estudiarla. En la mayoría de los análisis no es necesario considerar todos los detalles; de tal manera que el modelo no sólo es un sustituto de la realidad, sino también una ejemplificación de ella.
- **Evento:** Es la ocurrencia que cambia el estado del proceso.

3.5 Evaluación de proyectos

3.5.1 Valor presente (VP) y Valor Actual Neto (VAN)

El valor presente de una cantidad de dinero en un determinado período es el equivalente de ese dinero en dinero de hoy. En general, se usan potencias donde el valor presente hoy de un monto C_t recibido en el período t y descontado a una tasa de descuento r es:

$$V_P = \frac{C_t}{(1 + r)^t} \quad (9)$$

El Valor Actual Neto o VAN, se define como la suma del valor presente de todos los flujos del proyecto incluyendo la inversión inicial:

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1 + r)^t} \quad (10)$$

Donde cada C_t representa un flujo de dinero neto (cantidad positiva o negativa) en el período de tiempo t . El VAN es la herramienta más segura para evaluar proyectos, pero también existen otras alternativas entre las que destacan la regla de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Retorno de la Inversión (“payback”).

3.5.2 Valor Actual de Costos (VAC)

El VAC o valor actual de costos se utiliza cuando:

1. Existen beneficios difíciles de valorar, pero se reconoce que son deseables.
2. Los beneficios de dos alternativas son idénticos.
3. En ambos casos se buscan alternativas de mínimo costo.

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Cuando se relaciona el VAC con alguna variable del proyecto, se convierte en indicador costo– eficiencia. Por ejemplo: costo por total de toneladas a producir (mina).

4 Metodología

El estudio se subdividió en distintas etapas, que tienen por finalidad cumplir los objetivos del estudio.

4.1 Definición zona de estudio

Para empezar este estudio, se debe determinar el material al que destinará el equipo y el lugar donde se instalará (Tabla 4.1). Se decidió usarlo para extraer lastre, debido a que se busca aumentar la tasa de extracción con el fin de reducir los costos operación de la pala y el camión. A su vez, se estableció que la fase indicada es la 17, ya que sólo está planificado extraer lastre con una meta de 40.9 [MTon] para el año 2020.

Tabla 4.1: Ventajas y desventajas de emplear el equipo para extraer el material con o sin interés económico.

Mineral		Estéril	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Mayor tasa de extracción en el material de interés económico	Capacidad del Chancador menor a la capacidad de la Tolva Móvil: • Atollamientos de material • Aumento en el tiempo de cola	Mayor cantidad de estéril que de mineral (REM 2,5): • Mayor conveniencia para el uso del equipo • Mayor oportunidad de reducir los costos	No presenta valor económico.
		Se requiere de una rápida extracción para acceder al mineral	

4.2 Etapas del desarrollo del estudio

Para llevar a cabo este trabajo, se definieron las siguientes etapas:

4.2.1 Recolección, gestión y limpieza de datos

Se recopilará la información necesaria para tener una representación global del proceso y obtener, entre otros, los datos del sistema despacho y de la planificación mina. Posteriormente, se realizará una limpieza de éstos para excluir aquellos cuya ocurrencia es imposible.

4.2.2 Modelamiento del Caso Base

Desarrollo de un modelo de simulación del proceso actual de carguío y transporte de estéril desde el tajo hasta el botadero. Para este efecto se utilizarán los datos del sistema Dispatch de los cuales será posible obtener distribuciones de los tiempos de ciclos de trabajo de los camiones. Se usará un 60% de los datos para operar el modelo y el 40% restante para validarlo

4.2.3 Modelación del proceso retador: Tolva Móvil

Considerando la información entregada por la empresa proveedora de la tolva móvil, se configura el modelo de simulación validado, para representar la operación con Tolva Móvil. Con el modelo configurado para Tolva Móvil, se evalúan las mejoras en los tiempos de ciclo y la utilización del sistema de manejo de materiales, es decir, pala, tolva móvil y camión.

4.2.4 Propuesta de valor

Con los flujos de costos del proceso actual y el nuevo se calcula un VAC de cada proceso, para mediante la comparación directa, evaluar el impacto del cambio de proceso.

5 Desarrollo

5.1 Recolección, procesamiento y gestión de datos

5.1.1 Datos de la mina

Para el presente estudio se tiene acceso a datos de “dispatch” de la mina Spence, con la cual se obtienen los registros de un año de los eventos de descarga de material en los botaderos por parte de los camiones desde la fase 17, entre enero a diciembre 2019, con un total de **406.288 de registros** para todos los orígenes y destinos de la mina en cuestión. Originalmente la base de datos tiene para cada registro la fecha, datos de equipos asociados y los tiempos de ciclo desglosados, los cuales se ocuparán para este estudio.

Si se obtienen las estadísticas básicas de los datos sin limpiar (ningún tipo de filtro) se tiene que existen diferentes tiempos que son aberrantes en relación con el tipo de labor que como lo indica la Tabla 5.1, por ejemplo, tiempos de aculatamiento nulos o de valores muy bajos son físicamente imposibles, dado que corresponde al desplazamiento del camión desde un punto a otro. También pasa lo contrario, hay presentes valores muy altos que no tienen sentido bajo la arista que se analicen. De forma análoga se tiene lo mismo para otros tiempos, tales como tiempos de carga, descarga, viajes de ida y vuelta, y distancias. Para definir los rangos de tiempo, se tomó el criterio de los líderes de carguío de Spence y otros profesionales del área.

Tabla 5.1: *Tiempos desglosados sin limpiar provenientes de “dispatch” del ciclo del camión durante el año 2019.*

Ítem	Unidad	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv.Est.
Tiempo de carguío	Segundos	406287	0	3809	63.52	66.25
Tiempo de aculatamiento	Segundos	406287	0	17933	137.78	138.74
Tiempo viaje ida	Segundos	406287	0	22251	870.68	421.78
Tiempo viaje vuelta	Segundos	406287	0	27747	643.38	580.45

Descarga	Segundos	406287	0	16865	68.12	137.23
Total del ciclo	Segundos	406287	0	28470	1871.83	801.35

5.1.2 Limpieza de datos

Con el fin de filtrar aquellos datos que no reflejan el comportamiento real de la operación es que se tienen que definir nuevos máximos y mínimos (Tabla 5.2), si es que lo amerita el caso. En base al criterio experto de las personas que trabajan en faena.

Tabla 5.2: Datos estadísticos obtenidos posterior a la limpieza de los tiempos de camión durante el año 2019.

Ítem	Unidad	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv.Est.
Tiempo de carguío	Segundos	223754	20	90	62	18.3
Tiempo de aculatamiento	Segundos	171718	15	80	56	15.3
Tiempo viaje ida	Segundos	199561	900	1800	1130	177
Tiempo viaje vuelta	Segundos	60494	900	1800	1220	255
Descarga	Segundos	189433	30	90	59.8	15.6
Total del ciclo	Segundos	231133	1750	3770	1680	801.35

5.1.3 Distribución de tiempos

Una vez con los datos limpios es posible calcular las distribuciones que siguen los distintos tiempos obtenidos. Lo anterior permitirá ingresar estas distribuciones en el modelo de simulación que se construirá, lo que aportará parte de la variabilidad que se tiene en la operación misma. Usando el software “Input Analyzer” que viene junto a Arenas es posible estimar las distribuciones a partir de los datos de “dispatch”. El software ajusta las distribuciones en función de la que presenta menos error en comparación con los datos reales (Capítulo 8.1). Da la casualidad de que todos los tiempos se ajustan a la distribución beta.

La distribución beta es posible para una variable aleatoria continua que toma valores en el intervalo $[0,1]$, lo que la hace muy apropiada para modelar proporciones. Uno de los principales recursos de esta distribución es el ajuste a una gran variedad de distribuciones empíricas, pues adopta formas muy diversas dependiendo de cuáles sean los valores de los parámetros de forma α y β , mediante los que viene definida la distribución. En este caso, el software “Input Analyzer”, arroja esos valores.

A continuación, se muestran los gráficos de cada uno de los tiempos.

Gráfico 5.1: Distribución del tiempo de aculatamiento durante el año 2019.

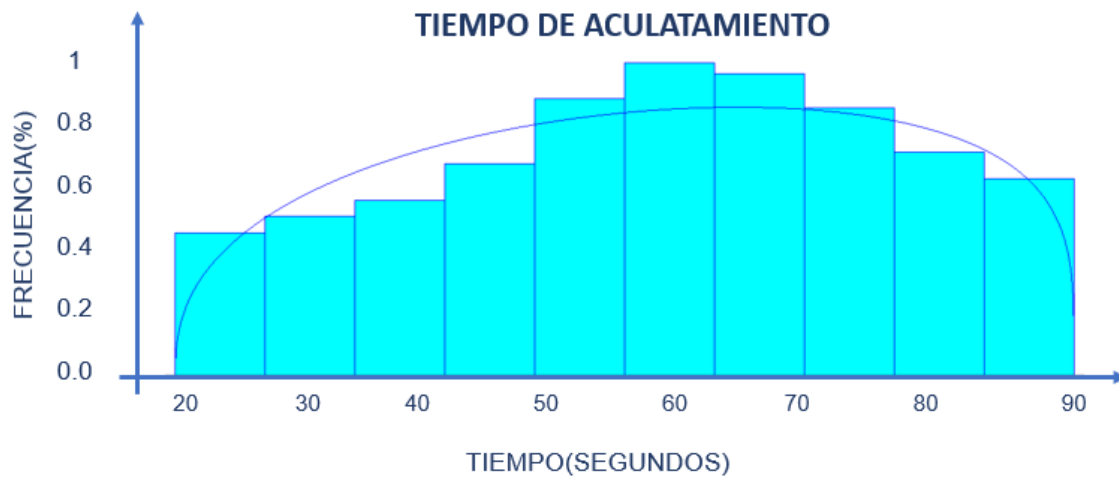


Gráfico 5.2: Distribución del tiempo de carguío durante el año 2019.



Gráfico 5.3: Distribución del tiempo de viaje lleno durante el año 2019.



Gráfico 5.4: Distribución del tiempo de viaje vacío durante el 2019.

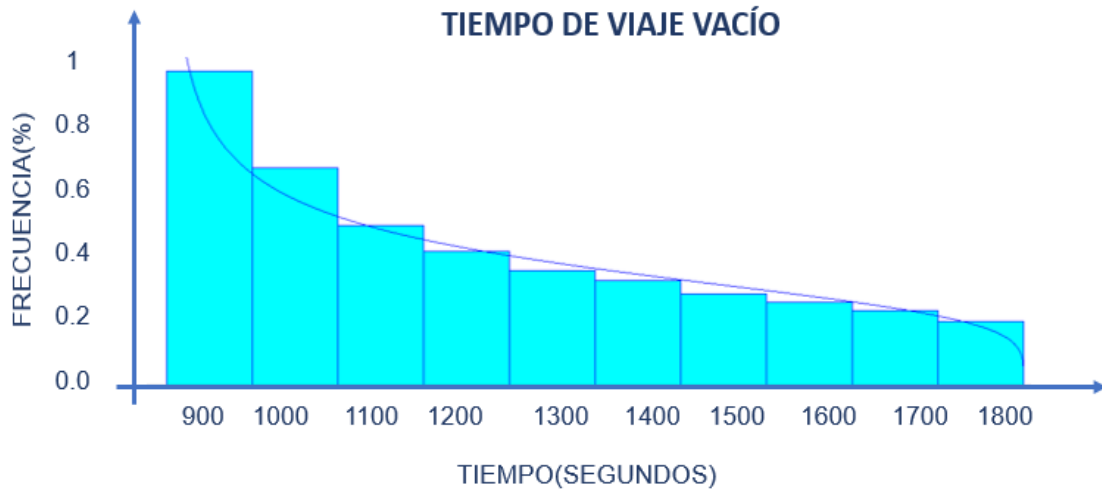


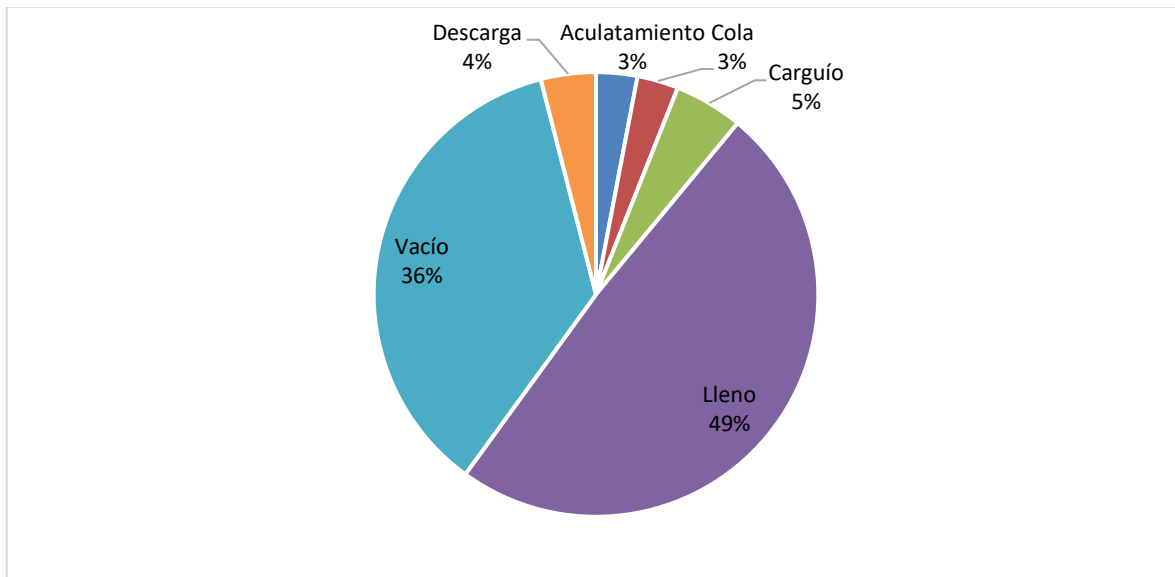
Gráfico 5.5: Distribución del tiempo de descarga durante el año 2019.



5.2 Diseño de aplicación de la Tolva Móvil

Como indica el Gráfico 5.6, los procesos que representan un mayor porcentaje son los tiempos de ida lleno y vuelta vacía, lo cual es justificable ya que están asociados a las extensas distancias entre los distintos puntos de vaciado (botaderos) con los puntos de carguío.

Gráfico 5.6: Distribución del ciclo de tiempo completo del camión en Spence durante el año 2019 para lastre.



El ciclo de carguío está constituido por los tiempos de acuatamiento y carguío. Que como se muestra en Gráfico 5.6, representan un 8 % del ciclo total del camión. Tomando el ciclo promedio 30 [min], estos tiempos en la realidad corresponden a 2,4 [min] del ciclo total. Es decir, si el objetivo es reducirlos, la incidencia dentro del ciclo es baja desde el punto de vista de los camiones, no obstante, si lo miramos desde la perspectiva de la pala es significativo (Tabla 5.3 y Tabla 5.4).

Para esta investigación, independiente de que sólo se ven afectados estos dos tiempos (tiempo de carguío y acuatamiento), se realizará un estudio del ciclo completo. Con el objeto de obtener una aproximación lo más cercana posible a la realidad. Se hará un contraste entre los resultados de este estudio con la propuesta del fabricante.

Para entender a fondo esto, se debe conocer el detalle de los tiempos de carguío en las distintas flotas, donde para el caso Caterpillar el carguío se realiza en 50 [segundos]. En este caso, la pala realiza dos baldadas y libera al camión. Para los Komatsu, el llenado se hace en 75 [segundos], es decir, se requieren de 3 baldadas para colmar al camión. En ambas situaciones, el acuatamiento es de 56 [segundos] promedio. Por lo que el primer caso, suma 106 [segundos] y otro, 131 [segundos]. La diferencia entre los valores reales

de la mina y aquellos utilizados por MMD (Tabla 5.3 y Tabla 5.4) es significativa, ya que, es del orden de un minuto.

Tabla 5.3 Comparativa de tiempos entre lo que propone el fabricante y la realidad en Spence, para camiones Caterpillar.

Tiempo	Unidad	Pala- Caterpillar	Tolva Móvil - Caterpillar
Acuatamiento	Segundos	56	20
Carguío	Segundos	50	57
Total	Segundos	106	77

Tabla 5.4: Comparativa de tiempos entre lo que propone el fabricante y la realidad en Spence, para camiones Komatsu.

Tiempo	Unidad	Pala-Komatsu	Tolva Móvil – Komatsu
Acuatamiento	Segundos	56	20
Carguío	Segundos	75	84
Total	Segundos	131	104

Si en lugar de utilizar los tiempos estándar de carga por pase, se calcula el tiempo de carga del camión a partir de la capacidad del alimentador la tolva móvil (15.000 [ton/h]), se tiene los tiempos de la Tabla 2.4, en que el tiempo de carga se reduciría a 84 [segundos] y el total de ambas operaciones bajaría a 104 [segundos] y 77 [segundos]. Esta cifra es menor que el tiempo medio de carguío y acuatamiento de Spence con sistema convencional. En ambos casos, la tolva móvil puede contribuir a acortar los ciclos de los camiones.

Como se muestran en las tablas, el tiempo de carguío aumentaría mientras que el de acuatamiento se reduciría, ya que el camión debe estacionarse y salir. Lo hace en un tiempo pequeño, por lo que la ganancia se encuentra ahí y representa 30 [segundos] menos del ciclo, que en términos del ciclo represan 27% del tiempo para caterpillar y 26% para los camiones Komatsu y no el 50% que se planteaba originalmente.

Además, el fabricante ha hecho notar que en la puesta marcha del equipo en Kennecot, se llegó a alimentar 27.000 [ton/h] cargando un camión 360 [ton] en 45 [segundos]. Lo que en el escenario de Spence no es realista ya que considerando los factores de utilización, disponibilidad y tiempo de ciclo lo máximo que podría llegar hacer la pala son 8670 y 8324 [ton/h], para los camiones Caterpillar y Komatsu, respectivamente.

5.3 Simulación del caso

5.3.1.1 Modelo conceptual

El modelo conceptual es la representación del proceso en estudio, que sirve como un diagrama de los procesos que se modelarán. El modelo conceptual tiene que declarar el objetivo que se busca y las limitaciones de interpretaciones que tiene. Este modelo debe tener un nivel de detalle suficiente que sirva como guía de construcción del modelo computacional.

5.3.1.2 Objetivo

Representar el proceso de carguío y transporte con la Tolva Móvil en Spence , que comprende el ciclo completo que debe realizar el camión con la incorporación desde que espera a ser cargado, el aculatamiento, el carguío, el viaje de ida a vaciar, maniobras de aculatamiento para descargar, vaciado, maniobras para salir de la zona de descarga y regreso a la cola de carguío.

5.3.1.3 Alcance

- El modelo solo toma en consideración las distribuciones de tiempo que afectan al ciclo de carguío en estudio.
- El modelo considera las capacidades de los camiones Komatsu y Caterpillar y la capacidad de la Tolva Móvil.
- Se trabaja solo con datos obtenidos directamente en Mina Spence y los valores propuestos por el fabricante.

- El proceso de carguío no presenta interferencias dentro del modelo. Posteriormente, se aplicarán la utilización y disponibilidad reales de la mina, para obtener los valores efectivos.

5.3.1.4 Elementos principales

- Equipos

El modelo se puede configurar considerando cualquier combinación de los siguientes equipos: camiones Caterpillar, camiones Komatsu, Tolva Móvil y pala P&H, de los cuales se necesita indicar la capacidad del balde y tolvas, según corresponda.

- Actividades de la producción

Tabla 5.5: Variables de estudio usadas en la simulación de cada caso.

Caso Base / Tolva Móvil
Tiempo de espera de camión
Maniobras de aculatamiento
Operación de cargar el camión con la pala
Transporte de material desde la pala al lugar de destino
Descarga de material
Retorno del equipo

La Figura 5.1 muestra el modelo que se implementó en el software Arenas para representar el caso base, tomando los parámetros establecidos en la Tabla 5.1. Éste se simuló por 25 días para distintas flotas de camiones en el proceso de carguío. Para el caso de los Caterpillar, se simulan de 5 a 20 camiones, mientras que en el caso Komatsu de 5 a 15 camiones. El modelo

que se usa de caso base, también se ocupa para el caso de la Tolva Móvil, donde lo que cambia es la configuración de los parámetros.

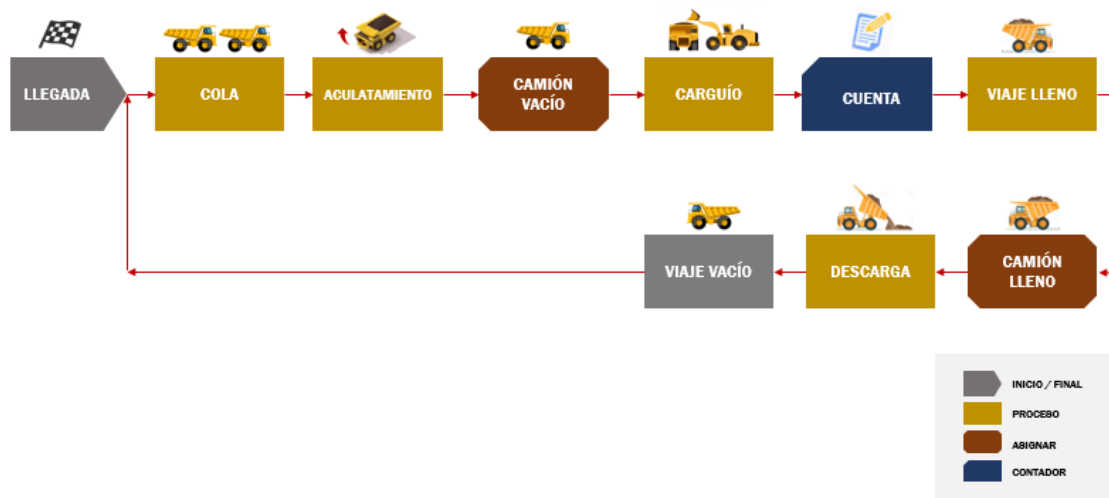


Figura 5.1: Modelo del caso base del ciclo de carguío y transporte de un camión en Spence, puesto en marcha en Arenas.

5.3.2 Parámetros y variables de entrada

Para comenzar la simulación es necesario disponer de una serie de parámetros iniciales, se simularán 4 casos, dos caterpillar y dos Komatsu, donde cada uno tendrá un caso base y otro caso Tolva Móvil. El estudio está centrado en el comportamiento de los camiones, que se detallan a continuación:

5.3.2.1 Camiones

El uso de éstos es fundamental para transportar el material, trasladándolo desde el frente de carguío hasta el punto de vaciado, que en este caso sería el botadero. Se simulan distintas flotas para explorar con qué cantidad de camiones se logra cumplir la meta de producción en casos base y Tolva Móvil y si hay algún tamaño de flota en que la Tolva Móvil que tenga mayor impacto. Debido al escenario base de esta investigación, se mantuvo constante viaje lleno, descarga y viaje vacío. Se modificaron los tonelajes, los tiempos de aculatamiento y carguío (Tabla 5.6).

Tabla 5.6: Variables de interés ocupadas en la simulación de los camiones.

Caso			Caso base		Tolva Móvil	
Camión		Unidad	Komatsu	Caterpillar	Komatsu	Caterpillar
Capacidad		Toneladas	315	220	360	240
Tiempos de ciclo	Aculatamiento	Segundos	56	56	20	20
	Carguío	Segundos	75	50	85	57

Tabla 5.7: Parámetros de estudio que se mantuvieron constante.

Tiempos de ciclo	Unidad	Distribución	Camión Komatsu y Caterpillar
Viaje lleno	Segundos	Beta	[900,1800]
Descarga	Segundos	Beta	[20,90]
Viaje vacío	Segundos	Beta	[900,1800]

5.3.2.2 Tolva Móvil

Los detalles técnicos que interesan para efectos de la modelación son los siguientes:

Tabla 5.8: Descripción técnica del equipo Tolva Móvil.

Equipo	Modelo	Capacidad Tolva(toneladas)	Distribución
Tolva Móvil	D10	720	Constante

5.3.3 Parámetros y variables de salida

El simulador procesa las corridas y registra los resultados en un archivo Excel (Capítulo 8.2) con los siguientes parámetros:

Tabla 5.9: Parámetros de salida de las simulaciones realizadas.

Parámetro	Unidad
Tonelaje por Camión	Toneladas
Baldadas	#
Número de camiones	#
Tiempo de cola	Segundos
Camiones en cola	#
Tiempo de ciclo	Minutos

5.4 Resultados de la simulación

A continuación, se detallará los resultados que entregará la simulación para la pala y los camiones.

5.4.1 Pala

Para ambos casos simulados, la utilización de la pala aumenta en la medida en que el aculatamiento disminuye, ya que se transforman en segundos ganados que la pala va a poder utilizar para seguir llenando la Tolva Móvil (Tabla 5.10).

Tabla 5.10: Utilización obtenida para el Caso Base y la Tolva Móvil, con respecto a la utilización real de Spence.

Utilización	Unidad	Caterpillar	Komatsu
Convencional	%	80	80
Tolva Móvil	%	84	88
Aumento	%	4	8

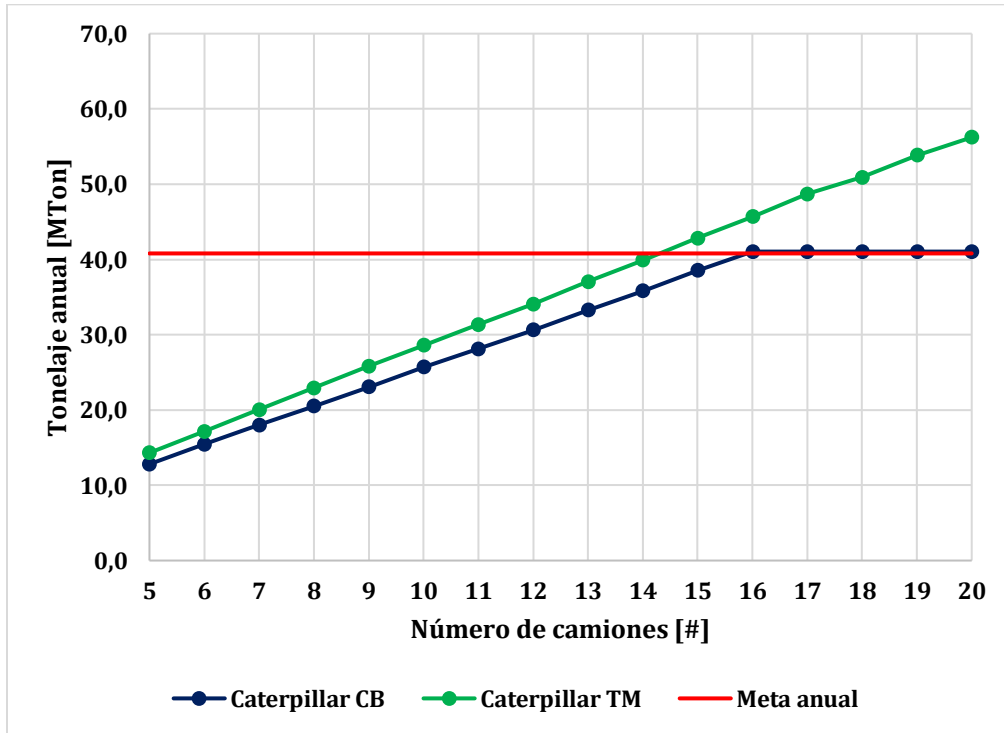
5.4.2 Camiones

Para que este estudio diera resultados comparables se definió un rendimiento máximo para ambas flotas, de 4686 [ton/h], lo que también permitiría conseguir la producción de material no valioso planificada. Este valor coincide con el rendimiento máximo de la flota Caterpillar para el caso convencional.

5.4.2.1 Caso Caterpillar

- **Producción anual**

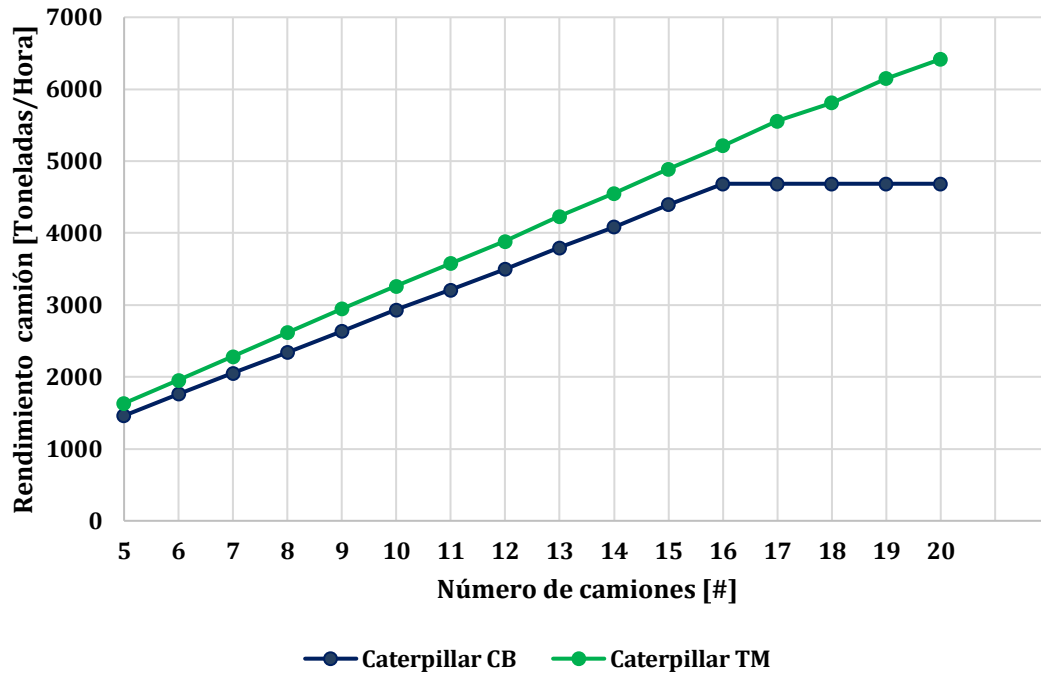
Gráfico 5.7: Tonelaje anual calculado de las simulaciones para el caso Caterpillar. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.



En el Gráfico 5.7 se visualiza que con Tolva Móvil es posible obtener mayores tonelajes anuales con la misma flota de camiones. Para el caso convencional, se requiere de 16 camiones mientras que, para el caso retador, se necesitan 15, es decir, se produce el ahorro de un camión. También, es posible observar que para el Caso Base con 16 camiones se estabiliza la producción mientras que para la Tolva Móvil se hace para 20 camiones, llegando a una producción mucho mayor de 56,2 [Mton] con el máximo de flota disponible.

- **Rendimiento de la flota de camión**

Gráfico 5.8: Rendimiento promedio obtenido los escenarios simulados para el caso Caterpillar. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.



Similar al Gráfico 5.8 se visualiza la tendencia a apuntar a un determinado rendimiento y estabilizarse. Para el caso en estudio, se requieren 4686 [ton/h], lo que representa un incremento de 11,4 % en comparación al caso real. Sin embargo, se podrían alcanzar mayores valores, específicamente 31,0% más de lo que se trabaja. Asimismo, el fabricante plantea un rendimiento (15000 [ton/h]), valor que se podría obtener si es que la flota de camiones fuera de 46 para cada pala y no 20.

- **Ciclos**

Para el caso de estudio, en el Gráfico 5.9 se observa un aumento de ciclos de 3,8%, pero podría llegar a un 11,3% más si se usará en su máximo rendimiento. Ese 3,8% corresponde a 22 ciclos más por día. Respecto al tiempo de ciclo del Gráfico 5.10, se visualiza que los ciclos promedios son del orden de 30,5 [min], lo que es acorde a lo que sucede a la realidad en el Caso Base. Mientras que, con la incorporación de la Tolva Móvil, los tiempos promedio de ciclo disminuirán respecto al ciclo normal 29 [segundos]. Esta reducción representa un 1,6% menos que el ciclo normal.

Gráfico 5.9: Promedio diario de ciclos obtenidos por flota durante 25 días para el caso Caterpillar. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

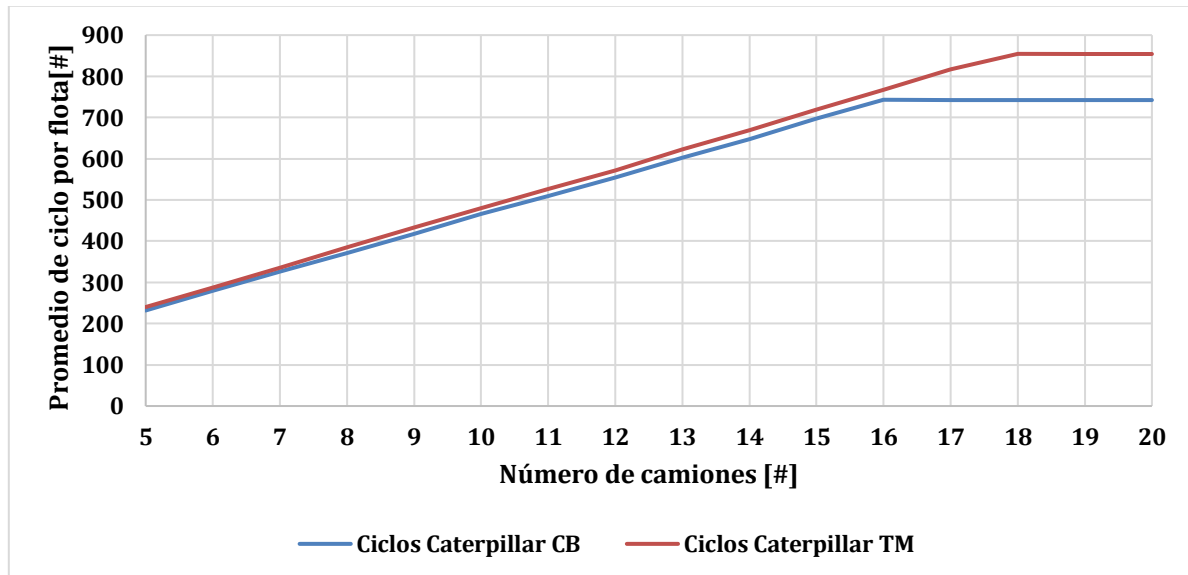
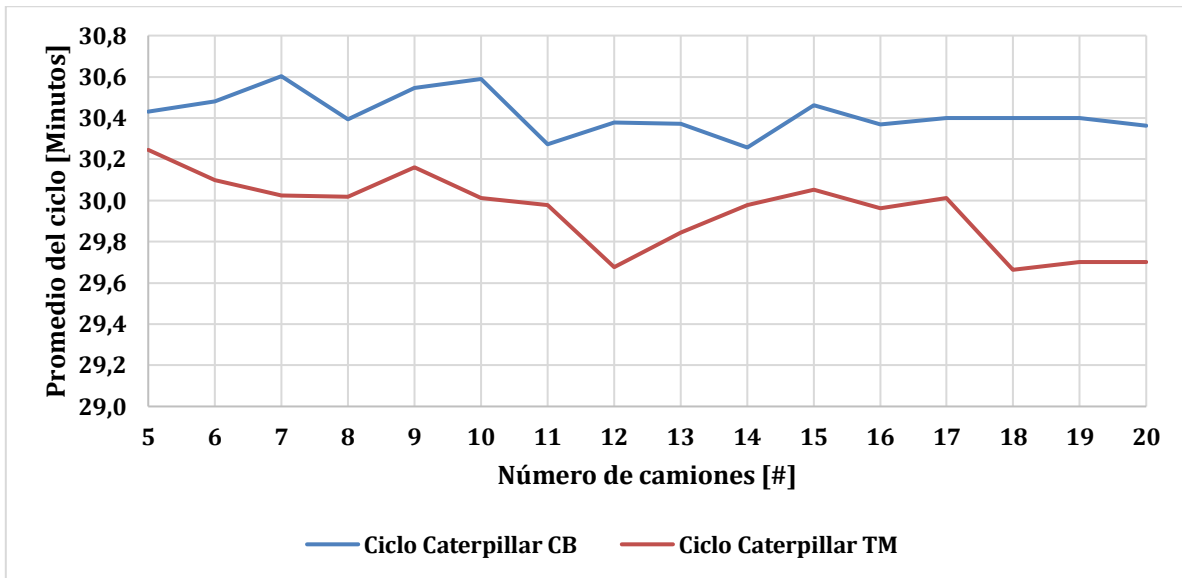


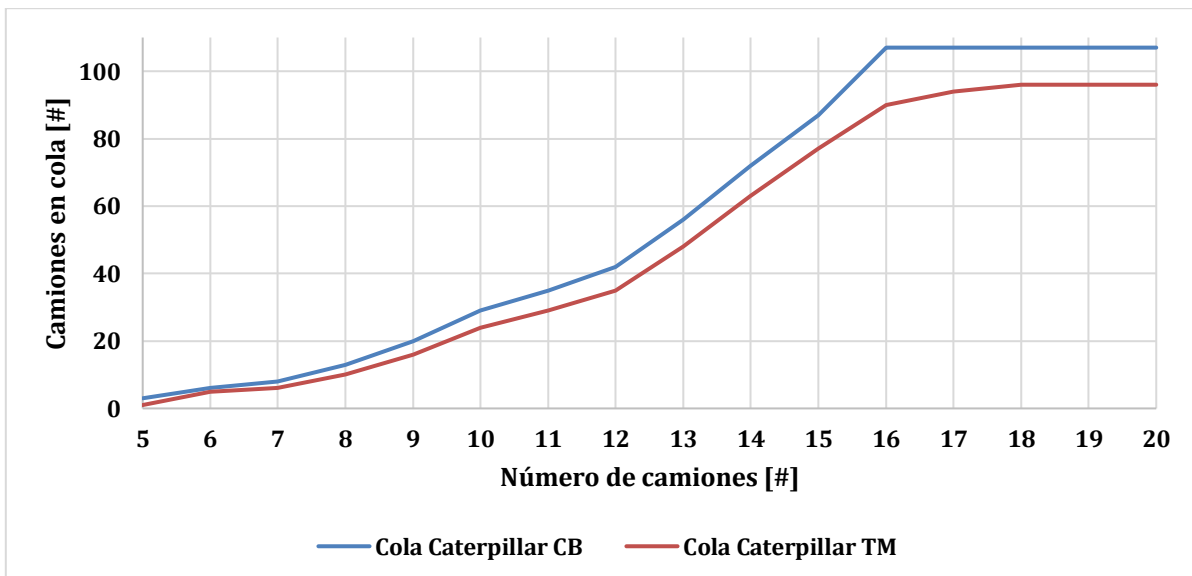
Gráfico 5.10: Promedio de ciclos de tiempo obtenidos por flota durante 25 días para el caso Caterpillar. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.



- **Tiempos de colas**

De la simulación modelada, como

Gráfico 5.11: Camiones en cola por flota durante 25 días para el caso Caterpillar. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

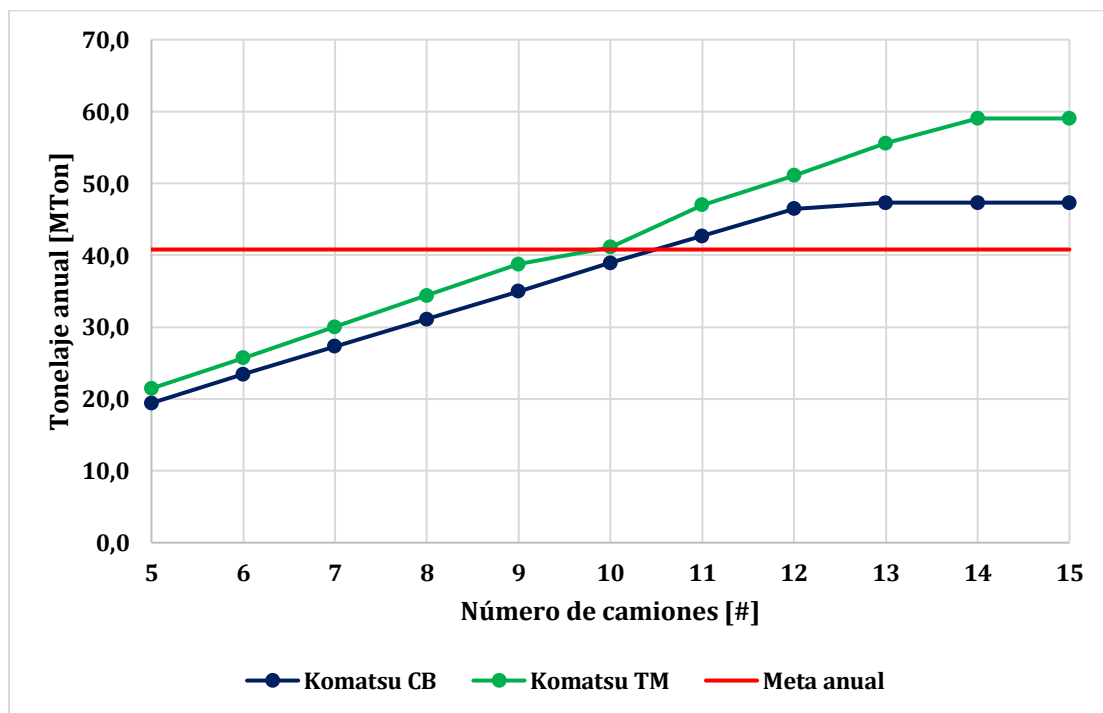


En el Gráfico 5.11 , se produce una reducción de 17,4% diaria camiones en cola y para el caso de estudio de 11,49%, eso significa que originalmente un camión se posicionaba en la cola 87 veces al día y ahora lo hace 10 veces menos. Paralelo a esto, el tiempo de cola disminuye en 33,3 %, que implican entre 15 segundos menos por ciclo en que el camión se encuentre en cola respecto a los 45 promedios original.

5.4.2.2 Caso Komatsu

- **Producción Anual**

Gráfico 5.12: Tonelaje anual calculado de las simulaciones para el caso Komatsu. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

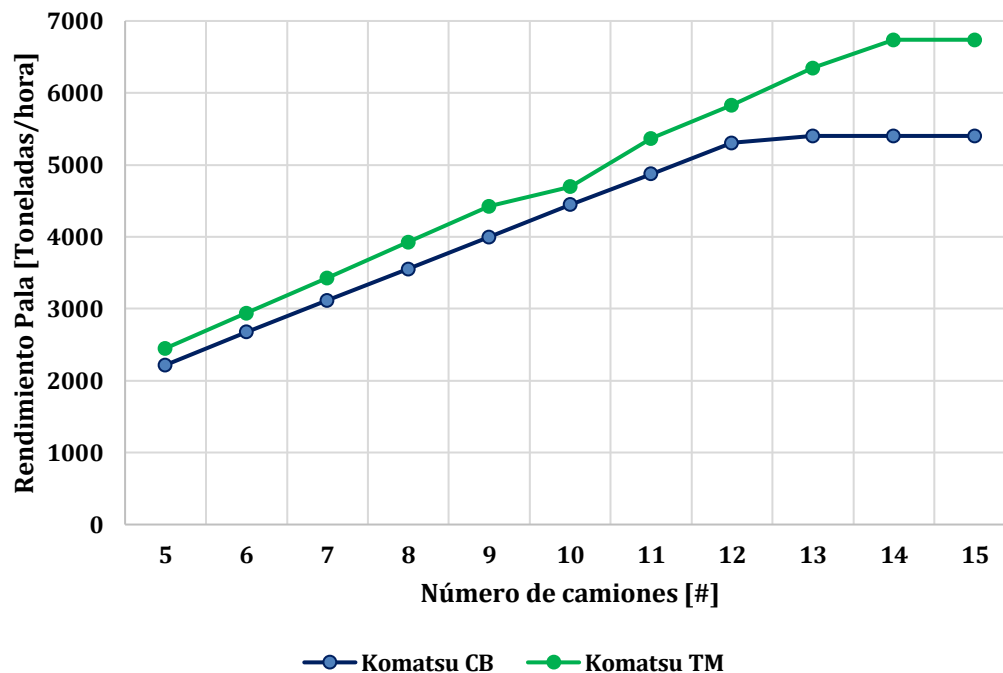


En el Gráfico 5.12 se observa que con Tolva Móvil es posible obtener mayores tonelajes anuales con la misma flota de camiones. Para el caso convencional, se requiere de 11 camiones mientras que, para el caso retador, se necesitan 10, es decir, se produce el ahorro

de un camión. A su vez, es posible observar que para el Caso Base con 13 camiones se estabiliza la producción mientras que para la Tolva Móvil se hace para 14 camiones, llegando a una producción mucho mayor 59 [Mtoneladas] con el máximo de flota disponible.

- **Rendimiento flota de camión**

Gráfico 5.13: Rendimiento promedio obtenido los escenarios simulados para el caso Komatsu. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.



Equivalente al Gráfico 5.13 se observa la tendencia a apuntar a un determinado rendimiento y estabilizarse. Para el caso en estudio, se requieren 4686 [ton/h], lo que representa un incremento de 10,7 % en comparación al caso real. No obstante, se podrían alcanzar mayores valores, específicamente 27,0% más de lo que se trabaja. Igualmente, el fabricante plantea un rendimiento (15.000 [ton/h]), valor que se podría obtener si es que la flota de camiones fuera de 31 para cada pala y no 15.

- **Ciclos**

Para el caso Komatsu, en el Gráfico 5.14 se observa una reducción de 3,3%, pero podría alcanzar un 11,3% de ciclos menos si se usará en su máximo rendimiento. Ese 3,3% corresponde a 14 ciclos menos por camión. Respecto al tiempo de ciclo del Gráfico 5.15, se visualiza que los ciclos promedios son del orden de 29,5 [*minutos*], lo que es afín a lo que sucede a la realidad en el Caso Base. Mientras que, con la incorporación de la Tolva Móvil, los tiempos promedio de ciclo disminuirán respecto al ciclo normal 25 [*segundos*]. Esta reducción representa un 1,4% menos que el ciclo normal.

Gráfico 5.14: Promedio de ciclos obtenidos por flota durante 25 días para el caso Komatsu. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

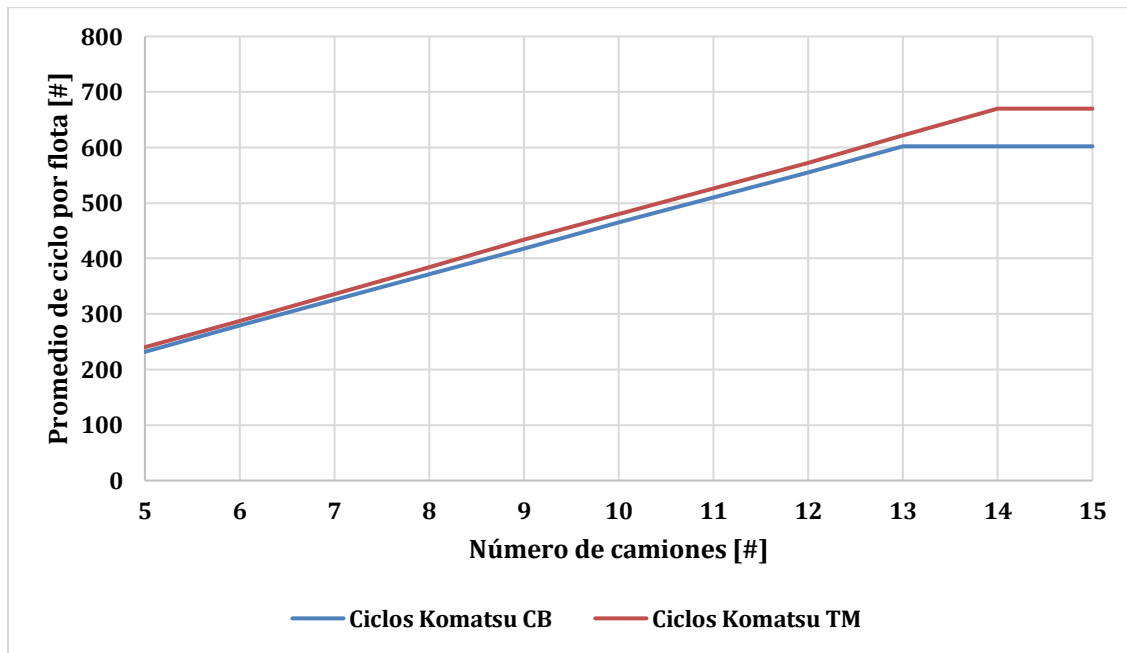
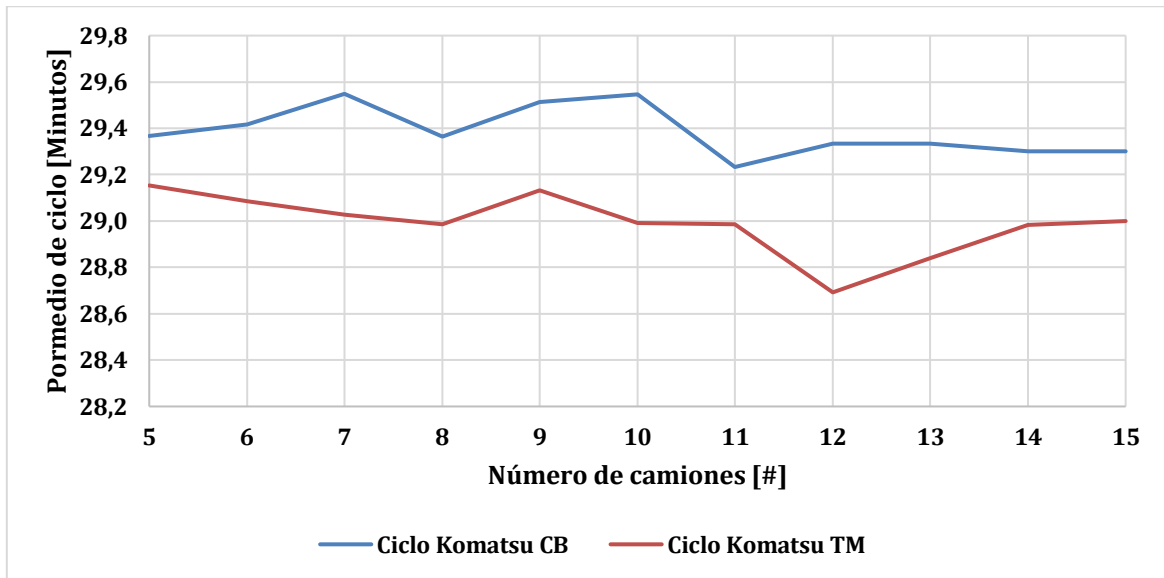
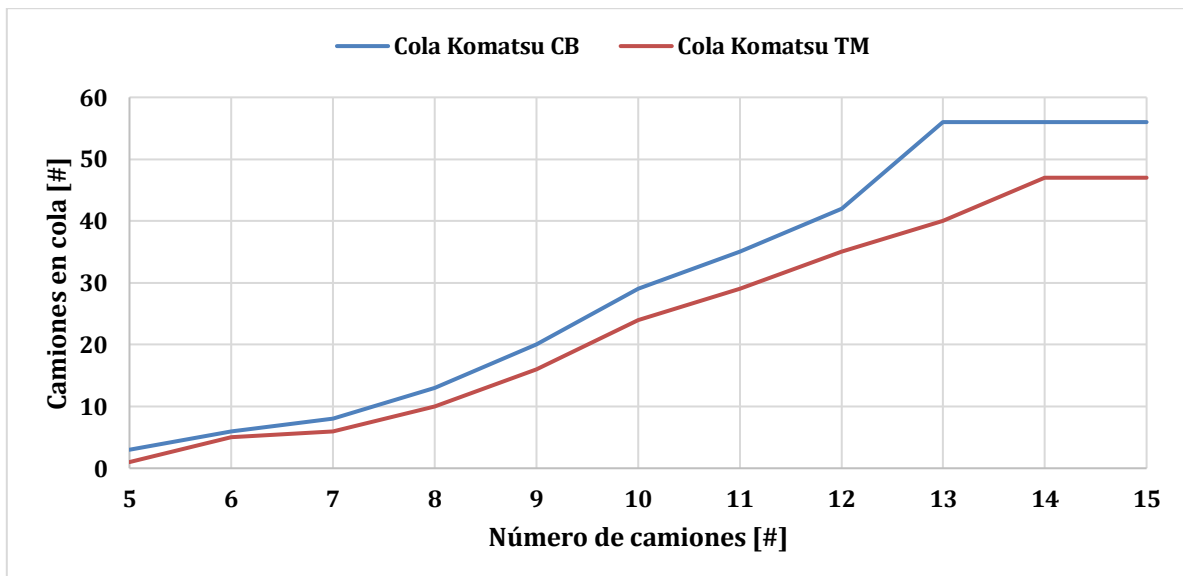


Gráfico 5.15: Promedio de ciclos de tiempo obtenidos por flota durante 25 días para el caso Komatsu. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.



- **Tiempo de colas**

Gráfico 5.16: Camiones en cola por flota durante 25 días para el caso Komatsu. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.



En el Gráfico 5.16, se produce una reducción de camiones en cola 18,5% diario y para el caso de estudio de 17,2%, eso significa que originalmente un camión se posicionaba en la cola 29 veces al día y ahora lo hace 5 veces menos. Paralelo a esto, el tiempo de cola disminuye en 22,2 %, que implican entre 10 segundos menos por ciclo en que el camión se encuentre en cola, respecto a los 45 segundos originales.

5.5 Análisis de los resultados operativos

5.5.1 Producción y Rendimiento

En ambas flotas, se requiere de un equipo menos para cumplir la producción. Específicamente, se necesita de 10 camiones para el caso Komatsu y 15 camiones para el caso Caterpillar, con un rendimiento fijo de 4686 [ton/h]. Sin embargo, es importante señalar que, al utilizar la Tolva Móvil, se podrían conseguir mayores rendimientos por camión, pero no era el objetivo del estudio. Los máximos rendimientos que se pueden alcanzar con la Tolva Móvil son de 6418 [ton/h] para los camiones Caterpillar y 6739 [ton/h] para los camiones Komatsu.

Con respecto a la propuesta del fabricante, respecto a la tasa de producción, no se logra alcanzar el mínimo propuesto. Se obtiene un 10% promedio de aumento en comparación con el 15% mínimo y se está muy lejos de los valores máximos de 40% para el caso de estudio. No obstante, cuando se alcancen los rendimientos máximos es posible conseguir un 27% y 31%, para los camiones Komatsu y Caterpillar, respectivamente. Con respecto a la utilización de la pala, para el caso Caterpillar se llega un 84% y para el Komatsu un 88%, valores que incrementaron, pero no lo suficiente como para llegar al 95%.

La capacidad del equipo no se logra aprovechar con la flota de camiones Caterpillar ni Komatsu, recordar que se podía llegar a un rendimiento de hasta 15.000 [ton/h], bajo las condiciones en que se encuentra Spence se aprovecha un 30% del equipo. Para llegar a esos rendimientos se necesitan 46 camiones caterpillar y 31 camiones, más de la flota existente.

Ahora, si es que se utilizarán los rendimientos mayores, su uso se incrementaría en un 13% más.

5.5.2 Ciclos

Los resultados obtenidos demostraron que el efecto que tiene el equipo sobre los tiempos muertos de los camiones es ínfimo, la reducción de tiempo es de 1,4% y 1,6% para los camiones Caterpillar y Komatsu, respectivamente. Estos porcentajes representan 25 y 29 [segundos] menos del ciclo total del camión. Considerando que en el ciclo actual la suma del tiempo de carguío y aculataamiento, representan un 8%, no es de extrañar que su efecto fuera marginal.

Desde el punto de vista del ciclo de carguío, hay una reducción de un 27,3% y 25,9% del ciclo, para el caso Caterpillar y Komatsu, respectivamente. Según el fabricante debía ser de 50%, valor al que no se consigue, debido a que sus valores de estimación de los tiempos de carguío usados por MMD son superiores a la realidad de Spence.

5.6 Análisis económico

Para empezar esta sección se deben conocer los valores de los equipos en estudio, lo que se indican a continuación en la siguiente Tabla 5.11:

Tabla 5.11: Costos de inversión y operación de los equipos en estudio.

Equipo	Unidad	Caterpillar 793	Komatsu 980-E	P&H 4100XPC	Tolva Móvil D10
CAPEX	MUS\$	2.9	4.4	25	18
OPEX	US\$/h operativa/camión	Valor restringido	Valor restringido	Valor restringido	Valor restringido

Con los datos presentados, se construyen tres tablas adicionales (más abajo), para determinar el costo anual por cada equipo. Para obtenerlo, primero se calculan las horas destinadas a trabajar por año por camión (se agregan los factores de utilización y disponibilidad correspondiente), luego se multiplican por la flota dependiendo si es Caso Base o Tolva Móvil y finalmente, se multiplican por su determinado OPEX (Tabla 5.11) y así se obtienen los valores buscados (Tabla 5.12, Tabla 5.13 y Tabla 5.14).

Tabla 5.12: Costo anual de los casos Caterpillar. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

	Unidad	Caso base	Tolva móvil
Camiones Caterpillar	#	16	15
Horas al año por camión	Horas/Camión	6058,4	6058,4
Horas totales trabajo de camiones	Horas/Camión	96934,7	90876,2
OPEX	US\$/h operativa/camión	Valor restringido	Valor restringido
OPEX	MUS\$	16,3	15,3

Tabla 5.13: Costo anual de los casos Komatsu. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

	Unidad	Caso base	Tolva móvil
Camiones Komatsu	#	11	10
Horas al año por camión	Horas/Camión	6058,4	6058,4
Horas totales trabajo de camiones	Horas/Camión	66642,6	60584,2
OPEX	US\$/h	Valor Restringido	Valor Restringido
OPEX	MUS\$	16,0	14,6

Tabla 5.14: Costo anual pala. Donde CB es Caso Base y TM es Tolva Móvil.

	Unidad	Valor
Horas al año pala	Horas	5466
Horas al año pala TM CAT	Horas/Pala Cat	3971
Horas al año pala TM KOM	Horas/Pala K	3782
OPEX pala	US\$/h	Valor restringido
OPEX al año pala	MUS\$	3,3
OPEX al año pala TM CAT	MUS\$	2,4
OPEX al año pala TM KOM	MUS\$	2,3

Respecto a la comparación de costos anuales entre el Caso Base y Tolva Móvil, se advierte que la flota de camiones Komatsu es más beneficiosa económicamente que los Caterpillar, donde con los primeros se obtiene 1,46 [MUSD] en comparación con los segundos que se logran 1,02 [MUSD]. Es una diferencia de 0,44 [MUSD] y cinco camiones Caterpillar. Con la pala se logra un ahorro bastante parejo entre las dos flotas, 2,3 y 2,4 [MUSD], donde la primera es la Caterpillar y la segunda es Komatsu.

Ahora, con estos cálculos anuales se quiere determinar si este equipo es realmente viable, para eso se van a comparar los VAC de cada caso, en un período de 10 años a una tasa de interés del 8%. Y así finalmente, determinar si el equipo realmente genera un ahorro. Para este cálculo, además, se considera como ingreso que el camión que no se va a requerir, se venda a un 30% de su valor original. Para más información ir a Capítulo 8.4.

Gráfico 5.17: VAC del caso Caterpillar, en un período de 10 años. Donde VAC es valor actual de costo por año y VACa es el valor actual de costos acumulados.

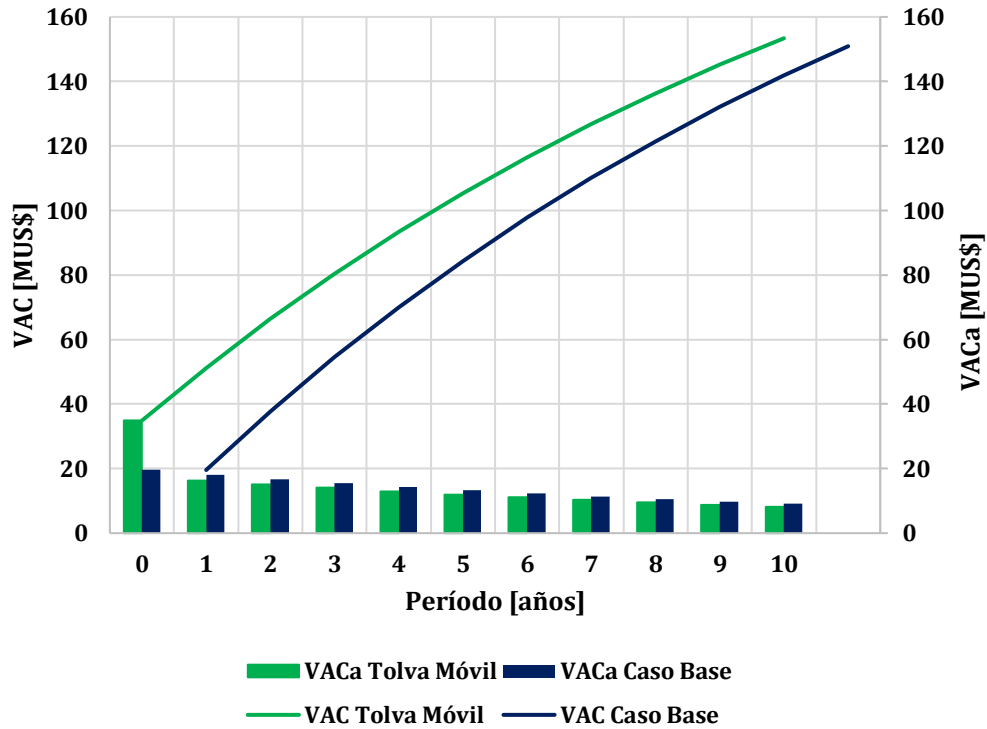
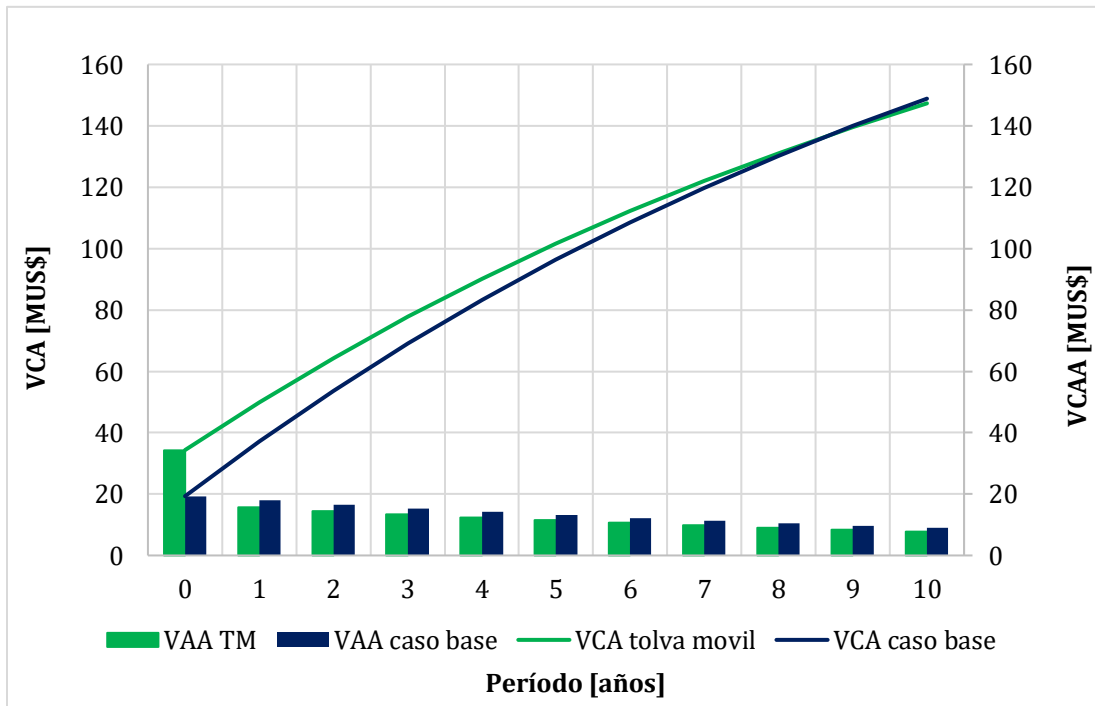


Gráfico 5.18: VAC del caso Komatsu, en un período de 10 años. Donde VAC es valor actual de costo por año y VACa es el valor actual de costos acumulados.



En los Gráfico 5.17 y Gráfico 5.18, se observa que en el año 0 se producen los costos más altos y esto se debe a la gran inversión que supone el equipo, coincidente para ambos casos. Posteriormente, las curvas de VACa del caso Tolva Móvil tienden a acercarse, ocurriendo dos fenómenos: para el caso Caterpillar es más costoso incluir el equipo a la operación que dejarla como está actualmente, de hecho, se gastan 2.5 [*MUSD*] más. Y para el caso Komatsu, se logra generar un ahorro de 1.6 [*MUSD*], aun así, ese valor no es suficiente para compensar el colocar el equipo en operación. Por lo tanto, el ahorro en costo no es capaz de conseguir que se pague el CAPEX de forma significativa.

6 Conclusiones

No es negocio incorporar la Tolva Móvil a la operación minera Spence, ya que producir más en menos tiempo no genera el ahorro económico esperado. Para el caso Caterpillar se produjo una pérdida de 2,5 [*MUSD*] y para la flota Komatsu un ahorro de 1,5 [*MUSD*]. Donde para poder invertir en una tecnología se debe recuperar mínimo el 30% del ahorro original que en este caso, serían 45,3 [*MUSD*] para el caso Caterpillar y 44,7 [*MUSD*] para el caso Komatsu. Los valores mínimos convenientes para realizar la inversión están muy alejados de los beneficios que produce la incorporación de la tecnología.

Se demuestra que el equipo es compatible con la realidad minera en Spence, ya que para el caso de estudio se aumentan tasas de producción en un 10% promedio para una misma cantidad de camiones, se requiere de un camión menos por flota, los ciclos de carguío como los de los camiones se reducen y los tiempos de cola como espera de camión disminuyen. Se podrían incluso lograr mejores resultados, si es que no se hubiera puesto como limitante un rendimiento fijo para ambas flotas, pasando de un aumento de un 10% de la producción a incluso un 31%.

.

7 Recomendaciones

Evaluar la opción de aumentar la capacidad del chancador, y así que la posibilidad de incorporar la Tolva Móvil pueda ser evaluada desde el punto de vista de aumentar la producción de cobre fino.

Evaluar tecnologías que impacten los procesos del transporte de material, debido a su importancia en el costo de minado, específicamente los tiempos de viaje lleno y viaje vacío.

8 Anexos

8.1 Distribuciones de tiempo

Las figuras que se muestran a continuación son dos, la primera es una descripción estadística de la distribución de los datos de los tiempos junto con su mejor modelo ajustado y la segunda, corresponde al grado de error asociado a cada modelo, la primera función es la que presenta el menor error y, por ende, corresponde a la distribución usada.

8.1.1 Tiempo del Ciclo

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution: Beta			
Expression: $1.96e+003 + 1.81e+003 * \text{BETA}(2.53, 4.75)$			
Square Error: 0.000626			
Chi Square Test			
Number of intervals = 32		Beta	0.000626
Degrees of freedom = 29		Gamma	0.000897
Test Statistic = 60.8		Erlang	0.000904
Corresponding p-value < 0.005		Normal	0.002
Kolmogorov-Smirnov Test		Weibull	0.00212
Test Statistic = 0.0213		Lognormal	0.00263
Corresponding p-value = 0.0482		Triangular	0.00399
Data Summary		Uniform	0.0182
Number of Data Points = 4117		Exponential	0.0202
Min Data Value = $1.96e+003$			
Max Data Value = $3.77e+003$			
Sample Mean = $2.58e+003$			
Sample Std Dev = 299			
Histogram Summary			
Histogram Range = $1.96e+003$ to $3.77e+003$			
Number of Intervals = 40			

Figura 8.1: Descripción estadística del tiempo de ciclo limpiado mediante el software Input Analyzer.

8.1.2 Tiempo de Aculatamiento

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution: Beta		-----	
Expression: 19.5 + 71 * BETA(1.46, 1.29)			
Square Error: 0.000273			
Chi Square Test		Beta	0.000273
Number of intervals = 71		Weibull	0.000714
Degrees of freedom = 68		Normal	0.000725
Test Statistic = 6.78e+003		Uniform	0.001
Corresponding p-value < 0.005		Triangular	0.00158
Data Summary		Gamma	0.00245
Number of Data Points = 223754		Erlang	0.00276
Min Data Value = 20		Lognormal	0.00446
Max Data Value = 90		Exponential	0.00604
Sample Mean = 56.2		Poisson	0.0161
Sample Std Dev = 18.3			
Histogram Summary			
Histogram Range = 19.5 to 90.5			
Number of Intervals = 71			

Figura 8.2: Descripción estadística del tiempo de aculatamiento limpiado mediante el software Input Analyzer.

8.1.3 Tiempo de Carguío

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution: Beta		-----	
Expression: 14.5 + 66 * BETA(2, 0.795)			
Square Error: 0.004060			
Chi Square Test		Beta	0.00406
Number of intervals = 66		Normal	0.00533
Degrees of freedom = 63		Triangular	0.0075
Test Statistic = 4.9e+004		Gamma	0.0109
Corresponding p-value < 0.005		Uniform	0.0109
Data Summary		Erlang	0.0114
Number of Data Points = 171718		Poisson	0.012
Min Data Value = 15		Lognormal	0.0143
Max Data Value = 80		Weibull	0.0157
Sample Mean = 61.7		Exponential	0.0195
Sample Std Dev = 15.3			
Histogram Summary			
Histogram Range = 14.5 to 80.5			
Number of Intervals = 66			

Figura 8.3: Descripción estadística del tiempo de carguío limpiado mediante el software Input Analyzer.

8.1.4 Tiempo de Viaje Lleno

Distribution Summary	Function	Sq Error
Distribution: Beta		
Expression: 900 + 900 * BETA(1.03, 2.92)		
Square Error: 0.000236		
Chi Square Test		
Number of intervals = 39	Beta	0.000236
Degrees of freedom = 36	Weibull	0.000557
Test Statistic = 1.54e+004	Gamma	0.00113
Corresponding p-value < 0.005	Erlang	0.00259
	Exponential	0.00259
	Triangular	0.00315
	Normal	0.00584
	Lognormal	0.00601
	Uniform	0.0184
Data Summary		
Number of Data Points = 199561		
Min Data Value = 900		
Max Data Value = 1.8e+003		
Sample Mean = 1.13e+003		
Sample Std Dev = 177		
Histogram Summary		
Histogram Range = 900 to 1.8e+003		
Number of Intervals = 40		

Figura 8.4: Descripción estadística del tiempo de viaje lleno limpiado mediante el software Input Analyzer.

8.1.5 Tiempo de Viaje Vacío

Distribution Summary	
Distribution:	Beta
Expression:	900 + 900 * BETA(0.711, 1.22)
Square Error:	0.000619
Chi Square Test	
Number of intervals	= 40
Degrees of freedom	= 37
Test Statistic	= 947
Corresponding p-value	< 0.005
Data Summary	
Number of Data Points	= 60494
Min Data Value	= 900
Max Data Value	= 1.8e+003
Sample Mean	= 1.22e+003
Sample Std Dev	= 255
Histogram Summary	
Histogram Range	= 900 to 1.8e+003
Number of Intervals	= 40

Function	Sq Error

Beta	0.000619
Erlang	0.00113
Exponential	0.00113
Gamma	0.00125
Triangular	0.00259
Lognormal	0.00392
Weibull	0.00584
Uniform	0.00762
Normal	0.00899

Figura 8.5: Descripción estadística del tiempo de viaje vacío limpiado mediante el software Input Analyzer.

8.1.6 Tiempo de Descarga

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Beta		
Expression:	29.5 + 61 * BETA(1.47, 1.49)		
Square Error:	0.000860		
Chi Square Test			
Number of intervals	= 61	Beta	0.00086
Degrees of freedom	= 58	Erlang	0.00102
Test Statistic	= 1.16e+004	Gamma	0.00105
Corresponding p-value	< 0.005	Triangular	0.00153
Data Summary		Normal	0.0016
Number of Data Points	= 189433	Weibull	0.00168
Min Data Value	= 30	Uniform	0.00203
Max Data Value	= 90	Lognormal	0.00218
Sample Mean	= 59.8	Exponential	0.00721
Sample Std Dev	= 15.3	Poisson	0.015
Histogram Summary			
Histogram Range	= 29.5 to 90.5		
Number of Intervals	= 61		

Figura 8.6: Descripción estadística del tiempo de descarga limpiado mediante el software Input Analyzer.

8.2 Informe Excel Arena

Al utilizar Arena, el programa escogido para realizar las simulaciones del estudio, se puede obtener un archivo Excel que detalla las características especificadas. En la siguiente figura se aprecia lo entregado por el software:

Tabla 8.1: Excel obtenido a través del programa Arena.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Id	N°Camiones	Día	Tonelaje	por viaje pr	Tiempo de ciclo total [h]	Rendimiento promedio total [ton/h]	Rendimiento promedio por ciclo [ton/h]	Ciclo diario por Camión	Ciclos diarios totales	Tiempo de cola por camión [h]	Camiones totales en cola [#]	Rendimiento o Pala	Rendimiento o Camión
Caso Base	5	Día 1	61760.08	260.59	116.09	2660.03	2940.43	47.40	237.00	0.66	1.00	1874.52	2074.47
Caso Base	5	Día 2	65672.15	272.50	124.48	2637.94	2891.82	48.20	241.00	0.58	3.00	1843.53	2040.18
Caso Base	5	Día 3	60290.29	258.76	118.26	2549.16	2723.91	46.60	233.00	0.58	3.00	1736.49	1921.72
Caso Base	5	Día 4	61394.65	262.37	120.97	2537.68	2720.78	46.80	234.00	0.53	4.00	1734.50	1919.51
Caso Base	5	Día 5	56699.27	260.09	114.62	2473.46	2663.52	43.60	218.00	0.50	4.00	1697.99	1879.11
Caso Base	5	Día 6	60615.95	255.76	118.63	2554.91	2767.15	47.40	237.00	0.66	7.00	1764.06	1952.22
Caso Base	5	Día 7	58796.31	262.48	115.42	2547.06	2771.66	44.80	224.00	0.54	2.00	1766.93	1955.41
Caso Base	5	Día 8	58409.87	253.96	117.33	2489.06	2677.27	46.00	230.00	0.62	7.00	1706.76	1888.82
Caso Base	5	Día 9	59220.32	252.00	122.52	2416.75	2604.56	47.00	235.00	0.63	1.00	1660.41	1837.52
Caso Base	5	Día 10	59366.57	267.42	112.52	2638.04	2866.33	44.40	222.00	0.61	1.00	1827.28	2022.19

La Tabla 8.1 representa un resumen del tratamiento de datos que se obtuvo del Excel original proveniente de Arena, ya que se hicieron 40 simulaciones - cada una de 25 días-, donde los

camiones trabajan las 24 horas. Con estos datos, se obtuvieron los valores de la ilustración. Cada columna se explica en la Tabla 8.2:

Tabla 8.2: Resumen de las variables de salida entregada por el software Arena.

Columna	Detalle
A	Id (caso base o caso tolva móvil)
B	N° Camiones
C	Día
D	Tonelaje
E	Tonelaje por viaje promedio
F	Tiempo ciclo total
G	Rendimiento promedio total
H	Rendimiento promedio por ciclo
I	Ciclo diario por camión
J	Ciclos diarios totales
K	Tiempo de cola por camión(horas)
L	Camiones totales en cola
M	Rendimiento pala (toneladas por hora)
N	Rendimiento camión (toneladas por hora)

8.3 Simulador Arena

El software Arena es de simulación, lo que permite recrear procesos de la realidad. Para comenzar a entender cómo funciona este programa es importante conocer la ventana del mismo, lo que se observa en la siguiente Figura 8.7.

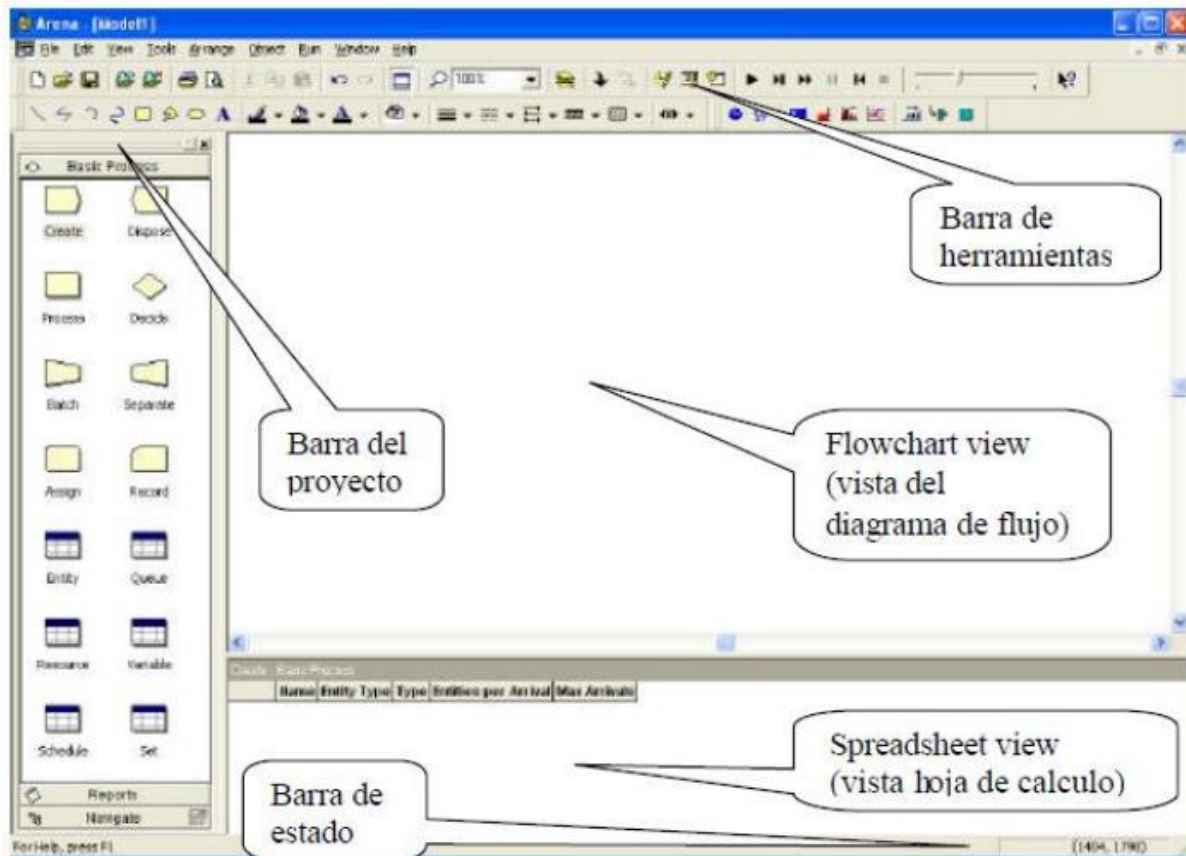


Figura 8.7: Ventana de trabajo Arena

Para términos prácticos, se especifica qué hacen los módulos utilizados para crear las simulaciones de la investigación. En primer lugar, se identifica que dichos módulos de trabajo se encuentran en la barra de proyecto, la que se divide en los siguientes componentes:

1. **“Basic Process Panel”**: Contiene los elementos básicos de construcción de modelos; son denominados módulos.
2. **“Advanced Process”**: Más módulos para tareas adicionales.

En segundo lugar, se identifican los módulos utilizados en las simulaciones:

1. **“Create”**: representa la llegada de entidades al modelo de simulación. Las entidades se crean usando una planificación o basándose en el tiempo entre llegadas. En este módulo se especifica también el tipo de entidad de qué se trata. Una vez que se incluye en el modelo, a la derecha del símbolo aparece bajo una línea el número de entidades creadas.
2. **“ReadWrite”**: se usa para leer datos de un archivo de entrada o del teclado y asignar los valores de datos a una lista de variables o atributos (u otra expresión). Este módulo también se utiliza para escribir datos en un dispositivo de salida, como la pantalla o un archivo. Al leer o escribir en un archivo, la lógica de ReadWrite varía según el tipo de acción de lectura o escritura realizada y según el tipo de acceso del nombre del archivo Arena (el tipo de acceso de un archivo se especifica en el módulo de archivo).
3. **“Process”**: Este módulo corresponde a la principal forma de procesamiento en simulación. Dispone de opciones para ocupar y liberar un recurso. El tiempo de proceso es añadido a la entidad y puede ser considerado como valor añadido, valor no añadido, transferencia, espera u otros. Una vez se introduce en el modelo, aparece un número en la parte inferior del símbolo que indica el número de entidades que actualmente se están procesando.
4. **“Assign”**: usado para asignar valores nuevos a las variables, a los atributos de las entidades, tipos de entidades, figuras de las entidades, u otras variables del sistema. Se pueden hacer múltiples asignaciones con un único módulo “Assign”. Para añadir una nueva variable al modelo, simplemente se selecciona “Add, Type: Entity”, el nombre de la variable y el valor que se desea tome a partir de ese momento.
5. **“Decide”**: permite a los procesos tomar decisiones en el sistema. Incluye la opción de tomar decisiones basándose en una o más condiciones o, en una o más probabilidades. Las condiciones se pueden basar en valores de atributos, valores de variables, el tipo de entidad o una expresión. Existen dos puntos de salida del módulo Decide cuando se especifica el tipo 2-way chance o 2-way condition.

Hay un punto de salida para las entidades “verdaderas” y otro para las entidades “falsas”. Cuando se especifica el tipo N-way chance o condition, aparecen múltiples

puntos de salida para cada condición o probabilidad y una única salida “Else”. Una vez incluido en el modelo, cerca de cada una de las ramas que salen del símbolo que representa el módulo, aparece un número. La rama “True”, corresponde al número de entidades que toman la rama de verdadero y el de la rama “False”, el número de entidades que toman la rama de falso.

8.4 Análisis Económico

Tolva móvil											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	1.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos	35.66	16.84	16.84	16.84	16.84	16.84	16.84	16.84	16.84	16.84	16.84
I-C	-34.34	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84	-16.84
Valor actualizado [MUS\$]	-34.34	-15.59	-14.44	-13.37	-12.38	-11.46	-10.61	-9.82	-9.10	-8.42	-7.80
VAC [MUS\$]	-147.3										
Caso base											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31	19.31
I-C	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31	-19.31
Valor actualizado [MUS\$]	-19.30595068	-17.8758803	-16.551741	-15.325686	-14.19045	-13.139306	-12.166024	-11.264837	-10.430404	-9.6577819	-8.9423906
VAC [MUS\$]	-148.9										

Figura 8.8: Desglose del cálculo del ahorro (MUSD) en los distintos escenarios de estudio, para el caso óptimo.

Tolva móvil											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0.87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos	35.77	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66	17.66
I-C	-34.90	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66	-17.66
Valor actualizado [MUS\$]	-34.90	-16.35	-15.14	-14.02	-12.98	-12.02	-11.13	-10.30	-9.54	-8.83	-8.18
VAC [MUS\$]	-153.4										
Caso base											
Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57	19.57
I-C	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57	-19.57
Valor actualizado [MUS\$]	-19.57252098	-18.1227046	-16.780282	-15.5372982	-14.3863872	-13.3207289	-12.3340082	-11.420378	-10.5744241	-9.7911334	-9.06586426
VAC [MUS\$]	-150.9										

Figura 8.9: Cálculos económicos de los distintos escenarios posibles al reducir la flota de camiones.

9 Referencias

- González, V. (2018). “*Modelo Evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en compañía doña Inés de Collahuasi*”. Santiago. Universidad de Chile.
- H. Reyes, T. (2020). “*Métodos de evaluación*”. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Irribarren, D. I. (2015). “*Evaluación de metodologías de estimación de tiempos de ciclo en Minera Escondida*”. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Ltd, M. G. (2020, Febrero). “*MMD FMSL Questions & Answers*”. Sierra Gorda, Antofagasta, Chile.
- Alarie, S., & Gamache, M. (2002). “*Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines*”. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16(1), 59–76.
- Numaan, H. (2016). “*Cyber Threats to the Mining Industry. Trend Micro Forward-Looking Threat Research (FTR) Team.*”
- Soofastaei, A. (2015). “*The Effect of Average Truck Speed on Fuel Consumption in Surface Mines. Engineering and Mining Journal.*”
- CODELCO. (2005). “*Norma ASARCO*”. Documento Interno, División Codelco Norte
- Sáez, K. (2019) “*Diseño de nivel de producción alternativo Block/Panel Caving*”. Concepción. Universidad de Concepción.
- Barrientos, V. (2014) “*Análisis de factores operacionales en detenciones y productividad de sistema de carguío y transporte en minera cielo abierto*”. Santiago. Universidad de Chile.

- Pedraza, D. (2019) “*Simulación y comparación de desempeño de algoritmo de despacho en minera a cielo abierto*”. Santiago. Universidad de Chile.
- Kelton, W, & Zupick, N. (2015) “*Simulation with Arena*”. New York. United States of America. McGraw Hill