



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**MODELO DE SIMULACION DE EVENTOS DISCRETOS PARA EVALUACION TECNICO-
ECONOMICA DE PLAYAS DE RELEVO IN PIT EN MINAS A CIELO ABIERTO**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERIA

DIEGO AUGUSTO TARAZONA TORRES

**PROFESOR GUIA:
JOSE CHARANGO MUNIZAGA-ROSAS**

**PROFESOR CO-GUIA:
JUAN LUIS YARMUCH GUZMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
DAVID GONZALO VARGAS NUÑEZ
BRIAN KEITH TOWNLEY CALLEJAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2019**

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL

GRADO DE: Magíster en Minería

POR: Diego Augusto Tarazona Torres

FECHA: 07/06/19

PROFESOR GUIA: José Charango Munizaga-Rosas

**MODELO DE SIMULACION DE EVENTOS DISCRETOS PARA EVALUACION
TECNICO-ECONOMICA DE PLAYAS DE RELEVO IN PIT EN MINAS A CIELO
ABIERTO**

En minería a cielo abierto el principal método de transporte de materiales es a través del uso de camiones de alto tonelaje. Dada su gran importancia, es quizá la operación unitaria sobre la que se ejerce un control más minucioso, de hecho, se espera que todas las detenciones programadas de los camiones, como por ejemplo para el cambio de turno, duren exactamente lo que deban de durar, porque de lo contrario podrían tener un impacto negativo en los indicadores de producción.

Ese fue justamente el problema que se generó en la mina caso de estudio, dada una restricción que prohibía el estacionamiento de camiones en lugares no habilitados para ello, ocurrió que los cambios de turno empezaron a extenderse más allá de lo programado, hecho que se agravó a causa de las grandes dimensiones de la mina, pero sobre todo debido a que los únicos sectores habilitados para el relevo se encontraban en la periferia de esta.

En ese contexto se planteó la alternativa de construir playas de relevo *in pit* para recuperar la productividad del sistema. Y, con el propósito de evaluar la conveniencia de su utilización es que se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos de uno de los circuitos de transporte de la mina. El objetivo fue examinar las múltiples posibles combinaciones de playas hasta determinar un escenario que se le pudiese considerar como mejor resultado, en términos de productividad.

Los resultados demostraron que las playas de relevo *in pit* tienen un enorme potencial para elevar la productividad de los sistemas pala-camión y además, el análisis económico reveló que las playas podían generar (en un mes) una reducción de costos del orden de los kUS\$ 155 (sólo en la fase analizada). Sin mencionar que se prevé podría generar sustanciales beneficios económicos si se aplicara adecuadamente en circuitos de transporte de mineral.

ABSTRACT OF THESIS TO OBTAIN THE

DEGREE OF: Master in Mining

BY: Diego Augusto Tarazona Torres

DATE: 07/06/19

THESIS ADVISOR: José Charango Munizaga-Rosas

**DISCRETE EVENT SIMULATION MODEL FOR TECHNICAL-ECONOMIC
EVALUATION OF TRUCK PARKING LOTS INSIDE OPEN PIT MINES**

The main method to haulage materials in open pit mining is using high-tonnage trucks. Given its importance, it is perhaps the unitary operation over which a more detailed control is exercised. In fact, it is expected that all the programmed detentions of trucks, such as the change of shift, last exactly what they should last, because otherwise they could have a negative impact on production indicators.

That was precisely the problem that occurred in the mine chosen as case study. Restrictions that prohibited the parking of trucks in places not authorized for it were established. As a result, shift changes began to extend beyond the programmed. This situation was aggravated by the large size of the mine, but mainly because the only authorized truck parking lots for the change of shift were in the periphery of the mine.

In this context, the alternative of building truck parking lots inside the open pit was proposed to recover the productivity of the system. And with the purpose of evaluating the suitability of its use, a discrete event simulation model was developed to replicate one of the transport circuits of the mine. The objective was to examine the multiple possible combinations of truck parking lots to determine that could be considered as the best result, in terms of productivity.

The results showed that truck parking lots built inside the open pit have a huge potential to increase the productivity of the shovel-truck systems and also, the economic analysis revealed that the truck parking lots could generate (in a month) a cost reduction of 155,000 dollars (only for the circuit analyzed), not to mention that it is expected to generate substantial economic profits if it is properly applied in mineral transport circuits.

Dedicado a Maly y Augusto, mis padres.
Gracias por haber sido mi brújula.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía José Charango Munizaga-Rosas, por su paciencia, preocupación y aportes durante el desarrollo de este trabajo.

A Walter Morales Cortés, por las largas y extensas reflexiones sobre los temas abordados en este trabajo de investigación y, en especial, por sus ganas de enseñar.

A Nicole Mazzei Fernández, por su apoyo desinteresado e incondicional desde el principio, pero sobre todo por su amistad.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION	1
1.1.	Planteamiento del Problema	2
1.2.	Objetivos	3
1.2.1.	Objetivo Principal.....	3
1.2.2.	Objetivos Específicos	3
1.3.	Alcance	3
1.4.	Hipótesis	3
2.	ANTECEDENTES.....	4
2.1.	Antecedentes Generales	4
2.1.1.	Simulación de Eventos Discretos	4
2.1.1.1.	Elementos de una Simulación de Eventos Discretos.....	4
2.1.2.	Playas de Relevó	5
2.2.	Revisión del Estado del Arte	7
3.	METODOLOGIA	11
3.1.	Formulación del Problema.....	11
3.2.	Recolección de Datos y Construcción del Modelo Conceptual.....	11
3.3.	Validación del Modelo Conceptual	12
3.4.	Programación del Modelo.....	12
3.5.	Validación del Modelo Programado	12
3.6.	Diseño, Realización y Análisis de Experimentos	12
3.7.	Documentación y Presentación de los Resultados de la Simulación.....	13
4.	MODELO DE SIMULACION	14
4.1.	Formulación del Problema.....	14
4.2.	Recolección de Datos.....	15
4.3.	Declaración de Supuestos	16
4.4.	Programación del Modelo.....	17
4.4.1.	Descripción del Modelo Computacional	18
4.4.1.1.	Sección 1	19
4.4.1.2.	Sección 2	21
4.4.1.3.	Sección 3	25
4.5.	Verificación y Validación del Modelo.....	29
4.6.	Diseño de Experimentos	30
4.6.1.	Combinaciones de Playas	30
4.6.1.1.	Caso 1: Compa	31
4.6.1.2.	Caso 2: Compa y Silos	34
4.6.1.3.	Caso 3: Compa y 100	37
4.6.1.4.	Caso 4: Compa y DIN100	37
4.6.1.5.	Caso 5: Compa y DINBot	38
4.6.1.6.	Caso 6: Compa, DIN100 y DINBot	38

4.6.1.7.	Caso 7: Compa, DIN100, DINBot y 100	39
4.6.1.8.	Caso 8: Compa, DIN100, DINBot, 100 y Silos	39
4.6.1.9.	Comparación de Casos	39
4.6.2.	Relación entre Vacíos y Cargados.....	41
4.6.3.	Alejamiento del Equipo de Carguío con Respecto a la Playa	46
4.7.	Análisis Económico de Resultados.....	48
4.7.1.	Efecto del Alejamiento del Equipo de Carguío en Caso Base	48
4.7.2.	Efecto del Alejamiento del Equipo de Carguío en Caso Final.....	49
4.7.3.	Análisis de Costos	50
4.7.3.1.	Costo de Construcción e Implementación de Playas de Relevó.....	50
4.7.3.2.	Costo de Transporte por Hora	52
4.7.3.3.	Análisis Comparativo de Costos	53
4.7.3.4.	Ahorro por Postergación del Requerimiento de Camiones Adicionales..	55
4.7.3.5.	Resumen Análisis de Costos	56
5.	CONCLUSIONES	57
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	59
7.	ANEXOS Y APÉNDICES.....	62
7.1.	Parámetros Experimento: Alejamiento de Pala & Playa Fija	62
7.2.	Parámetros Experimento: Alejamiento de Pala & Playa Dinámica.....	63
7.3.	Consumo de Combustible	64
7.4.	Cálculo de Requerimiento de Tractor de Orugas.....	64
7.5.	Cálculo de Requerimiento de Motoniveladora	65
7.6.	Cálculo de Requerimiento de Cargador Frontal	66
7.7.	Cálculo del Costo de Posesión y Operación de la Torre de Iluminación	68

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Análisis de Velocidades	16
Tabla N° 2: Análisis de Tiempos de Carga y Descarga	16
Tabla N° 3: Resultados de la Variante General del Caso 2	37
Tabla N° 4: Resultados de la Variante General del Caso 3	37
Tabla N° 5: Resultados de la Variante General del Caso 4	37
Tabla N° 6: Resultados de la Variante General del Caso 5	38
Tabla N° 7: Resultados de la Variante General del Caso 6	38
Tabla N° 8: Resultados de la Variante General del Caso 7	39
Tabla N° 9: Resultados de la Variante General del Caso 8	39
Tabla N° 10: Resultados Relación Vacíos y Cargados	44
Tabla N° 11: Parámetros Geométricos de las Playas de Relevó	50
Tabla N° 12: Tiempo & Costo de Construcción de Playas de Relevó	51
Tabla N° 13: Costo Construcción & Implementación Playas de Relevó	51
Tabla N° 14: Costo de Transporte	53
Tabla N° 15: Comparación Costo de Transporte	54
Tabla N° 16: Comparación Costo de Combustible	54
Tabla N° 17: Comparación Costo de Mano de Obra	55
Tabla N° 18: Flujo de Costos de un Camión	55
Tabla N° 19: Reducción de Costos	56
Tabla N° 20: Parámetros a Modificar en Modelo de Simulación con Playa Fija	62
Tabla N° 21: Parámetros a Modificar en Modelo de Simulación con Playa Dinámica	63
Tabla N° 22: Consumo Medio de Combustible	64
Tabla N° 23: Parámetros Tractor de Orugas Caterpillar D11R	65
Tabla N° 24: Parámetros Motoniveladora Caterpillar 16M	66
Tabla N° 25: Parámetros Cargador Frontal Caterpillar 988G	67
Tabla N° 26: Costo de la Torre de Iluminación	68

INDICE DE ILUSTRACION

Ilustración N° 1: Eventos y Actividades	5
Ilustración N° 2: Diseño Estándar de Playa de Relevó	6
Ilustración N° 3: Playa Fija “Compa”	7
Ilustración N° 4: Camión Estacionado en Playa Dinámica.....	7
Ilustración N° 5: Enfoque de los Siete Pasos	11
Ilustración N° 6: Ubicación de la Playa Existente y Playas Alternativas	14
Ilustración N° 7: Diagrama de Flujo del Modelo.....	18
Ilustración N° 8: Modelo de Simulación. Sección 1	19
Ilustración N° 9: Submodelo “Transitando Desde Playa”	19
Ilustración N° 10: Proceso “Transportando desde Playa Compa - Subiendo”	20
Ilustración N° 11: Velocidades en Función al “Estado” de la Entidad	20
Ilustración N° 12: Modelo de Simulación. Sección 2.....	21
Ilustración N° 13: <i>Assign</i> “Datos Post Descarga”	22
Ilustración N° 14: Submodelo “Gaviota Descarga”	22
Ilustración N° 15: Submodelo “Último Caex Descargado”	22
Ilustración N° 16: Submodelo “Medio Turno Pala?”	23
Ilustración N° 17: <i>Assign</i> “Datos Post Carguío”	24
Ilustración N° 18: Submodelo “Transportando”	25
Ilustración N° 19: Modelo de Simulación. Sección 3	26
Ilustración N° 20: Condicional “MT Vacío?”	26
Ilustración N° 21: Condicional “FT Vacío?”	27
Ilustración N° 22: Submodelo “Transitando Hacia Playa”	28
Ilustración N° 23: Datos Simulados & Datos Reales.....	29
Ilustración N° 24: Tonelaje & Número de Camiones	30
Ilustración N° 25: Caso 1. Primer Camión Cargado y Descargado	31
Ilustración N° 26: Caso 1. Último Camión Cargado y Descargado.....	32
Ilustración N° 27: Caso 1. Histograma Tonelaje Descargado y Cargado	32
Ilustración N° 28: Caso 1. Histograma Utilización Efectiva	33
Ilustración N° 29: Caso 1. Tonelaje Descargado por Hora.....	33
Ilustración N° 30: Módulos Adicionales: Creación Entidades Playa Silos	34
Ilustración N° 31: Módulos Adicionales: Submodelo Transitando Desde Playa Silos	34
Ilustración N° 32: Módulos Adicionales: Condicionales Playa Más Lejana & Capacidad .	35
Ilustración N° 33: Módulos Adicionales: Submodelo Transitando Hacia Playa Silos	35
Ilustración N° 34: Variantes del Caso 2.....	36
Ilustración N° 35: Comparación y Selección del Mejor Caso	40
Ilustración N° 36: Comparación y Selección de la Mejor Variante.....	40
Ilustración N° 37: Módulos Adicionales: Submodelos Transitando Desde Playa Remate..	42
Ilustración N° 38: Módulos Adicionales: Condicional Remate??	42
Ilustración N° 39: Módulos Adicionales: Remate1? & Remate2?	43

Ilustración N° 40: Módulos Adicionales: Submodelos Transitando Hacia Playa Remate ..	43
Ilustración N° 41: Módulos Adicionales: Secuencia Asignación “Remate”	44
Ilustración N° 42: Sumatoria Tonelaje 8° y 1° Hora	45
Ilustración N° 43: Diagrama de Dispersión. Camiones Vacíos & Tonelaje	46
Ilustración N° 44: Tonelaje por Hora & Porcentaje Camiones Vacíos.....	46
Ilustración N° 45: Incremento de la Longitud del Circuito & Tonelaje	47
Ilustración N° 46: Tonelaje Horario para Incrementos de 1500 y 2000 m.	48
Ilustración N° 47: Alejamiento Equipo de Carguío en Caso Base	49
Ilustración N° 48: Alejamiento del Equipo de Carguío en Caso Final	50
Ilustración N° 49: Comparación de Requerimiento de Camión	52

1. INTRODUCCION

Para la minería, al igual que para otras industrias, un cambio de turno es tan sólo un pequeño paréntesis en las actividades productivas; una pausa necesaria que permite asegurar la continuidad de sus procesos. Se suele pensar que este empieza cuando se detiene el primer equipo, pero lo cierto es que ocurre mucho antes. Su organización y ejecución requieren de una sincronía tal que permita garantizar la seguridad de las personas y lograr el máximo potencial de producción de los equipos.

Por supuesto, lo ideal es que la pausa sea lo más breve posible para no incidir negativamente en los resultados. Pero en una mina de grandes dimensiones -y con extensos circuitos de transporte- podría durar más de lo programado, sobre todo si las zonas de relevo se encuentran alejados de los lugares de trabajo. Justamente ese fue el escenario que se configuró en la mina caso de estudio. En determinado momento quedó establecido que los operadores de los camiones sólo podrían realizar el cambio de turno en zonas especialmente acondicionadas para ello, es decir, en playas; y las que existían sólo se encontraban en superficie y por tanto, alejadas de los frentes de carguío.

Esta restricción impactó de forma negativa a la continuidad operacional. Debido a las grandes distancias existentes en algunas fases, ocurría que por ejemplo, el primer camión cargado salía casi 25 minutos después de iniciado el turno (puesto que era necesario esperar a que los camiones vacíos bajasen desde superficie) y al final de la jornada, el cambio de turno podía iniciar hasta 40 minutos antes de lo normal, porque de lo contrario, los camiones que se cargasen después de dicho umbral no arribarían a tiempo a su destino y posteriormente a las playas de relevo. Como consecuencia, la restricción también generó una caída drástica en los indicadores de utilización y productividad.

Con el fin de enfrentar dicho problema se impulsó la iniciativa de construir playas de relevo para camiones dentro del rajo. El presente estudio se encarga de recopilar los antecedentes de dicha iniciativa, analizar su potencial como estrategia para incrementar la productividad en el proceso de cambio de turno y valorizar el beneficio económica resultante de su utilización.

En ese contexto, este trabajo de investigación se divide en cinco capítulos:

- El capítulo I es uno introductorio en el cual se define el planteamiento del problema, los objetivos, el alcance y la hipótesis que se pretende comprobar.
- El capítulo II comprende la revisión de los antecedentes generales y del estado del arte, esto con el propósito de establecer qué ya se dicho o hecho sobre el tema de estudio.
- El capítulo III describe la metodología utilizada para el diseño y construcción del modelo de simulación que permitirá estudiar las playas de relevo.

- En el capítulo IV se encuentra en detalle el paso a paso utilizado para la construcción del modelo de simulación de eventos discretos, su validación, el diseño y desarrollo de los experimentos y, por último, el análisis económico de los resultados.
- El capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones finales en cuanto a los nuevos posibles horizontes de estudio, que no fueron considerados en este trabajo.
- Finalmente, los apartados VI y VII contienen información de las fuentes bibliográficas y los anexos, respectivamente.

1.1. Planteamiento del Problema

El problema se encuadra en la caída de la productividad del sistema de carguío y transporte de una mina a cielo abierto debido a la menor utilización de los equipos (sobre todo de transporte) en el periodo circundante al cambio de turno; generado por el establecimiento de una restricción que prohibía a los operadores efectuar el cambio de turno en sectores no acondicionados para ello y agravado porque en dicha época los únicos sectores habilitados eran playas que se encontraban en la periferia de la mina, a significativa distancia de los puntos de carguío.

En el pasado, cuando estaba cerca el final del turno, los operadores simplemente estacionaban sus camiones en las inmediaciones de los equipos de carguío. Por tanto, la solución más obvia sería replicar esta práctica y construir playas en los sectores en donde antes se hacía el relevo sin ellas, con la esperanza de alcanzar quizá un estado igual al anterior, en términos de productividad. Pero esta iniciativa exige una inversión -en recursos y tiempo- de por medio y por tanto, hay un costo adicional que se tendría que asumir periódicamente por ir reubicando estas nuevas playas cada vez que los equipos de carguío se alejen. En consecuencia, bajo este nuevo esquema se hace necesario encontrar una distancia máxima de alejamiento de los equipos de carguío -con respecto a las playas- que realmente justifique la reubicación de estas.

Por otro lado, si lo que se pretende alcanzar es el *full potential* del sistema pala-camión, lo ideal -hipotéticamente- sería que una vez llegado el final del turno todos los camiones se detuviesen simultáneamente en el mismo sitio en el que se encuentren, casi como si el sistema en sí fuese un carrusel que se ralentiza poco a poco hasta detenerse, se cambien los usuarios y después se retome el movimiento. Por supuesto, para llevar a cabo algo semejante serían necesarias infinitas playas a lo largo de la ruta, algo que de por sí es inviable. Pero esta breve reflexión sirve para comprender la importancia de pensar en el sistema como si fuese un todo, lo óptimo para este es que ojalá todos los camiones se detengan en el mismo intervalo de tiempo y para lograr ello es necesario identificar dentro de las escasas superficies disponibles para la construcción de playas, cuáles tienen el mayor potencial de contribuir con el incremento de la productividad del sistema.

Por último, es importante mencionar que este tipo de problemas son más evidentes en minas con circuitos de transporte bastante extensos, característica particular de explotaciones con un alto grado de profundización o que se encuentran próximos a alcanzar su *pit* final. En minas más jóvenes se presume que la pérdida de productividad sería inclusive despreciable.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

Construir un modelo de simulación que permita evaluar la conveniencia técnico-económico de construir playas de relevo *in pit* para camiones de extracción con el propósito de mejorar la productividad de los equipos durante el proceso de cambio de turno en una mina a cielo abierto.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Encontrar la mejor combinación de playas y número de estacionamientos que permitan incrementar el movimiento de materiales.
- Encontrar la mejor configuración de camiones de extracción, entre vacíos y cargados, estacionados en las playas de relevo *in pit* al final de un turno, de tal forma que se logre aumentar la productividad de los equipos al inicio del próximo.
- Calcular el valor económico de la construcción de playas de relevo *in pit* y sus beneficios operacionales.

1.3. Alcance

El caso de estudio corresponde a una mina a cielo abierto ubicada en el norte de Chile.

Dentro del modelo de simulación se considerarán los equipos pertenecientes a la flota carguío y transporte de la mina.

1.4. Hipótesis

Dado el bajo costo de inversión y facilidad de implementación, las playas de relevo *in pit* son una alternativa económicamente favorable, Además, contribuirían a incrementar el rendimiento de los equipos.

2. ANTECEDENTES

2.1. Antecedentes Generales

2.1.1. Simulación de Eventos Discretos

La simulación de eventos discretos se refiere a sistemas que se representan por una secuencia o serie de eventos, en donde cada evento “ocurre en un instante particular en el tiempo y marca un cambio de estado en el sistema” (Robinson, 2004). Además, puesto que entre eventos consecutivos no se espera que ocurra algún cambio en el sistema, el tiempo de simulación puede saltar al tiempo de ocurrencia del siguiente evento directamente, razón por la cual puede ejecutarse más rápido que un modelo de simulación continua.

Es poderosamente útil para representar sistemas pala-camión porque “es capaz de reproducir la aleatoriedad de los problemas de los equipos y la variabilidad temporal de los viajes y procesos” (Fioroni et al., 2008). Para representar esa aleatoriedad se “generan distribuciones de probabilidad a partir de los datos históricos de producción de la mina” (Nageshwaraniyer et al., 2013) y después se incorporan como datos de entrada dentro del modelo.

Por otro lado, un “modelo de simulación de eventos discretos se construye considerando cada elemento físico como una entidad discreta, con su propio conjunto único de propiedades o atributos definidos” (Zeigler et al., 2000).

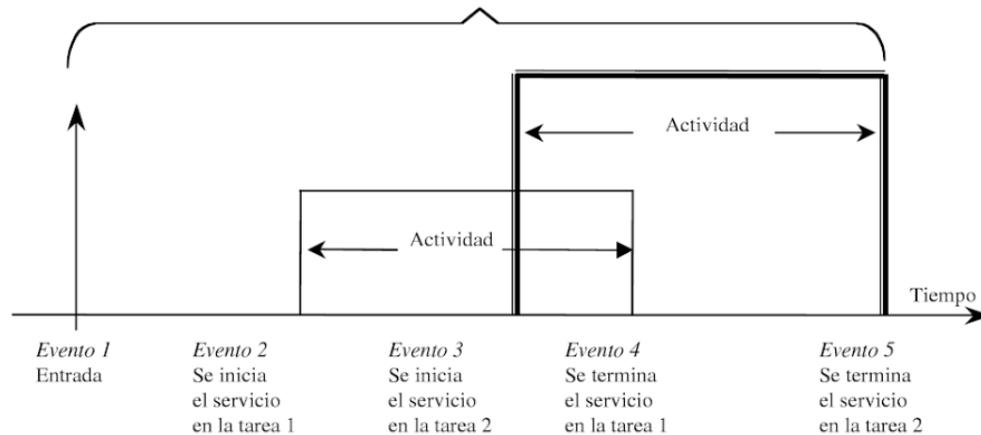
2.1.1.1. Elementos de una Simulación de Eventos Discretos

Independiente del software que se utilice, la estructura básica de todo modelo de simulación de eventos discretos contará con algunos de los siguientes elementos:

- **Entidades:** O actores, son la representación de los objetos o individuos que se mueven dentro de un sistema (por ejemplo: clientes, vehículos, etc.) y que pueden causar cambios en el estado de este, asimismo pueden afectar o verse afectadas por otras entidades.
- **Recursos:** Son elementos estacionarios que son ocupados por las entidades. Un recurso suele utilizarse cuando se desea representar una actividad (o proceso) que restringe el flujo de entidades.
- **Atributos:** o variables locales, son las características propias de cada entidad y cuentan con un valor específico que permite diferenciarlas unas de otras.
- **Variables:** Representan características globales del sistema. A diferencia de los atributos, las variables no dependen de una entidad específica, pero al mismo tiempo pueden ser cambiadas por alguna entidad.

- **Eventos:** Es un suceso que cambia el estado de un sistema (atributos, variables, etc.) y que ocurre en un instante de tiempo.
- **Actividades:** Es la secuencia de eventos que conforman un ciclo funcional (ver Ilustración N° 1).

Ilustración N° 1: Eventos y Actividades



Fuente: ARENA®

2.1.2. Playas de Relevó

Una playa de relevó es una superficie especialmente acondicionada para que los operadores -de los camiones- realicen el cambio de turno de forma rápida y segura. No obstante, estos espacios también suelen ser utilizados para otras actividades como: atención mecánica, abastecimiento de combustible, periodo de colación, etc.

En un principio existieron varios diseños de playas de relevó en la mina caso de estudio, esto por la variada geometría y poca área disponible para su construcción. Sin embargo, el diseño cuyo uso se terminó generalizando es el que se presenta en la Ilustración N° 2. Este cuenta con un espacio especial para el estacionamiento de los vehículos menores en el extremo izquierdo de la playa, esto como medida de seguridad para que el primer camión que se estacione tenga siempre dentro de su campo visual al vehículo menor utilizado para el relevó (que podría estar con pasajeros)¹. Después, de izquierda a derecha se encuentran los estacionamientos para los camiones y en la parte posterior de la playa un camino auxiliar para el tránsito de vehículos menores, evitando así a que se expongan a las maniobras que realizan los camiones al ingresar o salir de las playas.

¹ Por procedimiento los camiones de alto tonelaje siempre se estacionan de izquierda a derecha.

- **Playas Fijas:** Se espera que existan por un largo e indefinido periodo de tiempo, por tal razón se construyen generalmente en la periferia del rajo o en sectores en donde ya se ha alcanzado el *pit final*.

Ilustración N° 3: Playa Fija “Compa”



Fuente: Elaboración Propia

- **Playas Dinámicas:** Su diseño es idéntico a las playas fijas, pero a diferencia de las anteriores estas se construyen cerca a los equipos de carguío y se “mueven” junto a ellos, es decir, se reubican periódicamente en función al desarrollo que tengan las fases de minado.

Ilustración N° 4: Camión Estacionado en Playa Dinámica



Fuente: Elaboración Propia

2.2. Revisión del Estado del Arte

Aunque los métodos de simulación pueden ser ciertamente nuevos en algunos entornos, no son del todo desconocidos para ninguna industria. Según Rasche y Sturgul (1991), se han utilizado

en la industria minera desde el año 1961 y a pesar de que no se encuentran ampliamente difundidos, existen numerosos casos documentados que demuestran que su aplicación ha sido de gran utilidad para resolver complejos problemas que de otra forma hubieran sido difíciles de afrontar.

No obstante, existen aún muchos “actores” en la industria que desconocen qué exactamente es la simulación (especialmente quienes toman las decisiones importantes) o cómo puede ayudarles a comprender el comportamiento de los sistemas y convertirse así en una poderosa herramienta de ingeniería, útil sobre todo para “administrar los riesgos y tomar decisiones clave con un mejor nivel de entendimiento de los costos y beneficios” (Luce et al., 2005) en especial cuando “las operaciones mineras encarnan una actividad económica que involucra alto riesgo e incertidumbre” (Chinbat y Takakuwa, 2009).

Es por ello que las simulaciones pueden convertirse en una herramienta muy importante para la supervisión de las operaciones mineras, porque a partir de un modelo computacional basado en un sistema real se pueden realizar experimentos que de otra forma serían inviables de ejecutar y, además, porque permiten entender el comportamiento integral de los sistemas, incluidos sus cuellos de botella y problemas del proceso, y en base a dicha comprensión evaluar estrategias que permitan mejorar el funcionamiento del sistema.

Sin embargo, existe una verdad innegable: no todo puede (o debe) resolverse con los métodos de simulación. Usualmente se comete “el error de utilizarla para probar lo que de hecho ya se sabe o ya está decidido” (Sadowski y Sturrock, 2006), o simplemente para solucionar problemas que no requieren su uso. Otro error bastante común según Standridge et al. (2007) es “perder el foco en el alcance y la escala”: un modelo muy genérico es poco útil, pero uno muy detallado también. Los modelos muy detallados requieren de una gran inversión en tiempo para su construcción y, además, al ser muy complejos se vuelven más lentos y difíciles de entender.

Otra preocupación cuando se construye un modelo de simulación es asegurar que represente correctamente al sistema real. No es necesario que sea una copia fiel de la realidad -de hecho, según Pidd (1998) «el modelo no debería tener siquiera la misma complejidad que un proceso real ya que forma parte de un ‘modelo de usuario’» (un entendimiento conceptual)-, pero sí una “copia” capaz de generar datos semejantes a los reales. Por tanto, el verdadero arte de la simulación está en hallar el nivel de detalle adecuado para satisfacer los objetivos del estudio. Y aunque la dificultad radica justamente en encontrar dicho “equilibrio”, lo ventajoso de esta metodología es que un modelo podría ser tan detallado y flexible como el usuario lo requiera. Por ejemplo “si hay procedimientos que no afectan la medición de los resultados esperados no existe necesidad de modelarlos” (Fioroni et al., 2008), pero tampoco todos los procedimientos se pueden suprimir o minimizar, es importante tener presente que existen procedimientos tan relevantes como para obviarlos y que la simplificación de un procedimiento complejo significa la pérdida de precisión en los resultados.

Por otro lado, desde que Bauer y Calder notaron en 1973 los beneficios de utilizar GPSS² en las minas a cielo abierto para simular los sistemas de carguío y transporte se han realizado múltiples investigaciones en este campo. Por mencionar sólo algunas: en 1981, Nenonen et al. elaboraron un modelo pala-camión de una mina de cobre a cielo abierto para diseñar y evaluar el funcionamiento de un sistema informático de despacho de camiones; en 2009, Ercelebi y Bascetin estudiaron varios modelos pala-camión y sus enfoques de optimización para establecer nuevos criterios de asignación y despacho de camiones bajo diferentes condiciones operacionales; en 2012, Yarmuch elaboró un modelo de simulación pala-camión para evaluar la conveniencia o no de reubicar un chancador al interior del rajo; en 2014, Vazquez elaboró un modelo de simulación para optimizar el sistema de transporte de materiales en una mina a cielo abierto; y el mismo año, Barrientos elaboró un modelo para analizar los factores operacionales que disminuían la productividad del sistema de transporte de una mina a cielo abierto.

No es de extrañar que numerosos estudios hayan explorado las oportunidades de mejora y/u optimización de los sistemas de transporte en base a la aplicación de métodos de simulación, sobre todo si se tiene en cuenta que el transporte de materiales constituye la operación unitaria más cara en las minas a cielo abierto y que los métodos basados en simulación tienen la capacidad de entregar estimaciones más precisas en comparación a los métodos tradicionales.

En cuanto a los objetivos que pretende alcanzar este trabajo de investigación, el estudio hecho por Barrientos es el que más se asemeja. Este expone la pérdida de productividad que ha significado realizar el cambio de turno sólo con camiones vacíos y, por tanto, explora los beneficios de cambiar esa práctica de trabajo para que también se pueda hacer el cambio de turno con camiones cargados. Además, plantea la alternativa de acercar la playa de relevo hacia el chancador y justifica el uso de métodos de simulación en la capacidad que estos tienen para probar prácticas operacionales que de otra forma serían imposibles de realizar en un sistema real por los impactos económicos que podría generar. Por último, los resultados obtenidos por Barrientos fueron favorables para los fines de su estudio, sin embargo, no se aprecia un análisis detallado de los costos de operación y por tal razón se prevé incluir un análisis especial en la sección económica de este trabajo que permita observar su comportamiento en la simulación (sugerencia propuesta por Vazquez en sus conclusiones).

Adicionalmente, con excepción del estudio hecho por Barrientos, en la revisión bibliográfica no se halló referencia alguna de otra investigación que haya analizado la influencia de la ubicación de las playas de relevo en la productividad de los sistemas de transporte pala-camión, y justamente esa es la causa por la que se estableció como uno de los principales objetivos de esta investigación.

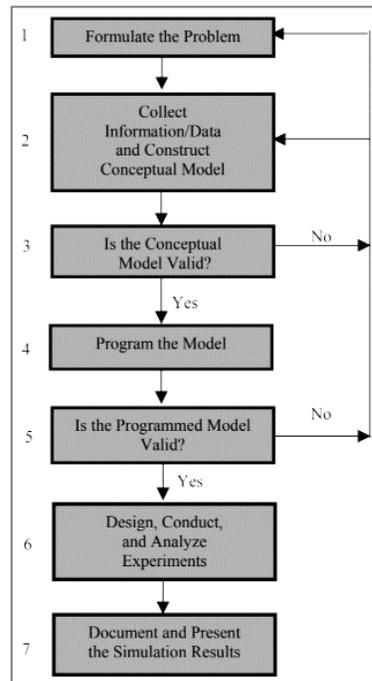
² *General Purpose Simulation System*: lenguaje de programación de propósito general de simulación de eventos discretos.

Por último, así como Yarmuch vislumbraba el gran potencial de la aplicación de los métodos de simulación para abordar temas relacionados con el corto plazo, en donde “el detalle impacta de mayor manera en los resultados”, el autor del presente trabajo de investigación confía en el enorme potencial de la simulación para resolver temas de carácter operativo, justamente porque su alcance se encuentra circunscrito al corto plazo.

3. METODOLOGIA

La metodología utilizada para la construcción del modelo de simulación es la propuesta por Law en su publicación *“How to conduct a successful simulation study”* (2003), que proporciona un enfoque de siete pasos (ver Ilustración N° 5).

Ilustración N° 5: Enfoque de los Siete Pasos



Fuente: Law, A.

3.1. Formulación del Problema

Cuando se realiza por primera vez un estudio de simulación ocurre a veces que no se establece con claridad cuál es el problema que se pretende resolver o inclusive no se comprende su naturaleza por completo, lo que a la larga genera que, a medida que se desarrolle el estudio y se adquiera una mejor comprensión de este, se deba reformular el problema. Por tanto, es de suma importancia que desde un principio se tengan bien definidos los objetivos del estudio y las preguntas que se quieren responder con este, así como su alcance y, el tiempo y recursos que requerirá.

3.2. Recolección de Datos y Construcción del Modelo Conceptual

La recolección de datos no sólo consiste en reunir la mayor cantidad de información de libros, planillas, bases de datos, etc. El verdadero propósito es reunir información que permita generar una mejor comprensión de la estructura y funcionamiento del sistema a replicar. Además, los datos que se recuperen deben permitir especificar los parámetros y distribuciones a utilizar dentro del modelo y al mismo tiempo ser útiles para su posterior validación.

Por otro lado, antes de pasar directamente a la etapa de programación es importante construir un modelo conceptual que incluya por ejemplo: diagramas de flujo, descripción de los subsistemas, detalles de los supuestos simplificadores y, por supuesto, que contenga resúmenes de los datos de entrada del modelo. Esto, además, de propiciar un desarrollo metódico del estudio también permite identificar prontamente las limitaciones del modelo y ubicar en dónde se justificaría darle un poco más de detalle.

3.3. Validación del Modelo Conceptual

Esta actividad, aunque crítica, a menudo se omite y es de relevante importancia porque ayuda a asegurar que las suposiciones hechas sobre el modelo son correctas. En caso se encuentren errores u omisiones en el modelo conceptual, estos se deben actualizar antes de proceder a la programación para evitar a posteriori una reprogramación más significativa del modelo, que podría ocasionar más gastos en recursos y tiempo.

3.4. Programación del Modelo

Para la programación del modelo se puede utilizar tanto un lenguaje de programación como un software comercial de simulación. Si bien es cierto, utilizar un lenguaje de programación brinda la posibilidad de tener un mayor control de la programación, en este estudio se optó por utilizar un software comercial para reducir sustancialmente el tiempo de “programación”. El software elegido fue el Arena, en especial porque tiene funcionalidades que facilitan la construcción de un modelo de simulación de eventos discretos.

3.5. Validación del Modelo Programado

La técnica de validación más común se denomina “validación de resultados” y consiste en la comparación de los indicadores de rendimiento de un modelo de simulación con los indicadores de rendimiento comparables del sistema ya existente. Con dicho propósito se optó por utilizar el test T de Student, porque permite determinar si la media de dos conjuntos de datos (reales y simulados) son significativamente diferentes entre sí.

No obstante, independiente de que la validación sea exitosa y se le de credibilidad al modelo, siempre debe revisarse que los resultados de la simulación sean razonables y consistentes con cómo se espera que funcione el modelo.

3.6. Diseño, Realización y Análisis de Experimentos

En la etapa de diseño de experimentos se deben tomar decisiones del tipo: cuánto deben durar las simulaciones y cuál es el número ideal de repeticiones. En especial porque una de las principales dificultades es que el modelo entregue información estadística representativa de la realidad a partir

de una duración y cantidad arbitrarias. Por otro lado, las limitaciones de los recursos informáticos (*hardware*) también juegan un rol importante cuando se toman este tipo de decisiones.

Para nuestro caso de estudio se definieron tres experimentos:

- a. Combinaciones de playas.
- b. Relación entre vacíos y cargados.
- c. Alejamiento del equipo de carguío con respecto a la playa.

Finalmente, se analizará los resultados y se decidirá si se requiere realizar más experimentos.

3.7. Documentación y Presentación de los Resultados de la Simulación

La documentación final para la presentación de los resultados debe contener:

- a. El modelo conceptual (crítico para la reutilización futura del modelo).
- b. Una descripción detallada de la programación hecha en computadora.
- c. Los resultados y conclusiones del estudio.

4. MODELO DE SIMULACION

El modelo de simulación que se desarrollará en el presente estudio pretende construir, a través del uso de datos reales, una réplica computacional de uno de los circuitos de transporte de la mina. El circuito elegido es uno cerrado, es decir, funciona con camiones fijos. La decisión de no trabajar con un sistema de asignación dinámica se debe al interés del autor por analizar el modelo en su estado más básico, sin la interferencia de variables que pudiesen restar objetividad en la posterior interpretación de los resultados.

4.1. Formulación del Problema

Antes de continuar con la formulación del problema es necesario detallar algunos parámetros relevantes del circuito de transporte en análisis. Este tiene una longitud total de 8.720 metros y se encuentra en una fase de descarga (lastre) localizada en la periferia de la mina. Cuenta con una pala electromecánica P&H 2800 XPA de 56 yd³ y una flota de camiones de extracción Komatsu 930E con un factor de carga de 282 toneladas métricas. Además, teniendo en cuenta que al día se trabajan tres turnos y cada uno de ellos tiene una duración de 8 horas nominales, para efectos de este estudio se estableció la meta de producción en 30.000 toneladas métricas por turno.

El circuito cuenta también con una playa ya existente denominada “Compa” y existen cuatro locaciones que poseen las condiciones para convertirse en nuevas playas de relevo (ver Ilustración N° 6). Por tanto, el caso base estará constituido por aquel escenario que sólo incluya a la playa ya existente y los casos alternativos por todas las otras combinaciones de una o más playas adicionales.

Ilustración N° 6: Ubicación de la Playa Existente y Playas Alternativas



Fuente: Elaboración Propia

Por tanto, el objetivo es determinar cuál de los diferentes escenarios es el más beneficioso en términos de productividad, eficiencia, costos y mejor utilización de los recursos necesarios para la construcción e implementación de las playas.

Adicionalmente, posterior a la identificación del mejor escenario se pretende determinar una proporción ideal, entre camiones vacíos y cargados estacionados en las playas al final de un turno, que permita incrementar la productividad de la primera hora del turno siguiente; para finalmente explorar qué ocurre en el sistema conforme la fase se va desarrollando y en consecuencia, las playas recién implementadas van quedando cada vez más alejadas del punto de extracción.

4.2. Recolección de Datos

Puesto que “el uso de una base de datos puede ahorrar una cantidad considerable de tiempo en los esfuerzos de recopilación e incluso proporcionar mejores estimaciones de las distribuciones” (Standridge et al., 2007), la información se recopiló principalmente de la base de datos del sistema de despacho de la mina (Jigsaw) y corresponde al mes de enero de 2018.

En lo que respecta a las rutas de transporte de la mina, el software de despacho tiene las rutas segmentadas por tramos y cada uno tiene una pendiente propia. Para efectos de análisis se considera que un camino minero tiene pendiente negativa si su inclinación se encuentra en el rango de -12% a -5%, horizontal entre -4% a 4% y positiva de 5% a 12%.

Para el análisis de las velocidades se tomó en cuenta la pendiente que tenía cada tramo y los dos únicos posibles estados de los camiones cuando circulan por ellos: vacíos o cargados. Con esos parámetros se clasificaron las velocidades en seis grupos, se establecieron límites de control (dos desviaciones estándar hacia arriba y hacia abajo) y se prosiguió con el trabajo de limpieza de datos. Finalmente, dada la utilidad de “seleccionar una distribución para modelar una cantidad aleatoria tanto al utilizar datos como en ausencia de ellos” (Standridge et al., 2007), con la herramienta *Input Analyzer* del software Arena se determinó las funciones de distribución para cada grupo (ver Tabla N° 1).

En la Tabla N° 1 se puede observar que para cada caso existen dos funciones de distribución. Para los primeros ensayos se utilizó la función que mejor se ajustaba a los datos (Distribución 1), pero dado que varias de estas funciones tienen un comportamiento asintótico (en especial hacia la derecha), ocurría que en algunas replicaciones los resultados obtenidos se encontraban por encima del rango de lo esperado, es decir, aparecían velocidades simuladas de 60 o 70 kilómetros por hora, cuando en la realidad los camiones no pueden -o no deben- superar los 50 kilómetros por hora. Por tal motivo se decidió utilizar funciones triangulares (Distribución 2), porque permitían predefinir los valores límites de las velocidades (en función a los datos) y, además, porque su error cuadrático en la mayoría de los casos era prácticamente idéntico al de las distribuciones iniciales.

Tabla N° 1: Análisis de Velocidades

Velocidad	N° Datos	Media (kph)	Desv. (kph)	Distribución 1	EC* 1	Distribución 2	EC* 2
Subiendo Vacío	30.591	23,8	9,1	NORM(23.8, 9.1)	0,084	TRIA(3, 21.5, 47)	0,084
Subiendo Cargado	189.227	11,7	4,4	3+LOGN(8.85, 5.08)	0,257	TRIA(3, 10.5, 29)	0,268
Horizontal Vacío	170.701	28,3	10,4	NORM(28.3, 10.4)	0,068	TRIA(7, 32.9, 51)	0,068
Horizontal Cargado	131.399	21,9	10,8	3+44*BETA(1.31, 1.74)	0,067	TRIA(3, 15.7, 47)	0,068
Bajando Vacío	197.653	31,0	6,8	TRIA(14, 32.6, 47)	0,121	TRIA(14, 32.6, 47)	0,121
Bajando Cargado	22.429	21,9	8,0	NORM(21.9, 7.96)	0,104	TRIA(3, 18.7, 44)	0,104

* EC: Error Cuadrático

Fuente: Elaboración Propia

Es importante señalar que para el análisis de las velocidades se utilizaron los datos registrados en toda la mina y no sólo los pertenecientes al circuito en análisis. Esto básicamente para disponer de distribuciones representativas de toda la mina si es que en la eventualidad se requiriese analizar otros circuitos. Por último, se optó por clasificar las velocidades en seis “tipos” porque además de facilitar la construcción del modelo, permitía también hacer un cálculo más detallado del consumo de combustible de los camiones.

Para el caso de los tiempos de carga y descarga se realizó un proceso similar: se establecieron límites de control, se procedió a la limpieza de datos y nuevamente con la ayuda de la herramienta *Input Analyzer* se calculó una función de distribución a cada grupo de datos (ver Tabla N° 2). Vale la pena mencionar que el tiempo de maniobras y acuatamiento (en la zona de vaciado) se encuentra incluido dentro del tiempo de descarga.

Tabla N° 2: Análisis de Tiempos de Carga y Descarga

Velocidad	N° Datos	Media (min)	Desv. (min)	Distribución	EC*
Tiempo de Carga	968	2,51	0,64	1.21 + LOGN(1.32, 0.74)	0,002
Tiempo de Descarga	975	1,25	0,51	0.18 + LOGN(1.07, 0.501)	0,003

* EC: Error Cuadrático

Fuente: Elaboración Propia

4.3. Declaración de Supuestos

Dado que lo que se desea es analizar la variación de la productividad del circuito de transporte seleccionado en función a las diferentes configuraciones y capacidades de las playas de relevo, el

modelo no contempla: (i) fallas en los equipos de carguío y transporte -por lo que se considera que siempre tendrán una disponibilidad mecánica del 100%- y (ii) la ocurrencia de imprevistos.

Por otro lado, la zona de carguío del circuito de transporte es lo suficientemente ancha como para permitir el carguío por ambos lados, por tanto, el modelo no considera el tiempo de maniobras y aculatamiento en la zona de carguío. Se asume que cuando la pala termina de cargar por un lado, ya hay otro camión aculatado y esperando en el lado opuesto. De forma similar, la zona de vaciado es también lo bastante ancha como para que descarguen varios camiones a la vez, razón por la cual el modelo tampoco considera la ocurrencia de congestión y, en consecuencia, asume que no existen tiempos de espera en el botadero.

En lo que respecta a las detenciones programadas correspondientes a los periodos de cambio de turno y medio de turno, en la mina caso de estudio estas están definidas de la siguiente manera: (i) para la guardia que se retira el turno finaliza 20 minutos antes del final real de la jornada, (ii) para la guardia entrante el turno comienza -aproximadamente- 20 minutos antes del inicio real de la jornada y (iii) el horario de colación es alrededor del medio turno y dura 30 minutos. Para el modelo se mantendrá el criterio del punto (i), pero con relación al punto (ii), se asumirá que a todo evento el inicio del turno (en máquina) es en el minuto cero (0'), y en cuanto al punto (iii) se define que el medio turno empieza en el minuto doscientos cuarenta (240').

En cuanto a las playas, es necesario aclarar que para el planteamiento del caso base se asumió que la capacidad de la playa "Compa" sería indeterminada. No obstante, en la revisión de los casos alternativos su capacidad se estableció en función a los resultados de las simulaciones.

Por último, la experiencia sugiere que el peor inicio de un turno ocurre cuando la mayoría de los camiones lo hacen vacíos. Por lo tanto, se decidió utilizar esta condición adversa para identificar el escenario que, a pesar de dicha condición, ofrezca el mejor resultado

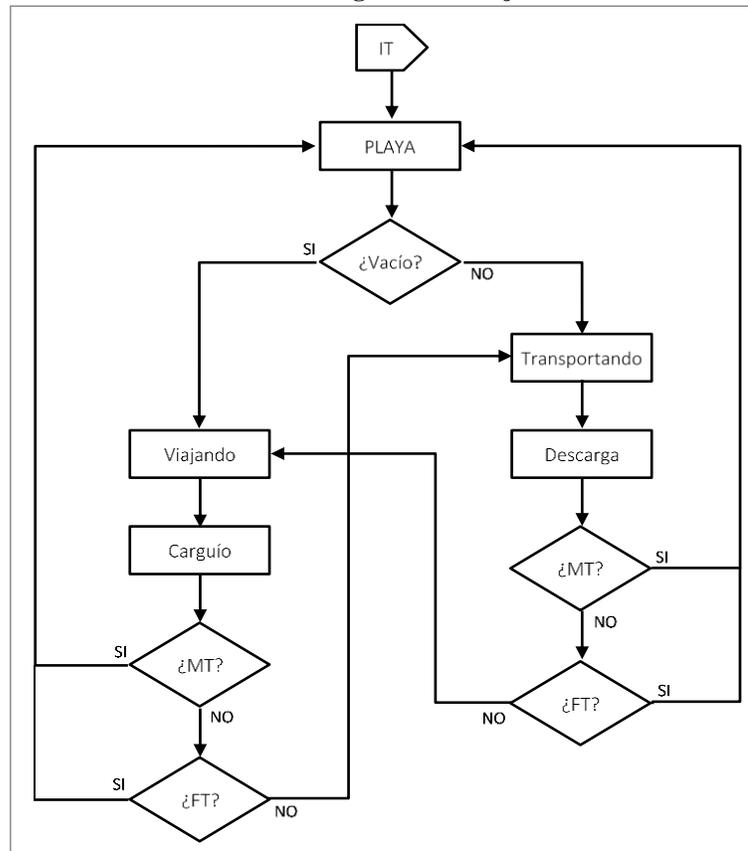
4.4. Programación del Modelo

Las entidades más importantes para el modelo son los camiones de extracción. Estos inician su turno en una playa de relevo (playa "Compa" en el caso base) y de acuerdo con su estado, vacío o cargado, se le asigna un destino. Si el camión se encuentra vacío se le ordena que viaje hacia el equipo de carguío y si por el contrario está cargado, entonces deberá transportar el material hacia el botadero para descargar. Una vez que un camión concluye con cualquiera de estos dos procesos (carguío o descarga) pasa por dos condicionales y revisa en primer lugar si se encuentra próximo al periodo del medio turno. Si la respuesta es afirmativa entonces se dirigirá hacia la playa existente en el circuito, en donde permanecerá por 30 minutos; y si la respuesta es negativa entonces pasará al siguiente condicional y revisará ahora si se encuentra próximo al final del turno. De forma similar a lo anterior, si la respuesta es afirmativa entonces el camión se dirigirá a la playa de relevo, pero

esta vez permanecerá ahí de forma definitiva; y si nuevamente la respuesta es no, entonces retomará su normal tránsito hacia el siguiente proceso (ver Ilustración N° 7).

Además, es importante recordar que “la premisa básica durante el proceso de modelado es que existe un punto en el que un mayor grado de complejidad en el modelo produce menos utilidad o valor” (Standridge et al., 2007), y “ya que a menudo pareciese que todo podría ser un factor de importancia para el rendimiento” (Sadowski, 2006), se tendrá especial cuidado en no sobrecargar el modelo con algoritmos o secuencias que no contribuyan significativamente con el estudio.

Ilustración N° 7: Diagrama de Flujo del Modelo



Fuente: Elaboración Propia

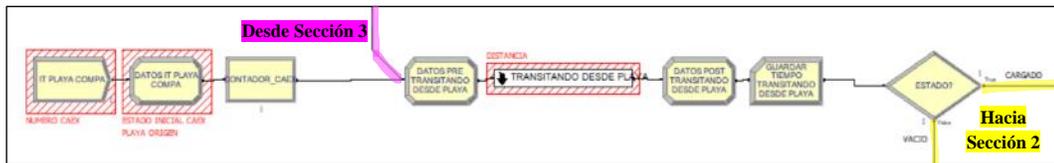
4.4.1. Descripción del Modelo Computacional

El modelo fue desarrollado en Arena, un “software para el análisis y simulación de procesos” (Chinbat y Takakuwa, 2008), y se encuentra dividido en tres secciones: la primera tiene la función de generar los camiones y asignarles un destino en función a su estado, la segunda replica el proceso de carguío y transporte y la última se encarga de enviar los camiones a playa si ya es tiempo del medio o final del turno.

4.4.1.1. Sección 1

En detalle, la sección 1 (ver Ilustración N° 8) inicia con un módulo *create* llamado “IT Playa Compa” encargado de crear las entidades (camiones) para el modelo. Una vez creadas se les asigna dos atributos: (i) el “estado” en que iniciaron el turno (un valor “1” para los camiones vacíos y un “2” para los cargados) y (ii) la “playa” de origen (también identificadas con números, por ejemplo la playa “Compa” posee el número “1”); e inmediatamente después ingresan al proceso “Contador Caex”, cuya única función es contabilizar el número de camiones que entraron al modelo. Además, es importante notar que en este punto se enlaza un conector proveniente de la sección 3 que retorna entidades (que acaban de finalizar el medio turno) hacia el principio del modelo.

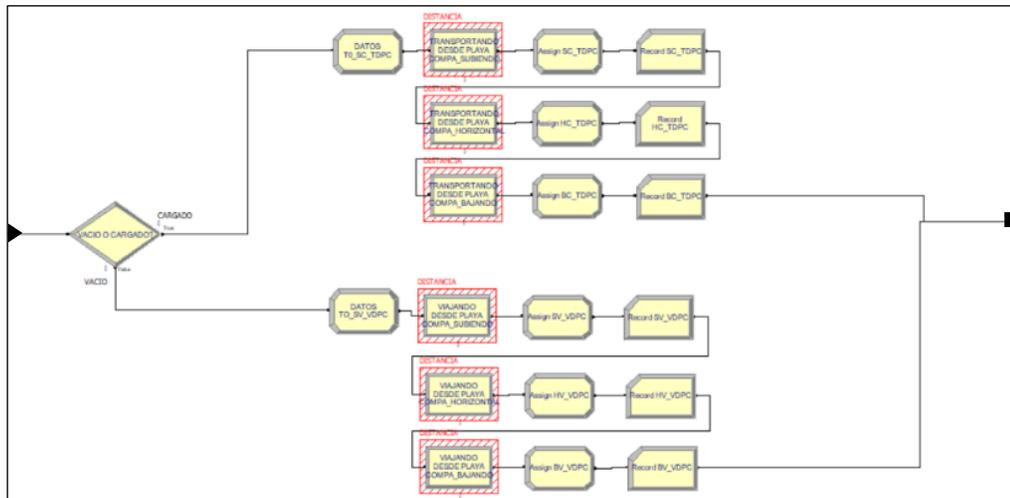
Ilustración N° 8: Modelo de Simulación. Sección 1



Fuente: Elaboración Propia

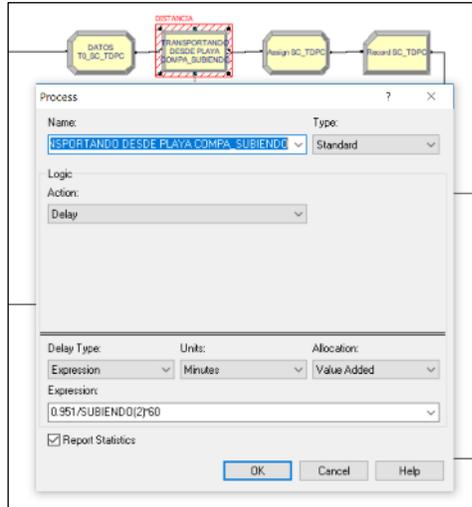
Luego, estas entidades son enviadas a un submodelo llamado “Transitando Desde Playa” (ver Ilustración N° 9), que replica el tránsito de las entidades desde la playa de origen a sus dos posibles destinos (botadero o equipo de carguío) a través de la generación de un tiempo de tránsito aleatorio. Para ello cada submodelo cuenta con una condicional que revisa en primer lugar el “estado” de las entidades. Si se encuentran vacías lo harán por el camino de los procesos “viajando desde playa” y si por el contrario, están cargadas irán por el camino de los procesos “transportando desde playa”, y adicionalmente, se les adicionará un atributo llamado “tonelaje” (que es igual a 282 toneladas y corresponde al factor de carga de los camiones cuando transportan lastre).

Ilustración N° 9: Submodelo “Transitando Desde Playa”



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración N° 10: Proceso “Transportando desde Playa Compa - Subiendo”



Fuente: Elaboración Propia

Cada camino está compuesto por tres procesos: (i) subiendo, (ii) horizontal y (iii) bajando. Y a su vez, cada uno de estos procesos constituye una *delay* (ver Ilustración N° 10) determinado por la expresión $t = d/v$, en donde la distancia se determina a partir de la sumatoria de aquellos tramos del circuito en análisis que tienen el mismo tipo de pendiente; y la velocidad, de la distribución de probabilidades determinada en la Tabla N° 1. Además, para facilitar el funcionamiento del modelo, la velocidad está formulada como una expresión asociada al “estado” vacío o cargado de la entidad. Por ejemplo, la distribución de probabilidad de la velocidad a la que se desplaza un camión al subir cargado se representa utilizando la expresión “Subiendo(2)” (ver Ilustración N° 11).

Ilustración N° 11: Velocidades en Función al “Estado” de la Entidad

Expression - Advanced Process						Expression Values	
	Name	Rows	Columns	Data Type	File Name	Expression Values	
1	SUBIENDO	2		Native		2 rows	
2	HORIZONTAL	2		Native		2 rows	
3	BAJANDO	2		Native		2 rows	

Expression Values	
1	TRIA(3, 21.5, 47)
2	TRIA(3, 10.5, 29)

Fuente: Elaboración Propia

Además, a la entrada y salida de cada uno de estos módulos *delay* existe un *assign* encargado de registrar el tiempo de entrada y salida de las entidades, lo que permite determinar el tiempo total de tránsito de las entidades en los tres tipos de pendiente, información que posteriormente se guarda en un *record* que se encuentran al final de cada *delay*. Clasificar los resultados de esta manera es particularmente útil porque en etapas posteriores permite calcular con mayor precisión el consumo de diesel de los camiones (el consumo de combustible varía también en función a la pendiente por la que se desplazan los vehículos, ver Anexo 7.3).

Por otro lado, antes de ingresar y al salir del submodelo también existen unos módulos *assign* encargados de registrar el tiempo de entrada y salida del submodelo. El tiempo total de tránsito por

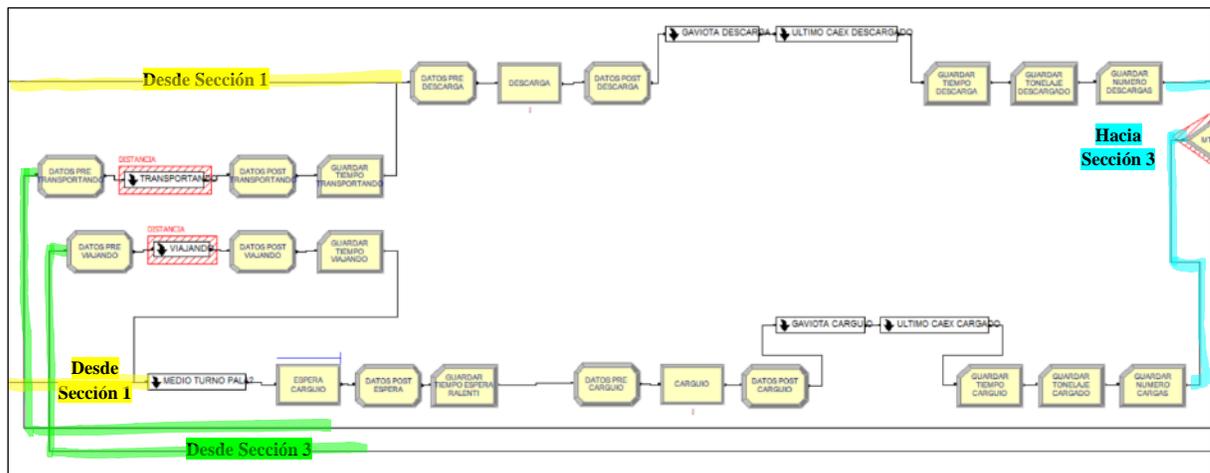
el submodelo queda después registrado en un *record* y es utilizado más adelante en los cálculos de utilización efectiva de los camiones.

Es importante mencionar que, dada la imposibilidad de generar dos *exit* diferentes para salir del submodelo -por lo menos en la versión de Arena utilizada- es que los dos caminos, que generan el tiempo aleatorio de tránsito de las entidades de acuerdo a su “estado” vacío o cargado, confluyen. Por tal razón, al finalizar esta sección se usa nuevamente una condicional que verifica el “estado” de las entidades y, dado que el tiempo de tránsito ya se encuentra simulado, simplemente las envía de forma instantánea hacia su destino. Es decir, la única función de esta condicional es la de bifurcar de nuevo el camino.

4.4.1.2. Sección 2

A esta sección ingresan entidades tanto de la sección 1 como de la sección 3 (ver Ilustración N° 12), y cumple la función de replicar el proceso carguío y transporte.

Ilustración N° 12: Modelo de Simulación. Sección 2



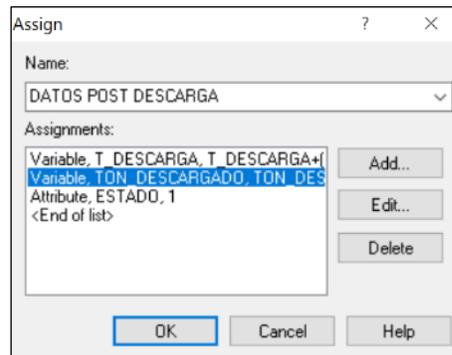
Fuente: Elaboración Propia

“Caminos” Provenientes de la Sección 1:

Desde la sección 1 se conectan dos caminos para los dos posibles “estados” de las entidades. Los camiones cargados arriban al proceso *delay* llamado “descarga” y definido por la distribución de probabilidades presentada en la Tabla N° 2. Además, a ambos lados del proceso existen módulos *assign* que se encargan de registrar el momento de entrada y salida (con el objetivo de generar una sumatoria del tiempo que les tomó a las entidades realizar tal proceso, esto para posteriores cálculos de utilización efectiva de las entidades). Adicionalmente, el módulo *assign* ubicado a la salida del *delay* “descarga” cuenta con una variable llamada “Ton_Descargado” que permite contabilizar el tonelaje descargado hasta ese preciso instante (ver Ilustración N° 13) y dado que, hipotéticamente

la entidad acaba de descargar, existe un atributo que cambia su “estado” cargado por el de vacío (representado por el número “1”).

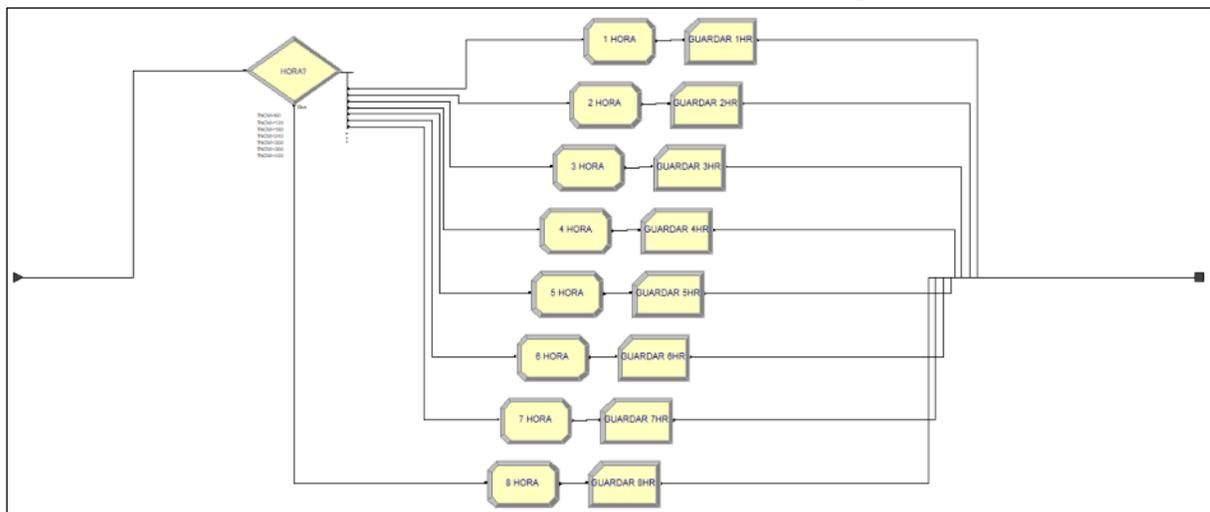
Ilustración N° 13: Assign “Datos Post Descarga”



Fuente: Elaboración Propia

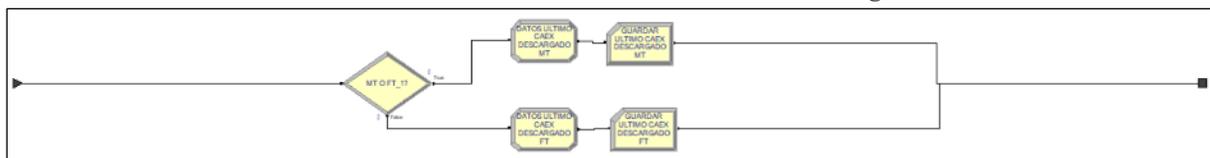
Al finalizar el proceso “descarga” las entidades se dirigen hacia dos submodelos que cumplen la función de registrar datos. El primero de ellos, el submodelo “Gaviota Descarga” (ver Ilustración N° 14), utiliza un condicional para revisar el momento en el tiempo en que las entidades ingresaron al submodelo para contabilizar el tonelaje descargado por hora, información que se utiliza para la construcción del bien conocido gráfico de “gaviota”.

Ilustración N° 14: Submodelo “Gaviota Descarga”



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración N° 15: Submodelo “Último Caex Descargado”



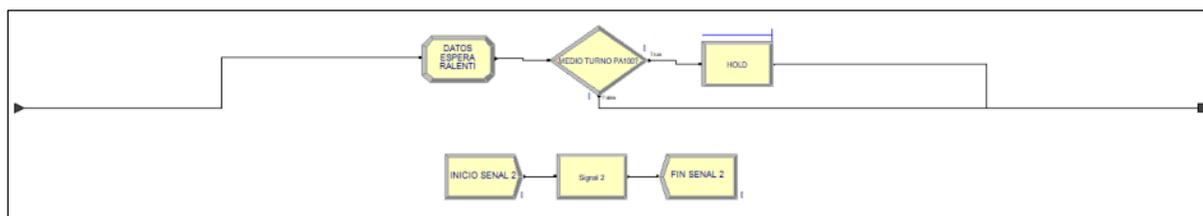
Fuente: Elaboración Propia

El siguiente submodelo llamado “Último Caex Descargado” (ver Ilustración N° 15) permite conocer en qué momento descargó el último camión antes del medio y fin de turno. Para ello utiliza un condicional que envía por un camino a todas las entidades que arriban antes del medio turno (que ocurre en el minuto 240) y por otro a las entidades que llegan después de dicho umbral. Luego, en los módulos *assign* existe una variable denominada “T” que se actualiza cada vez que ingresa una entidad. De esa forma siempre queda registrado en los *record* “Último Caex Descargado FT/MT” del submodelo el momento en el tiempo en que pasó el último camión.

Los últimos módulos de esta secuencia lógica lo constituyen unos *record* que guardan: (i) la sumatoria del tiempo de descarga de las entidades, (ii) el tonelaje total descargado y (iii) el número total de descargas (ver Ilustración N° 12).

En cuanto a los camiones vacíos provenientes de la sección 1, estos ingresan por defecto en el submodelo “Medio Turno Pala?” (ver Ilustración N° 16). Este submodelo cumple la función de verificar si el momento en el tiempo en que las entidades arriban a él es durante el periodo en que el equipo de carguío (en teoría el operador) se encuentra en medio turno. Para ello, posee un módulo *assign* llamado “Datos Espera Ralenti” que registra el momento en que una entidad pasa por él y a continuación un condicional que revisa si efectivamente el momento de arribo es entre los minutos 240 y 270. Si la respuesta es negativa las entidades simplemente salen del submodelo, pero si por el contrario el momento de arribo es durante dicho periodo, las entidades pasarán a un módulo *hold* que los retendrá hasta el minuto 270, momento en que se enviará una señal al *hold* para “liberar” a las entidades.

Ilustración N° 16: Submodelo “Medio Turno Pala?”



Fuente: Elaboración Propia

Al salir del submodelo, ingresan a un proceso “*seize*” que representa la fila de espera o cola en el equipo de carguío. Si no hay camiones en espera la entidad se dirigirá directamente hacia los módulos que representan el proceso de carguío o sino esperará a que le toque su turno. Cualquiera sea el caso, cuando una entidad sale del *seize* se encuentra con un *assign* que cumple la función de sumar el tiempo de espera total (en ralenti³) de los camiones, ya sea porque hay más equipos en fila o porque se encuentran esperando a que la pala finalice el medio turno. Luego, la información

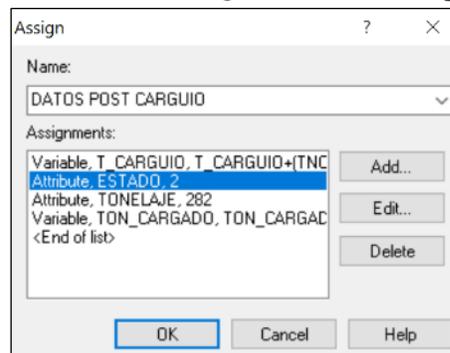
³ Entendiéndose por ralenti que el camión se encuentra con el motor encendido, consumiendo combustible, pero sin realizar desplazamiento alguno.

del tiempo de espera se registra en un módulo *record* y es utilizada para el cálculo del consumo de combustible.

Ahora, es importante aclarar que en Arena todo proceso está constituido por tres etapas: *seize*, *delay* y *release*. Durante el *seize* una entidad es tomada por un recurso (equipo de carguío) y queda en fila hasta que le toque su turno. Cuando al fin este llega la entidad pasa al *delay* (retraso) que no es otra cosa que el tiempo que dura el proceso y finalmente, al concluir, el recurso libera la entidad en el *release*. En nuestro caso, el *seize* se encuentra separado del *delay release* porque de otra forma no sería posible contabilizar los tiempos de espera de las entidades (en las inmediaciones del equipo de carguío) y para propósitos del estudio es importante contar con dicha información.

Aclarado esto el paso siguiente es que las entidades ingresen al *delay release* “carguío”. Para ello primero pasan por un módulo *assign* que registra el momento de ingreso de las entidades y una vez dentro la duración del proceso está definida por la distribución de probabilidades expuesta en la Tabla N° 2. Después, al concluir el proceso “carguío” las entidades ingresan a un módulo *assign* que (i) contabiliza el tiempo de carguío de cada una y lo suma a una variable llamada “T_Carguío”, que no es otra cosa que la sumatoria de los tiempos de carguío de todas las entidades que pasaron por el proceso hasta ese momento (esta información se utiliza después en el cálculo de la utilización efectiva de los camiones); (ii) luego, dado que en teoría los camiones acaban de cargar, es necesario realizar una modificación en su atributo “estado” para indicar que efectivamente lo están, para ello se le asigna un valor “2” a dicho atributo y (iii) se crea uno nuevo llamado “tonelaje” que se fija en 282 (factor de carga). (iv) Finalmente se incluye la variable “Ton_Cargado” para sumar el tonelaje cargado por el equipo de carguío hasta ese momento (ver Ilustración N° 17).

Ilustración N° 17: Assign “Datos Post Carguío”



Fuente: Elaboración Propia

De forma análoga a lo que ocurre en el camino de los camiones que inician el turno cargados, los pasos finales de este camino están compuestos por los submodelos: “Gaviota Carguío”, “Último Caex Cargado” y por los *record* que registran el tiempo de carguío, el tonelaje cargado y el número de cargas. Su funcionamiento es similar a lo descrito anteriormente, sólo que ahora aplica para los camiones que iniciaron el turno vacíos, pero concluyeron después el proceso de carguío.

“Caminos” Provenientes de la Sección 3:

Las entidades provenientes de la sección 3 (que se describirá con mayor detalle en el siguiente subtítulo) son aquellas que no están en proceso de medio o final de turno y por tanto continúan con su tránsito normal hacia alguno de los dos destinos de la sección 2, por lo que si su atributo “estado” corresponde a cargado irán al submodelo “transportando” y si por el contrario se encuentran vacíos se dirigirán al submodelo “viajando”. En el caso de los camiones cargados, primero pasarán por un *assign* que registrará el tiempo de entrada de las entidades y a continuación entrarán al submodelo “transportando” (ver Ilustración N° 18).

Ilustración N° 18: Submodelo “Transportando”



Fuente: Elaboración Propia

Al igual que en el submodelo “Transitando Desde Playa”, este se encuentra conformado por varios *delay* con duraciones expresadas en términos de la velocidad de transporte para cada tipo de pendiente (ver Tabla N° 1) y de la longitud de los tramos que conforman el perfil de transporte por tipo de pendiente (subida, horizontal, bajada). Por ejemplo, un camión que transporta lastre desde el equipo de carguío hacia el botadero tendría que realizar un recorrido de 1,7 km subiendo, 1,9 km en horizontal y 0,7 km bajando. Luego, al salir de cada uno de estos *delay*, las entidades pasan por otro *assign* que revisa el momento en que lo hacen y calcula el tiempo total de transporte para cada tipo de pendiente, información que después se registra en un *record* (y que es utilizada más adelante para el cálculo del consumo de combustible).

Cuando las entidades finalmente abandonan el submodelo “Transitando Desde Playa” pasan nuevamente por un *assign* que se encarga de calcular en la variable “T_Transportando” el tiempo total de transporte de las entidades y después dicha información se registra en un *record*. Concluida esta etapa las entidades simplemente se envían al siguiente proceso: “descarga”.

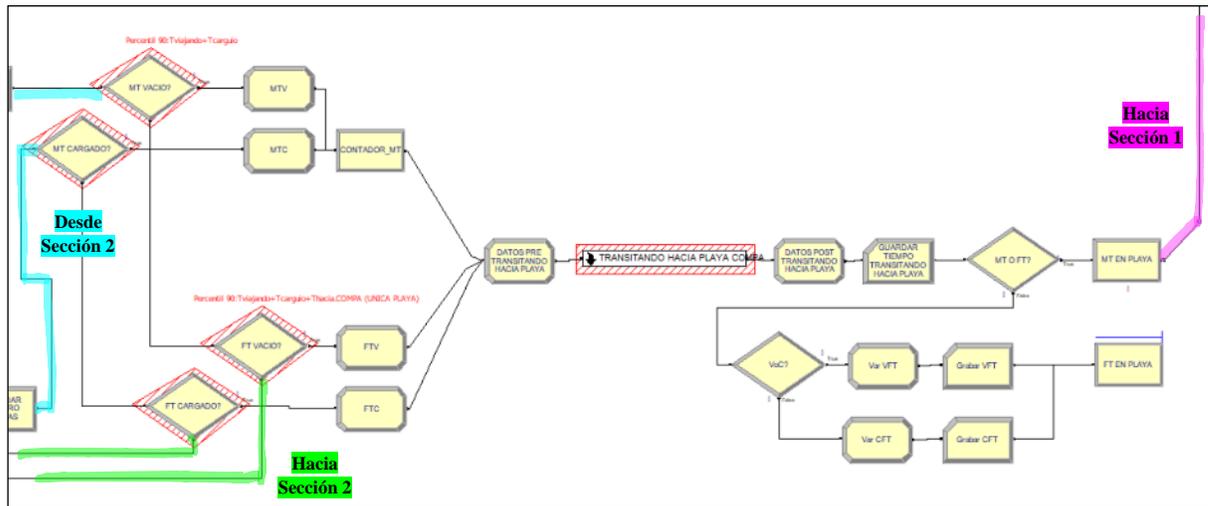
En el caso de los camiones que llegan vacíos desde la sección 3, estos siguen pasos análogos a lo descrito líneas arriba, con la única salvedad que al concluirlos, las entidades ahora son enviadas al proceso “carguío”.

4.4.1.3. Sección 3

La sección 3 se encarga de verificar si una vez culminados los procesos de carguío o descarga, las entidades se encuentran próximas al periodo del medio o final de turno. A esta sección ingresan

dos tipos de entidades desde dos caminos diferentes: (i) los que acaban de descargar y (ii) los recién cargados (ver Ilustración N° 19).

Ilustración N° 19: Modelo de Simulación. Sección 3



Fuente: Elaboración Propia

Los que provienen del primer grupo (vacíos) siguen la siguiente secuencia lógica:

- a. Se envían a una condicional llamada “MT Vacío?” (ver Ilustración N° 20). En ese módulo se toma el momento en el tiempo en que arriba la entidad y a eso se le suma un parámetro calculado por separado (18,89 minutos) que, en este caso, corresponde al percentil 90 de “n” simulaciones de los procesos “viajando” y “carguío”, y este resultado se compara con el horario en que está programado el inicio del medio turno (que es en el minuto 240). El propósito de este ejercicio es evaluar si la entidad tiene buenas posibilidades de llegar al siguiente proceso antes de que inicie el medio turno.

Ilustración N° 20: Condicional “MT Vacío?”

Fuente: Elaboración Propia

Además, la condicional cuenta con una secuencia que revisa la cantidad de entidades que han pasado por ella, para evitar que estas realicen el medio turno más de una vez.

- b. Si el valor de la expresión es verdadero entonces la entidad pasa un *assign* que le genera dos atributos: (i) el tipo de detención (“1” para medio turno y “2” para fin de turno) y (ii) la playa en la que lo realizará. Inmediatamente después se enviará al proceso “Contador MT”, que consiste en un *delay* con tiempo de retraso igual a cero y sólo sirve para conocer cuántas entidades han sido enviadas al medio turno.
- c. Si el valor de la expresión es falso significa que a la entidad no le corresponde realizar el medio turno y por tanto se le envía a la condicional “FT Vacío?” para verificar si está en horario de fin de turno (ver Ilustración N° 21). Este módulo revisa el momento de arribo de la entidad y le suma un parámetro (32,34 minutos) que corresponde al percentil 90 de “n” simulaciones de los procesos “viajando”, “carguío” y “transportando hacia playa”.

Ilustración N° 21: Condicional “FT Vacío?”

Fuente: Elaboración Propia

Nuevamente, el propósito de esta condicional es evaluar si la entidad tiene posibilidades de llegar al siguiente proceso y, además, arribar después a una playa de estacionamiento antes de que finalice el turno.

- d. Si el valor de esta nueva condicional es verdadero, entonces la entidad entra a un módulo *assign* que le genera los atributos de tipo de detención y la playa en la que la realizará y, si en cambio el valor es falso, la entidad simplemente retornará a la sección 2 para retomar su normal tránsito a través del modelo (ver Ilustración N° 19).

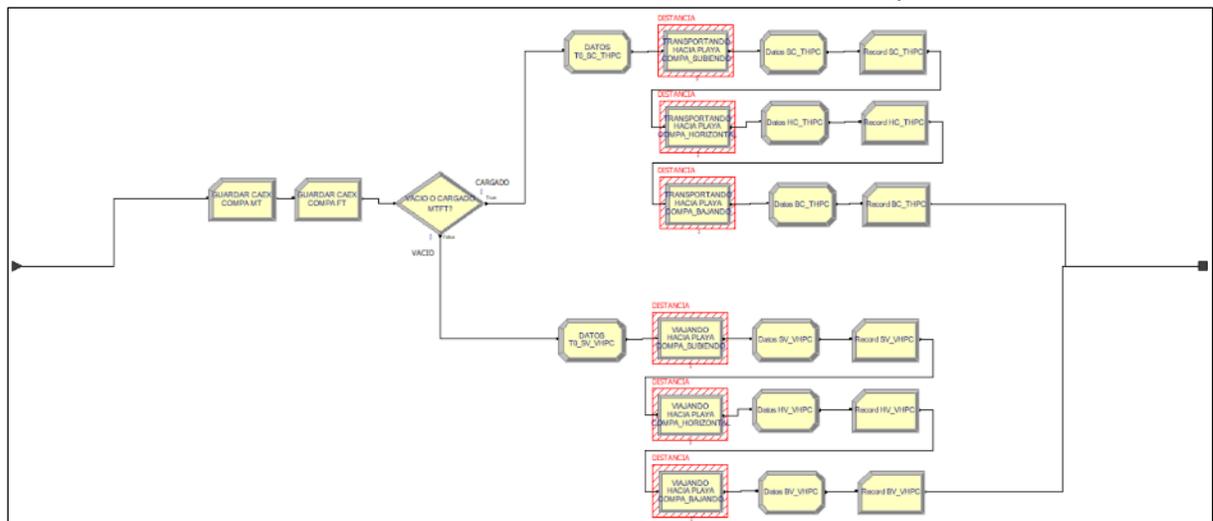
Análogamente, las entidades que provienen del segundo grupo (cargados) siguen una lógica similar:

- a. Se envían al condicional “MT Cargado?” para verificar si al tratar de realizar los procesos “transporte” y “descarga” superarían el umbral del periodo de inicio del medio turno.
- b. Si el valor es verdadero, entonces se les asigna un atributo de tipo de detención y la playa en donde la realizarán.

- c. Si el valor es falso, entonces irán al condicional “FT Cargado?” para verificar si al tratar de realizar los procesos “transporte”, “descarga” y “viajando hacia playa” sobrepasarían el umbral del periodo de inicio del fin de turno.
- d. Si el resultado de esta nueva condicional es verdadero, entonces se les asigna un atributo de tipo de detención y la playa en donde la realizarán, y si por el contrario es falso, sólo se dirigirán hacia la sección 2 para continuar por su tránsito dentro del modelo.

Finalmente, todos los resultados verdaderos de las condicionales antes descritas se dirigen al submodelo “Transitando Hacia Playa” (ver Ilustración N° 22). Esto porque se ha resuelto que deben cumplir con algún tipo de detención y es necesario simular el tiempo que les tomaría transitar hacia la playa en donde la realizarán. Para tal efecto existen dos módulos *assign*, que registran el tiempo de entrada y salida del submodelo, información que después de guarda en un *record*.

Ilustración N° 22: Submodelo “Transitando Hacia Playa”



Fuente: Elaboración Propia

Dentro del submodelo se desarrolla una dinámica igual a la descrita en párrafos previos. Se simula el tránsito de las entidades, en función a su atributo “estado” y haciendo una diferenciación en cuanto a la velocidad a la que lo hacen en cada tipo de pendiente. Adicionalmente, el submodelo cuenta con dos *record* al principio cuya única función es la de contar cuántos camiones se enviaron a realizar el medio y final de turno. Esto sólo con el propósito de descartar la ocurrencia de posibles errores lógicos.

Luego, fuera del submodelo hay un nuevo condicional que revisa el tipo de detención. Si esta corresponde al medio turno, entonces la entidad se envía a un proceso *delay* en donde permanecerá por treinta minutos y si corresponde al final de turno, se envía a un *hold* que la retendrá hasta que finalice el turno, es decir, hasta que concluya el modelo.

Por último, cómo ya se habrá visto en la Ilustración N° 19, al salir de la condicional anterior las entidades no pasan directamente hacia el módulo *hold*, sino más bien ingresan a una secuencia de condicionales y módulos adicionales. Por tanto, es importante aclarar que estos sólo cumplen la función de contabilizar cuántos camiones finalizaron el turno vacíos o cargados, información que después sirve para analizar cómo se distribuye la proporción de camiones vacíos/cargados de forma “natural” dentro del modelo.

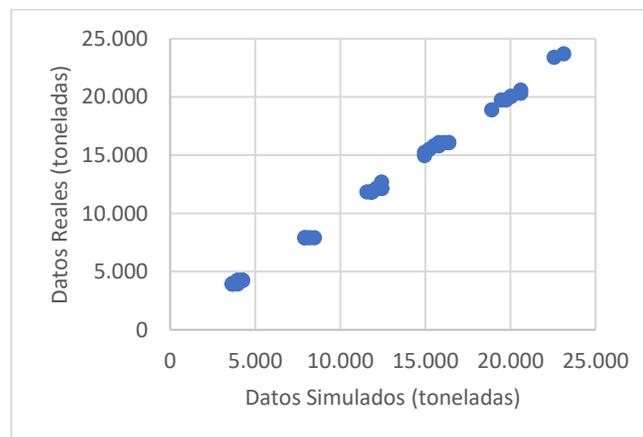
4.5. Verificación y Validación del Modelo

La verificación y validación son etapas diferentes de la construcción del modelo. La primera se encarga de “comprobar que el modelo realmente hace lo que uno cree que debe hacer” (Sadowski and Sturrock, 2006). Y aunque puede llegar a ser un proceso lento y tedioso, se suele realizar con pruebas que consisten en “sobrecargar el modelo con entidades y ejecutarlo sección por sección. (Chinbar y Takakuwa, 2008). No obstante, no se identificó ninguna anomalía durante tales ensayos.

Por otro lado, “la validación es la tarea de garantizar que el modelo se comporta igual que el sistema real” (Chinbar y Takakuwa, 2008). En nuestro caso, para validar el modelo de simulación se generaron múltiples replicaciones del caso base para diferente número de camiones y se comparó los resultados de la variable “tonelaje descargado” obtenidos de las simulaciones con los resultados reales de la operación.

Se utilizó el Test T de Student para comparar los dos grupos muestrales y ver si existía una diferencia estadísticamente significativa entre ellos con un 95% de confianza. Se validó la hipótesis de homocedasticidad a través de una Prueba F y en consecuencia se utilizó la Prueba T para grupos muestrales con varianzas homogéneas, obteniendo como resultado un estadístico t de -0,055 y un valor P de 0,956. Al ser el valor P mayor al nivel de significancia se acepta la hipótesis de que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los dos grupos muestrales y, por lo tanto, se valida el modelo.

Ilustración N° 23: Datos Simulados & Datos Reales



Fuente: Elaboración Propia

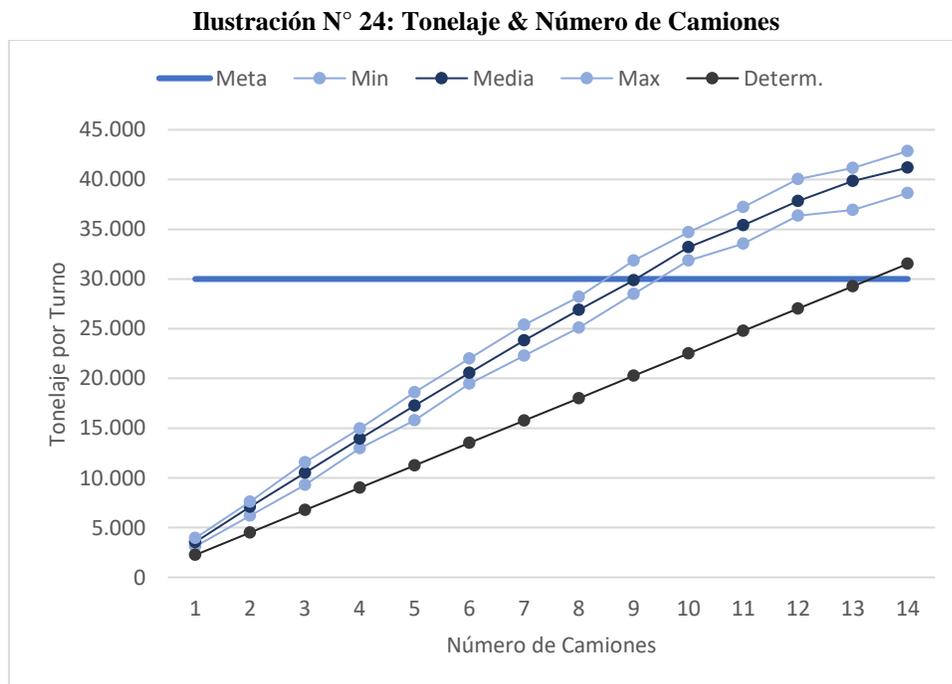
No obstante, es importante señalar que “la verificación del modelo debe realizarse a lo largo del proyecto” (Sadowski y Sturrock, 2006), no sólo en las etapas primigenias.

4.6. Diseño de Experimentos

Por los numerosos objetivos que tiene el estudio, los experimentos se dividieron en tres partes o etapas. La primera se encarga de encontrar la mejor combinación de playas (y estacionamientos), la siguiente analiza la relación entre camiones vacíos y cargados estacionados en una playa al final de un turno y la influencia que esto podría tener sobre la productividad. Por último, se incluyó una etapa adicional en la cual se explora qué podría ocurrir a posteriori con las playas, es decir, cuando estas ya estén construidas y el equipo de carguío se aleje de ellas como consecuencia del desarrollo de la fase.

4.6.1. Combinaciones de Playas

Dado que el problema plantea una meta de producción definida, era necesario determinar con cuántos camiones se iban a realizar los diferentes experimentos de tal forma que se garantice, para todos los casos, el cumplimiento de dicha meta. Con tal propósito se tomó el caso base y -al igual que en el proceso de validación- se probó el modelo a diferente número de camiones. Los resultados obtenidos se presentan en la Ilustración N° 24.



Fuente: Elaboración Propia

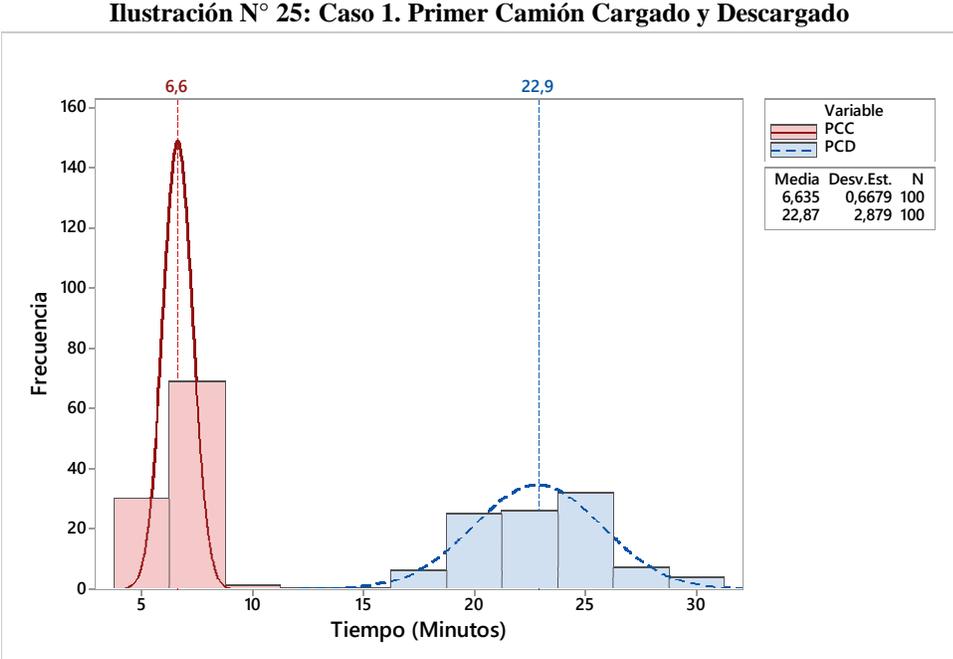
Allí se observa que aquellas pruebas que consideraron de diez a más camiones dentro de sus modelos superaron -hasta en sus valores mínimos- la meta de producción de treinta mil toneladas

por turno. Por tanto, se estableció como parámetro de entrada que todos los casos en análisis contarían con diez camiones, puesto que basta con esa cantidad para cumplir con la meta y el uso de una cantidad mayor sólo significaría una pérdida de recursos.

Por otro lado, se determinó que las posibles combinaciones de playas adicionales resultarían en quince casos o escenarios distintos. Un número grande en comparación a lo que se tenía previsto. Por tal motivo se estableció una estrategia que ayudase a identificar las combinaciones que tuviesen un mayor potencial de aporte y que permitiese al mismo tiempo descartar las que no. Con dicho fin se decidió revisar primero aquellas combinaciones que tuviesen una sola playa adicional y después, en función a los resultados, explorar combinaciones con un mayor número de playas que pudiesen tener algún potencial de contribuir al incremento de la productividad.

4.6.1.1. Caso 1: Compa

El Caso 1 es en estricto rigor el caso base. Considera la existencia de una única playa llamada “Compa” (ubicada a 2,8 kilómetros del punto de carguío) y diez camiones dentro del circuito. Por tanto, será el que se utilizará como referencia para el posterior análisis comparativo. Los resultados obtenidos de este modelo son los siguientes:

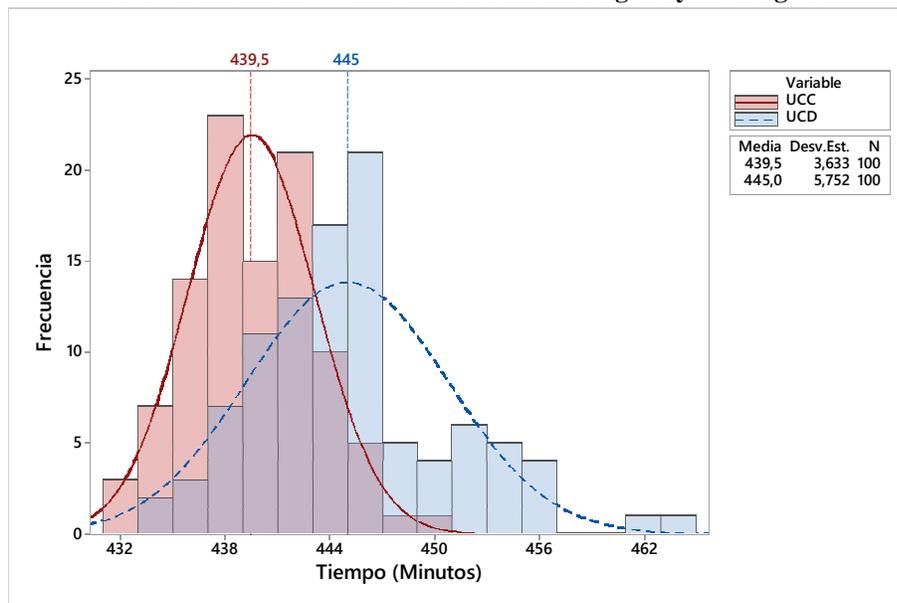


Fuente: Elaboración Propia

- En la fase inicial del turno: En promedio el primer camión cargado (PCC) aparece durante el minuto 6 y el primer camión en descargar (PCD) lo hace recién en el minuto 22 (ver Ilustración N° 25). Que el primer evento de descarga ocurra tan tarde se debe a la condición que establece que todos los camiones iniciarían el turno en estado “vacío”. En esa línea, lo ideal es que estos eventos

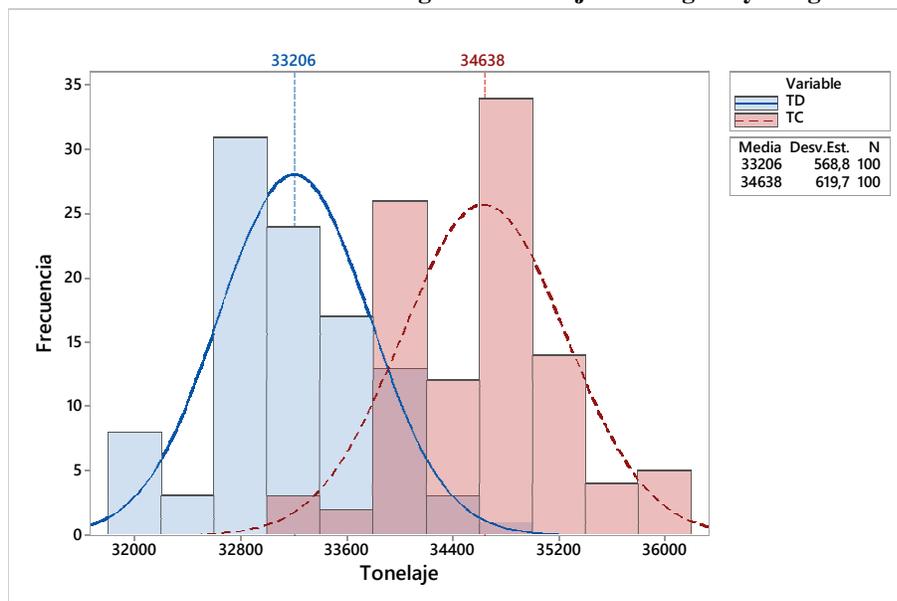
siempre ocurran cercanos al minuto cero, porque eso indicaría que la pala volvió rápidamente a la operación y que los camiones, por su parte, iniciaron temprano el aporte de tonelaje.

Ilustración N° 26: Caso 1. Último Camión Cargado y Descargado



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración N° 27: Caso 1. Histograma Tonelaje Descargado y Cargado



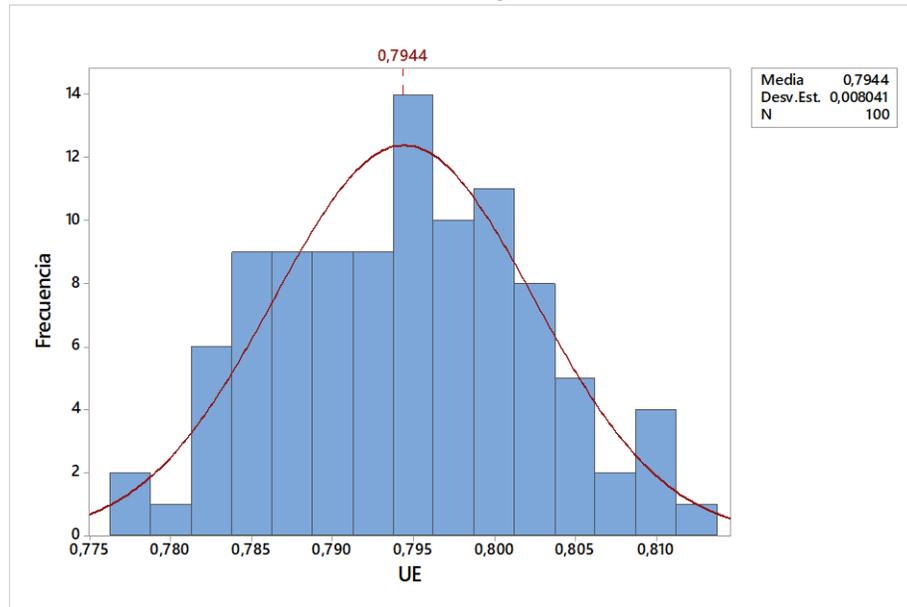
Fuente: Elaboración Propia

- En la fase final del turno: En promedio el último camión en cargar (UCC) lo hace en el minuto 439 y el último camión en descargar (UCD) en el minuto 445 (ver Ilustración N° 26). Esto demuestra que tanto el equipo de carguío como los camiones se detienen varios minutos antes de lo estipulado. Por consiguiente, para este caso lo recomendable es que los eventos ocurran siempre

lo más cercano posible al minuto en que empieza el cambio de turno (460'), porque eso garantizaría un mejor uso de los recursos.

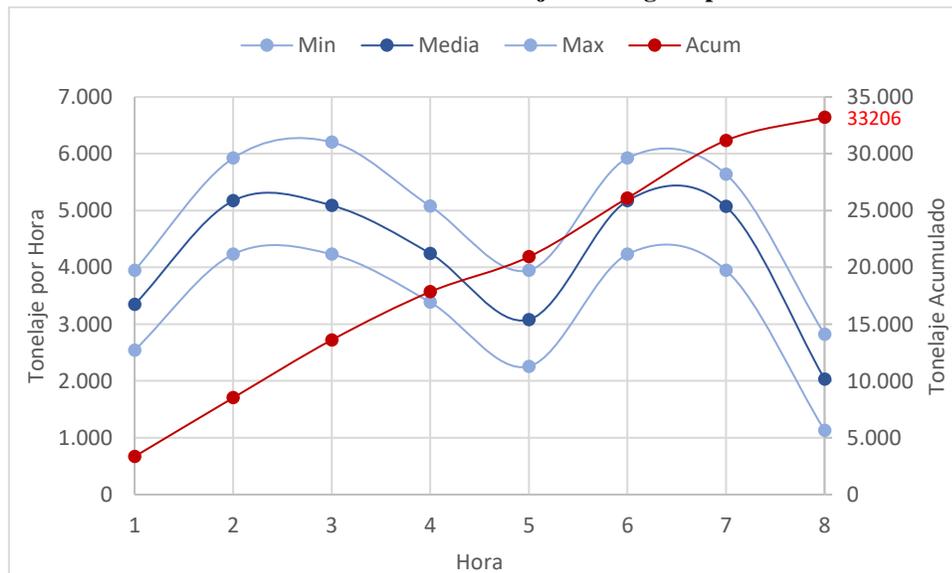
- En promedio se descargaron 33.206 toneladas y se cargaron 34.628 toneladas (ver Ilustración N° 27). Además la utilización efectiva de los camiones fue de 79,44% (ver Ilustración N° 28).

Ilustración N° 28: Caso 1. Histograma Utilización Efectiva



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración N° 29: Caso 1. Tonelaje Descargado por Hora



Fuente: Elaboración Propia

- Por último, en la Ilustración N° 29 se puede ver el tonelaje descargado por hora durante todo el turno (“la gaviota” y la sumatoria de los valores medios (tonelaje acumulado).

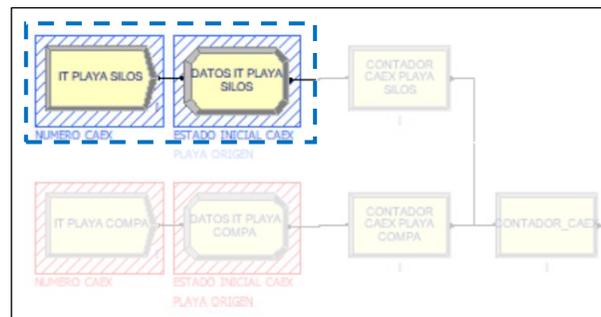
4.6.1.2. Caso 2: Compa y Silos

El Caso 2 considera la existencia de dos playas dentro del circuito: “Compa” y “Silos”. Estas se encuentran a 2,8 y 2,6 kilómetros del punto de carguío, respectivamente.

Para el estudio de este caso-y en general para todos los casos siguientes - fue necesario incluir algunos módulos adicionales al modelo original y que básicamente consistieron en:

- Una secuencia (en la Sección 1) encargada de crear entidades y asignarles un atributo para identificar la playa de donde provienen al inicio del turno (Ilustración N° 30).

Ilustración N° 30: Módulos Adicionales: Creación Entidades Playa Silos



Fuente: Elaboración Propia

- Un submodelo (en la Sección 1) que replique el tránsito de las entidades desde las playas de relevo adicionales hacia los procesos carguío o descarga y registre la información (ver Ilustración N° 31).

Ilustración N° 31: Módulos Adicionales: Submodelo Transitando Desde Playa Silos



Fuente: Elaboración Propia

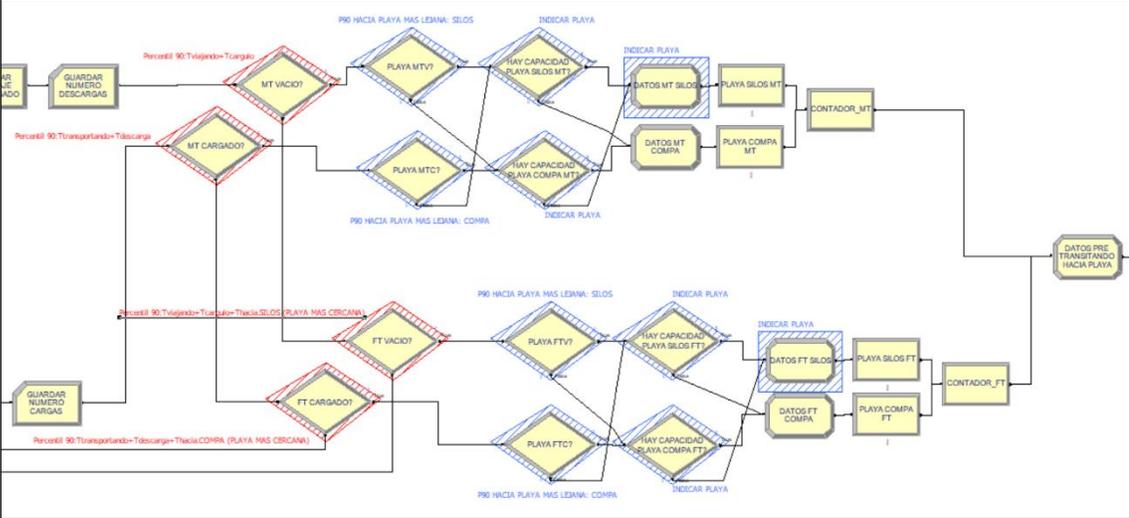
- Condicionales (en la Sección 3) que ante la decisión de enviar una entidad a efectuar el medio o final de turno, evalúen si pueden llegar a la playa más lejana y si hay estacionamientos disponibles en ella.

En la Ilustración N° 32 se puede observar con más detalle esta secuencia. Por ejemplo, en el caso de las entidades que acaban de salir del condicional “MT Vacío?” y tienen que ir a una playa a realizar el medio turno, estas ingresan directamente a un condicional llamado “Playa MTV?” que con la ayuda de un parámetro (percentil 90 de “n” simulaciones del tiempo de viaje desde la zona

de vaciado hacia la playa más lejana: “Silos”) evalúa si la entidad tiene posibilidades de llegar a la playa “Silos” antes de que inicie el medio turno. Si la respuesta es afirmativa, entonces la entidad se envía al condicional que evalúa si la playa “Silos” tiene capacidad para recibir más camiones y, si por el contrario la respuesta es negativa y no tiene posibilidades de llegar a tiempo, entonces se envía la entidad al condicional que evalúa si la única otra playa existente en el modelo: la “Compa” tiene capacidad para recibir más camiones. Nótese en este punto que al evaluar la capacidad de las playas nuevamente surge la posibilidad de que una entidad se tenga que dirigir de todas formas al destino que inicialmente le fue “negado”, es decir, por ejemplo puede que a un camión no le alcance el tiempo para llegar a la playa “Silos” antes del inicio del medio turno y se tenga que ir por defecto a la playa “Compa”, pero si esta última no tiene capacidad para recibirlo, entonces se tendrá que ir si o si a la playa “Silos”, aunque tenga que llegar tarde. Este tipo de encrucijadas son muy usuales en la operación y este conjunto de condicionales tratan de replicar su ocurrencia y resolución.

El resto de los caminos provenientes de las condicionales: “MT Cargado?”, “FT Vacío?” y “FT Cargado” se resuelven bajo la misma lógica, procurando siempre que las entidades queden lo más lejos posible de su origen y revisando la capacidad de las playas antes de enviarlos.

Ilustración N° 32: Módulos Adicionales: Condicionales Playa Más Lejana & Capacidad



Fuente: Elaboración Propia

- Un submodelo (en la Sección 3) que replique el tránsito de las entidades desde los procesos carguío o descarga hacia las playas adicionales y registre la información (ver Ilustración N° 33).

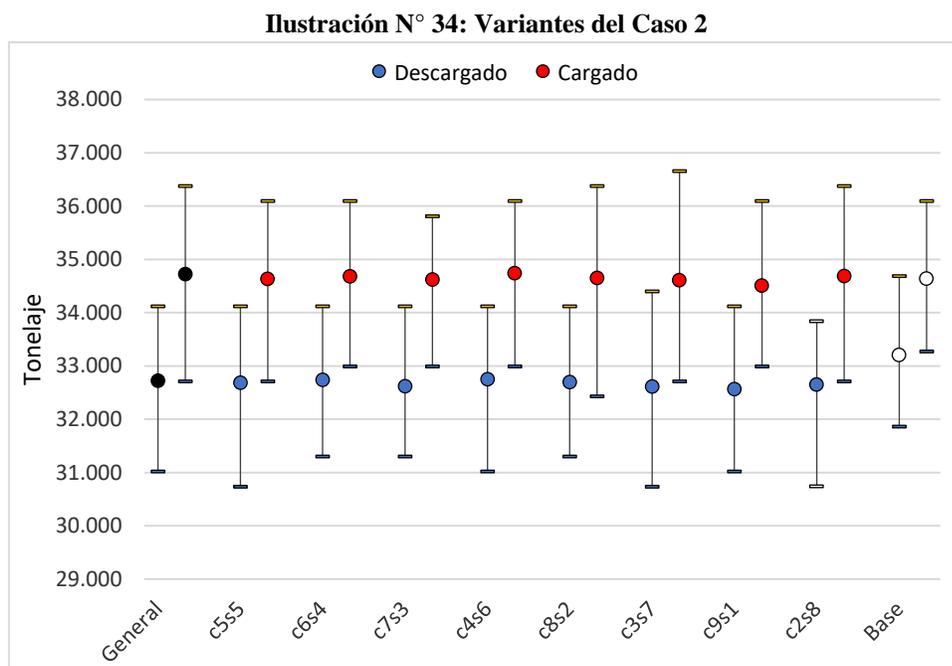
Ilustración N° 33: Módulos Adicionales: Submodelo Transitando Hacia Playa Silos



Fuente: Elaboración Propia

Después de incorporar los nuevos módulos el siguiente paso fue revisar las distintas variantes de cada caso en análisis. Ocurre que no sólo existen muchas posibles combinaciones de playas, sino también muchas otras posibles combinaciones del número de estacionamientos para cada caso.

El Caso 2 cuenta con once variantes y los casos con un mayor número de playas tienen aún más. Entonces, para reducir el número de variantes a revisar, se decidió tomar el modelo con la playa recién incorporada (variante general), ejecutarlo para que las entidades se distribuyan de forma natural en las playas durante el medio y final de turno, y por último, seleccionar las variantes que tuvieran una mayor probabilidad de ocurrencia. Los resultados de este ejercicio se aprecian en la Ilustración N° 34.



Fuente: Elaboración Propia

En dicho gráfico se puede apreciar la variante general del Caso 2 y otras ocho con diferente combinación en el número de estacionamientos. Por ejemplo, la notación “c5s5” hace referencia a que la playa “Compa” cuenta con cinco estacionamientos y la playa “Silos” con otros cinco más. La gráfica pretende mostrar el tonelaje cargado y descargado en cada variante y comparar estos resultados contra el caso base. Se pudo notar que, para todas las variantes, el tonelaje cargado fue en la práctica igual al caso base y el tonelaje descargado tuvo valores ligeramente inferiores.

Por último, es importante mencionar que en la revisión de las variantes del Caso 2 (y en la de los subsiguientes casos) se encontró que los resultados eran análogos a la variante general. Por tal razón se optó por, en adelante, utilizar solamente la variante general para comparar los casos. Los resultados de la variante general del Caso 2 se pueden ver en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3: Resultados de la Variante General del Caso 2

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,9	-	30,2
Último Camión Cargado	min	430,7	441,1	+1,6	453,0
Último Camión Descargado	min	424,4	440,0	-5	461,3
Utilización Efectiva	%	76,23	79,21	-0,23	81,24
Tonelaje Descargado	t	31.020	32.720	-486	34.122
Tonelaje Cargado	t	32.712	34.720	+82	36.378

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1.3. Caso 3: Compa y 100**Tabla N° 4: Resultados de la Variante General del Caso 3**

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,9	-	30,2
Último Camión Cargado	min	436,8	447,3	+7,8	455,4
Último Camión Descargado	min	423,7	440,6	-4,4	459,9
Utilización Efectiva	%	77,54	79,49	+0,05	81,55
Tonelaje Descargado	t	31.302	32.802	-404	34.122
Tonelaje Cargado	t	33.840	35.267	+629	36.660

Fuente: Elaboración Propia

El Caso 3 considera la existencia de las playas “Compa” y “100” (esta última ubicada a 1,3 kilómetros del equipo de carguío). En total se revisaron ocho variantes de este caso y en todas ellas los resultados de la variable tonelaje cargado estuvieron por encima del caso base, mientras que el tonelaje descargado se mantuvo nuevamente por debajo (ver Tabla N° 4).

4.6.1.4. Caso 4: Compa y DIN100**Tabla N° 5: Resultados de la Variante General del Caso 4**

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,9	-	30,2
Último Camión Cargado	min	441,7	451,1	+11,6	459,4
Último Camión Descargado	min	426,9	439,9	-5,1	465,2
Utilización Efectiva	%	77,43	79,52	+0,08	81,47
Tonelaje Descargado	t	31.020	32.819	-387	34.122
Tonelaje Cargado	t	33.840	35.538	+900	36.942

Fuente: Elaboración Propia

El Caso 4 contempla la existencia de las playas “Compa” y “DIN100” (localizada a sólo 100 metros de la pala). En total se revisaron siete variantes y en todas ellas los resultados de la variable

tonelaje cargado estuvieron muy por encima del caso base, mientras que el tonelaje descargado se mantuvo de nuevo por debajo (ver Tabla N° 5).

4.6.1.5. Caso 5: Compa y DINBot

Tabla N° 6: Resultados de la Variante General del Caso 5

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,9	-	30,2
Último Camión Cargado	min	433,4	439,7	+0,2	448,5
Último Camión Descargado	min	438,4	451,5	+6,5	476,9
Utilización Efectiva	%	77,80	79,92	+0,48	82,05
Tonelaje Descargado	t	32.430	33.828	+622	35.250
Tonelaje Cargado	t	33.276	34.632	-6	35.814

Fuente: Elaboración Propia

El Caso 5 considera la existencia de las playas “Compa” y “DINBot” (esta última ubicada a tan sólo 100 metros de la zona de vaciado). En total se revisaron cuatro variantes y a diferencia de los casos anteriores, se encontró que los resultados de la variable tonelaje cargado fueron similares al caso base, mientras que el tonelaje descargado estuvo muy por encima (ver Tabla N° 6).

4.6.1.6. Caso 6: Compa, DIN100 y DINBot

Tabla N° 7: Resultados de la Variante General del Caso 6

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,9	-	30,2
Último Camión Cargado	min	442,7	453,4	+13,9	461,7
Último Camión Descargado	min	439,8	451,7	+6,7	469,9
Utilización Efectiva	%	77,86	80,64	+1,2	82,51
Tonelaje Descargado	t	32.430	33.840	+634	35.250
Tonelaje Cargado	t	34.122	35.825	+1.187	37.506

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados preliminares obtenidos de los casos anteriores sugieren que el mejor escenario para la variable tonelaje cargado es aquel en que la playa se encuentra lo más cerca posible al punto de carguío y de forma análoga, el mejor resultado para la variable tonelaje descargado se da cuando existe una playa en las proximidades de la zona de vaciado. Por tal motivo, la configuración de este caso está constituida por las playas “Compa”, “DIN100” y “DINBot” (las dos últimas ubicadas a tan sólo 100 metros de los puntos de carguío y descarga respectivamente).

Para este caso se revisaron en total 10 variantes y, tal como se esperaba, los resultados de las variables tonelaje cargado y descargado, se encontraron ambas por encima de los del caso base (ver Tabla N° 7).

4.6.1.7. Caso 7: Compa, DIN100, DINBot y 100

Tabla N° 8: Resultados de la Variante General del Caso 7

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,9	-	30,2
Último Camión Cargado	min	441,9	453,5	+14,0	461,7
Último Camión Descargado	min	435,9	451,2	+6,2	470,7
Utilización Efectiva	%	78,57	80,83	+1,39	83,18
Tonelaje Descargado	t	32.148	33.828	+622	35.532
Tonelaje Cargado	t	34.404	35.814	+1.176	37.224

Fuente: Elaboración Propia

Dados los buenos resultados del caso anterior, se decidió incluir una playa adicional para ver si esto podría generar alguna variación significativa en los resultados. Los resultados fueron, en la práctica, idénticos al caso anterior (ver Tabla N° 8).

4.6.1.8. Caso 8: Compa, DIN100, DINBot, 100 y Silos

Tabla N° 9: Resultados de la Variante General del Caso 8

Variable	Unidad	Mínimo	Media	Δ c/r CB	Máximo
Primer Camión Cargado	min	5,5	6,6	-	8,8
Primer Camión Descargado	min	17,3	22,8	-	30,2
Último Camión Cargado	min	445,1	453,6	+14,1	462,4
Último Camión Descargado	min	440,2	452,4	+7,4	474,3
Utilización Efectiva	%	78,95	81,06	+1,62	83,20
Tonelaje Descargado	t	32.430	33.781	+575	35.250
Tonelaje Cargado	t	34.404	35.775	+1.137	37.506

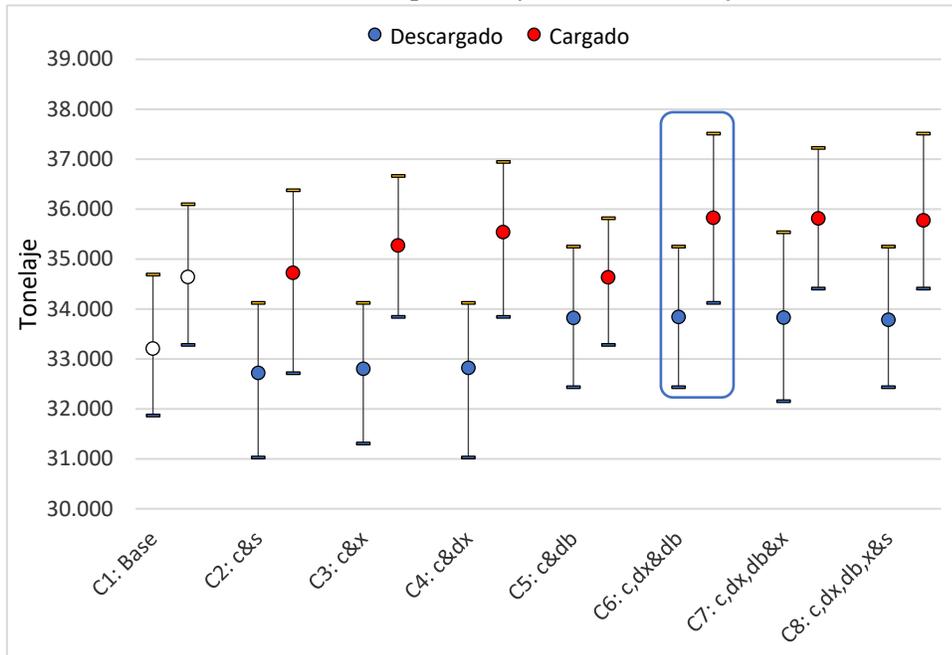
Fuente: Elaboración Propia

Para comprobar que efectivamente se había hallado un mejor resultado se incluyó una playa más y se ejecutó el modelo, encontrándose que los resultados fueron nuevamente semejantes a los casos 6 y 7 (ver Tabla N° 9).

4.6.1.9. Comparación de Casos

Las variantes generales de todos los casos revisados se presentan en la Ilustración N° 35. En esta se observa que: (i) aquellas combinaciones que consideraron la instalación de una playa entre la existente y el equipo de carguío (Casos 2, 3 y 4) aumentaron el resultado de su variable tonelaje cargado en la medida que la playa adicional se “aproximaba” cada vez más a este último; y (ii) que la instalación de una playa en las inmediaciones del botadero permitía incrementar el resultado de la variable tonelaje descargado (Caso 5). Sobre la base de dichos hallazgos, se optó por evaluar un escenario que combinase aquellos casos con los mejores resultados en las variables de interés (Caso 6).

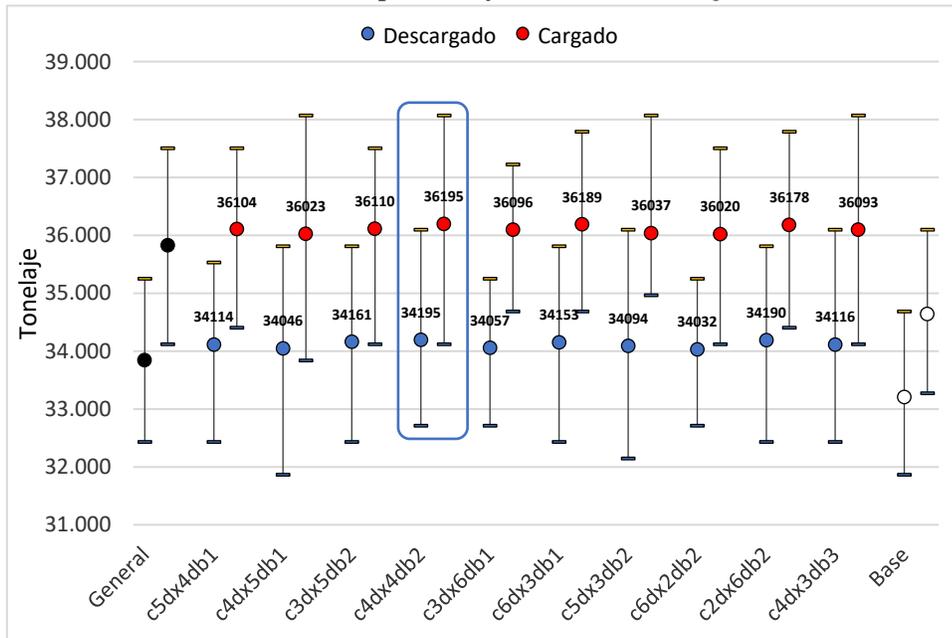
Ilustración N° 35: Comparación y Selección del Mejor Caso



Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, las combinaciones de cuatro y cinco playas (Casos 7 y 8) tuvieron resultados que podría considerárseles semejantes a la combinación de tres playas y, dado que el costo y tiempo necesarios para la construcción de dos playas adicionales versus tres o cuatro es menor, se tomó el Caso 6 como mejor resultado (combinación de playas “Compa”, “DIN100” Y “DINBot”).

Ilustración N° 36: Comparación y Selección de la Mejor Variante



Fuente: Elaboración Propia

Luego, el siguiente paso es determinar el número de estacionamientos que se habilitarán en las playas. Por defecto, cada variante está compuesta por una combinación en específico de número de estacionamientos. En la playa “DIN100” se podrían construir de tres a seis y en la “DINBot” de uno a tres, no obstante cualquiera sea la combinación los resultados son muy parecidos entre sí (ver Ilustración N° 36).

El costo de construir o no un estacionamiento adicional es despreciable, por tanto la decisión queda por lo general únicamente supeditada al área disponible con que se cuente. Sin embargo, ya que no se especifica la superficie real disponible ni se precisa la existencia de alguna restricción de espacio en las locaciones seleccionadas, se asume que existe el espacio suficiente para implementar las playas hasta en sus variantes con mayor número de estacionamientos. Finalmente, la variante seleccionada fue la que presentó los valores medios más altos para las variables tonelaje cargado y descargado, que vendría a ser la variante c4dx4db2 (cuatro estacionamientos en la playa “Compa”, 4 en “DIN100” y 2 en “DINBot”).

4.6.2. Relación entre Vacíos y Cargados

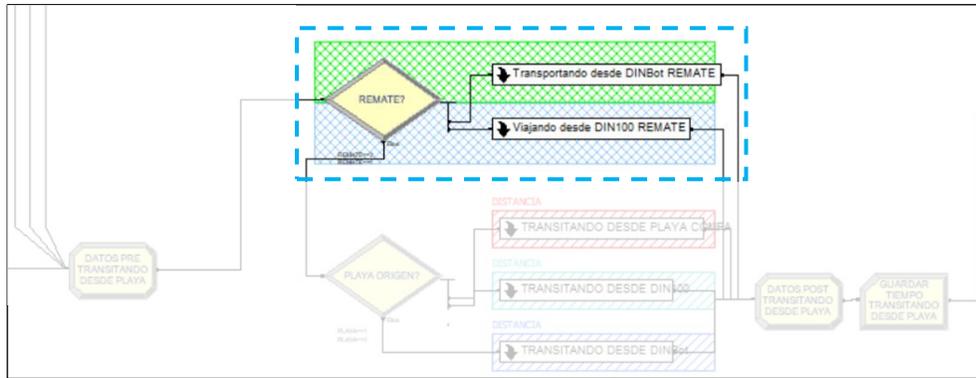
Esta sección recoge los ensayos realizados para determinar una relación ideal entre el número de camiones vacíos y cargados estacionados en una playa al final de un turno de tal forma que esa configuración genere un incremento en el tonelaje de la primera hora del turno siguiente.

Al realizar los primeros ensayos se encontró que el modelo de simulación no contaba con el nivel de detalle adecuado para entregar información lo suficientemente realista, por lo menos, para satisfacer los fines de este experimento. Por ejemplo, ocurría que cuando un camión recién cargado era enviado a realizar el cambio de turno en la playa más alejada: “DINBot”, si este arribaba mucho antes del final del turno simplemente se quedaba esperando en playa, aun cuando en algunos casos tenía el tiempo suficiente como para ir a descargar al botadero (que teóricamente sólo se encuentra a cien metros) y volver.

Por lo tanto, para lograr un mayor nivel de realismo se hicieron algunos ajustes al modelo de simulación para que las entidades evalúen si tienen posibilidades de aprovechar el poco tiempo que les queda antes de que finalice el turno para “rematarlo” cargando o descargando, a pesar de que ya se encuentran en la playa donde realizarán el cambio de turno. Tales ajustes corresponden a los siguientes:

- Una secuencia ubicada en la Sección 1 (justo antes de ingresar a los submodelos que simulan el tránsito de las entidades desde sus playas de origen) que revisa si la entidad cuenta con el atributo “remate”. Si su valor es igual a “2” entonces enviará la entidad a un submodelo que simula el viaje cargado desde la playa DINBot hacia el botadero y si el valor es igual a “1” enviará la entidad a un submodelo que simula el viaje vacío desde la playa DIN100 hacia el equipo de carguío.

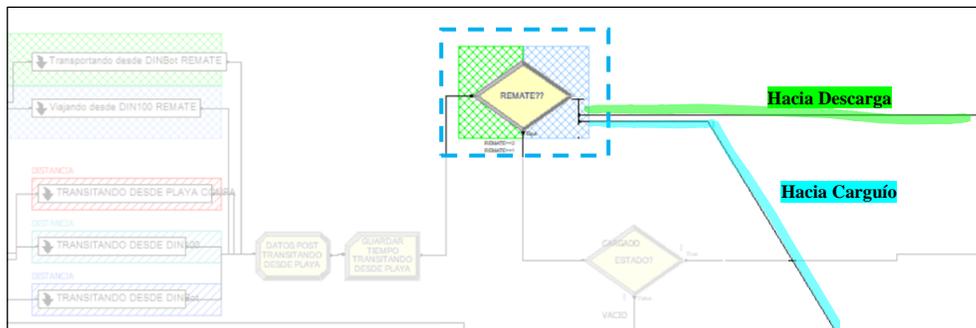
Ilustración N° 37: Módulos Adicionales: Submodelos Transitando Desde Playa Remate



Fuente: Elaboración Propia

- Un condicional en la Sección 1 que revise el atributo “remate” de las entidades al salir de los submodelos “Transitando Desde Playa” para asignarles un destino. Ocurre que todas las entidades que salen de estos submodelos deben confluir en unos módulos *assign* y *record* que se encargan de registrar la información del tiempo de viaje de estas. Por tal razón es necesario revisar si cuentan con el atributo “remate” para enviar a las entidades directamente al proceso que le corresponde, si su valor es igual a “2” entonces la entidad irá al proceso “descarga”, si es igual a “1” irá al proceso carguío y si no cuenta con el atributo “remate” entonces simplemente continuarán su camino dentro del modelo (ver Ilustración N° 38).

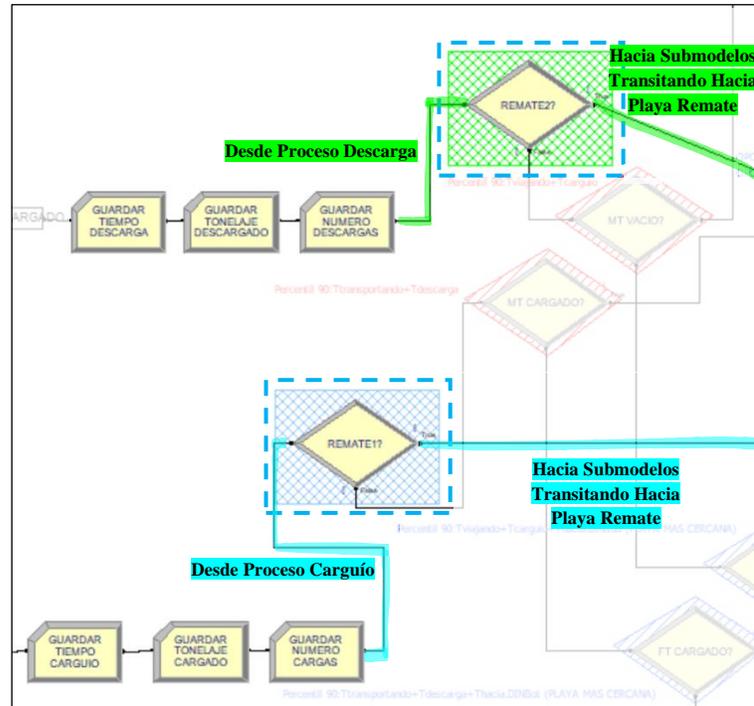
Ilustración N° 38: Módulos Adicionales: Condicional Remate??



Fuente: Elaboración Propia

- Condicionales al final de la Sección 2 que revisan si las entidades que acaban de concluir los procesos de carguío o descarga cuentan con el atributo “remate” para evitar que pasen por la serie de condicionales que se encuentran al inicio de la Sección 3 (que sirven para revisar si se encuentran próximos al medio o final de turno y elegir la playa a donde deberán ir) e ir directamente a la playa que les corresponde para el remate (ver Ilustración N° 39). Los camiones que rematen el turno en el botadero irán a la playa DINBot y los que lo hagan cargando a la DIN100. No se hace necesario revisar si estas playas cuentan con capacidad para recibirlos puesto que su cupo se “reservó” desde el momento en que empezaron con el “remate”.

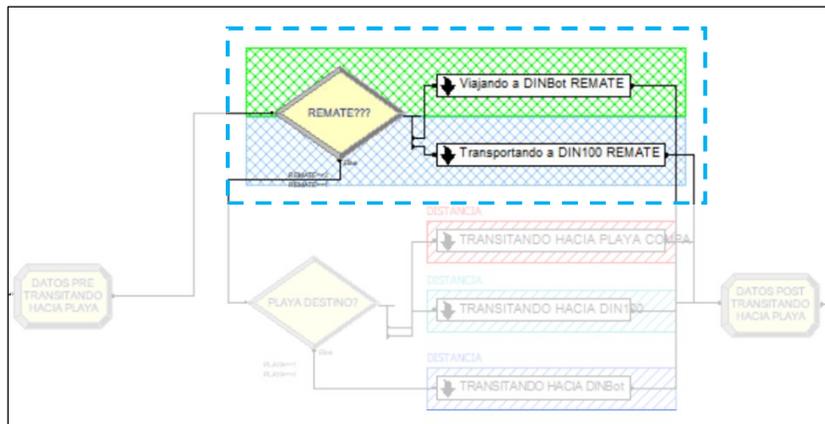
Ilustración N° 39: Módulos Adicionales: Remate1? & Remate2?



Fuente: Elaboración Propia

- Submodelos que simulen el tránsito de las entidades en remate hacia sus playas de destino.

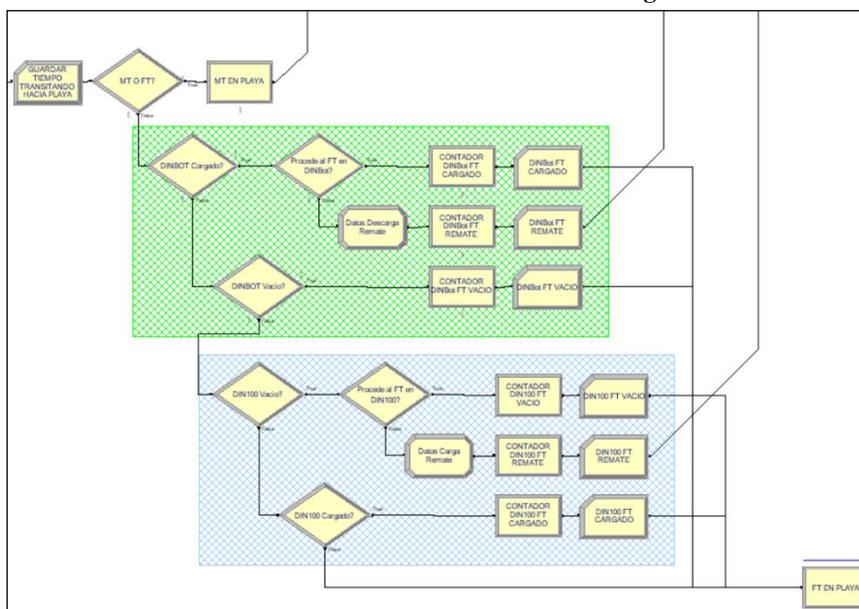
Ilustración N° 40: Módulos Adicionales: Submodelos Transitando Hacia Playa Remate



Fuente: Elaboración Propia

- Una secuencia de módulos al final de la Sección 3 que evalúan si una vez asignadas las playas de relevo para proceder al cambio de turno, existen: (i) camiones cargados en la playa DINBot que puedan ir a descargar y volver antes del fin de turno y (ii) camiones vacíos en la playa DIN100 que -en función al número de camiones en fila- tengan posibilidades de ir a cargar y regresar antes del fin de turno. Es decir, buscan entidades que cumplan con el perfil de “remate” para aprovechar los últimos minuto del turno cumpliendo una función productiva (ver Ilustración N° 41).

Ilustración N° 41: Módulos Adicionales: Secuencia Asignación “Remate”



Fuente: Elaboración Propia

Hechos estos ajustes se tomó la variante c4dx4db2, seleccionada como mejor resultado en los ensayos anteriores, y se revisó bajo qué estado (vacío o cargado) se estacionaban los camiones en las diferentes playas al final del turno. Los datos revelaron que en promedio el 76% de los camiones que se estacionaban en la playa “DINBot” lo hacían vacíos, y en las playas “Compa” y “DIN100”, el 22% y 9% respectivamente, también lo estaban. En total, el 27% de los camiones que se estacionaban al final del turno estaban vacíos; relación que contrasta bastante con respecto al caso base, en donde el 50% de los camiones que se estacionaban el final del turno se encontraban vacíos.

Tabla N° 10: Resultados Relación Vacíos y Cargados

Caso	Configuración	% Vacíos	FR	8HR	1HR	Sumatoria
1	V_db100c25dx0	30%	19%	2.825	4.881	7.706
2	V_db100c0dx0	20%	12%	2.758	5.034	7.791
3	V_db50c25dx0	20%	11%	2.794	5.206	7.999
4	V_db100c25dx25	40%	7%	2.775	4.867	7.642
5	V_db100c0dx25	30%	7%	2.719	5.051	7.769
6	V_db50c50dx0	30%	7%	2.868	5.037	7.904
7	V_db50c0dx0	10%	7%	2.750	5.304	8.055
8	V_db100c50dx0	40%	7%	2.878	4.712	7.590
9	V_db50c25dx25	30%	5%	2.802	5.115	7.917
10	V_db0c25dx0	10%	3%	2.646	5.420	8.067
11	V_db50c0dx25	20%	3%	2.743	5.366	8.110
12*	V_db0c0dx0	0%	-	2.735	5.601	8.336
13*	V_db100c50dx50	60%	-	2.820	4.588	7.408

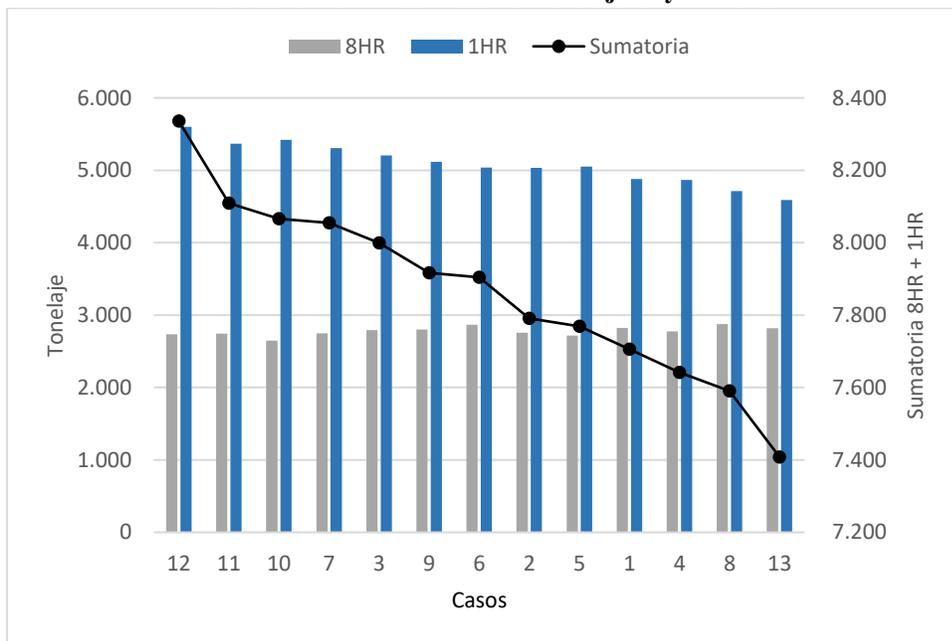
* Caso Especial

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, dado que hay muchas posibles configuraciones para la variante seleccionada, se decidió tomar sólo aquellas que tuvieran una mayor posibilidad de ocurrencia. Bajo esa premisa se seleccionaron once combinaciones y se adicionaron dos casos especiales (ver Tabla N° 10).

Para denominar a estas configuraciones se utilizó una nomenclatura que hiciera referencia al porcentaje de camiones vacíos en cada playa. Por ejemplo, la configuración V_db100c25dx0 indica que el 100% de los camiones estacionados en la playa “DINBot” se encuentran vacíos, el 25% de los estacionados en la playa “Compa” también y el 0% en “DIN100”.

Ilustración N° 42: Sumatoria Tonelaje 8° y 1° Hora

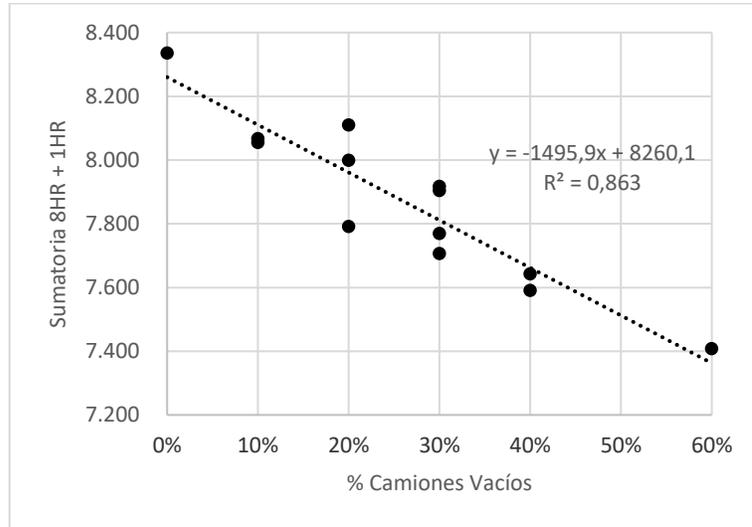


Fuente: Elaboración Propia

Si bien es cierto, se pretende hallar una configuración que permita incrementar el tonelaje de la primera hora, pero bajo ningún punto de vista eso puede significar la disminución del tonelaje producido por el turno saliente. Por tanto, la mejor configuración será aquella que genere el mayor tonelaje entre la octava hora de un turno y la primera hora del siguiente. En la Ilustración N° 42 se aprecian los resultados de este ejercicio.

El tonelaje descargado durante la última hora es en general análogo en todos los casos y se encuentra alrededor de las 2.800 toneladas por hora, en cambio el tonelaje de la primera fluctúa entre las 4.600 y 5.600 toneladas por hora. La sumatoria del tonelaje descargado durante estas dos horas establece una clara tendencia (ver Ilustración N° 43): a menor porcentaje de camiones vacíos estacionados al final del turno, mayor será el tonelaje descargado; o dicho de otra forma: a mayor número de camiones cargados, mayor tonelaje.

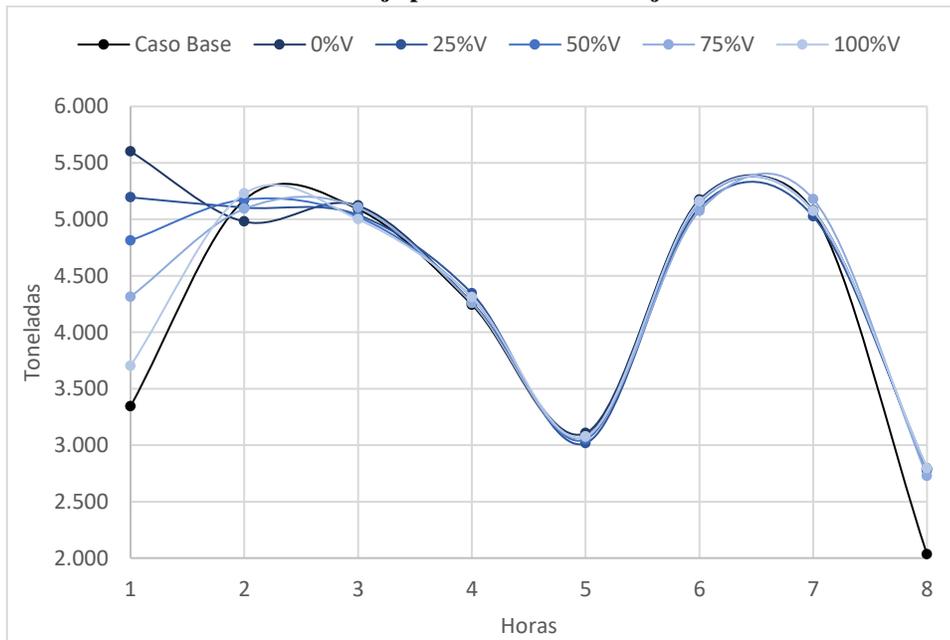
Ilustración N° 43: Diagrama de Dispersión. Camiones Vacíos & Tonelaje



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, la Ilustración N° 44 comprueba que el porcentaje de camiones vacíos que inician el turno influye en el tonelaje que se produce durante la primera hora del turno.

Ilustración N° 44: Tonelaje por Hora & Porcentaje Camiones Vacíos



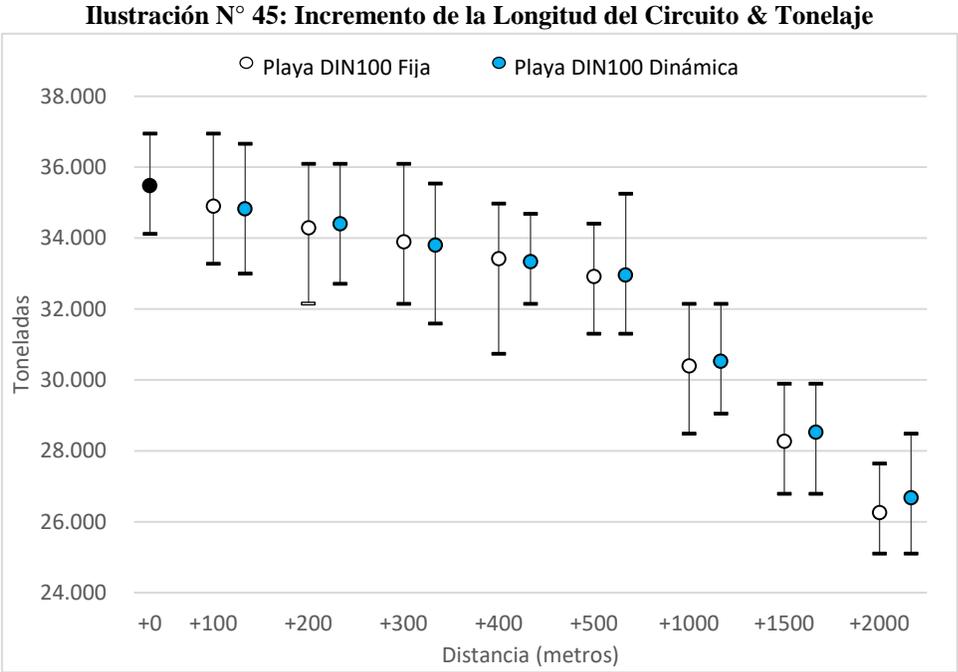
Fuente: Elaboración Propia

4.6.3. Alejamiento del Equipo de Carguío con Respecto a la Playa

El último experimento se enfocó en contestar la interrogante respecto a si es conveniente o no de renovar constantemente las playas de relevo conforme el equipo de carguío se aleja de ellas. Para su desarrollo se consideró dos posibles escenarios: (i) que la playa DIN100 permanece en su

ubicación original o (ii) que se “desplaza” junto a la pala (manteniendo siempre una distancia de cien metros con respecto a ella). Para los ensayos se asumió que el avance de la pala sería sobre una superficie horizontal y también se tuvo que actualizar para cada caso los parámetros del modelo para representar el alejamiento de las palas y/o la reubicación de las playas (estos se pueden revisar en los anexos 7.1 y 7.2). En cuanto a la relación vacíos/cargados se utilizó la originalmente hallada en la variante c4dx2db2 (ver subtítulo 4.6.2).

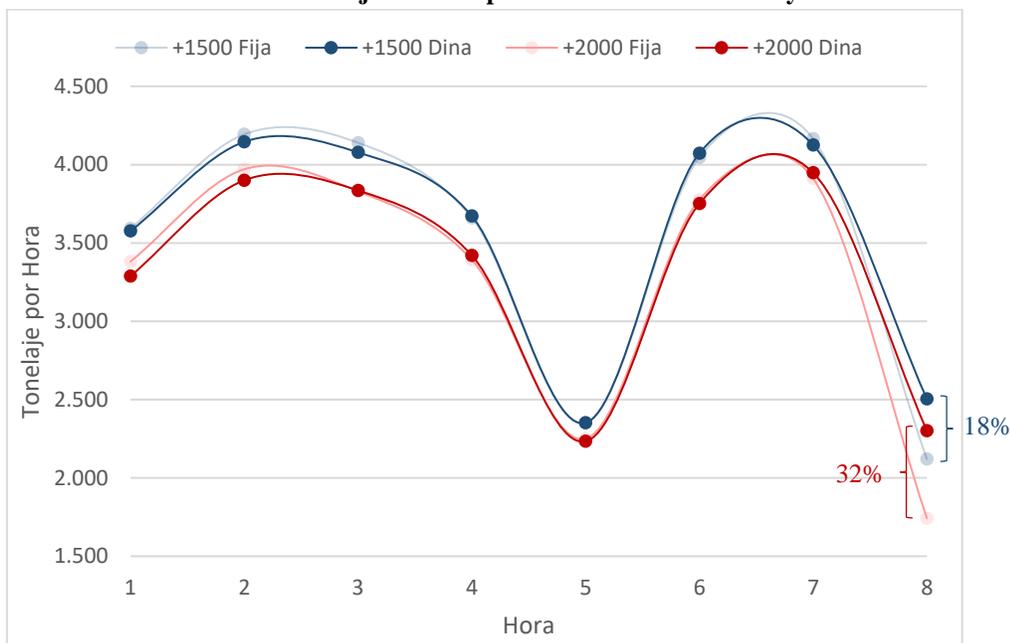
Se revisó cada escenario para diferentes incrementos en la longitud del circuito de transporte y, a pesar de la disminución gradual de la productividad que esta condición implica, los resultados revelaron que: (i) para el caso de la variable tonelaje descargado no existía una variación destacable entre mantener la playa en el mismo sitio o reubicarla, y (ii) en cuanto a la variable tonelaje cargado, se observó que recién cuando la pala se alejaba mil quinientos metros con respecto al punto inicial se lograba apreciar una diferencia del 1%, en favor de contar con una playa dinámica en vez de una fija (ver Ilustración N° 45). Se presume que este favorecimiento exclusivo para la variable tonelaje cargado se debe a que la variante dinámica de la playa en análisis se encuentra siempre cercana al equipo de carguío (ver subtítulo 4.6.1.6).



Fuente: Elaboración Propia

Además, los tonelajes horarios de los escenarios evaluados (playa “DIN100” fija y dinámica) no presentaron mayor diferencia durante el transcurso del turno, a excepción de los incrementos de mil quinientos y dos mil metros, en donde la variable tonelaje cargado si presentó un aumento del 18% y 32%, respectivamente, durante la última hora del turno (ver Ilustración N° 46).

Ilustración N° 46: Tonelaje Horario para Incrementos de 1500 y 2000 m.



Fuente: Elaboración Propia

4.7. Análisis Económico de Resultados

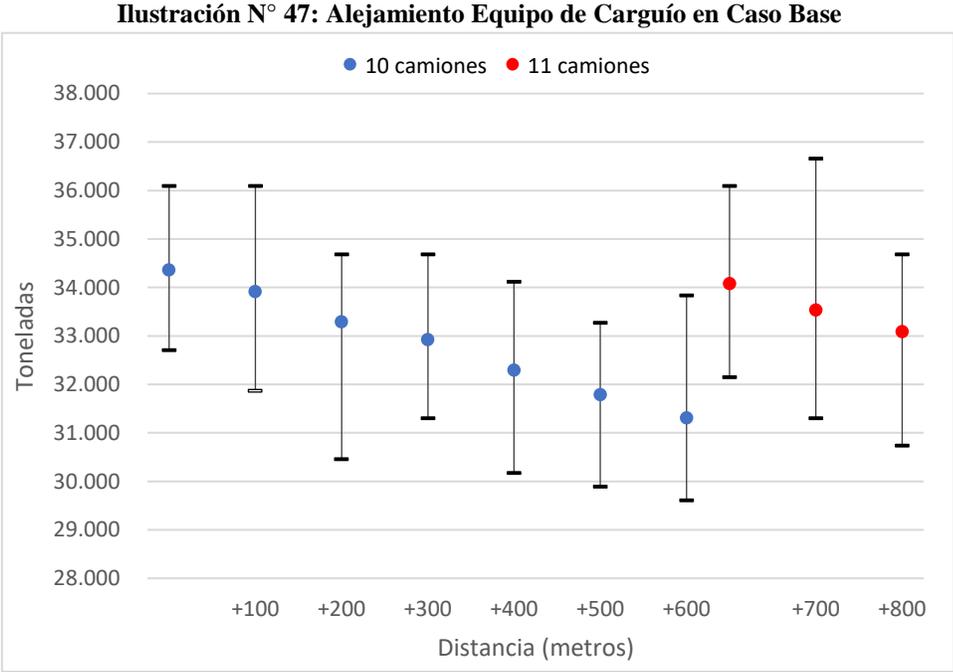
Dado que el estudio fue basado en un circuito de transporte de lastre que no genera de forma directa un beneficio económico, se decidió realizar un análisis comparativo de los costos del caso base y del seleccionado como mejor resultado. El periodo definido para la evaluación económica fue de un mes (30 días). Por tanto, se hizo necesario considerar el alejamiento progresivo del equipo de carguío durante dicho periodo para ambos casos.

4.7.1. Efecto del Alejamiento del Equipo de Carguío en Caso Base

El primer paso fue determinar cuánto avanza el equipo de carguío durante un turno, teniendo en cuenta que se debe cumplir con la meta de producción de 30.000 toneladas. Si se considera que la densidad del material tronado es de 2 toneladas por metro cúbico, entonces la meta se traduce en 15.000 metros cúbicos de material. Por otro lado, el banco en explotación tiene un ancho medio de 85 metros y una altura de 20 metros, generando una sección de 1.700 metros cuadrados. Entonces, para remover 15.000 metros cúbicos de material en un turno, el equipo de carguío tiene que avanzar aproximadamente 9 metros. En conclusión, en 90 turnos (30 días) el equipo avanzaría 810 metros.

Para plasmar el alejamiento del equipo de carguío dentro del modelo de simulación se generó múltiples replicaciones del caso base cada 100 metros y en cuanto a la proporción vacíos/cargados se tomó como referencia los resultados obtenidos originalmente, en donde el 50% de los camiones que se estacionaban al final del turno lo hacían vacíos (ver subtítulo 4.6.2).

En la Ilustración N° 47 se puede apreciar el efecto que tiene el incremento en la longitud del circuito sobre la productividad del sistema. Específicamente, se observa que si el circuito se amplía más de 600 metros ya no bastan 10 camiones para satisfacer el requerimiento de producción (a 600 metros el 8% de las replicaciones presentan resultados inferiores a las 30.000 toneladas por turno), por tanto es necesario adicionar un camión más al sistema. En resumen, durante 67 turnos se podría trabajar con 10 camiones, pero en los 23 restantes necesariamente se tendría que utilizar 11.



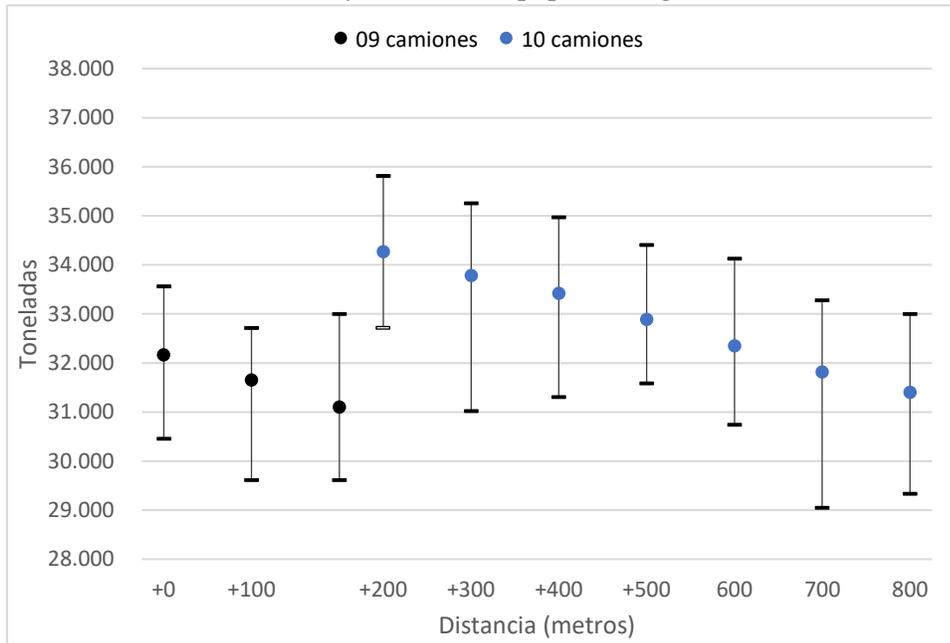
Fuente: Elaboración Propia

4.7.2. Efecto del Alejamiento del Equipo de Carguío en Caso Final

El caso final no es otro que aquel seleccionado como mejor resultado en ensayos anteriores: “c4dx4db2” (ver subtítulo 4.6.1.9) y en cuanto a la relación vacíos/cargados se utilizó la encontrada en su variante original (ver subtítulo 4.6.2).

Dado que el sistema entregaba resultados bastante satisfactorios para 10 camiones, se decidió probar con 9 y aun así entregó buenos resultados hasta que el circuito se extendió en 200 metros (a 100 metros sólo el 1% de los resultados era inferior a las 30.000 toneladas por turno y a 200 metros sólo el 3%), después fue necesario utilizar nuevamente 10 camiones (ver Ilustración N° 48). Por lo observado, se definió entonces que durante los primeros 23 turnos se utilizaría 9 camiones y en los 67 restantes 10.

Ilustración N° 48: Alejamiento del Equipo de Carguío en Caso Final



Fuente: Elaboración Propia

Es importante mencionar que aunque en el gráfico el límite inferior de las barras se encuentre por debajo de las 30.000 toneladas para el caso de los 700 y 800 metros de ampliación del circuito, sólo el 1% y 2% de los resultados se encontraron por debajo de dicho parámetro, respectivamente.

4.7.3. Análisis de Costos

4.7.3.1. Costo de Construcción e Implementación de Playas de Relevó

El costo de construcción de una playa no es otro que el costo de la maquinaria utilizada para su construcción más el costo de los elementos complementarios (torre de iluminación, señaléticas, etc.) que se vayan a instalar en ella.

Tabla N° 11: Parámetros Geométricos de las Playas de Relevó

Capacidad (N° Estac.)	Longitud (m)	Ancho (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	Pretiles (mL)	Pretiles (m ³)
1	30	30	120	900	103	386
2	47	30	154	1.410	153	574
3	64	30	188	1.920	203	761
4	81	30	222	2.430	253	949
5	98	30	256	2.940	303	1.136

Fuente: Elaboración Propia

En función a las dimensiones presentadas en la Ilustración N° 2 se determinó el área necesaria para la construcción de las playas, los metros lineales de pretiles y el volumen de material requerido

(se consideró que los pretilos tienen una altura media de 1,5m y el material un ángulo de reposo de 45°). El resumen de estos resultados se presenta en la Tabla N° 11.

La construcción de una playa de relevo se ejecuta en dos etapas: una primera que consiste en la nivelación del terreno y la siguiente que es la confección de pretilos. Para la nivelación se puede utilizar un tractor de orugas y/o una motoniveladora (la elección depende del estado de la superficie sobre la que se construirá la playa) y para los pretilos se suele utilizar un cargador frontal.

Tabla N° 12: Tiempo & Costo de Construcción de Playas de Relevo

Capacidad (N° Estac.)	Tractor de Orugas		Motoniveladora		Cargador Frontal		Total	
	hrs	US\$	hrs	US\$	hrs	US\$	hrs	US\$
1	0,8	109	0,2	8,4	1,3	104	2,3	221
2	1,2	160	0,3	13,2	1,9	154	3,4	327
3	1,6	210	0,4	17,9	2,5	204	4,5	432
4	1,9	261	0,5	22,7	3,1	255	5,5	538
5	2,3	311	0,6	27,5	3,8	305	6,6	644

Fuente: Elaboración Propia

En este análisis se consideró el uso de los tres equipos: un tractor de orugas Caterpillar D11R con un costo de posesión y operación de US\$ 135 por hora, una motoniveladora Caterpillar 16M con un costo de US\$ 48 por hora y un cargador frontal Caterpillar 988G con un costo de US\$ 81 por hora. El detalle del cálculo de requerimiento de equipos se puede revisar en los anexos 7.4, 7.5 y 7.6, y el resumen en la Tabla N° 12.

De acuerdo a estos resultados, construir la playa de relevo DINBot (con 2 estacionamientos) requiere un tiempo de trabajo de 3,4 horas y un costo de US\$ 327, y la playa de relevo DIN100 (4 estacionamientos) un tiempo de trabajo de 5,5 horas y un costo de US\$ 538. Por tanto, el costo de construcción de ambas playas asciende a los US\$ 865.

Tabla N° 13: Costo Construcción & Implementación Playas de Relevo

Ítem	Cant.	Horas	Costo Hora (US\$/hr)	Costo Total (US\$)
Construcción Playa DIN100	1	-	-	538
Construcción Playa DINBot	1	-	-	327
Torres de Iluminación	2	720	1,26	908
Señaléticas	12	8.640	0,03	231
			Total	2.004

Fuente: Elaboración Propia

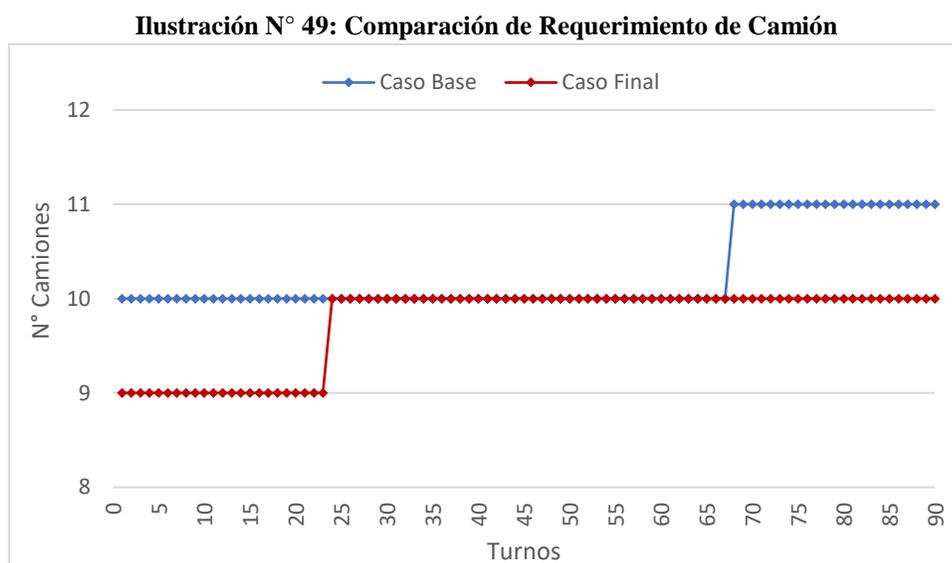
En cuanto a la torre de iluminación, esta tiene un costo de posesión y operación de US\$ 1,26 por hora (ver anexo 7.7) y las señaléticas un costo de US\$ 0,03 por hora⁴. En total se requieren dos

⁴ Cada señalética tiene un costo de US\$ 234 y una vida útil mínima de un año.

torres de iluminación (una para cada playa) y doce señaléticas (cinco para la playa DINBot y siete para la playa DIN100). Finalmente, el resumen de los costos de construcción e implementación de la playa se puede ver en la Tabla N° 13 y entrega un valor final de US\$ 2.004.

4.7.3.2. Costo de Transporte por Hora

Puesto que el caso final requiere de menos camiones para cumplir con la meta de producción (ver Ilustración N° 49), es válido afirmar que ello también supondría una reducción en el costo de transporte con respecto al caso base. Basado en dicho razonamiento se procedió a calcular el costo de transporte para cuantificar que tan significativa era la diferencia -en costo- entre ambos casos.



Fuente: Elaboración Propia

El detalle de dicho cálculo se puede revisar en la Tabla N° 14. El valor calculado corresponde al costo total de posesión y operación (incluida mano de obra) y asciende a 438,16 dólares por hora. Es importante aclarar que algunos de los parámetros empleados en este análisis son referenciales, no obstante todos ellos se encuentran dentro del *benchmarking* de la industria.

Para el cálculo del costo del combustible, el consumo se determinó a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones (183,9 litros por hora) y el costo corresponde al precio promedio del *diesel* en el 2018 (0,644 dólares por litro⁵). En lo que respecta a los lubricantes, estos pueden llegar a ser hasta el 15% del costo del combustible; y en cuanto a los neumáticos, cada camión utiliza seis y cada uno de ellos tiene una vida útil de 4.500 horas (para las condiciones de la mina en estudio), además se consideró que cada neumático tiene un valor comercial de 50.000 dólares.

⁵ <https://www.enap.cl>

El apartado reparaciones contempla los repuestos y las mantenciones mayores. Para el caso del primero se tomó en cuenta que podría llegar a ser hasta el 5% del valor del activo por cada año en operación y para las mantenciones mayores hasta el 15% del valor del activo por cada diez mil horas de operación.

Por último, para el cálculo del salario horario se consideró que cada operador trabaja cuarenta y cinco horas a la semana y se utilizó el tipo de cambio promedio del 2018 (640,29 pesos chilenos por dólar⁶).

Tabla N° 14: Costo de Transporte

Parámetros		
Equipo: Komatus 930 E		
Valor Comercial	MUS\$	4,76
Periodo Estimado de Posesión (años)	años	10
Horas Operativas (horas/año)	hrs/año	6.963
Tiempo de Posesion (total de horas)	hrs.	69.635
Tasa de Interés Simple		10%
Prima de Seguro		1%
Costo de Posesión	US\$/hr	109,71
1. Costo por hora	US\$/hr	68,36
2. Intereses	US\$/hr	37,60
3. Seguro	US\$/hr	3,76
Costo de Operación	US\$/hr	308,43
4. Combustible	US\$/hr	118,42
5. Lubricantes	US\$/hr	17,76
6. Neumáticos	US\$/hr	66,67
7. Reparaciones	US\$/hr	105,6
Posesión y Operación de la Maquina	US\$/hr	418,14
8. Salario Horario del Operador	US\$/hr	20,02
Costo Total de Posesion y Operación	US\$/hr	438,16

Fuente: Elaboración Propia

4.7.3.3. Análisis Comparativo de Costos

En la Ilustración N° 49 se observa que el caso base empieza con diez camiones y después de 67 turnos es necesario incluir un undécimo camión para satisfacer el requerimiento de producción, mientras que el caso final empieza sólo con nueve camiones y después de 23 turnos recién se hace necesario adicionar el décimo camión. Como se mencionaba antes, es lógico pensar que un menor requerimiento de camión puede traducirse en un menor costo de transporte, pero lo verdaderamente importante es determinar qué tan significativo podría ser dicho “ahorro”.

⁶ <https://www.bcentral.cl>

Tabla N° 15: Comparación Costo de Transporte

Caso Base				
N° Camiones	N° Turnos	Horas	Costo Trans. (US\$/hr)	Costo Total (US\$)
10	67	4.824	438,16	2.113.686
11	23	1.822	438,16	798.153
Total		6.646	-	2.911.840
Caso Final				
Camiones	N° Turnos	Horas	Costo Trans. (US\$/hr)	Costo Total (US\$)
9	23	1.490	438,16	653.034
10	67	4.824	438,16	2.113.686
Total		6.314	-	2.766.721
Ahorro		331	-	145.119

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla N° 15 compara las horas-camión de cada caso y el costo total de transporte. El caso base acumuló en total 6.646 horas-camión generando un costo total de kUS\$ 2.912, en cambio el caso final acumuló 6.314 horas-camión (331 horas menos) con un costo total de kUS\$ 2.767. Poco más de kUS\$ 145 de ahorro. Adicionalmente, si en este análisis se incluyese los kUS\$ 2 que cuesta instalar las playas (DIN100 y DINBot) se obtendría un ahorro neto de kUS\$ 143.

Por otro lado al revisar las componentes del costo de transporte y compararlas entre los casos se obtuvo que, en cuanto al combustible, el caso final tiene un consumo de 60.908 litros menos con respecto al caso base, lo que podría traducirse en un ahorro de kUS\$ 39,2 (ver Tabla N° 16). Y en lo que respecta al costo por mano de obra existe un ahorro de kUS\$ 6,6 (ver Tabla N° 17).

Tabla N° 16: Comparación Costo de Combustible

Caso Base					
N° Camiones	N° Turnos	Horas	Consumo (l)	Costo Unit. (US\$/l)	Costo Total (US\$)
10	67	4.824	887.134	0,64	571.248
11	23	1.822	334.992	0,64	215.710
Total		6.646	1.222.126	-	786.958
Caso Final					
N° Camiones	N° Turnos	Horas	Consumo (l)	Costo Unit. (US\$/l)	Costo Total (US\$)
9	23	1.490	274.085	0,64	176.490
10	67	4.824	887.134	0,64	571.248
Total		6.314	1.161.218	-	747.738
Ahorro		331	60.908	-	39.220

Fuente: Elaboración Propia

Tabla N° 17: Comparación Costo de Mano de Obra

Caso Base				
N° Operadores	N° Turnos	Horas	Costo/Hora (US\$/hr)	Costo Total (US\$)
10	67	4.824	20,02	96.591
11	23	1.822	20,02	36.474
Total		6.646	-	133.065
Caso Final				
N° Operadores	N° Turnos	Horas	Costo/Hora (US\$/hr)	Costo Total (US\$)
9	23	1.490	20,02	29.842
10	67	4.824	20,02	96.591
Total		6.314	-	126.433
Ahorro		331	-	6.632

Fuente: Elaboración Propia

4.7.3.4. Ahorro por Postergación del Requerimiento de Camiones Adicionales

Retrasar el ingreso de un camión adicional al circuito puede representar también un beneficio económico en la medida que dicha postergación permita desplazar el flujo de costos del camión al futuro. El valor del dinero no es el mismo en el tiempo: pierde valor y por tanto existe una diferencia entre asumir el pago por el uso de un activo hoy que en un futuro próximo, aunque sólo fuese por unos días.

Para cuantificar el ahorro por postergar el ingreso de un camión primero se determinó el CAE del camión considerando una tasa de descuento del 10%. El detalle se puede revisar en la Tabla N° 18. Después, en el lado izquierdo de la Ilustración N° 49 se puede observar que hay un primer retraso: el caso final requiere recién del décimo camión 23 turnos o 7,7 días después que en el caso base.

Tabla N° 18: Flujo de Costos de un Camión

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Horas Acum.	6.963	13.927	20.890	27.854	34.817	41.781	48.744	55.708	62.671	69.635
Camión	774.668	774.668	774.668	774.668	774.668	774.668	774.668	774.668	774.668	774.668
Seguro	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747	7.747
Combustible	824.603	824.603	824.603	824.603	824.603	824.603	824.603	824.603	824.603	824.603
Lubricantes	123.690	123.690	123.690	123.690	123.690	123.690	123.690	123.690	123.690	123.690
Neumáticos	464.233	464.233	464.233	464.233	464.233	464.233	464.233	464.233	464.233	464.233
Repuestos	238.000	238.000	238.000	238.000	238.000	238.000	238.000	238.000	238.000	238.000
Overhauls	-	714.000	714.000	-	714.000	714.000	-	714.000	714.000	-
Mano de Obra	139.430	139.430	139.430	139.430	139.430	139.430	139.430	139.430	139.430	139.430
Flujo de Caja	2.572.372	3.286.372	3.286.372	2.572.372	3.286.372	3.286.372	2.572.372	3.286.372	3.286.372	2.572.372
VP	18.414.895									
CAE	2.996.939									

Fuente: Elaboración Propia

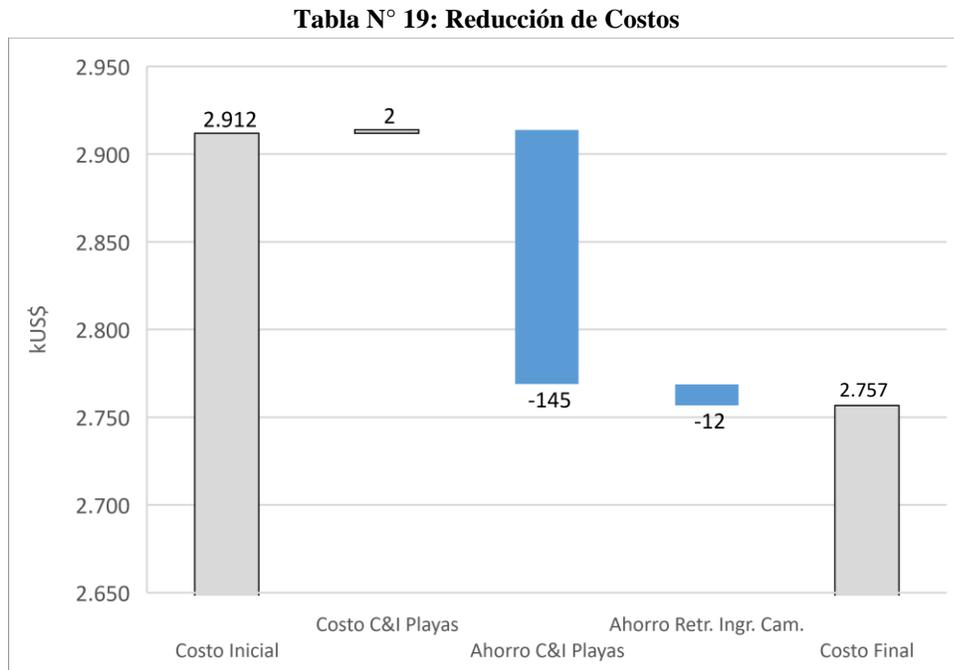
Dado que la postergación es sólo de unos días, es necesario ajustar la tasa de descuento anual a una diaria para calcular el valor presente de pagar el CAE dentro de 7,7 días. Para ello se utilizó las siguientes fórmulas:

- Tasa Efectiva Mensual: $TEM = ((1 + TEA)^{1/12} - 1)$
- Tasa Efectiva Diaria: $TED = ((1 + TEM)^{1/30} - 1)$
- Valor Presente: $VP = VF/(1 + TED)^n$, entonces: $VP = CAE/(1 + TED)^n$

El resultado de la última ecuación entrega un valor presente de US\$ 2.990.862, una diferencia de apenas US\$ 6.077 en comparación al CAE original, pero una diferencia al fin y al cabo. Además, si se tiene en cuenta que el retraso en el ingreso de un camión adicional ocurre en dos oportunidades (la segunda después del turno 67, cuando se dilata el ingreso del undécimo camión por un periodo similar de 7,7 días) el ahorro total ascendería a US\$ 12.154.

4.7.3.5. Resumen Análisis de Costos

Finalmente, los resultados para el periodo en análisis (30 días) revelan que con una inversión de kUS\$ 2 para la construcción de dos playas se puede generar una reducción de costos del orden de kUS\$ 155 (ver Tabla N° 19).



Fuente: Elaboración Propia

5. CONCLUSIONES

El método de simulación de eventos discretos permitió examinar un caso de estudio que de otra forma hubiese sido muy difícil de analizar y, a través de las múltiples replicaciones del modelo de un circuito de transporte de una mina a cielo abierto, permitió verificar la efectiva conveniencia de la instalación de playas de relevo *in pit* como una estrategia para incrementar la productividad del sistema pala-camión en el periodo circundante al cambio de turno.

Además, en los ensayos se encontró que la mejor combinación no está constituida únicamente por playas *in pit*, sino también por una playa ubicada cerca de la zona de vaciado. Hecho destacable porque ratifica los resultados encontrados en una investigación previa que proponía aproximar la playa de relevo al chancador y demuestra que posicionar las playas cerca de los lugares donde se desarrollan los procesos de carguío y descarga aumenta la productividad. En esa línea, también se determinó que algunas locaciones no generan mayor aporte al sistema y que a partir de determinado límite, la adición de más playas deja de contribuir a la productividad, lo que resulta bastante natural, pero al mismo tiempo respalda la importancia de realizar este tipo de análisis antes de ejecutar la construcción de las playas para evitar incurrir en gastos innecesarios.

En lo que respecta al número de estacionamiento se puede afirmar que en algunos casos bastó con uno o dos estacionamientos por playa para generar una mejora en la productividad del sistema. No obstante, puesto que todas las variantes del caso seleccionado como mejor resultado presentan una gran semejanza en el rango de las variables de interés (ver Ilustración N° 36), se cree necesario en una etapa posterior, conferir un mayor nivel de detalle al modelo de simulación para establecer un parámetro de selección de las variantes más robusto.

En la búsqueda de una proporción ideal de camiones vacíos y cargados estacionados al final del turno en las playas, primero se tuvo que establecer que cualquier incremento en la productividad de la primera hora del turno entrante no podría ser a costa de “sacrificar” la productividad del turno saliente. Por tal razón se decidió trabajar con la sumatoria de esas dos horas y sobre esa base recién buscar una combinación que ofreciese el mejor resultado. Sin embargo, fue la propia aleatoriedad del sistema la que demostró que, a pesar de existir algunas combinaciones que se presentaban con mayor frecuencia, ninguna lo suficiente como para considerársele una proporción típica e “ideal” para una playa. Lo que sí se pudo determinar fue una tendencia, y es que los resultados revelaron que lo más conveniente para el sistema es que al final del turno queden cargados la mayor cantidad de camiones, en especial si quedan lo más alejados posible del equipo de carguío.

En adición a los objetivos propuestos en un principio, se estimó por conveniente explorar el efecto del alejamiento del equipo de carguío con respecto a la playa recién construida y al contrario de lo que se esperaba, se encontró que una vez instalada la playa el equipo de carguío podría alejarse hasta un kilómetro y medio, y recién a esa distancia su reubicación hacia las cercanías del equipo de carguío generaría un incremento del 1% en la productividad del sistema (2% si se realiza a los

dos kilómetros). Es importante recordar que esta distancia corresponde a una superficie horizontal y fue establecido así para facilitar posteriores cálculos de longitud equivalente si se requiere hacer una nueva evaluación en caminos con pendiente. No obstante, este hallazgo resulta muy revelador, pues en la práctica basta con que un equipo de carguío se aleje unos cuantos cientos de metros para considerar reubicar las playas.

Por último, ya que este estudio se realizó sobre un circuito de transporte de lastre, el análisis económico se enfocó únicamente en la reducción de costos generada por la instalación de las playas de relevo. Sin embargo, los resultados para el periodo en análisis hablan por sí solos: la instalación de dos playas tiene el potencial para generar una reducción en el costo de transporte de kUS\$ 145 producto de un menor requerimiento de camión (un 27% de ese valor corresponde al ahorro en el consumo de combustible -casi 61.000 litros menos-). Además, el retraso en el ingreso de camiones adicionales al sistema también generó un ahorro en el flujo de caja, en el sentido que el desembolso de dicho flujo se desplazó al futuro por unos días, originando un ahorro de kUS\$ 12. En resumen, una inversión de US\$ 2.000 para generar una reducción total de costos de US\$ 155.000.

No obstante, a juicio del autor los resultados económicos no reflejan todo el potencial de las playas de relevo, puesto que es altamente probable que en un circuito de transporte de mineral no sólo contribuyan a la reducción de los costos operacionales, sino también a generar un beneficio económico adicional. Por tanto, estudios posteriores podrían abordar temas como: cuan más valioso es la implementación de playas de relevo en circuitos de transporte de mineral y si de forma análoga a lo hallado en este trabajo, existe también algún beneficio en el instalar playas en las inmediaciones de los equipos de carguío, chancado y/o stocks; o cómo impactaría la implementación de las playas de relevo en circuitos de transporte con múltiples equipos de carguío y/o con sistemas de despacho de camiones funcionando en “dinámico”.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. ALARIE, S. y GAMACHE, M. 2002. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journey of Surface Mining, Reclamation and Environment* 16: 59-76.
2. BARRIENTOS, V. 2014. Análisis de factores operacionales en detenciones y productividad de sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
3. BAUDINO, M., GIL-COSTA, V., GIUBERGIA, A., GUERRERO, R. y PRINTISTA, M. 2012. Modelos de simulación: selección y reemplazo de equipos para proyectos mineros. En: XIV WICC 2012. Universidad Nacional de San Luis, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales (Argentina). pp.713-717. Recuperado de <<https://goo.gl/tpecUj>>.
4. CATERPILLAR. 2000. Manual de rendimiento. 31° ed. Illinois, Estados Unidos.
5. CATERPILLAR. 2017. Caterpillar performance handbook. 47° ed. Illinois, Estados Unidos.
6. CHINBAT, U. y TAKAKUWA, S. 2008. Using operations process simulation for a six sigma project of mining and production factory. En: 2008 WINTER Simulation Conference (Miami, Estados Unidos). pp 2431-2438.
7. CHINBAT, U. y TAKAKUWA, S. 2009. Using simulation analysis for mining project risk management. En: 2009 WINTER Simulation Conference (Texas, Estados Unidos). pp 2612-2623.
8. FABREGAS, A., WADNIPAR, R., PATERNINA, C. y MANCILLA, A. 2003. Simulación de Sistemas Productivos con Arena®. Barranquilla. Colombia.
9. FIORONI, M., FRANZESE, L., BIANCHI, T., ESAWA, L., PINTO, L., MIRANDA, G. 2008. Concurrent Simulation and Optimization models for Mining Planning. En: 2008 WINTER Simulation Conference (Miami, Estados Unidos). pp 759-767.
10. GALLARDO, P. y CARDENAS, R. 2018. Combustibles: peso de impuestos en el precio final en Chile es uno de los más bajos de la OCDE [en línea] La Tercera, Pulso. 22 de octubre, 2018. <<https://goo.gl/fcbXJW>>.
11. KOLOJNA, B., KALASKY D. R. y MUTMANSKY, J. M. 1993. Optimization of dispatching criteria to open pit truck haulage system design using multiple comparisons with the best and

- common random numbers. En: 1993 WINTER Simulation Conference (Los Angeles, Estados Unidos). pp. 393-401.
12. LAW, A. 2013. How to conduct a succesful simulation study. En: 2003 WINTER Simulation Conference (New Orleans, Estados Unidos). pp 66-70.
13. LUCE, K., TREPANIER, L., CIOCHETTO, F. y GOLDMAN, L. 2005. Simulation and optimization as effective DFSS Tools. En: 2005 WINTER Simulation Conference (Orlando, Estados Unidos).
14. NAGESHWARANIYER, S., SON, Y. y DESSUREAULT, S. 2013. Simulation-based robust optimization for complex turck-shovel systems in surface coal mines. En: 2013 WINTER Simulation Conference (Washington DC, Estados Unidos). pp 3522-3532.
15. PORTO, A. y LOBÃO, E. 1999. Proposta pasa sistematização de estudos de simulação. Revista Engenharia Arquitectura. EESC-USP, 1(2): 61-69.
16. RAMOS, M. 2011. Los enormes beneficios tributarios a los que acceden las empresas mineras en Chile [en línea] Ciper. 19 de julio, 2011. <<https://goo.gl/PsXhnw>>.
17. RASCHE, T. y STURGUL, J. R. 1991. A simulation to assist a small mine: a case study. International Jounal of Surface Mining, Reclamation and Environment 5: 123-128.
18. ROBINSON, S. 2004. Simulation, the practice of Model Development and use. Reino Unido. John Wiley & Sons, Ltd. 316p.
19. SADOWSKI, D. y STURROCK, D. 2006. Tips for the successful practice of simulation. En: 2006 WINTER Simulation Conference (California, Estados Unidos). pp 67-72.
20. SHANNON, R. E. 1998. Introduction to the art and science of simulation: En: 1998 WINTER Simulation Conference (Washington DC, Estados Unidos). pp 7-14.
21. SMART SIMULATION BLOG. 2012. “Simulation is the best way to allocate trucks to shovels in open-pit mine operations. 14 de Junio, 2012. Recuperado de <<https://goo.gl/J1gTs2>>.
22. STANDRIDGE, C., JINKE, D., JURISHICA, C., FERRIN, D. y HARMONOSKY, C. 2007. What I wish they would have taught me (or that I would have better remembered!) in school. En: 2007 WINTER Simulation Conference (Washington DC, Estados Unidos). pp 2315-2321.

23. TAN, Y., CHINBAR, U., MIWA, K. y TAKAKUWA, S. 2012. Operations modeling and analysis of open pit copper mining using GPS tracking data. En: 2012 WINTER Simulation Conference (Berlín, Alemania). pp 1309-1320.
24. TURNER, R. J. 1999. Simulation in the mining industry of South Africa. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment 13: 47-56.
25. VASQUEZ, P. 2014. Optimization of the haulage cycle model for open pit mining using a discrete-event simulator and a context-based alert system. Tesis para optar al grado de Master of Science. United States of America, University of Arizona, Department of Mining, Geological and Geophysical Engineering.
26. YARMUCH, J. 2012. Simulación del sistema de carguío y transporte Mina Chuquicamata. Tesis para optar al grado de Magister en Minería. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

7. ANEXOS Y APÉNDICES

7.1. Parámetros Experimento: Alejamiento de Pala & Playa Fija

Tabla N° 20: Parámetros a Modificar en Modelo de Simulación con Playa Fija

N°	Caja	Detalle Variación	Unid.	Avance Pala (metros)											
				+0	+100	+200	+300	+400	+500	+600	+800	+1000	+1500	+2000	
1	Remate / Viajando desde DIN100 Remate	Distancia horizontal entre DIN100 y PA100	km	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,900	1,100	1,600	2,100	
2	Playa Origen / Transitando desde Compa / Vacío	Distancia horizontal entre Compa y PA100	km	1,733	1,833	1,933	2,033	2,133	2,233	2,333	2,533	2,733	3,233	3,733	
3	Playa Origen / Transitando desde DIN100 / Vacío	Distancia horizontal entre DIN100 y PA100	km	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,900	1,100	1,600	2,100	
4	Playa Origen / Transitando desde DINBot / Vacío	Distancia horizontal entre DINBot y PA100	km	1,845	1,945	2,045	2,145	2,245	2,345	2,445	2,645	2,845	3,345	3,845	
5	Transportando	Distancia horizontal entre PA100 y Bot95	km	1,911	2,011	2,111	2,211	2,311	2,411	2,511	2,711	2,911	3,411	3,911	
6	Viajando	Distancia horizontal entre Bot95 y PA100	km	1,945	2,045	2,145	2,245	2,345	2,445	2,545	2,745	2,945	3,445	3,945	
7	MT Vacío?	Percentil90: t_viajando + t_carguio	min	18,89	19,17	19,44	19,77	20,07	20,35	20,66	21,30	21,87	23,53	24,90	
8	MT Cargado?	Percentil90: t_transportando + t_descarga	min	27,82	28,35	28,90	29,44	29,75	30,24	30,62	31,64	32,69	35,16	38,27	
9	Playa MTC? / Condición 1	Percentil 90: t_transportando hacia DINBot	min	25,90	26,31	26,73	27,28	27,71	28,32	28,80	29,63	30,69	33,31	36,05	
10	Playa MTC? / Condición 2	Percentil 90: t_transportando hacia Compa	min	16,47	17,02	17,45	17,96	18,59	19,20	19,61	20,79	21,85	24,64	27,47	
11	FT Vacío?	Percentil 90: t_viajando + t_carguio + t_transportando hacia DIN100	min	19,10	19,73	20,41	21,08	21,77	22,65	23,54	24,94	26,42	30,22	34,05	
12	FT Cargado?	Percentil 90: t_transportando + t_descarga + t_viajando hacia DINBot	min	28,02	28,53	29,13	29,59	30,00	30,41	30,87	31,91	32,90	35,30	38,44	
13	Playa FTC? / Condición 1	Percentil 90: t_transportando hacia DINBot	min	25,90	26,31	26,73	27,28	27,71	28,32	28,80	29,63	30,69	33,31	36,05	
14	Playa FTC? / Condición 2	Percentil 90: t_transportando hacia Compa	min	16,47	17,02	17,45	17,96	18,59	19,20	19,61	20,79	21,85	24,64	27,47	
15	Remate / Transportando a DIN100 Remate	Distancia horizontal entre PA100 y DIN100	km	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,900	1,100	1,600	2,100	
16	Playa Destino / Transitando hacia Compa / Cargado	Distancia horizontal entre PA100 y Compa	km	1,699	1,799	1,899	1,999	2,099	2,199	2,299	2,499	2,699	3,199	3,699	
17	Playa Destino / Transitando hacia DIN100 / Cargado	Distancia horizontal entre PA100 y DIN100	km	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,900	1,100	1,600	2,100	
18	Playa Destino / Transitando hacia DINBot / Cargado	Distancia horizontal entre PA100 y DINBot	km	1,811	1,911	2,011	2,111	2,211	2,311	2,411	2,611	2,811	3,311	3,811	
19	Procede al FT en DIN100?	Percentil 90: t_DIN100_PA100_DIN100	min	4,04	4,76	5,53	6,24	7,02	7,92	8,74	10,40	12,10	16,29	20,45	

Fuente: Elaboración propia

7.2. Parámetros Experimento: Alejamiento de Pala & Playa Dinámica

Tabla N° 21: Parámetros a Modificar en Modelo de Simulación con Playa Dinámica

N°	Caja	Detalle Variación	Unid.	Avance Pala (metros)											
				+0	+100	+200	+300	+400	+500	+600	+800	+1000	+1500	+2000	
1	Remate / Viajando desde DIN100 Remate	Distancia horizontal entre DIN100 y PA100	km	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
2	Playa Origen / Transitando desde Compa / Vacío	Distancia horizontal entre Compa y PA100	km	1,733	1,833	1,933	2,033	2,133	2,233	2,333	2,533	2,733	3,233	3,733	
3	Playa Origen / Transitando desde DIN100 / Vacío	Distancia horizontal entre DIN100 y PA100	km	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
4	Playa Origen / Transitando desde DIN100 / Cargado	Distancia horizontal entre DIN100 y Bot95	km	1,811	1,911	2,011	2,111	2,211	2,311	2,411	2,611	2,811	3,311	3,811	
5	Playa Origen / Transitando desde DINBot / Vacío	Distancia horizontal entre DINBot y PA100	km	1,845	1,945	2,045	2,145	2,245	2,345	2,445	2,645	2,845	3,345	3,845	
6	Transportando	Distancia horizontal entre PA100 y Bot95	km	1,911	2,011	2,111	2,211	2,311	2,411	2,511	2,711	2,911	3,411	3,911	
7	Viajando	Distancia horizontal entre Bot95 y PA100	km	1,945	2,045	2,145	2,245	2,345	2,445	2,545	2,745	2,945	3,445	3,945	
8	MT Vacío?	Percentil90: t_viajando + t_carguio	min	18,89	19,17	19,44	19,77	20,07	20,35	20,66	21,30	21,87	23,53	24,90	
9	Playa MTV? / Condición 1	Percentil 90: t_viajando hacia DIN100	min	15,75	16,14	16,42	16,64	16,89	17,22	17,46	18,06	18,64	20,13	21,82	
10	MT Cargado?	Percentil90: t_transportando + t_descarga	min	27,82	28,35	28,90	29,44	29,75	30,24	30,62	31,64	32,69	35,16	38,27	
11	Playa MTC? / Condición 1	Percentil 90: t_transportando hacia DINBot	min	25,90	26,31	26,73	27,28	27,71	28,32	28,80	29,63	30,69	33,31	36,05	
12	Playa MTC? / Condición 2	Percentil 90: t_transportando hacia Compa	min	16,47	17,02	17,45	17,96	18,59	19,20	19,61	20,79	21,85	24,64	27,47	
13	FT Vacío?	Percentil 90: t_viajando + t_carguio + t_transportando hacia DIN100	min	19,10	19,41	19,71	20,03	20,36	20,63	20,94	21,59	22,16	23,80	25,23	
14	Playa FTV? / Condición 1	Percentil 90: t_viajando hacia DIN100	min	15,75	16,14	16,42	16,64	16,89	17,22	17,46	18,06	18,64	20,13	21,82	
15	FT Cargado?	Percentil 90: t_transportando + t_descarga + t_viajando hacia DINBot	min	28,02	28,53	29,13	29,59	30,00	30,41	30,87	31,91	32,90	35,30	38,44	
16	Playa FTC? / Condición 1	Percentil 90: t_transportando hacia DINBot	min	25,90	26,31	26,73	27,28	27,71	28,32	28,80	29,63	30,69	33,31	36,05	
17	Playa FTC? / Condición 2	Percentil 90: t_transportando hacia Compa	min	16,47	17,02	17,45	17,96	18,59	19,20	19,61	20,79	21,85	24,64	27,47	
18	Remate / Transportando a DIN100 Remate	Distancia horizontal entre PA100 y DIN100	km	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
19	Playa Destino / Transitando hacia Compa / Cargado	Distancia horizontal entre PA100 y Compa	km	1,699	1,799	1,899	1,999	2,099	2,199	2,299	2,499	2,699	3,199	3,699	
20	Playa Destino / Transitando hacia DIN100 / Cargado	Distancia horizontal entre PA100 y DIN100	km	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
21	Playa Destino / Transitando hacia DIN100 / Vacío	Distancia horizontal entre Bot95 y DIN100	km	1,845	1,945	2,045	2,145	2,245	2,345	2,445	2,645	2,845	3,345	3,845	
22	Playa Destino / Transitando hacia DINBot / Cargado	Distancia horizontal entre PA100 y DINBot	km	1,811	1,911	2,011	2,111	2,211	2,311	2,411	2,611	2,811	3,311	3,811	
23	Procede al FT en DIN100?	Percentil 90: t_DIN100_PA100_DIN100	min	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	4,04	

Fuente: Elaboración propia

7.3. Consumo de Combustible

En la Tabla N° 22 se aprecia un resumen del consumo medio de combustible de los camiones de alto tonelaje utilizados en la mina caso de estudio, diferenciados por tipo de pendiente y estado vacío o cargado.

Tabla N° 22: Consumo Medio de Combustible

Pendiente	Estado	Consumo (l/hr)
Subiendo ($X > 4\%$)	Cargado	320
Subiendo ($X > 4\%$)	Vacío	150
Horizontal ($-4\% \leq X \leq 4\%$)	Cargado	200
Horizontal ($-4\% \leq X \leq 4\%$)	Vacío	120
Bajando ($X < -4\%$)	Cargado	250
Bajando ($X < -4\%$)	Vacío	150
Ralenti		70

Fuente: Mina Caso Estudio

7.4. Cálculo de Requerimiento de Tractor de Orugas

El cálculo de las horas-máquina de tractor que aquí se describe corresponde a la construcción de una playa de relevo con un único estacionamiento, por tanto, la superficie necesaria para ello es de 30 metros de largo por 30 metros de ancho. Es importante mencionar además que el objetivo de esta sección es únicamente aclarar cómo se calculó los valores presentados en la Tabla N° 12.

Fórmulas:

$$TPP = (LONG/V + TM)/EFF \dots (i)$$

$$NP = ANCH/EEP \dots (ii)$$

$$TT = TPP * NP \dots (iii)$$

$$CT = CPO * TT \dots (iv)$$

Donde:

TPP: Tiempo por pasada

LONG: Longitud del área a desgarrar

V: Velocidad media del tractor en modo desgarrador

TM: Tiempo de maniobras

EFF: Eficiencia

NP: Número de pasadas necesarias para cubrir toda el área

ANCH: Ancho del área a desgarrar
 EEP: Espacio entre pasadas
 TT: Tiempo total
 CT: Costo total
 CPO: Costo posesión y operación

Ejercicio:

Tabla N° 23: Parámetros Tractor de Orugas Caterpillar D11R

Penetración del desgarrador	m	0,50
Velocidad	m/min	26,70
Tiempo de maniobras	min	0,25
Espacio entre pasadas	m	1,00
Eficiencia	-	0,85
Costo posesión & operación	\$/hr	135,00

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los parámetros en las fórmulas (i), (ii), (iii) y (iv):

$$TPP = (30/26,7 + 0,25)/0,85 = 1,62 \text{ min}$$

$$NP = 30/1 = 30$$

$$TT = 1,62 * 30 = 48,48 \text{ min} = 0,8 \text{ hrs}$$

$$CT = 135 * 0,8 = 109 \text{ US\$}$$

7.5. Cálculo de Requerimiento de Motoniveladora

Para el cálculo de las hora-máquina de motoniveladora también se consideró la construcción de una playa de relevo con un único estacionamiento, por tanto, la superficie a cubrir es de 900 m².

Fórmulas:

$$ADO = V * (LH * \cos(AV) - AS) * 1000 * EFF \dots (v)$$

$$TT = AT/ADO * NP \dots (vi)$$

$$CT = CPO * TT \dots (vii)$$

Donde:

ADO: Área de operación

V: Velocidad
 LH: Longitud de la hoja
 AV: Ángulo de vertedera
 AS: Ancho de superposición
 EFF: Eficiencia
 TT: Tiempo total
 AT: Área Total
 NP: Número de pasadas
 CT: Costo total
 CPO: Costo posesión y operación

Ejercicio:

Tabla N° 24: Parámetros Motoniveladora Caterpillar 16M

Longitud de la hoja	m	4,88
Velocidad	kph	5,00
Angulo de vertedera	°	30
Eficiencia		0,85
Ancho de superposición	m	0,60
Número de pasadas		3
Costo posesión & operación	\$/hr	48,00

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los parámetros en las fórmulas (v), (vi) y (vii)

$$ADO = 5 * (4,88 * \cos(30^\circ) - 0,6) * 1000 * 0,85 = 15.411 \text{ m}^2/\text{hr}$$

$$TT = 900/15.411 * 3 = 0,18 \text{ hrs}$$

$$CT = 48 * 0,2 = 8,4 \text{ US\$}$$

7.6. Cálculo de Requerimiento de Cargador Frontal

Una playa con un único estacionamiento requiere la construcción de 103 metros lineales de pretilas, por tanto, si estos tienen una sección de $3,75 \text{ m}^2$, entonces en total se requeriría mover 386 m^3 .

Fórmulas:

$$PROD = CNC / (TPC / 3600) * EFF \dots \text{(viii)}$$

$$TT = (VP * DM) / PROD \dots \text{(ix)}$$

$$CT = CPO * TT \dots (x)$$

Donde:

PROD: Productividad

CNC: Capacidad nominal de carga

TPC: Tiempo promedio de ciclo

EFF: Eficiencia

TT: Tiempo total

VP: Volumen pretilas

DM: Densidad del material

CT: Costo total:

CPO: Costo de posesión y operación

Ejercicio:

Tabla N° 25: Parámetros Cargador Frontal Caterpillar 988G

Capacidad nominal de carga	t	11,34
Densidad del material	t/m3	2,00
Tiempo promedio de ciclo	seg	57,50
Eficiencia		0,85
Costo posesión & operación	\$/hr	81,00

Fuente: Elaboración propia

Reemplazando los parámetros en las fórmulas (viii), (ix) y (x)

$$PROD = 11,34 / (57,50 / 3600) * 0,85 = 603,5 \text{ ton/hr}$$

$$TT = (386 * 2) / 603,5 = 1,3 \text{ hrs}$$

$$CT = 81 * 1,3 = 104 \text{ US\$}$$

7.7. Cálculo del Costo de Posesión y Operación de la Torre de Iluminación

Tabla N° 26: Costo de la Torre de Iluminación

Parámetros		
Equipo: Torre de Iluminación		
Precio	US\$	14.910,70
Periodo Estimado de Posesión (años)	Años	6,85
Utilización Estimada (horas/año)	Hrs/años	4.380
Tiempo de Posesion (total de horas)	Hrs	30.000
Costo de Posesión	US\$/hr	0,50
Costo de Operación	US\$/hr	0,76
1. Combustible	US\$/hr	0,32
2. Lubricantes	US\$/hr	0,05
3. Reparaciones	US\$/hr	0,39
Costo Total de Posesión y Operación	US\$/hr	1,26

Fuente: Elaboración propia