



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

ANÁLISIS DE FACTORES OPERACIONALES EN DETENCIONES Y
PRODUCTIVIDAD DE SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN
MINERÍA A CIELO ABIERTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE
MINAS

VÍCTOR MANUEL BARRIENTOS GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:
MANUEL REYES JARA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
XAVIER EMERY
JUAN LUIS YARMUCH GUZMÁN

SANTIAGO DE CHILE
2014

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Víctor Manuel Barrientos González
FECHA: 26/11/2014
PROFESOR GUÍA: Manuel Reyes

ANÁLISIS DE FACTORES OPERACIONALES EN DETENCIONES Y PRODUCTIVIDAD DE SISTEMA DE CARGUÍO Y TRANSPORTE EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

En la gran minería del cobre a cielo abierto son los sistemas pala-camión los ampliamente usados para realizar la labor de carguío y transporte. Actualmente este ítem abarca cerca del 50% de los costos de operación, donde las principales mejoras se logran a través de una gestión óptima de la disponibilidad, confiabilidad y mantenimiento del sistema. El principal objetivo de este estudio es encontrar los cambios operacionales que tengan mejores resultados sobre las detenciones programadas de cambio de turno y colación, y cómo estas afectan en la productividad diaria del sistema de carguío y transporte.

La metodología del estudio corresponde a una limpieza de los datos disponibles siguiendo restricciones físicas, luego un análisis exploratorio descriptivo y analítico modelando la relación entre las detenciones en estudio y la productividad diaria. Luego se realiza un modelo de simulación dinámica de eventos discretos que emula la realidad del sistema en estudio, el cual es validado y calibrado con la información que se tiene del sistema real.

Los resultados indican que se observa que los días de mayor productividad son aquellos que poseen la menor duración de las detenciones en estudio, entre otros factores. El modelo permite construir nuevos escenarios a partir del caso base, donde se agregan cambios operacionales ligados a agregar la posibilidad de que los camiones puedan realizar cambios de turno cargado, que se varíe la posición del estacionamiento respecto al chancador y el cambio del tipo de camiones. Los escenarios con cambio de turno con los camiones cargados y donde estacionamiento está más cercano al chancador, aumentan la productividad diaria y disminuyen el total de las detenciones en estudio. Por otra parte, al cambiar el tipo de equipos de transporte hacia uno de mayor velocidad se logra que las detenciones disminuyan, mientras que un análisis en la productividad diaria no es posible de realizar debido a que es necesario cambiar la flota de transporte. Finalmente se recomienda realizar la implementación de que el camión pueda realizar el cambio de turno cargado y además acercar el estacionamiento al chancador. El resultado de un escenario combinando ambas estrategias logra un aumento de un 4.2% en la productividad diaria y disminuye en un 10.6% la duración de las detenciones. Esto se traduce en un aumento del beneficio económico de 4.07 MUS\$ mensualmente.

Con los resultados obtenidos se logró encontrar un escenario que aumenta la productividad, y en consecuencia, agregar valor a un sistema ya en funcionamiento, cumpliendo así el principal objetivo del estudio. Es posible completar un estudio de este tipo agregando más información detallada ligada a las detenciones estudiadas, pudiendo realizar análisis estadísticos específicos y el modelo de simulación pueda ser calibrado en base a estos datos.

**ABSTRACT OF THE ENGINEERING THESIS TO
OBTAIN THE GRADE OF:** Civil Mining Engineering
BY: Víctor Manuel Barrientos González
DATE: 26/11/2014
THESIS ADVISOR: Manuel Reyes

**ANALYSIS OF OPERATIONAL FACTORS IN DETENTIONS AND
PRODUCTIVITY OF THE LOADING-HAULING SYSTEM IN OPET PIT
MINING**

In open pit large scale mining, the truck-shovel systems are widely used to do the labor of the loading and hauling. Nowadays the costs related to these items are around 50% of the costs of operation, and the main improvements are reached through an optimal management of the reliability, availability and maintenance of the system. The main goal of this study is to find the operational changes that lead to the best results in scheduled detentions of shift changes and meal breaks, and how this impacts the daily productivity of the loading-hauling system.

The methodology is: a cleaning process of the available data following physical constraints, then an exploratory data analysis modeling the relation between the studied detentions and the daily productivity. Then a dynamic simulation model of discrete events is built, emulating the reality of the system in study, this is validated and calibrated with the information that has of the real system.

The outcomes indicates that the days of higher productivity are those which has the shortest detention, between others factors. The model allows to build new scenarios, where operational changes will be added related to considering the possibility of doing the shift change with trucks loaded, changing the position of the parking lot relative to the crusher and changing the type of truck. The scenarios with shift changed with loaded trucks and the parking lot nearest to the crusher, increases the daily productivity and diminishes the detentions in study. In the other hand, by changing the truck type to a higher-speed it's achieved that the detentions decreases, meanwhile an analysis in the daily productivity it's not possible because it's necessary to change the haulage fleet. Finally it's recommended to implement that the trucks can perform the shift change loaded and also change the parking lot position to one nearer to the crusher. The result of both changes applied in one scenario shows that the daily productivity is increased by 4.2% and the detentions decreases by 10.6%. This turns out in a monthly improvement of 4.07 MUS\$ in terms of economic profit.

With the obtained results the goal of this study it's accomplished, since it's able to find a setting that increase the daily productivity, and consequently, add value in a system already in operation. It's possible to complement the study by adding more detailed information related to the studied detentions, being able to perform specific statistical analysis and the simulation model can be calibrated based to this data.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, padre, hermana, abuelita y familia en general quienes me han dado todo su apoyo durante toda mi vida, y que sin ellos no podría haber empezado esta aventura.

A mis profesores de comisión, quienes se dieron el tiempo de apoyarme en todo momento requerido.

A Sebastián Troncoso quien fue gran aporte en la realización de esta memoria, con una paciencia y capacidad pedagógica que no es fácil de encontrar.

A Pilar Valderrama y Mane Fernández por todo su apoyo durante la vida cotidiana en la U, aportando en mi formación como persona y profesional.

A los amigos de verdad, colegio y universidad, quienes han estado en las buenas y en las malas.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
TABLA DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del sistema	3
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo General	6
1.2.2. Objetivos Específicos.....	6
1.3. Alcances	7
1.4. Antecedentes generales.....	9
1.4.1. Simulación dinámica de eventos discretos.....	9
1.4.2. Minería de datos: Clustering k-means	12
1.5. Estado del arte	14
1.6. Motivación del trabajo	15
2. METODOLOGÍA	16
3. Desarrollo	17
3.1. Recolección, procesamiento y gestión de datos.....	17
3.1.1. Limpieza de datos.....	18
3.1.2. Distribuciones de tiempo	20
3.1.3. Productividad de los eventos	22
3.2. Análisis estadístico y minería de datos.....	24
3.2.1. Nueva base de datos: construcción de caracterización por días.....	24
3.2.2. Análisis base de datos caracterización días.....	30
3.3. Modelo de simulación dinámica	35
3.3.1. Flujo lógico de información en modelo base	36
3.3.2. Implementación en Arena de modelo base	37
3.3.3. Validación y calibración del modelo base.....	43
3.3.4. Escenario cambio de turno cargado.....	47
3.3.5. Escenario con variación de posición de estacionamiento	49
3.3.6. Escenario cambiando tipos de equipos de transporte.....	50
3.4. Análisis de los resultados de los nuevos escenarios	51
3.4.1. Resultados escenario cambio de turno cargado.....	51
3.4.2. Resultado escenario con variación de posición de estacionamiento	53
3.4.3. Resultados escenario cambiando tipos de equipos de transporte	54
3.4.4. Resultados escenario combinado: cambio turno cargado y estacionamiento junto a chancador	55
4. CONCLUSIONES.....	59
5. BIBLIOGRAFÍA.....	62

6. ANEXOS..... 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cadena de valor del proceso productivo en minería a cielo abierto	1
Figura 2: Sistema en estudio	3
Figura 3: Esquema ciclo camión	4
Figura 4: Diseño del sistema	5
Figura 5: Clasificación de métodos de clustering	13
Figura 6: Diagrama de flujo lógico modelo de simulación base	36
Figura 7: Flujo lógico global en Arena	37
Figura 8: Asignación de orígenes por parte del sub-modelo dispatch	38
Figura 9: Chequeo de detención operacional en sub-modelo dispatch.....	40
Figura 10: Seize o apoderamiento del recurso en una primera intersección para luego realizar el transporte hacia la ubicación de la pala en sub-modelo destino.....	40
Figura 11: Carga en pala	41
Figura 12: Sub-modelo chancado	41
Figura 13: Viaje que emula la duración de la detención en sub-modelo estacionamiento	42
Figura 14: Corroboración de la hora de salida para cada detención en sub-modelo estacionamiento.....	43
Figura 15: Representación gráfica modelo simulación base	44
Figura 16: Modificación a sub-modelo dispatch para integrar posibilidad de "medio viaje"	48
Figura 17: Modificación sub-modelo origen para incorporar viaje a estacionamiento exclusivo camiones cargados.....	49

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribución de los tiempos de acuatamiento en carguío	21
Gráfico 2: Distribución de los tiempos de carguío.....	21
Gráfico 3: Distribución de los tiempos de acuatamiento más descarga.....	21
Gráfico 4: Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables cuantitativas presentes y la productividad del evento	22
Gráfico 5: Análisis k-mean separados en 2 grupos según caracterización diaria de productividad.....	27
Gráfico 6: Análisis k-mean separados en 3 grupos según caracterización diaria de productividad.....	27
Gráfico 7: Análisis k-mean separados en 4 grupos según caracterización diaria de productividad.....	28
Gráfico 8: Análisis k-mean separados en 5 grupos según caracterización diaria de productividad.....	29
Gráfico 9: Frecuencia por conglomerado de k-media	29
Gráfico 10: Número de casos para cada grupo de datos, izquierda: grupo palas, derecha: grupo camiones	30
Gráfico 11: Histograma productividad grupo 1	32
Gráfico 12: Histograma detenciones grupo 1.....	32
Gráfico 13: Histograma productividad grupo 2	32
Gráfico 14: Histograma detenciones grupo 2.....	33
Gráfico 15: Histograma productividad grupo 3	33
Gráfico 16: Histograma detenciones grupo 3.....	33
Gráfico 17: Histograma productividad grupo 4	34
Gráfico 18: Histograma detenciones grupo 4.....	34
Gráfico 19: Diferencias porcentuales entre promedios acumulados para cada replicación	46
Gráfico 20: Productividad instantánea real versus simulada	46
Gráfico 21: Dispersión entre productividades instantáneas simuladas y reales	47
Gráfico 22: Comparativa productividad instantánea entre caso base y caso con cambio turno cargado	52
Gráfico 23: Productividad diaria y detenciones operacionales versus distancia entre estacionamiento y chancador.....	53
Gráfico 24: Comparativa productividad instantánea entre caso base y mejor caso en escenario variando posición de estacionamiento	54
Gráfico 25: Comparativa productividad instantánea entre caso base y escenario combinado	56
Gráfico 26: Beneficio asociado a cada caso	57
Gráfico 27: Diferencial del beneficio asociado al caso anterior	58
Gráfico 28: Histograma de tiempo de cola en carguío.....	65
Gráfico 29: Histograma de tiempo de acuatamiento en carguío.....	65
Gráfico 30: Histograma de tiempos de carguío	66

Gráfico 31: Histograma de tiempos de aculatamiento más descarga en chancado.....	66
Gráfico 32: Histograma de tiempos de ciclos.....	67
Gráfico 33: Histograma de tiempos de ciclo desde la fase N06	67
Gráfico 34: Histograma de tiempos de ciclo desde la fase N06	68
Gráfico 35: Histograma de tiempos de ciclo desde el stock SAL	68
Gráfico 36: Histograma de tiempos de ciclo desde el stock SLM.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estadísticas básicas datos dispatch sin limpiar	18
Tabla 2: Estadísticas básicas con datos limpios	19
Tabla 3: Frecuencias de eventos por origen	20
Tabla 4: Formato tipo de la construcción de las productividades temporales durante el día	24
Tabla 5: Promedios al total de datos en caracterización diaria	31
Tabla 6: Promedios separados por grupos de datos en caracterización diaria	31
Tabla 7: Comparación entre parámetros reales y simulados	45
Tabla 8: Casos simulados y sus distancias con respecto al chancador respectivas	49
Tabla 9: Resultados caso base	51
Tabla 10: Resultados escenario cambio de turno cargado	52
Tabla 11: Resultados mejor caso en escenario de cambio de posición de estacionamiento	54
Tabla 12: Resultados escenario cambiando equipos de transporte	55
Tabla 13: Resultados escenario combinado	56

1. INTRODUCCIÓN

La operación de una mina a cielo abierto, y en particular el proceso productivo de tratamiento de sulfuros de cobre, se explica por la cadena de valor que sigue la secuencia de perforación, tronadura, carguío, transporte, chancado, molienda, flotación, fusión, conversión y electro refinación (Figura 1).

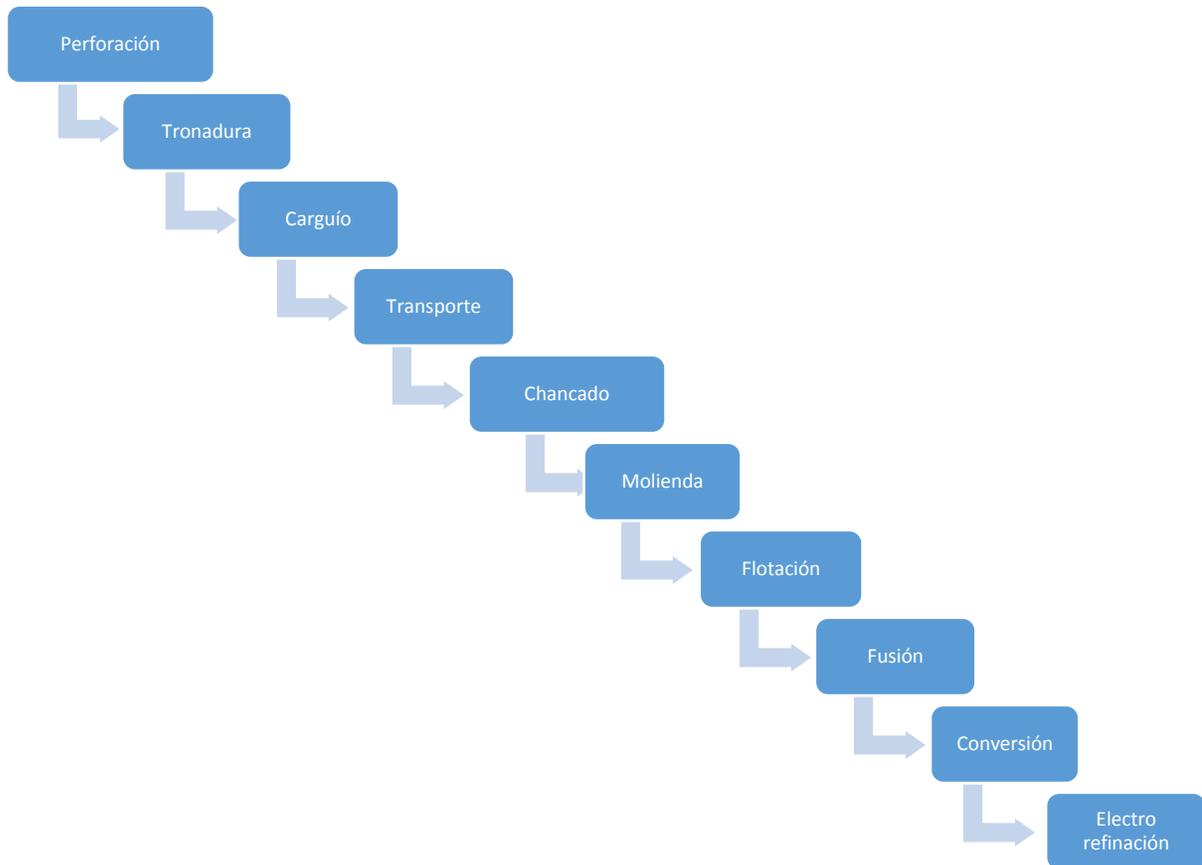


Figura 1: Cadena de valor del proceso productivo en minería a cielo abierto

En la gran minería del cobre, en particular en la gran minería a cielo abierto, los sistemas pala-camión son los medios históricamente más ocupados para los sistemas de carguío y transporte en las últimas décadas. Esto se debe a las ventajas comparativas con respecto a otros sistemas, tales como correas transportadoras y trenes, producto de su flexibilidad, alta movilidad, capacidad de subir pendientes, menores radios de giros y menor inversión en infraestructuras [1].

El movimiento de material en una mina a cielo abierto corresponde a alrededor del 50% de los costos de operación [2]. En las décadas del '60 y

'70 los mayores ahorros y avances en este sentido fueron a través de economías de escala, es decir, tender al aumento de las capacidades tanto de palas como de camiones para disminuir el costo por tonelada [3]. Sin embargo, en la actualidad, la disminución de costos por este medio ha llegado a su límite, teniendo que buscar en la eficiencia de la productividad a través de una gestión óptima de la disponibilidad, confiabilidad y mantenimiento del sistema (RAM, por sus siglas en inglés) [1 y 2].

El escenario actual para los métodos a cielo abierto presenta un progresivo descenso en la ley de mineral, es por esto que para mantener o aumentar la cantidad de mineral fino producido es necesario enviar mayores cantidades de mineral a la planta [4].

Es en busca del aumento de la disponibilidad del sistema pala-camión que se realizará este estudio, cuyo principal objetivo es estudiar la curva de productividad a lo largo de dos turnos de 12 horas cada uno, observando principalmente el comportamiento antes y después de detenciones operacionales.

1.1. Descripción del sistema

Debido a políticas de confidencialidad de la empresa donde se realiza la memoria no se puede dar el nombre de la faena en estudio, así como tampoco características que puedan indicar de qué mina se trata. Se puede indicar que corresponde a una mina a cielo abierto que extrae cobre, ubicada en el norte de Chile. En el proceso productivo del procesamiento del mineral, el sistema en estudio corresponde a una de las primeras partes de la cadena de valor.

El sistema en estudio consta de un chancador que produce en promedio 96.5 mil toneladas por día (ktpd), cuya alimentación proviene desde dos fases y dos stocks de minerales (Figura 2). El movimiento de material corresponde únicamente a movimiento de mineral, ya que se encuentra fuera de estudio el movimiento de lastre.

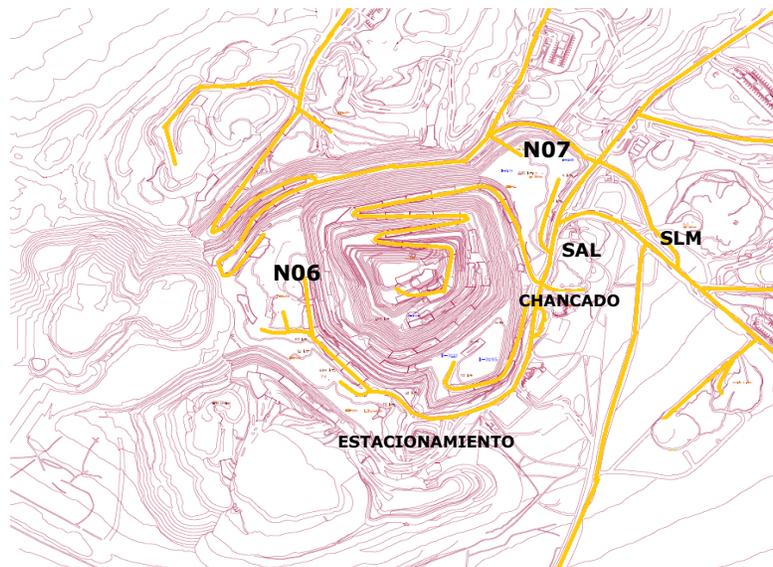


Figura 2: Sistema en estudio

A grandes rasgos, el ciclo que realiza un camión en la faena es descrito por el esquema en la Figura 3, donde la mayor cantidad de las veces el camión parte el turno en el estacionamiento¹ y realiza el viaje hacia la pala asignada. Aquí comienza el ciclo en la carga de mineral en la pala, viaje de ida hacia el chancador y descarga en este último. Al salir de la descarga, y si el tiempo es cercano al cambio de turno, se hace la revisión si es posible realizar un ciclo completo previo a realizar el cambio de turno. En caso de ser posible se realiza el ciclo, en caso contrario, el camión se dirige al estacionamiento para realizar el cambio de turno.

¹ Existen casos donde el camión parte su ciclo en una ubicación distinta al estacionamiento, producto de que al final del turno no fue posible su viaje a este o simplemente resultaba mejor realizar el cambio de turno en la locación en que se encontraba en el momento.

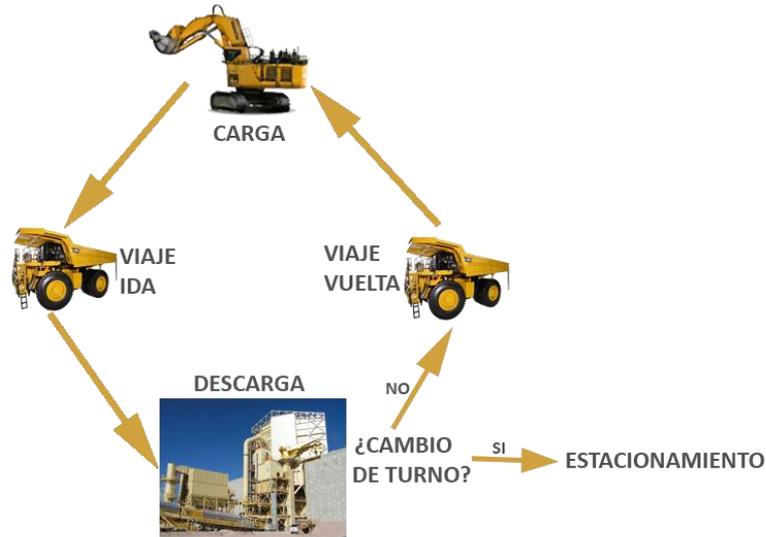


Figura 3: Esquema ciclo camión

En la faena los cambios de turnos se realizan únicamente con los camiones descargados, esto ligado principalmente a la seguridad de los operadores y la simplicidad de operación. Estos cambios de turnos se realizan en estacionamientos ocupados exclusivamente para ello, donde los operadores deben estar fuera de la faena al final del turno, 8 am para el turno de noche y 8 pm para el turno de día. Relacionado a esto se encuentra la problemática de que se debe asegurar que el operador no sobrepase los tiempos de salida de su turno, pero a la vez se intenta realizar la mayor cantidad de ciclos durante el turno.

La configuración dentro del sistema de chancado es un diseño que muchos sitios mineros ocupan [13]. Este diseño cuenta con una entrada o punto de acceso para los camiones cargados, el chancador primario, una tolva de descarga en el chancador primario que permite la descarga de material a través de dos puntos, un martillo picador, y finalmente un punto de salida para los camiones ya descargados (Figura 4).

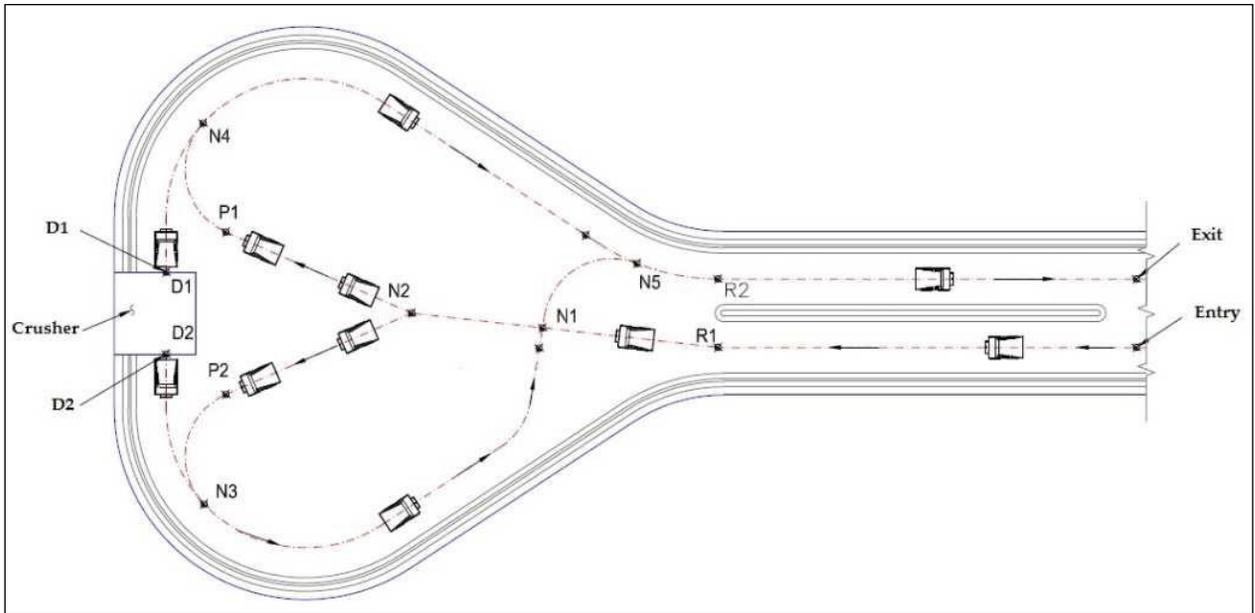


Figura 4: Diseño del sistema

Por otra parte, la viabilidad de existencia de un estacionamiento está dado por el espacio físico disponible en la operación, y es de relativa simpleza y bajo costo la reubicación de este.

1.2. Objetivos

A continuación se enumeran los objetivos generales y específicos del presente estudio. Cabe destacar que se define como escenario a aquella configuración operacional específica en el funcionamiento del sistema, en este caso, un escenario varía frente a otro al poseer alguna característica distinta que afecte directamente en las detenciones en estudio y la productividad diaria.

1.2.1. Objetivo General

El principal objetivo de este estudio es cuantificar el impacto que conlleva aplicar cambios operacionales sobre las detenciones en estudio y la productividad diaria, de tal manera de encontrar aquel escenario que agregue mayor valor al sistema.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Encontrar el escenario que disminuya en mayor medida las detenciones operacionales correspondientes a cambios de turno y colaciones, y en consecuencia, aumente la productividad del sistema de carguío y transporte hasta la planta de chancado.
- Identificar las variables que más afectan la curva de productividad del sistema de carguío y transporte en la planta de chancado a lo largo del turno.
- Ocupar nuevas herramientas de análisis multivariable, que permitan conocer el comportamiento de las técnicas en el estudio de ingeniería de minas.

1.3. Alcances

Los alcances del estudio corresponden a:

- El sistema en estudio corresponde a una porción del total de la faena. Este es el sistema de carguío y transporte que mueve mineral hacia la descarga en uno de los chancadores de la mina, por lo mismo los orígenes asociados (fases y stocks) serán aquellos que alimenten al sistema que se dirige al chancador en cuestión.
- Se asume que la descarga en el chancador corresponde a la totalidad del movimiento de material del sistema de carguío y transporte (productividad diaria de ahora en adelante), dejando fuera de los análisis el movimiento de estéril. Esto respaldado por que en la faena el movimiento de mineral es prioridad a corto plazo, llegando a reasignar camiones inicialmente ocupados para movimiento de estéril a este ítem.
- Se define como productividad instantánea a la razón entre la suma de las descargas en el chancador en un determinado periodo de tiempo y el periodo de tiempo indicado. En este estudio el periodo de tiempo es de 15 minutos (0.25 horas).
- Todos los cambios operacionales propuestos son de una inversión económica muy baja, despreciable por los montos manejados, por lo que se omite este ítem en los distintos análisis económicos. Caso contrario ocurre con el cambio del equipo de transporte, que tiene una inversión muy alta y operacionalmente hablando prácticamente imposible, por lo que se excluye de los análisis económicos.
- Se realizarán análisis cuantitativos sobre las detenciones y la productividad diaria de los cambios operacionales propuestos, dejando de lado los impactos logísticos asociados a dichos cambios.
- Las detenciones estudiadas serán únicamente las relacionadas a cambio de turno y colación.
- El modelo de simulación ocupará solo un tipo de equipo de transporte, y será aquel que abarque la mayor cantidad de descargas en el chancador.

- Obtención de datos de *dispatch* de los eventos de descarga en chancado, con sus tiempos de ciclo desglosados, incluyendo la limpieza (mediante restricciones físicas) y procesamiento de dichos datos.
- Encontrar relaciones de las variables o factores que influyen en la productividad del sistema de carguío-transporte en la planta de chancado.
- Generación de un modelo de simulación dinámica de eventos discretos del sistema en estudio a través del software Arena© que reproduzca la realidad actual.
- A partir de un modelo calibrado, construir nuevos escenarios que incluyan variables no incluidas en los datos de *dispatch*.
- Dentro de los escenarios construidos, encontrar aquel que aumenta la productividad diaria del sistema en mejor medida.

1.4. Antecedentes generales

A continuación se detallan los antecedentes de los aspectos más importantes considerados, relacionados a la simulación dinámica de eventos discretos y al algoritmo de clustering de k-medias. Cabe destacar que se incluyen antecedentes del software de simulación ocupado, Arena, ya que se hace necesario para detallar la lógica de modelación ocupada.

1.4.1. Simulación dinámica de eventos discretos

Para definir y explicar la simulación dinámica de eventos discretos es necesario partir por explicar conceptos más generales. Así, se definen los siguientes conceptos:

- **Modelo:** un objeto X es un modelo del objeto Y para el observador Z, si Z puede emplear X para responder cuestiones que le interesan acerca de Y [5]. En otras palabras, un modelo es una representación de una idea, objeto o proceso de un sistema que es usado para describir y explicar fenómenos que no pueden ser probados directamente. Estos permiten la experimentación y predicción a través de una simplificación de la realidad.
- **Simulación:** se define como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema [6]. Otro autor indica que la simulación se refiere a un conjunto de métodos y aplicaciones para imitar el comportamiento de sistemas reales, usualmente en un computador con el software apropiado [7].
- **Sistema:** conjunto de objetos o ideas que están interrelacionados entre sí como una unidad para la consecución de un fin. También se puede definir como la porción del universo que será objeto de la simulación [6].
Existen diversos tipos de sistemas, los cuales pueden ser separados por [7]:
 - **Determinístico:** si el sistema no contiene ningún elemento aleatorio es un sistema determinístico. En este tipo de sistema, las variables de salidas e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Es

decir, las relaciones funcionales entre las variables del sistema están perfectamente definidas.

- Estocástico: en este caso algún elemento del sistema tiene una conducta aleatoria. Entonces, para entradas conocidas no es posible asegurar los valores de salida. Cuando un sistema determinístico es alimentado con entradas estocásticas, la respuesta del sistema es también estocástica.

- Estático: el tiempo no varía en un modelo estático, se desarrolla en un punto dado en el tiempo.

- Dinámico: el tiempo varía a lo largo de la simulación. La mayoría de los modelos operacionales son de estas características.

- Continuo: Se tiene un sistema continuo cuando las relaciones funcionales entre las variables del sistema sólo permiten que el estado evolucione en el tiempo en forma continua (basta que una variable evolucione continuamente). Matemáticamente, el estado cambia en infinitos puntos de tiempo.

- Discreto: Se tiene un sistema discreto cuando las relaciones funcionales del sistema sólo permiten que el estado varíe en un conjunto finito de puntos temporales. Las causas instantáneas de los cambios de estados se denominan eventos.

Con esto es posible definir que una simulación dinámica de eventos discretos es aquella en que el estado de las variables de un sistema varía en puntos discretos en el tiempo cuando ocurren eventos.

También se hace necesario definir los elementos por los que estos tipos de simulaciones están compuestas [7]:

- Entidades: corresponden a los objetos dinámicos en la simulación. Son los "integrantes" que se mueven dentro del sistema, cambian estatus, afectan y son afectados por otras entidades y el estado mismo del sistema, y a su vez afectan los resultados medidos. En un mismo modelo pueden existir diferentes tipos de entidades que representen diferentes elementos de la realidad, o también pueden ser ocupados como elementos auxiliares que permitan realizar una función específica requerida.
- Atributos: se definen como características comunes entre mismos tipos de entidades, donde los diferentes valores de los atributos

individualizan a cada entidad. También se definen como variables locales específicas de cada entidad.

- Variables globales: se refiere a una pieza específica de información que describe alguna característica del sistema. Estas son propias del sistema y a diferencia de los atributos no están ligadas a una entidad.
- Recursos: se define como una entidad estática (que no puede recorrer el sistema) y que presta servicio a las entidades (las entidades dinámicas antes descritas). Las entidades generalmente compiten entre ellas por el servicio entregado por los recursos y estos pueden representar elementos de un sistema como personal, equipamiento o un lugar físico en una bodega.
- Filas: es el lugar donde una entidad espera cuando no puede continuar su avance a través del sistema (por ejemplo cuando no existen recursos disponibles para realizar un proceso).

Con los elementos de un modelo de simulación descritos es posible recrear un sistema real a través de una modelación lógica que no incluye gran parte de las interacciones físicas presentes en la realidad. Para solucionar esto es necesario agregar elementos de simulación más avanzados, y específicos del software ocupado, llamados transportadores de entidades (del inglés y de ahora en adelante: entity transfers). Para explicar este nuevo concepto es necesario agregar otras definiciones de herramientas incluidas en Arena [7]:

- Estaciones: locación física representada en el modelo donde se pueden asociar a recursos que realizan procesos determinados.
- Transferencia entre estaciones: permite el movimiento de una entidad desde una estación a otra. Además cuando se define una red de transferencia entre estaciones, las entidades están limitadas a seguir esta red para desplazarse físicamente de una estación a otra. También se asume que existe un tiempo de demora en realizar la transferencia.
- Entity transfers: se define como un elemento que es capaz de realizar un manejo de materiales en el modelo, es decir, es un elemento capaz de transportar desde una estación a otra a las entidades a través de

una red definida. Sirven como elemento limitante cuando las capacidades de transporte son finitas.

Existen dos tipos de entity transfers:

- Transportadores (del inglés y ahora en adelante: transporters): desde el punto de vista del modelamiento se pueden definir como recursos movibles que pueden transportar la entidad de un punto a otro, que además funcionan como dispositivos individuales de transporte de entidades. Ejemplos de modelamiento con transporters pueden ser camiones, carros, personas, etc.
- Cintas transportadoras (del inglés: conveyors): corresponden a elementos que realizan el transporte a través de un requerimiento de espacio y que se encuentran físicamente a lo largo entre dos estaciones. Ejemplos de modelamiento con conveyors pueden ser cintas transportadoras, líneas de remolques, escaleras mecánicas, etc.

Habiendo definido todos los elementos que componen y caracterizan la simulación dinámica de eventos discretos se agrega que estas pueden servir como una herramienta de análisis de complejos sistemas estocásticos, no solo en el área minera, sino que también en áreas como manufactura, salud, militar, marketing, etc. Además la simulación entrega la flexibilidad de experimentar con un sistema en específico, sobre todo en casos donde manipular el sistema real resulta muy costoso, difícil o simplemente imposible físicamente [7].

1.4.2. Minería de datos: Clustering k-means

Una de las primeras definiciones de minería de datos o *Data Mining* indica que corresponde a "el proceso no trivial de extracción de información implícita, previamente desconocida y potencialmente útil" [8]. Después, se expande esta definición agregando que es "la aplicación de varios algoritmos para encontrar patrones o relaciones en un set de datos" [9]. Lo anterior coincide con uno de los objetivos de este trabajo, por lo que se ocuparán herramientas de data mining para encontrar dichas relaciones en la productividad del sistema en estudio.

El análisis de clusters, o simplemente clustering, consiste en particionar un conjunto de datos o patrones de manera que aquellos pares de patrones similares entre sí queden en el mismo grupo, mientras que los pares de patrones que no son similares queden en grupos distintos. A cada grupo de patrones resultante se le denomina comúnmente en inglés como cluster, de donde proviene el término clustering (agrupamiento). El análisis de clusters

suele referirse también como clasificación no supervisada, ya que en términos generales consiste en un problema de clasificación (se debe asignar una clase o etiqueta a cada patrón), sólo que en la ejecución del algoritmo no se dispone de etiquetas reales que deban ser aprendidas. El aprendizaje de las clases debe hacerse utilizando sólo los patrones mismos y medidas de similitud entre ellos. De ahí el concepto de aprendizaje no supervisado [10].

Una posible clasificación es según el resultado obtenido por el método de clustering. Según este criterio, los algoritmos se pueden clasificar principalmente en particionales y jerárquicos [11]. La Figura 5 muestra un diagrama con una posible clasificación de los distintos enfoques para hacer análisis de clusters.

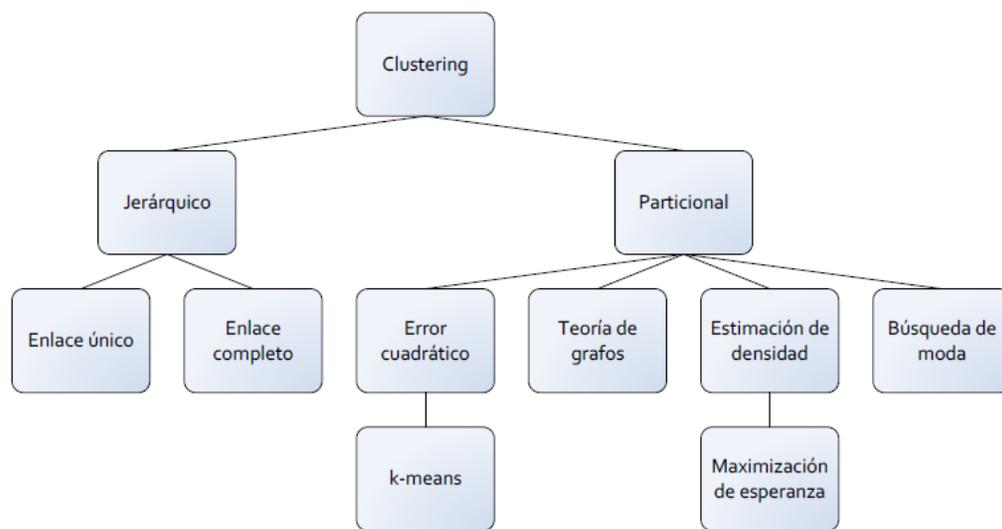


Figura 5: Clasificación de métodos de clustering

En este sentido se definirá el método de clustering que será ocupado en el presente estudio. Este corresponde al clustering a través del algoritmo de k-means (o k-medias), dada su simpleza para ocuparlo y su baja complejidad computacional (menor tiempo de ejecución).

Error cuadrático: El criterio más intuitivo y más frecuentemente usado como función de costos para algoritmos particionales es el error cuadrático. Esta medida estima el error que se comete al representar a los patrones de cada cluster por su centroide y tiende a funcionar bien cuando los clusters son compactos, isotrópicos y están aislados entre sí. De forma implícita estos métodos son paramétricos, ya que el procedimiento es equivalente a asumir una distribución gaussiana para cada cluster y buscar la media de cada distribución, que corresponde al centroide de cada cluster.

Algoritmo k-means: El método más simple y difundido de los que ocupan el criterio del error cuadrático es el algoritmo k-means [12]. El método comienza con una partición inicial aleatoria de los datos, y continúa reasignando los patrones a cierto cluster basado en la similitud entre el patrón y los centroides, hasta que se cumpla cierto criterio de detención (por ejemplo, que no haya reasignación de un patrón desde un cluster a otro, o que el error cuadrático no descienda significativamente por un número de iteraciones). El algoritmo k-means es popular porque es muy simple de implementar y porque su complejidad computacional es $O(n)$, donde n es el número de patrones. El procedimiento exacto que aplica el algoritmo k-means es el siguiente:

1. Elegir c centroides aleatoriamente, ya sea haciéndolos coincidir con c patrones cualesquiera, o definiéndolos al azar dentro del hipervolumen que contiene al conjunto de patrones.
2. Asignar cada patrón al cluster representado por el centroide más cercano.
3. Recalcular los centroides como las medias de todos los patrones que fueron asignados a sus respectivos clusters.
4. Repetir desde el punto 2 hasta que se cumpla algún criterio de detención.

1.5. Estado del arte

En el análisis de las distintas detenciones operacionales en faenas mineras, tanto programadas como no programadas, se observan análisis sobre detenciones en plantas de procesamiento de mineral como los hechos por Wilhelm [13] en uno de los capítulos de su memoria. En base a eso y junto a otros análisis se proponen una serie de mejoras relacionadas con la continuidad operacional, en gestión de procesos, cambios en los procedimientos y comunicación, así como implementación de nuevas tecnologías, que finalmente derivan en un aumento en la alimentación en la planta.

También se observan análisis directos en datos de detenciones de palas como los hechos por Solís [14], donde se proponen mejoras en distintos ítems que afectan directamente la disponibilidad de las palas en estudio.

Otro estudio que realiza análisis sobre detenciones de equipos es el realizado por Jaramillo [15], este análisis se centra principalmente en el estudio de alternativas de estrategia de mantenimiento mediante la cual se logre una mayor productividad y un menor costo unitario en plantas de procesamiento de mineral.

1.6. Motivación del trabajo

En el estudio de sistemas de transporte en minería a cielo abierto cuando se realizan análisis sobre la producción, generalmente los distintos escenarios que se construyen a través de modelos de simulación dinámica dependen principalmente del número de camiones y palas. Aquí se espera encontrar la combinación de estos dos factores que ofrecen la mayor producción del sistema [16 y 17].

Es en este contexto donde surge la interrogante del comportamiento del sistema antes y después de detenciones operacionales programadas, tales como cambios de turno y colaciones. Y como distintas variables no consideradas en otro tipo de estudios puede influir en la curva de productividad.

Además se observa que no existen estudios relacionados a la incidencia directa de los cambios de turno y colaciones con la producción del sistema de carguío y transporte en la gran minería del cobre. Donde como se vio en el capítulo de Estado del arte, existen estudios relacionados a políticas actuales de operación y relacionados con detenciones no programadas. Por lo que un estudio que relaciona estas detenciones programadas con nuevas políticas de operación, podría permitir encontrar mejoras no propuestas anteriormente, mejoras ligadas a agregar valor a un sistema ya en funcionamiento.

Las principales hipótesis que se tienen en este estudio corresponden a cómo políticas operacionales que buscan la disminución de tiempos muertos, ligadas directamente a los equipos de transportes, aumentan la productividad del sistema.

2. METODOLOGÍA

1. Recolección, procesamiento y gestión de datos

A partir de datos de *dispatch* que describen eventos de descarga en chancado, con los equipos, tiempos, y otras características asociadas se realizará una limpieza de datos que permita excluir aquellos datos que su ocurrencia es imposible porque físicamente no son viables. De esta forma será posible tener distribuciones de datos que representen los distintos tiempos y productividades a lo largo del día.

2. Análisis estadístico y multivariable

Mediante un análisis exploratorio descriptivo se espera obtener estadísticas básicas que permitan tener una idea de los datos que se está trabajando. Este análisis va de la mano con el punto 1, donde se va realizando la limpieza de datos a medida que se identifican datos anómalos u *outliers*.

Luego, mediante un análisis exploratorio analítico se espera encontrar grupos de correlación en las productividades diarias mediante un clustering o agrupamiento mediante el algoritmo de k-medias, donde se identifiquen distintos tipos de días y cómo las detenciones en estudio afectan la productividad diaria.

3. Modelo de simulación dinámica

Ocupando el software de simulación dinámica de eventos discretos, Arena©, se simulará el circuito carguío-transporte-chancado. Este modelo será validado y calibrado con respecto a los datos de *dispatch*. Para que una vez que reproduzca la realidad actual se construyan nuevos escenarios con nuevos parámetros operativos que puedan influir directamente en los tiempos de detenciones y en la productividad diaria.

4. Análisis de los resultados de los nuevos escenarios y conclusiones

Una vez que se tengan los resultados de los distintos escenarios, es posible realizar un análisis que permita medir cuantitativamente el impacto de los cambios operacionales en los dos puntos objetivos, detenciones operaciones y productividad. De la misma manera, se pueden crear nuevos escenarios que combinen más de una estrategia y así poder ver el aumento en los beneficios asociados. Finalmente se realiza un análisis del beneficio económico de todos los escenarios simulados.

3. DESARROLLO

A continuación se muestra el desarrollo de la metodología propuesta. Cabe destacar que se llamará origen a todas las fases y stock que alimentan el sistema.

3.1. Recolección, procesamiento y gestión de datos

Para el presente estudio se tiene acceso a datos de *dispatch* de la faena minera, el cual contiene registros de un año de los eventos de descarga en los distintos destinos (chancadores y stocks) por parte de los camiones, entre marzo de 2013 y marzo de 2014, con un total de 1.2 millones de registros para todos los orígenes y destinos de la mina en cuestión.

Originalmente la base de datos tiene para cada registro la fecha, datos de equipos asociados y los tiempos de ciclo desglosados (detalle en 6.1 en Anexos).

Como se indica en los alcances, con el fin de acotar el estudio, se define ocupar la descarga en uno de los cinco chancadores, el cual posee la característica de encontrarse relativamente aislado con respecto a los otros orígenes y destinos en la mina. Lo anterior es con el fin de que por temas de tráfico en los camiones en la mina la incidencia sea la menor posible y los datos no estén alterados en este sentido.

Los datos correspondiente al chancador 5 son en total 112,800, con estos se pretende hacer una primera aproximación a través de un análisis exploratorio descriptivo.

Si se obtienen las estadísticas básicas de los datos sin limpiar (ningún tipo de filtro) se tiene que existen diferentes tiempos que son aberrantes en relación al tipo de labor que realiza (Tabla 1), por ejemplo, tiempos de aculatamiento nulos o de valores muy bajos son físicamente imposibles, dado que corresponde al desplazamiento del camión desde un punto a otro, por lo que se tiene que elegir un tiempo arbitrario, pero justificado, que no considere estos tiempos erróneos. De forma análoga se tiene lo mismo para otros tiempos, tales como tiempos de carga, descarga, aculatamientos en orígenes y destinos, viajes de ida y vuelta, y distancias.

Por otra parte, sin una limpieza apropiada de los datos, estadísticos como la media o la desviación estándar no tienen utilidad alguna ya que poseen cantidades no menores de datos aberrantes.

Ítem	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Tiempo de cola en carguío [min]	112007	0.00	238.17	1.69	3.64
Tiempo acul. En carguío [min]	112800	0.00	58.28	1.05	1.22
Tiempo de carguío [min]	111312	0.00	149.42	2.65	1.66
Tiempo de acul. + descarga [min]	112800	0.00	230.97	3.83	4.55
Tiempo viaje ida [min]	111832	0.00	405.18	11.02	8.12
Tiempo viaje regreso [min]	112800	0.00	412.30	11.04	12.02
Tiempo de cola en descarga [min]	112800	0.00	132.00	0.07	1.45
Tiempo cola+acul.+descarga [min]	112799	-5.55	445.80	5.89	7.82
Tiempo total ciclo [min]	112797	0.00	429.67	31.15	17.39
Tolva [t]	112800	231.00	708.00	312.43	50.32
Distancia total [m]	112800	0.00	89312.00	3034.92	2354.49

Tabla 1: Estadísticas básicas datos dispatch sin limpiar

3.1.1.Limpieza de datos

Con el fin de filtrar aquellos datos que no reflejan el comportamiento real de la operación es que se tienen que definir cotas. Así es como se eligen valores expuestos a continuación, luego de reiteradas consultas a ingenieros con experiencia e indirectamente con la faena misma.

- Tiempo de fila en carguío: cota inferior no posee, ya que es posible que existan tiempos nulos (equivalente a que no hubo cola). Se aplica una cota superior de 60 minutos, dado que tiempos mayores se deben prácticamente a que la pala estuvo fallada u ocurrió algún tipo de inconveniente ajeno al comportamiento normal de la cola.
- Tiempo de aculatamiento en carguío: se aplica un límite inferior de 0.4 minutos, que es el tiempo mínimo que podría demorar el camión en acularse al salir de la fila, por otra parte, tiempos mayores a 4 minutos no representan un comportamiento normal.
- Tiempo de carguío: el tiempo de carguío mínimo considerando las palas y los camiones asociados corresponde a alrededor de 1 minuto, mientras que tiempos mayor a 20 minutos en carguío son anómalos.

- Tiempo de fila, cola y descarga en chancado: como este es un ítem compuesto por tiempos de 3 labores distintas, el filtro inferior que se ocupa corresponde a 0.9 minutos, que corresponde a el mínimo de 0.4 minutos de aculatamiento y el mínimo de 0.5 minutos de descarga. Por otra parte la suma de los tiempos que sea mayor a 10 minutos se escapa completamente de los rangos ocupados, dado que en la faena se privilegia la inexistencia de colas en la descarga.
- Tiempo de viaje de ida y vuelta: como cota inferior se define el menor tiempo en el que puede recorrer la distancia al destino más cercano, 1 minuto. La cota superior se define por inspección del histograma de tal forma que se extraigan una cantidad mínima de valores que efectivamente se encuentren muy alejados de el gran grueso de los tiempos, esto porque el tráfico en las rutas puede hacer alcanzar altos valores en este ítem.

		N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Tiempo de cola en carguío [min]	Original	112007	0	238.17	1.69	3.64
	Limpio	111991	0	58.43	1.68	3.35
Tiempo acul. En carguío [min]	Original	112800	0	58.28	1.05	1.22
	Limpio	75233	0.4	4	1.31	0.74
Tiempo de carguío [min]	Original	111312	0	149.42	2.65	1.66
	Limpio	98119	1	19.67	2.94	1.4
Tiempo cola+acul.+descarga [min]	Original	112799	-5.55	445.8	5.89	7.82
	Limpio	79371	0.9	10	3.56	2.48
Tiempo viaje ida [min]	Original	111832	0	405.18	11.02	8.12
	Limpio	99920	1	139.42	12.28	7.36
Tiempo viaje regreso [min]	Original	112800	0	412.3	11.04	12.02
	Limpio	98739	1	142.77	12.51	11.49
Tiempo total ciclo [min]	Original	112797	0	429.67	31.15	17.39
	Limpio	112690	4.3	149.95	31.04	16.62

Tabla 2: Comparativa de estadísticas básicas con datos iniciales y limpios

Al realizar la limpieza de datos se tiene que el dato erróneo es eliminado "localmente", es decir, no se elimina el evento completo sino que es el dato del ítem erróneo el que es eliminado, producto que en un mismo evento pueden existir datos válidos en ciertos ítems juntos a datos erróneos. Así se observa que en el tiempo de cola y el ciclo total es menor la limpieza de datos, mientras que en el resto de los ítems es un porcentaje mayor la eliminación de datos (Tabla 2).

Lo errores en los datos se explican por la forma en que son tomados, donde son pórticos ubicados en puntos fijos que definen inicio y fin de los

tiempos medidos, y el camión al pasar a través de este marca los datos que están siendo estudiados. Es así como ocurren casos en que el camión falla en alguna parte de la ruta, por ejemplo, y no necesariamente pasa por alguno de los pórticos, dando tiempos mayores a los normales. Otro ejemplo puede ser cuando una fila tiene una extensión mayor y excede la ubicación del pórtico, aportando tiempo de viaje cuando el tiempo debería ser tomado como de fila.

Por otra parte, al observar la frecuencias de eventos por origen (Tabla 3) también se hace necesario filtrar el origen fase N07, ya que presenta solo 191 eventos a lo largo de 1 año, lo que representa un 0,2% del total de los datos, lo que hace este origen prácticamente inexistente.

Origen	Frecuencia	Porcentaje
Fase N06	74846	66.5
Fase N07	191	0.2
Stock alta ley (SAL)	1802	1.6
Stock ley marginal (SLM)	35774	31.8
Total	112613	100.0

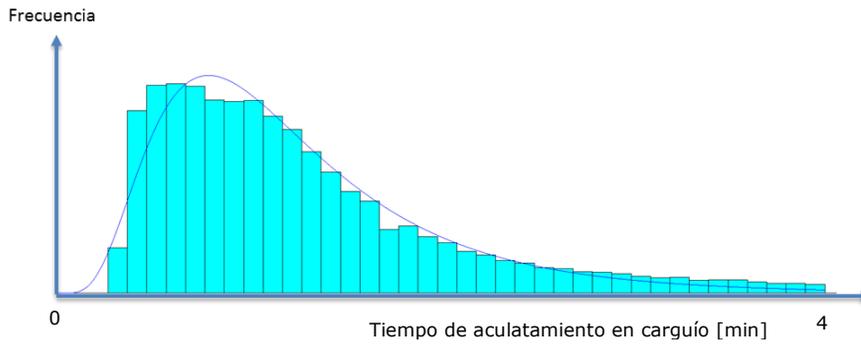
Tabla 3: Frecuencias de eventos por origen

3.1.2. Distribuciones de tiempo

Una vez con los datos limpios es posible calcular las distribuciones que siguen los distintos tiempos obtenidos. Lo anterior permitirá ingresar estas distribuciones en el modelo de simulación que se construirá, lo que aportará parte de la variabilidad que se tiene en la operación misma.

Usando el software *Input Analyzer* que viene junto a Arena es posible estimar las distribuciones a partir de los datos de *dispatch*.

El tiempo de acuatamiento en carguío sigue una distribución lognormal (Gráfico 1), mientras que el tiempo de carguío sigue una distribución Erlang (Gráfico 2). Por otra parte, en el chancador se tiene solamente los datos combinados de acuatamiento más descarga, pero incluso estos siguen una distribución, la cual es una beta (Gráfico 3).



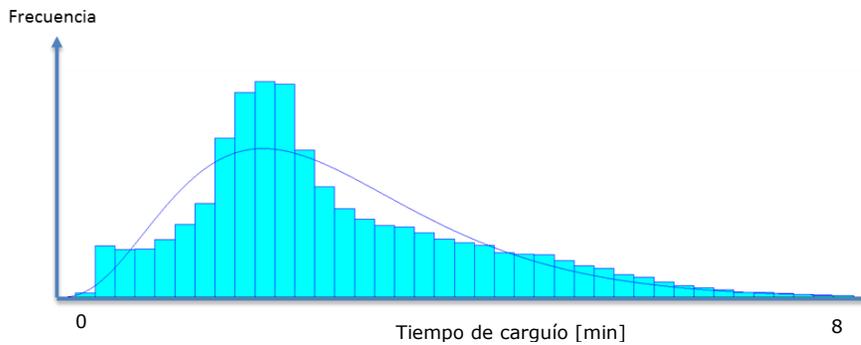
Distribution Summary
 Distribution: Lognormal
 Expression: $0.03 + \text{LOGN}(1.28, 0.758)$
 Square Error: 0.001053

Chi Square Test
 Number of intervals = 39
 Degrees of freedom = 36
 Test Statistic = $3.86e+003$
 Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

Number of Data Points = 75233
 Min Data Value = 0.4
 Max Data Value = 4
 Sample Mean = 1.31
 Sample Std Dev = 0.744

Gráfico 1: Distribución de los tiempos de acuatamiento en carguío



Distribution Summary

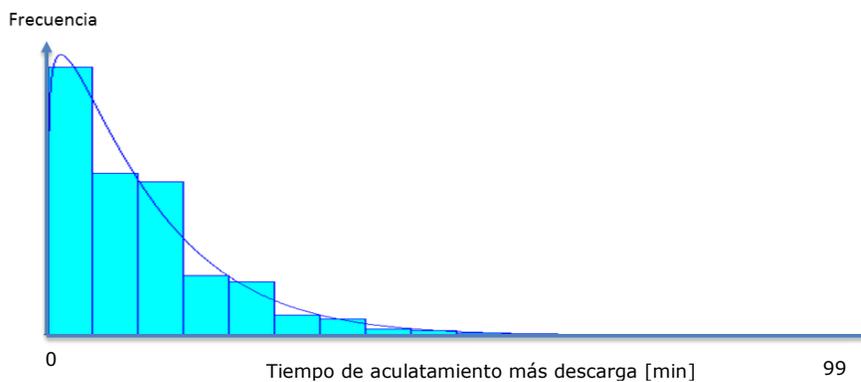
Distribution: Erlang
 Expression: $\text{ERLA}(0.693, 4)$
 Square Error: 0.004343

Chi Square Test
 Number of intervals = 40
 Degrees of freedom = 37
 Test Statistic = $1.09e+004$
 Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

Number of Data Points = 104452
 Min Data Value = 0.4
 Max Data Value = 7.98
 Sample Mean = 2.77
 Sample Std Dev = 1.41

Gráfico 2: Distribución de los tiempos de carguío



Distribution Summary

Distribution: Beta
 Expression: $99 * \text{BETA}(1.14, 20.9)$
 Square Error: 0.004108

Chi Square Test
 Number of intervals = 15
 Degrees of freedom = 12
 Test Statistic = $2.96e+003$
 Corresponding p-value < 0.005

Data Summary

Number of Data Points = 82628
 Min Data Value = 0.9
 Max Data Value = 99
 Sample Mean = 5.13
 Sample Std Dev = 4.57

Gráfico 3: Distribución de los tiempos de acuatamiento más descarga

3.1.3.Productividad de los eventos

De la forma que está construida la actual base de datos (cada fila es un evento de descarga) es posible realizar una aproximación de la productividad para cada evento, la razón para hacer esto es para poder realizar una comparación entre las distintas variables presentes actualmente y esta aproximación de la productividad.

$$Productividad\ del\ evento\ \left[\frac{t}{h}\right] = \frac{Tolva\ del\ camión\ [t]}{Tiempo\ de\ ciclo\ del\ evento\ [h]}$$

Ahora es posible medir el grado de correlación entre dos variables, en este caso, se hará para cada variable cuantitativa presente y la productividad de cada evento. Lo anterior se hará a través de un test de correlación de Pearson.

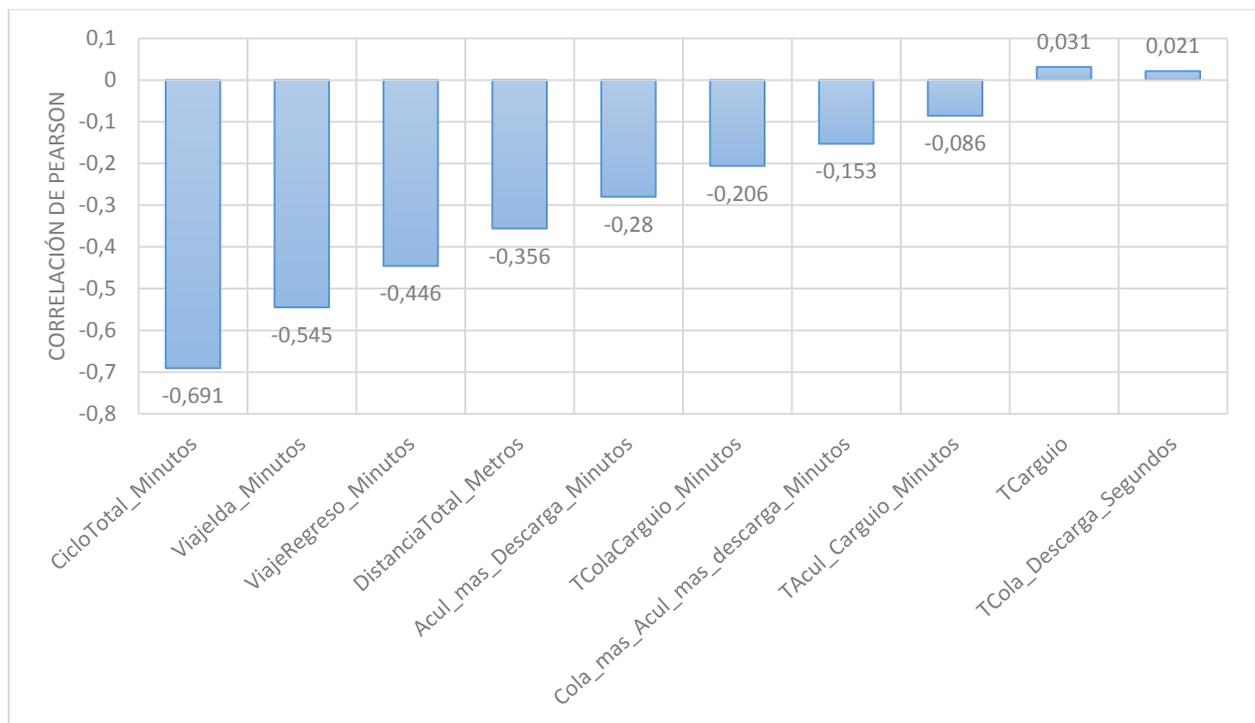


Gráfico 4: Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables cuantitativas presentes y la productividad del evento

Se tiene que entre las variables más relacionadas a la productividad del evento el tiempo de ciclo total del evento tiene la mayor correlación, resultado obvio, ya que la productividad está calculada a partir de esta variable (Gráfico 4). En segundo y tercer lugar se obtiene que el viaje de ida y vuelta, respectivamente, tienen una correlación considerable con la productividad. Esto se debe a que estos ítems ocupan gran parte del tiempo del ciclo total, por lo que se mantiene la relación con la productividad. En

cuarto lugar se encuentra la distancia total a recorrer por los equipos de transporte, esto se debe a que es un componente importante en el tiempo de viaje, dado que el tiempo de viaje está compuesto por el tiempo que realmente el equipo se está moviendo y los tiempos en tráfico. A continuación aparece el tiempo de acuatamiento más descarga y el tiempo de cola en carguío, con un coeficiente de correlación no menor, lo cual sorprende, ya que la participación efectiva en el tiempo de ciclo de estos ítems suele ser menor. Finalmente el tiempo de acuatamiento en el carguío, el tiempo de carguío y el tiempo de cola en descarga tiene una incidencia muy baja en la productividad del evento. La mayoría de las correlaciones expuestas son negativas, esto quiere decir que tienen una relación inversa en relación a la productividad. Lo anterior es coherente considerando que las variables mostradas son todas partes del tiempo de ciclo y este es inversamente proporcional a la productividad calculada.

Cabe destacar que esta nueva variable construida (la productividad del evento) refleja solamente la productividad del equipo en el tiempo relacionado al evento, por lo que no refleja el comportamiento a lo largo del día. Para esto es necesario construir nuevas bases de datos.

3.2. Análisis estadístico y minería de datos

A continuación se presenta la construcción de nuevas bases de datos, asociadas principalmente a la caracterización de los días abarcados en el estudio. También se agregan análisis relacionados a las particularidades presentes en cada día, y así construir relaciones entre las variables presentes y la productividad diaria.

3.2.1. Nueva base de datos: construcción de caracterización por días

Con la información de cada evento relacionada a una hora y fecha específica es posible agrupar esta información por días, de esta forma se obtiene una productividad diaria (toneladas por día o tpd). Por otra parte ahora cada fila corresponderá a un día, por lo que también es posible caracterizar estos días, es decir, construir ciertas variables que permitan diferenciar cada día.

El primer punto que se construye corresponde a una productividad que se calcula como las toneladas por hora cada 15 minutos (de ahora en adelante, productividad instantánea), siguiendo la siguiente relación:

$$\text{Productividad Instantánea } \left[\frac{t}{h} \right] = \frac{\text{Tolvas en los 15 minutos comprendidos } [t]}{0.25 [h]}$$

Así es posible construir una curva temporal para cada día la cual describe el comportamiento que tienen las detenciones en estudio (cambios de turno y colaciones a lo largo del día) a través de la productividad a lo largo del día (Tabla 4).

Productividad [t/h]			
Hora	Día 1	Día 2	...
0.25	2420	6588	...
0.5	7672	10092	...
0.75	7672	6176	...
1	3836	4760	...
...

Tabla 4: Formato tipo de la construcción de las productividades temporales durante el día

Dentro de las características de cada día se encuentra:

- Fecha.
- Productividad del día [tpd]: corresponde a la suma de las tolvas de cada evento que ocurre en un día dado.

- Productividad máxima [t/h]: corresponde al máximo valor alcanzado por la productividad instantánea.
- Promedio de Productividad [t/h]: corresponde al promedio de la productividad instantánea.
- Desviación estándar de productividad: corresponde a la desviación estándar de la productividad instantánea.
- Número de eventos pala tipo SHDXXXX ($Pala_{SHD}$).
- Número de eventos pala tipo SHEXXXX ($Pala_{SHE}$).
- Número de eventos de cargadores frontales tipo LDW (CF_{LDW}).
- Grupo Palas: variable categórica que depende de los 3 ítems anteriores, teniendo como criterio que si:
 - $\frac{Pala_{SHD}}{(Pala_{SHD}+Pala_{SHE}+CF_{LDW})} > 0.6 \Rightarrow Grupo\ Palas = 1 .$
 - $\frac{Pala_{SHE}}{(Pala_{SHD}+Pala_{SHE}+CF_{LDW})} > 0.6 \Rightarrow Grupo\ Palas = 2 .$
 - $\frac{CF_{LDW}}{(Pala_{SHD}+Pala_{SHE}+CF_{LDW})} > 0.6 \Rightarrow Grupo\ Palas = 3 .$
 - Si ninguno de los casos se cumple $\Rightarrow Grupo\ Palas = 4 .$
- Número de eventos camión tipo 960E ($Camión_{960E}$).
- Número de eventos camión tipo CAT793 ($Camión_{793}$).
- Número de eventos camión tipo CAT797 ($Camión_{797}$).
- Número de eventos camión tipo Make Up ($Camión_{Make-Up}$).
- Grupo Camiones: variable categórica que depende de los 4 ítems anteriores, teniendo como criterio que si:
 - $\frac{Camión_{960E}}{(Camión_{960E}+Camión_{793}+Camión_{797}+Camión_{Make-Up})} > 0.6 \Rightarrow Grupo\ Camiones = 1 .$
 - $\frac{Camión_{793}}{(Camión_{960E}+Camión_{793}+Camión_{797}+Camión_{Make-Up})} > 0.6 \Rightarrow Grupo\ Camiones = 2 .$
 - $\frac{Camión_{797}}{(Camión_{960E}+Camión_{793}+Camión_{797}+Camión_{Make-Up})} > 0.6$

⇒ *Grupo Camiones* = 3.

$$\begin{aligned} & \blacksquare \frac{\text{Camión}_{\text{Make-Up}}}{(\text{Camión}_{960E} + \text{Camión}_{793} + \text{Camión}_{797} + \text{Camión}_{\text{Make-Up}})} > 0.6 \\ & \Rightarrow \text{Grupo Camiones} = 4 \end{aligned}$$

▪ Si ninguno de los casos se cumple ⇒ *Grupo Camiones* = 5

- Promedio Distancias recorridas por camiones [m].
- Detenciones [h]: como no se cuenta con una base de datos que detalle las detenciones operacionales en la mina, se define un criterio con el cual se puede considerar un tiempo en detención en función del comportamiento de la productividad instantánea (PI) a lo largo del día. Es así como se define que si la productividad cumple los siguientes dos criterios es considerado una detención:
 - Si ($PI < \text{Promedio PI diario}$).
 - Si pasa continuamente más de media hora bajo el criterio anterior.

Así finalmente se suman las detenciones a lo largo del día y se obtiene el total de detenciones.

Por otra parte, es posible utilizar minería de datos para agrupar aquellos días que presenten un comportamiento similar en su productividad instantánea a lo largo del día. Es así como se realiza un agrupamiento o clustering, mediante el algoritmo de k-means, el cual separa el set de datos en k grupos con características similares en cada grupo.

El clustering se realiza ocupando el software estadístico SPSS, en el cual es posible indicar el número de grupos donde se desea agrupar los datos. Es así como se prueba desde 2 grupos en adelante.

En el caso de dos conjuntos de agrupamiento se tiene que los días son separados principalmente entre días de alta productividad y días de baja productividad (Gráfico 5). En el gráfico se muestra el promedio de los días contenidos en cada grupo y además la cantidad de días presentes en cada grupo del clustering.

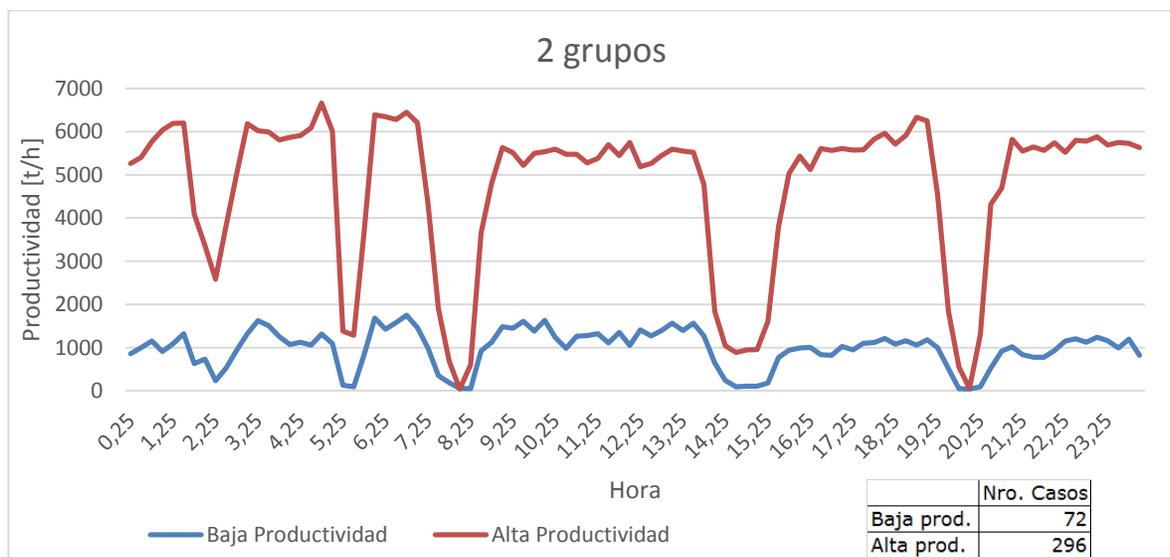


Gráfico 5: Análisis k-mean separados en 2 grupos según caracterización diaria de productividad

Al elegir tres conjuntos de agrupamiento se observa la aparición de un nuevo grupo que representa días de productividad media, encontrándose en todo momento entre los dos grupos de alta y baja productividad (Gráfico 6).

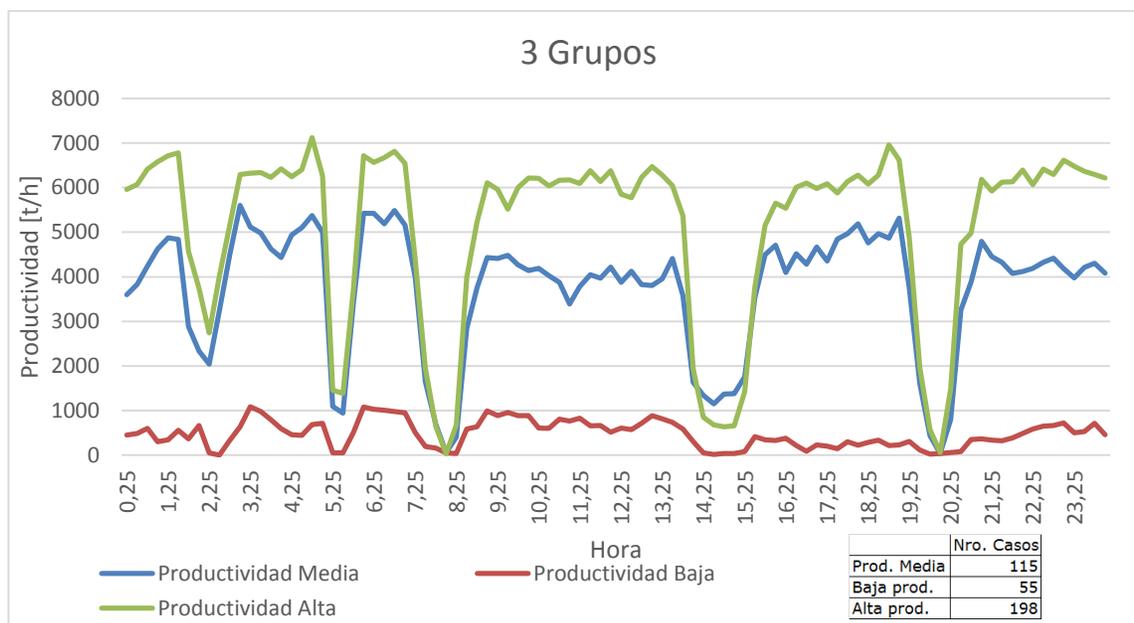


Gráfico 6: Análisis k-mean separados en 3 grupos según caracterización diaria de productividad

Al realizar el mismo ejercicio con cuatro conglomerados se observa que además de los tres grupos observados anteriormente (productividad baja, media y alta) aparece un grupo que describe nuevas características del día. Este grupo corresponde a uno de baja productividad durante el turno día, pero que a la vez posee una alta productividad durante el turno de noche (Gráfico 7). Cabe destacar que este grupo aparece a partir del grupo de

productividad media y baja, ya que el grupo de productividad alta mantiene prácticamente inalterado la cantidad de datos que contiene (de 198 a 195).

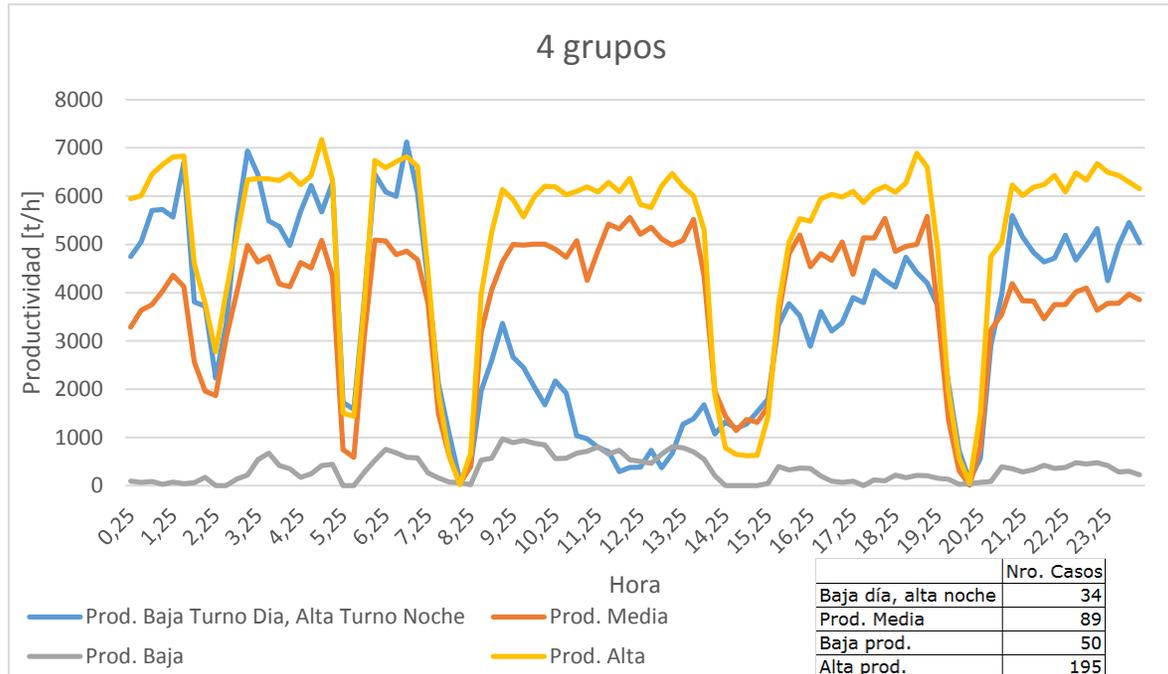


Gráfico 7: Análisis k-mean separados en 4 grupos según caracterización diaria de productividad

Al elegir cinco conglomerados de separación de los días, se observan los 4 grupos anteriores y además ocurre la aparición de un nuevo conglomerado (Gráfico 8). En este caso, el nuevo grupo no logra una diferenciación mayor con respecto al grupo de productividad alta, donde a lo largo del día presentan un comportamiento similar. Además gran parte de los datos provienen desde el grupo de alta productividad (lo que explica en parte su similitud), mientras que el grupo de productividad media también realiza un aporte importante de datos.

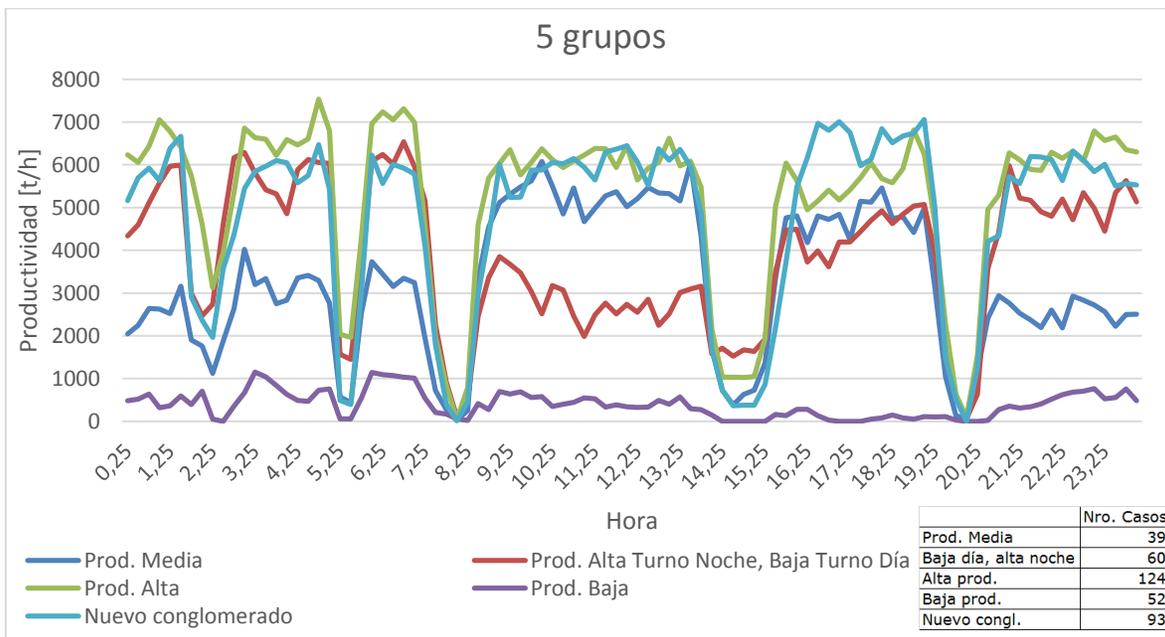


Gráfico 8: Análisis k-mean separados en 5 grupos según caracterización diaria de productividad

Es por lo anterior que se decide trabajar con el análisis k-mean de 4 conglomerados, ya que este aporta 4 grupos de descripción distintos unos de otros, lo cual permite realizar análisis posteriores para inferir las razones de este comportamiento con los datos que se tienen. Finalmente cada grupo tendrá un número dado por:

- 1: productividad alta turno noche y baja turno día.
- 2: productividad media.
- 3: productividad baja.
- 4: productividad alta.

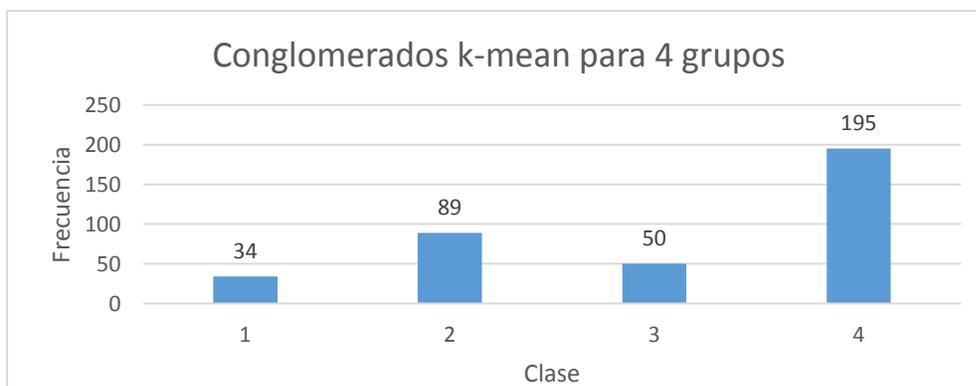


Gráfico 9: Frecuencia por conglomerado de k-media

Así, con la caracterización por el análisis de k-mean entregará una nueva variable categórica a la base de datos de caracterización de los días en estudio.

3.2.2. Análisis base de datos caracterización días

Con la base de datos ya construida es posible realizar ciertos análisis que permitan entender de mejor manera las razones del comportamiento de la productividad en los distintos días. Es así como se espera obtener estadísticas generales en un primer momento, para luego realizar las mismas estadísticas pero separadas por conglomerados. De esta forma se espera indicios del porqué la productividad tiene este comportamiento.

Primero se observará la participación de equipos a nivel general, esto a través de los grupos pala y camión descritos anteriormente, es así como al contar el total de los casos se tiene que en un gran porcentaje de los días las palas del tipo SHE poseen una mayor participación, esto se explica porque la fase N06 es quien más alimenta al chancador en estudio, y esta fase posee 2 de estas palas, también hay ubicada una en uno de los stocks. Prácticamente el total del resto de los días presenta un comportamiento más homogéneo en la distribución entre los distintos equipos de carguío (Gráfico 10). Por otra parte, en los equipos de transporte se tiene que en gran porcentaje de los días en estudio los equipos Cat 793 poseen la mayor parte de la participación diaria, quedando 33 días del año en estudio con preponderancia de los equipos del tipo 960e.

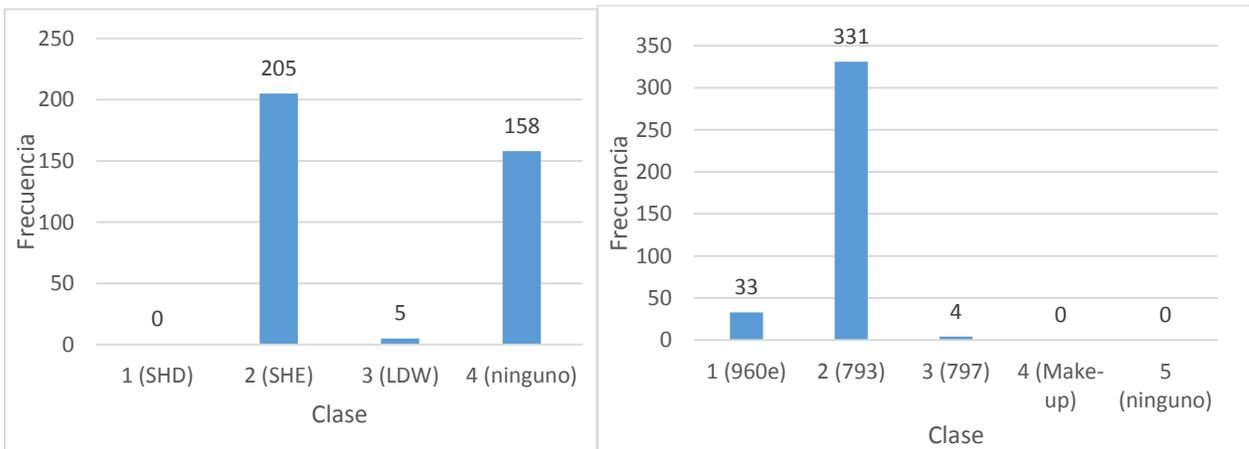


Gráfico 10: Número de casos para cada grupo de datos, izquierda: grupo palas, derecha: grupo camiones

Si se revisa el promedio de los 3 ítems cuantitativos de la caracterización diaria se observa que en promedio se tiene una productividad diaria de 95.7 ktpd, un promedio de distancias cercano a los 2800 m. y un promedio del estimador de detenciones de 7.83 horas (Tabla 5).

Promedio de Productividad [tpd]	95767.8
Promedio de Promedio Distancias [m]	2802.6
Promedio de Detenciones[h]	7.83

Tabla 5: Promedios al total de datos en caracterización diaria

Si se realiza el ejercicio análogo pero con los conglomerados obtenidos por el método de k-medias se tiene que existe una directa relación entre el tiempo promedio de detención y la productividad diaria del sistema (Tabla 6), observándose que a menor tiempo de detención mayor es la productividad (resultado esperado).

También se tiene que para los grupos 1, 2 y 4 la distancia promedio recorrida es muy similar, caso contrario del grupo 3 de baja productividad que posee una media cercana a un tercio de los otros grupos. Lo anterior indica que durante los días contenidos en el grupo 3 hubo problemas en la fase que alimenta al sistema, dado que las distancias a los stocks son cercanas a este promedio, mientras que las distancias a la fase es cercana al promedio de los otros grupos. Esto explica que, a pesar que se tiene una menor distancia en promedio, el sistema está siendo alimentado solo por stocks y los camiones deben haber sido reacomodados en las otras fases de la mina (recordar que el sistema en estudio es una parte de la mina en total).

Conglomerado k-mean	1	2	3	4
Nombre conglomerado	Baja día, Alta noche	Prod. Media	Prod. Baja	Prod. Alta
Cuenta de Grupo de Producción	34	89	50	195
Promedio de Productividad [tpd]	82122.0	91496.8	8138.5	122565.4
Promedio de Promedio Distancias [m]	3145.3	3063.5	1079.8	3065.5
Promedio de Detenciones[h]	10.45	9.46	6.70	6.93

Tabla 6: Promedios separados por grupos de datos en caracterización diaria

Complementando el análisis, es posible observar los histogramas de todos los datos en cada grupo, teniendo una idea más gráfica de la distribución de las variables de productividad y detenciones.

Para el grupo 1, productividad baja durante el turno día y alta durante el turno noche, se tiene que existe una alta dispersión en la productividad diaria con respecto a los otros conglomerados (Gráfico 11). Esto se explica por las diferencias en la productividad instantánea entre los distintos tramos a lo largo del día, y también por la alta dispersión en la estimación de las detenciones operacionales (Gráfico 12).

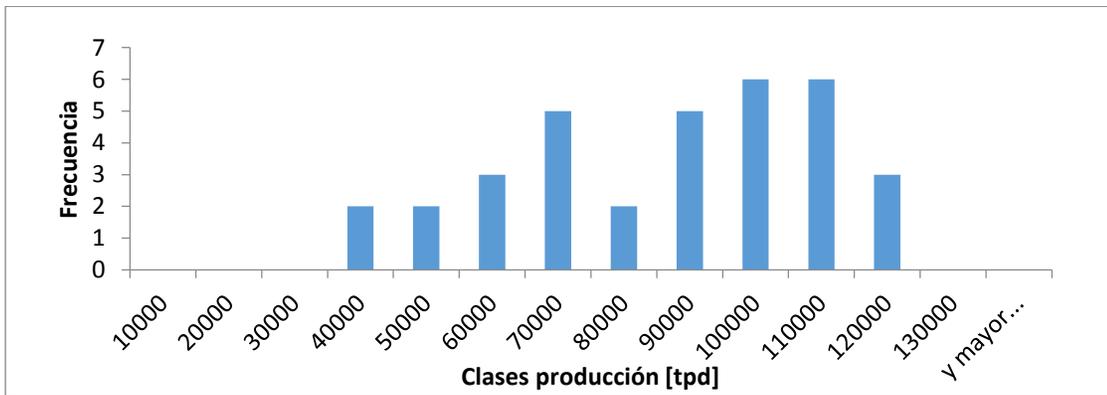


Gráfico 11: Histograma productividad grupo 1

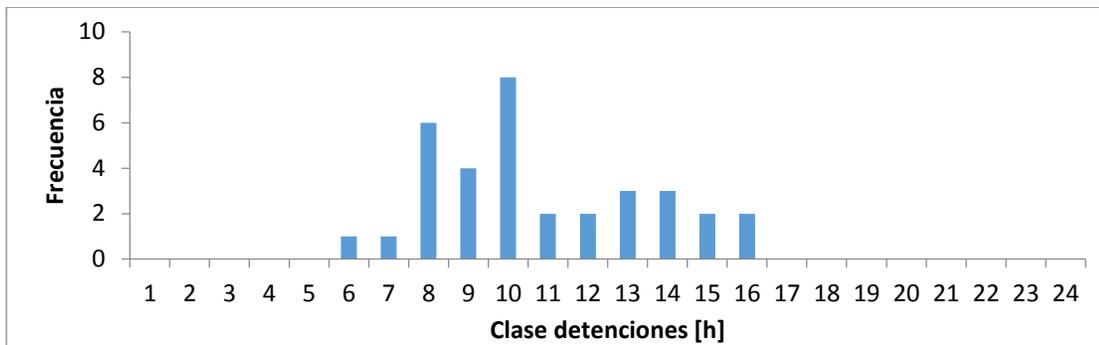


Gráfico 12: Histograma detenciones grupo 1

Mientras tanto en el grupo 2, el conglomerado de productividad media diaria, se observa un comportamiento menos disperso con respecto al promedio en comparación al grupo 1 (Gráfico 13), teniendo un menor rango. Por otra parte, las detenciones se concentran alrededor de su media teniendo una dispersión no menor, y con algunos datos que alcanzan las 24 horas (Gráfico 14). Recordar que es una aproximación de las detenciones en estudios en relación al comportamiento de la productividad instantánea, por lo que se pueden dar estos datos aberrantes.

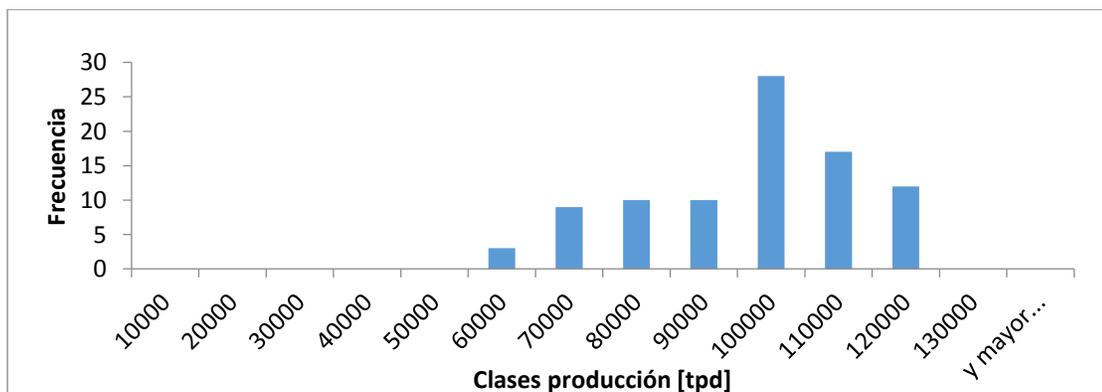


Gráfico 13: Histograma productividad grupo 2

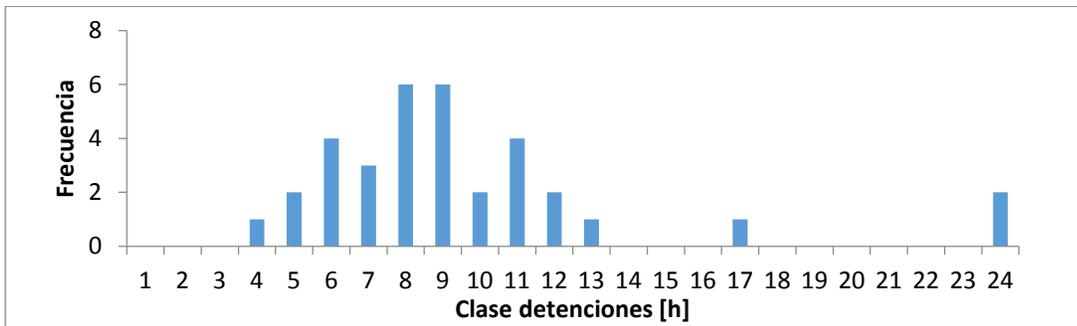


Gráfico 14: Histograma detenciones grupo 2

Para el grupo 3, de productividad diaria baja, se tiene que la mayoría de los datos de productividad se concentran bajo las 10ktpd (Gráfico 15). Mientras que el estimador de detenciones no funciona de manera correcta en este extremo, dado que prácticamente estima las detenciones entre dos valores (1 y 24 horas), lo que se explica por el método de cálculo de esta estimación (Gráfico 16).

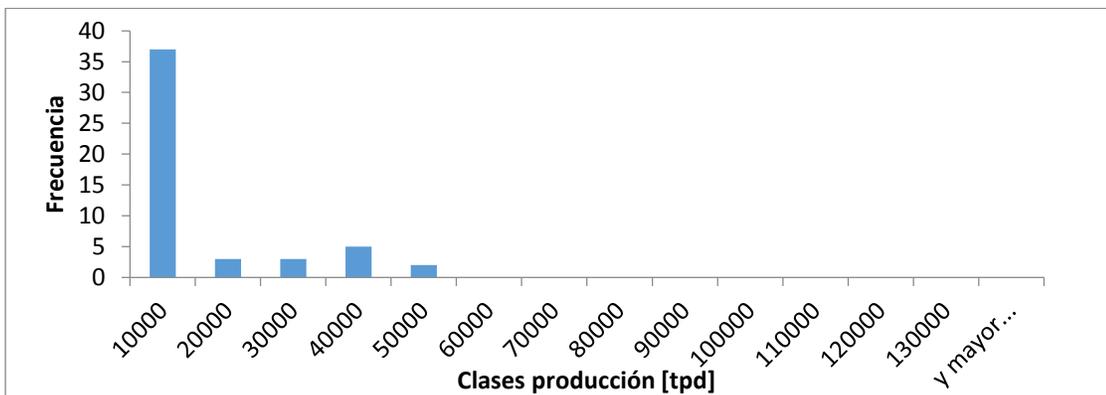


Gráfico 15: Histograma productividad grupo 3

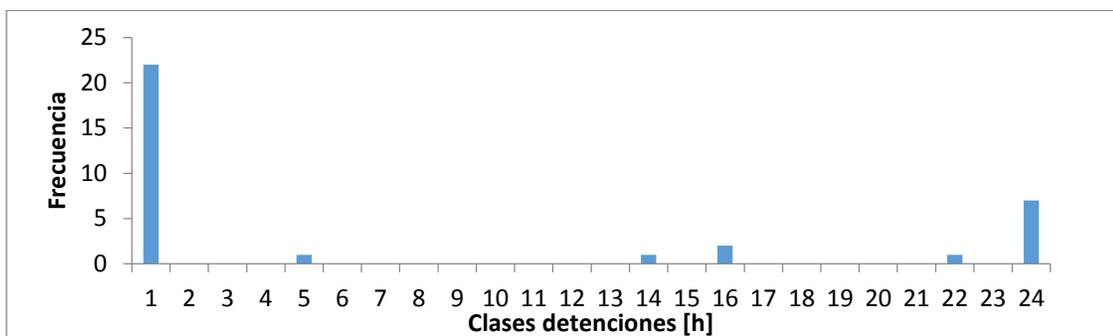


Gráfico 16: Histograma detenciones grupo 3

Finalmente en el grupo 4 de alta productividad, grupo que agrupa la mayor cantidad de datos y que vendría a describir los días de operación sin mayores inconvenientes, se observan que los datos se distribuyen alrededor de su alta media (en comparación a los otros grupos) presentando una baja dispersión con respecto a esta (Gráfico 17). Por otra parte la dispersión con

respecto a la media de detenciones refleja el comportamiento esperado en una faena minera de este estilo, con detenciones operacionales de cambio de turno y colación que oscilan entre las 5 y 10 horas diarias (Gráfico 18).

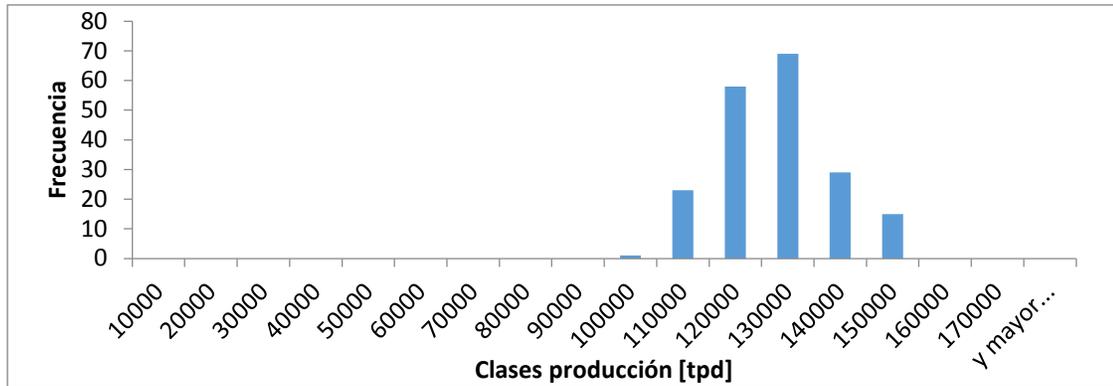


Gráfico 17: Histograma productividad grupo 4

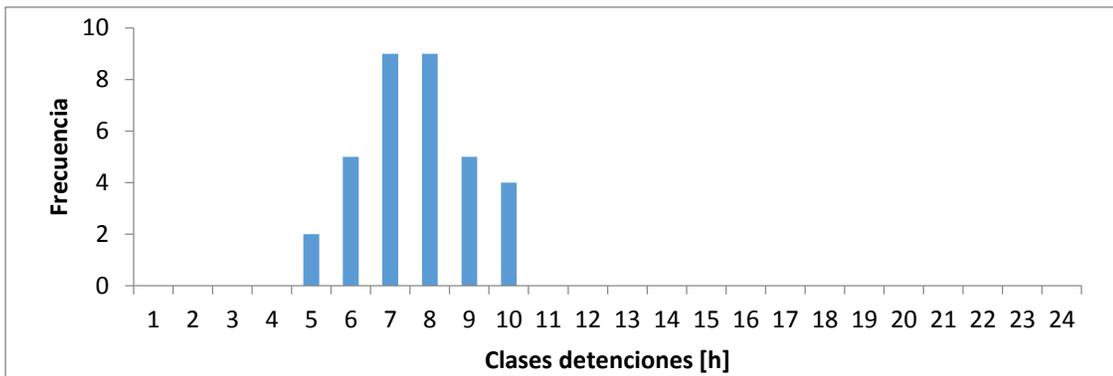


Gráfico 18: Histograma detenciones grupo 4

Con las estadísticas expuestas se observa que existe una directa correlación entre la productividad diaria y las detenciones operacionales previstas en el estudio (cambios de turno y colaciones), esta relación no se extiende solamente a que en promedio se tiene que si el número de detenciones aumenta la productividad diaria disminuye, sino que también se observa que una alta o baja dispersión en los datos de detención también se refleja en la dispersión de los datos de productividad diaria. Lo anterior motiva a continuar con el estudio en detalle de cómo cambios en la política operacional podrían afectar directamente en el tiempo empleado en detenciones y a través de este lograr determinar el comportamiento en la productividad del sistema.

3.3. Modelo de simulación dinámica

Con el fin de probar cómo nuevas variables en estudio pueden afectar a la productividad diaria y las detenciones es que se hace necesario modelar el sistema en estudio a través de un modelo de simulación dinámico de eventos discretos. Este tipo de representaciones de la realidad permite modelar el comportamiento de la faena con gran detalle, gracias a las capacidades de procesamiento de información de los sistemas computacionales.

En una primera parte se modelará el sistema actual en operación el cual tiene la característica operacional de realizar un chequeo previo al tiempo correspondiente a realizar el cambio de turno (8 am y 8 pm para el turno de noche y de día respectivamente), donde se evalúa si el camión en cuestión es capaz de realizar un nuevo ciclo completo (viaje a origen, carga en este, viaje a chancador y descarga en este) antes de que el camión logre llegar a estacionamiento y realizar el cambio de turno. Se ocupará solo el tipo de camión CAT 793 el cual tiene la mayor participación en la operación actual y la flota se estimará de tal forma que logre reproducir la productividad diaria de los datos anteriormente estudiados.

Luego se modelarán tres nuevos escenarios:

- Escenario posibilidad cambio de turno cargado: se incorpora la posibilidad de que el camión en vez de evaluar solo realizar el ciclo completo previo al cambio de turno, también evalúe la posibilidad de realizar solo el proceso de carga (viaje a origen y carga en este).
- Escenario variando la posición del estacionamiento con respecto al chancado: se construyen varios escenarios donde se varía la posición del estacionamiento entre la fase N06 (de mayor aporte a la productividad diaria) y el chancador.
- Escenario cambiando los tipos de equipo: se cambiará el tipo de equipo de transporte desde CAT 793 a CAT 797.

Los tres escenarios anteriormente descritos serán evaluados en razón de medir el impacto que tiene en las detenciones operacionales en estudio y en la productividad diaria.

3.3.1. Flujo lógico de información en modelo base

El flujo lógico que seguirá el modelo de simulación puede ser representado por un diagrama de flujo lógico que muestra la dirección y orden de cada proceso en el modelo.

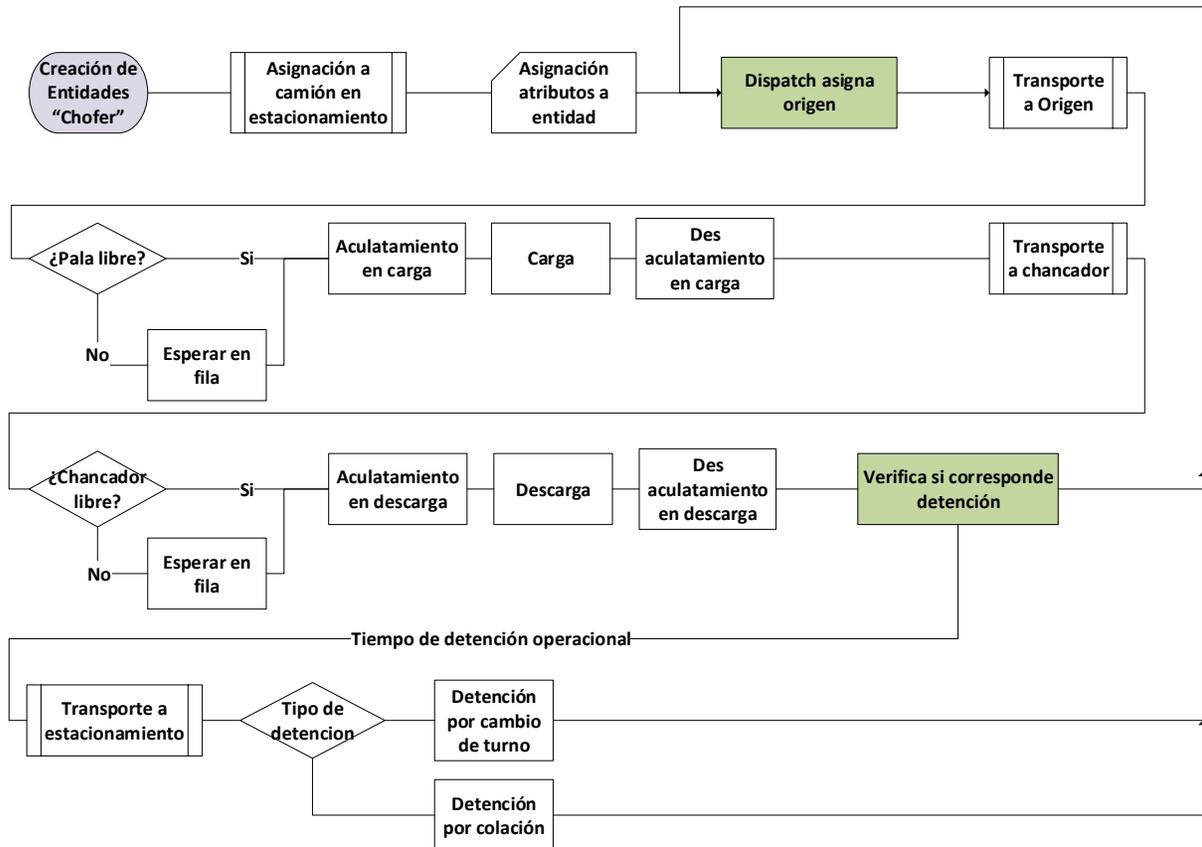


Figura 6: Diagrama de flujo lógico modelo de simulación base

En el diagrama de flujo lógico se tiene que en un primer lugar ocurre la creación de entidades, las cuales son asignadas a sus respectivos camiones, para que luego se realice la asignación de los atributos propios del camión. A continuación se ingresa a un dispatch que asigna el origen al que debe acudir cada camión, para que a continuación se realice el transporte correspondiente. Una vez en el origen se realiza el acuatamiento del camión hacia la pala, la carga de mineral por parte de la pala hacia el camión y a continuación ocurre el des acuatamiento o salida desde la pala, en caso de estar ocupada la pala es necesario que el camión espere en una fila. Posterior a ello se realiza el viaje hacia el chancador (único destino), donde se tiene un proceso análogo al ocurrido en el origen. Al salir del chancador se verifica si es tiempo de realizar una detención operacional, donde en caso de ocurrir se realiza el transporte hacia el estacionamiento y el tiempo de

detención asociado dependiendo si es cambio de turno o colación. Luego, se vuelve a entrar a dispatch para asignar un origen y se vuelve a entrar al loop lógico.

3.3.2. Implementación en Arena de modelo base

La implementación del flujo lógico de información hacia el software de simulación Arena conlleva una adaptación hacia la lógica con la que opera el programa. Cabe recalcar que están siendo ocupados "transporters" en el modelo de simulación, los cuales tienen la virtud de poder transportar una entidad "físicamente" a través de las intersecciones del modelo. Lo anterior tiene la ventaja de emular los tráfico que ocurren en la vida real, de tal forma de que este sea un ítem considerado en la modelación.

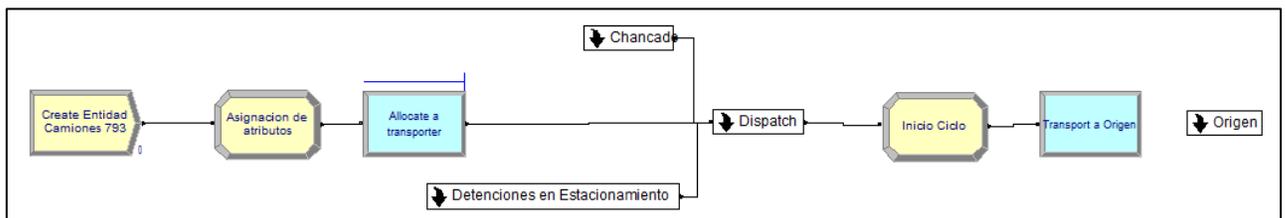


Figura 7: Flujo lógico global en Arena

Primero se realiza un modelo global que se divide en varios sub-modelos para realizar un trabajo más ordenado e identificar fácilmente aquellos sectores de la faena que están siendo modelados (Figura 7). En la figura se observa que existe una creación de entidades, que en este caso una buena aproximación sería que son los choferes de los camiones (ya que son quienes serán transportados por los "transporters"). En la siguiente caja se realiza la asignación de los atributos intrínsecos del camión con parámetros como el tonelaje de la tolva, el tipo de camión al que corresponde, que número de camión dentro de la flota es, entre otros. Luego se realiza la asignación del camión a la entidad (allocate en inglés) para que por primera vez entre el elemento al dispatch modelado. Luego de esto el camión sale del dispatch con su origen ya definido, previo a realizar el viaje se realiza una asignación del tiempo de inicio de ese ciclo, luego de esto se viaja desde el estacionamiento (punto inicial) hasta el origen correspondiente, donde ocurre la carga de mineral. Una vez realizadas las tareas en el origen ocurre un transporte hacia el único destino del sistema (el chancado), para que una vez que se haya realizado la descarga de mineral el camión entra nuevamente al sub-modelo de dispatch para realizar la consulta de a qué origen acudir y así estar en un loop que terminará cuando acabe la simulación.

El sub-modelo llamado dispatch cumple con dos objetivos, el primero corresponde a asignar el origen a cada camión que realiza la consulta, y el segundo corresponde a realizar la consulta si ya es tiempo de realizar algún cambio de turno o colación dependiendo del tramo del día en que se encuentre.

Para realizar la parte de asignar el origen a cada camión, se ocupa una lógica que realiza una estimación del rendimiento que tendría el camión yendo hacia cada pala en cada origen y elige aquel que tenga el mayor rendimiento (Figura 8). Una vez asignada la pala, se asigna un atributo a cada entidad que identificará posteriormente hacia dónde acudir.

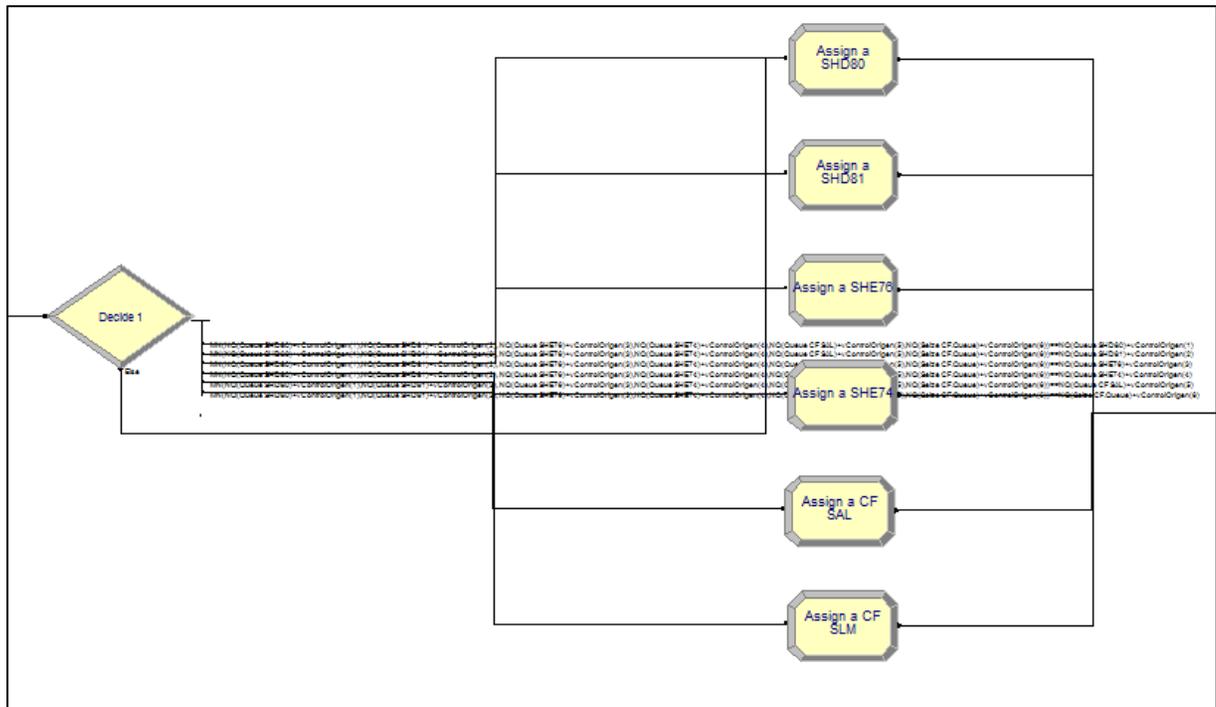


Figura 8: Asignación de orígenes por parte del sub-modelo dispatch

Esta estimación del rendimiento se realiza a través de la elección del valor mínimo del tiempo que toma en realizar un ciclo de carga y descarga, siguiendo la siguiente ecuación:

$$T_{Viaje Ida} + T_{fila en Pala} + T_{Carga} + T_{Viaje Vuelta} + T_{Fila en Chancado} + T_{Descarga} =$$

$$\frac{Distancia_{OriDes}}{Veloc_{OriDes Descargado}} + (N^{\circ}Cam_{enFilaPala} + N^{\circ}Cam_{enCaminoPala} + 1) * (T_{Carga})$$

$$+ \frac{Distancia_{OriDes}}{Veloc_{OriDes Cargado}} + (N^{\circ}Cam_{enFilaChancado} + N^{\circ}Cam_{enCaminoChancado} + 1) * (T_{Descarga})$$

Lo anterior se realiza para emular la lógica seguida por el dispatch en faena, donde a grandes rasgos se realiza una evaluación instantánea (o por turno) donde se estima el mayor rendimiento de cada equipo considerando colas en los orígenes. Esta asignación sigue la estrategia de asignación de 1-camión-para-n-palpas descrita por Alarie y Gamache [18].

El segundo rol del sub-modelo dispatch, realizar el chequeo si ya es tiempo para cada equipo de tener una detención operacional, se realiza a través de una separación de los tramos del día acorde a si es tiempo de realizar una de las siguientes detenciones operacionales:

- Colación turno noche 1: entre 0:00am y 2:00am.
- Colación turno noche 2: entre 2:00am y 4:45am.
- Cambio turno noche a día: entre 4:45am y 8:00 am.
- Colación turno día: entre 8:00 am y 3:00 pm.
- Cambio turno día a noche: 3:00pm y 8:00 pm.

Una vez que se ha identificado el tramo del día se evalúa a través de la siguiente condición:

$$T_{Objetivo} - T_{Actual} < T_{Ciclo\ a\ Origen} * Factor_{Forma}$$

Donde $T_{Objetivo}$ corresponde al tiempo final en el tramo correspondiente y $Factor_{Forma}$ corresponde un factor que permite hacer cambiar la forma de la productividad instantánea a lo largo del cambio de turno, de manera que los resultados del modelo representen de mejor forma la curva presente en la realidad. Si se cumple la condición, el camión puede hacer otro viaje y se reinicia el tiempo de ciclo en el modelo, sino el camión debe realizar el cambio de turno y se desplaza hacia el estacionamiento (Figura 9). En caso de realizar una detención operacional, se asignan dos variables binarias (1 o 0) para colación y cambio de turno, con el fin de identificar en estacionamiento a qué tipo de detención corresponde. También se asigna el tiempo de inicio de la detención, para que pueda ser calculada la duración de esta.

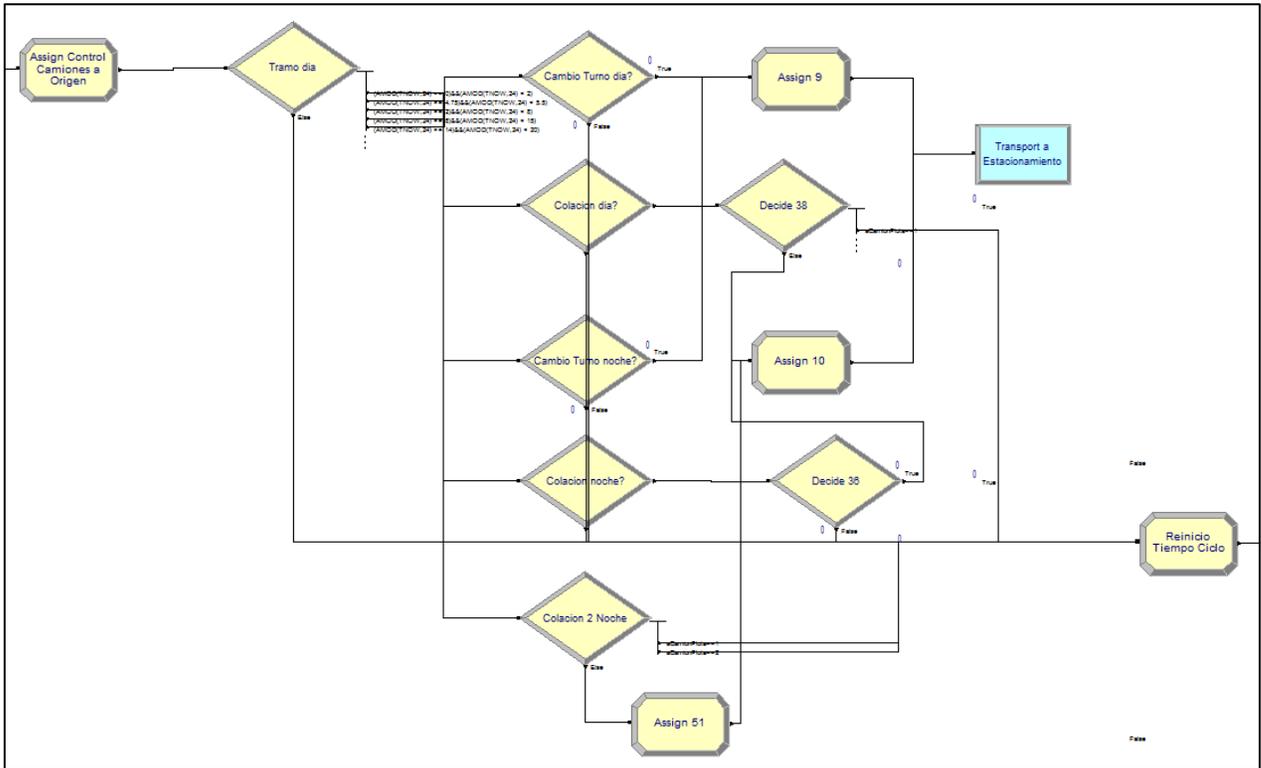


Figura 9: Chequeo de detención operacional en sub-modelo dispatch

Una vez que se llega al sub-modelo destino es necesario ocupar una técnica que permite que el programa modele de forma correcta las colas al usar "transporters", esto debido a que cada intersección solo puede albergar un solo "transporter", por lo que es necesario realizar el apoderamiento del recurso para en una primera intersección y luego realizar el transporte hacia una nueva (con una distancia mínima que no afecte el tiempo de ciclo).

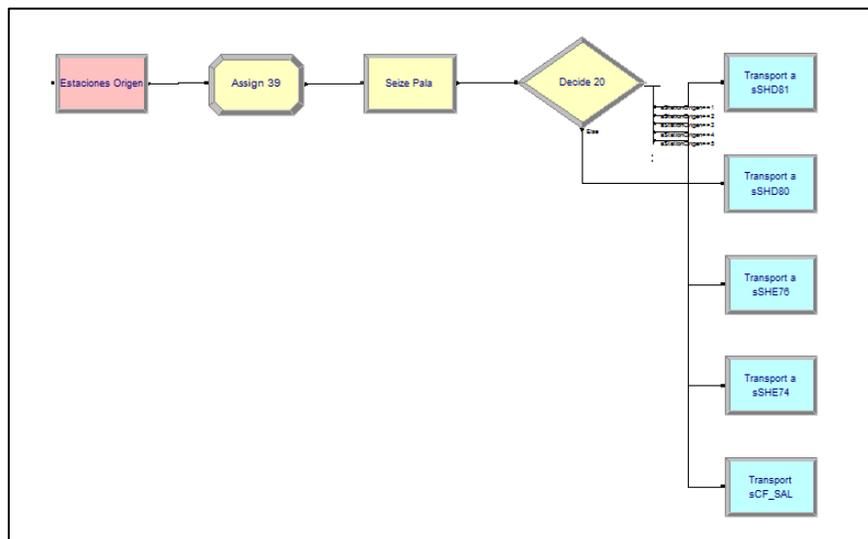


Figura 10: Seize o apoderamiento del recurso en una primera intersección para luego realizar el transporte hacia la ubicación de la pala en sub-modelo destino

Una vez ubicado en la intersección donde se encuentra la pala, basta con realizar los procedimientos de acuatamiento, carga, liberación del recurso pala y transporte hacia el destino, con sus respectivas asignaciones de los tiempos relevantes a medir, es decir, en entradas y salidas de cada proceso (Figura 11).

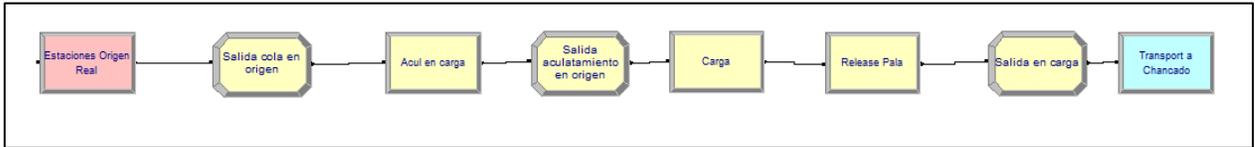


Figura 11: Carga en pala

Al llegar al chancado es necesario ver qué punto de descarga de los dos disponibles se encuentra menos congestionado, una vez que se identifica se realiza el apoderamiento del recurso chancador, donde se debe emplear la misma técnica que en el origen para que funcionen correctamente las colas (Figura 12).

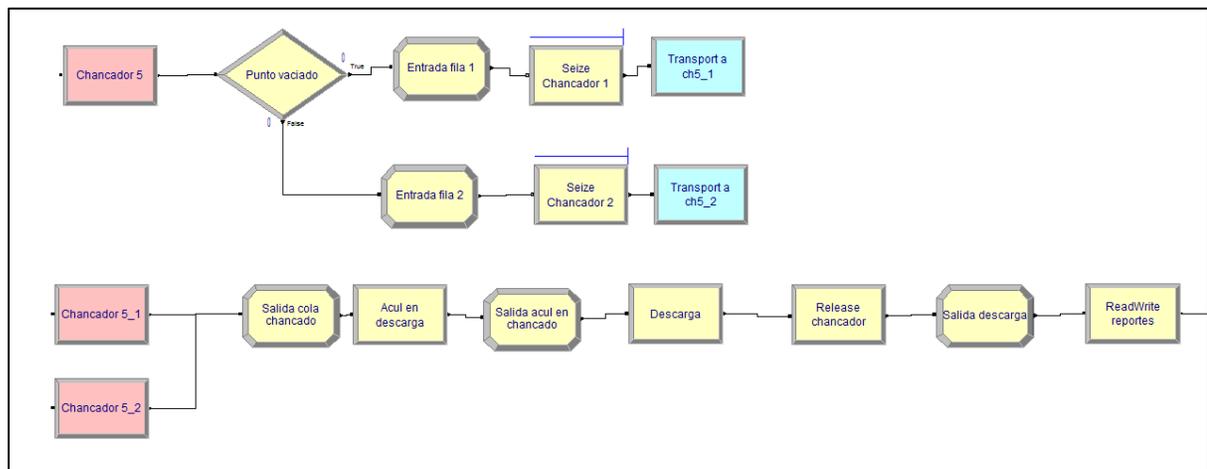


Figura 12: Sub-modelo chancado

Una vez en el chancador mismo, se realizan los procesos de acuatamiento y descarga, con sus respectivas asignaciones de tiempos relevantes, para que justo antes de la salida del sub-modelo se genere la escritura de cada evento completo hacia un archivo externo. Dicho archivo contiene las siguientes columnas:

- Origen
- Camión: número identificador de cada camión.
- TNOW (Fin Ciclo): tiempo en que se realiza el registro (salida del chancador).
- Tolva [t]: cantidad de mineral transportada.

- TViajeIda [min]: tiempo de viaje vacío.
- TColaOrigen [min]: tiempo de fila en origen.
- TAculOrigen [min]: tiempo de aculatamiento en origen.
- TCarga [min]: tiempo de carga en origen.
- TViajeVuelta [min]: tiempo de viaje cargado.
- TColaChancado [min]: tiempo de fila en chancador.
- TAculChancado [min]: tiempo de aculatamiento en chancador.
- TDescarga [min]: tiempo de descarga en chancador.
- TCiclo [min]: tiempo del ciclo completo (suma de los tiempos anteriores).
- NREP: número de replicación de la simulación.

Recordar que cuando se realizan las detenciones operacionales en estudio el camión debe desplazarse hacia el estacionamiento. Es en esta intersección en el modelo donde se debe modelar las demoras asociadas.

Por la misma razón que una intersección solo puede albergar un camión, es que se hace necesario modelar la duración de la detención a través de un viaje desde una intersección a otra que dure el tiempo estimado. Es así como se realiza un viaje desde el mismo estacionamiento hacia una intersección auxiliar, para luego volver al estacionamiento. Como cada detención tiene tiempos distintos asociados se realiza un tipo de viaje para los cambios de turnos, las colaciones y la segunda colación de noche por separado (Figura 13).

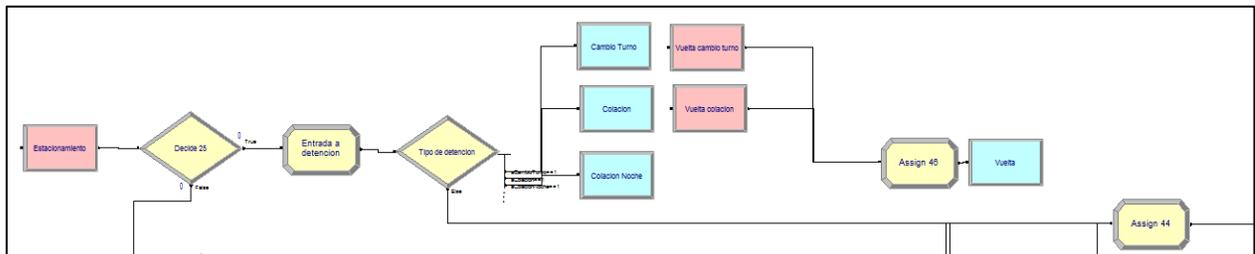


Figura 13: Viaje que emula la duración de la detención en sub-modelo estacionamiento

Sin embargo las detenciones tienen restricciones dada su naturaleza en la operación real, tales como que los cambios de turno los camiones no puedes salir antes de las 8 y 20 horas para cada turno, ya que es necesario que llegue el siguiente turno de choferes para que continúe con la realización de labores. Lo mismo ocurre con las colaciones, donde es necesario realizar el mismo chequeo con el fin que la productividad instantánea del sistema siga el comportamiento de los datos reales. Es por esto que es necesario realizar una verificación previa al retiro de los camiones del estacionamiento,

donde se corrobore que salgan a la hora que ocurre en la realidad (Figura 14).

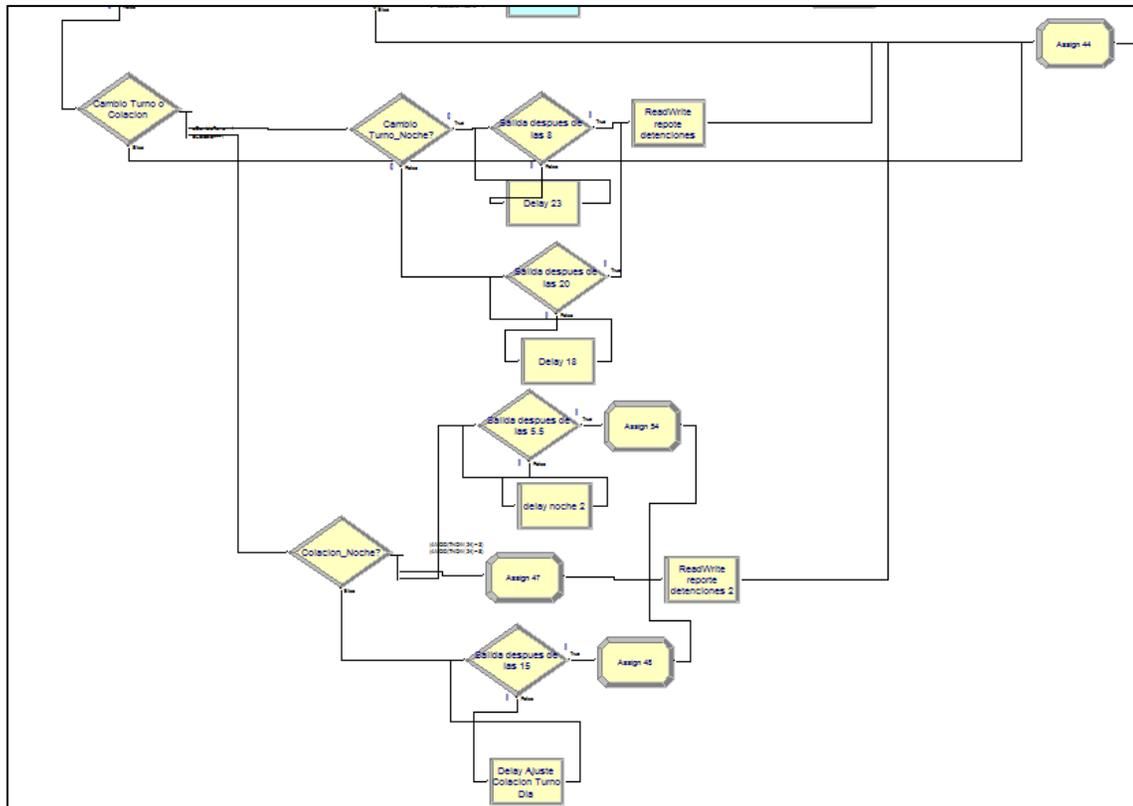


Figura 14: Corroboración de la hora de salida para cada detención en sub-modelo estacionamiento

De la misma forma que se exportaba una realización para los eventos de descarga, se realiza una escritura a un archivo externo que guarda los detalles de las detenciones para su posterior análisis.

3.3.3. Validación y calibración del modelo base

La validación del modelo se realiza a través de una representación gráfica de las interacciones físicas que están ocurriendo entre los "transporters" y la malla de intersecciones presentes en el modelo (Figura 15). Con esto es posible ir corroborando que la parte lógica del modelo está haciendo las labores que se espera por parte del modelador y que todos los elementos presentes (transporter, recursos, delays, etc.) se están comportando de la forma planeada.

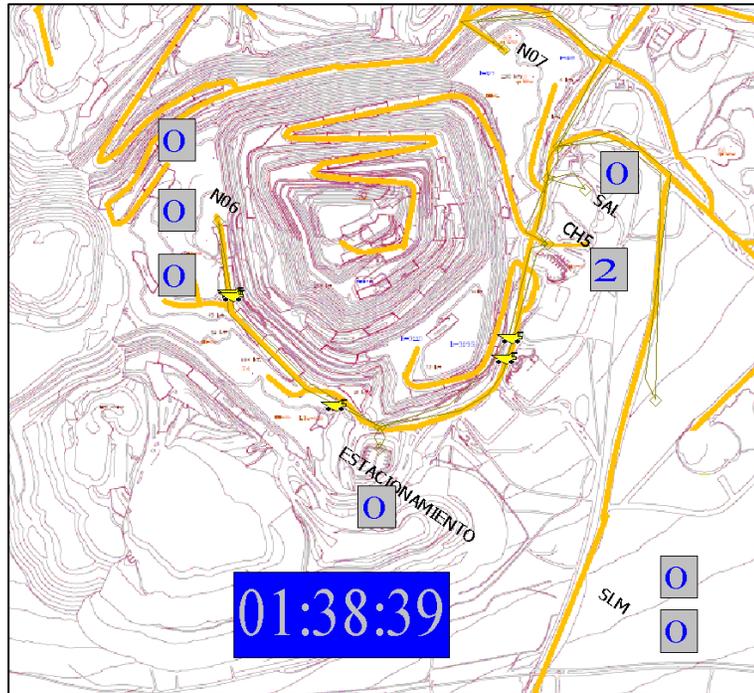


Figura 15: Representación gráfica modelo simulación base

Por otra parte, las variables del modelo deben ser calibradas para que los resultados que arroja este sean lo suficientemente cercanas al comportamiento real. Es por esto que se ocupa en una primera instancia el número de camiones presentes para comparar la producción diaria del modelo y la producción diaria promedio de los datos obtenido de la faena. A través de esto se llega a que con un total de 8 camiones del tipo CAT 793 se logra el mismo orden de magnitud que los datos reales. Lo anterior se realiza porque como el sistema en estudio es un sub sistema de una mina completa, no se tienen datos de la flota que contiene, ya que no siempre son los mismo equipos de transporte que están presentes en el sub sistema en estudio, es por esto que se debió llegar a esta flota equivalente a través del modelo de simulación.

Una segunda medida de calibración corresponde a que el modelo obtenga los mismos tiempos asociados a cada labor, y en consecuencia a los tiempos de ciclo entre cada origen y el destino presente. Esto se realiza a través de la variación de la velocidad de los equipos de transporte por tramos de distancias entre intersecciones, con el fin de variar el tiempo de viaje de ida y de vuelta.

Con esto se obtienen diferencias de menos de 4.2% entre los valores simulados y los reales para los ítems de productividad diaria y tiempos de viajes asociados a cada origen (Tabla 7).

	Promedio Real [t]	Promedio Simulado [t]	Relación
	95675.5	95435.2	99.7%
TViajeIda	Promedio Real [min]	Promedio Simulado [min]	Relación
N06	13.9	13.8	99.5%
SLM	2.8	2.7	96.2%
SAL	2.9	2.9	98.7%
TViajeIda	Promedio Real [min]	Promedio Simulado [min]	Relación
N06	9.9	10.2	103.1%
SLM	3.3	3.2	98.3%
SAL	3.3	3.2	95.8%

Tabla 7: Comparación entre parámetros reales y simulados

Pero comparar estos parámetros por si solos no es suficiente, ya que se espera emular el comportamiento de la productividad instantánea a lo largo del día. Además es necesario identificar el número de replicaciones mínimas para que el modelo de simulación sea estadísticamente representativo.

Considerando el corto tiempo de simular una replicación de 24 horas de duración (menor a los 30 segundos), es que se realizarán 50 replicaciones de la simulación para observar la convergencia de los promedios de cada punto de la productividad instantánea. Cómo la productividad instantánea se calcula cada 15 minutos y se está simulando 24 horas por cada replicación, se tienen 96 puntos de comparación.

El primero de los análisis a realizar en este sentido corresponde a una comparación entre las diferencias porcentuales del promedio acumulado de la productividad instantánea para cada cuarto de hora hasta la replicación en curso (Gráfico 19). Aquí se observa que a partir de la replicación 35, en todos los puntos en cuestión, el promedio no varía más allá de un 4%. Llegando en la replicación 50 a que la mayor variación corresponde a un 2.26%. Además, considerando el poco tiempo que toma en simular estas 50 replicaciones, es que se decide mantener este número de replicaciones para el cálculo a través de los promedios de todas estas para cada parámetro y variable en estudio.

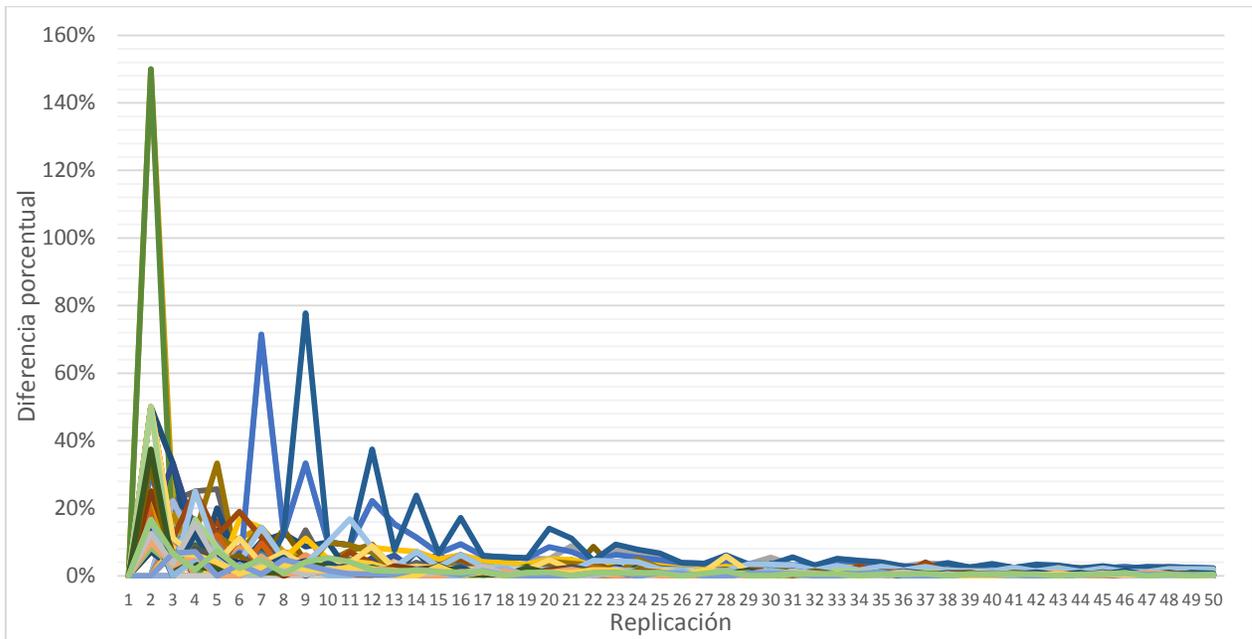


Gráfico 19: Diferencias porcentuales entre promedios acumulados para cada replicación

Por otra parte, como se desea que el modelo emule el comportamiento de la productividad instantánea es que se hace necesario realizar una comparación de los valores en cada punto. Para ello se construye un gráfico de productividad instantánea que muestra los valores a lo largo del día para el caso real y simulado (Gráfico 20), de esta forma es posible observar gráficamente que el modelo emula a grandes rasgos el comportamiento real.

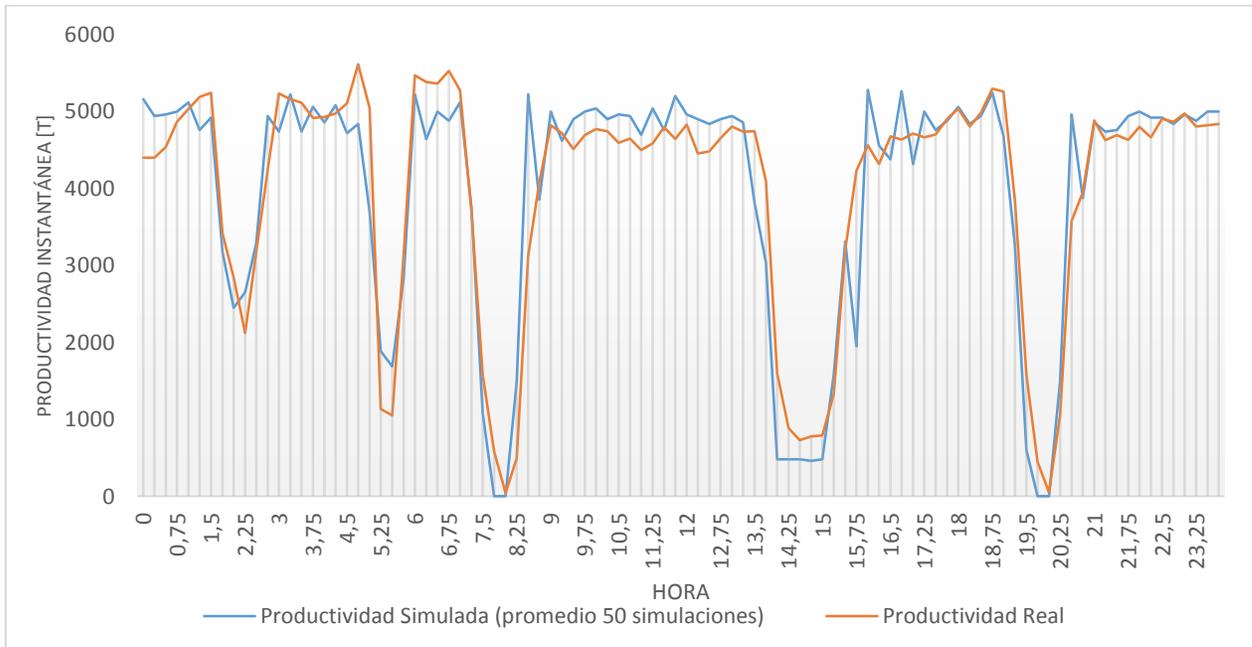


Gráfico 20: Productividad instantánea real versus simulada

Sin embargo, es necesario realizar una comparación más robusta. Esto se puede realizar a través de un gráfico de dispersión entre cada punto real y simulado (Gráfico 21), el cual muestra que la línea de tendencia de los datos es prácticamente igual a una línea de pendiente 1, y que el R^2 asociado es de un 0.8664. La principal razón del valor del R^2 corresponde a las diferencias intrínsecas que existirán entre una simulación y los datos reales, dado que es imposible considerar todos los detalles que existen en la realidad. Cabe recordar que una modelación de este tipo es una simplificación de la realidad, considerando esto, el valor de R^2 obtenido es un excelente valor desde el punto de vista de la representatividad de los resultados obtenidos mediante la simulación.

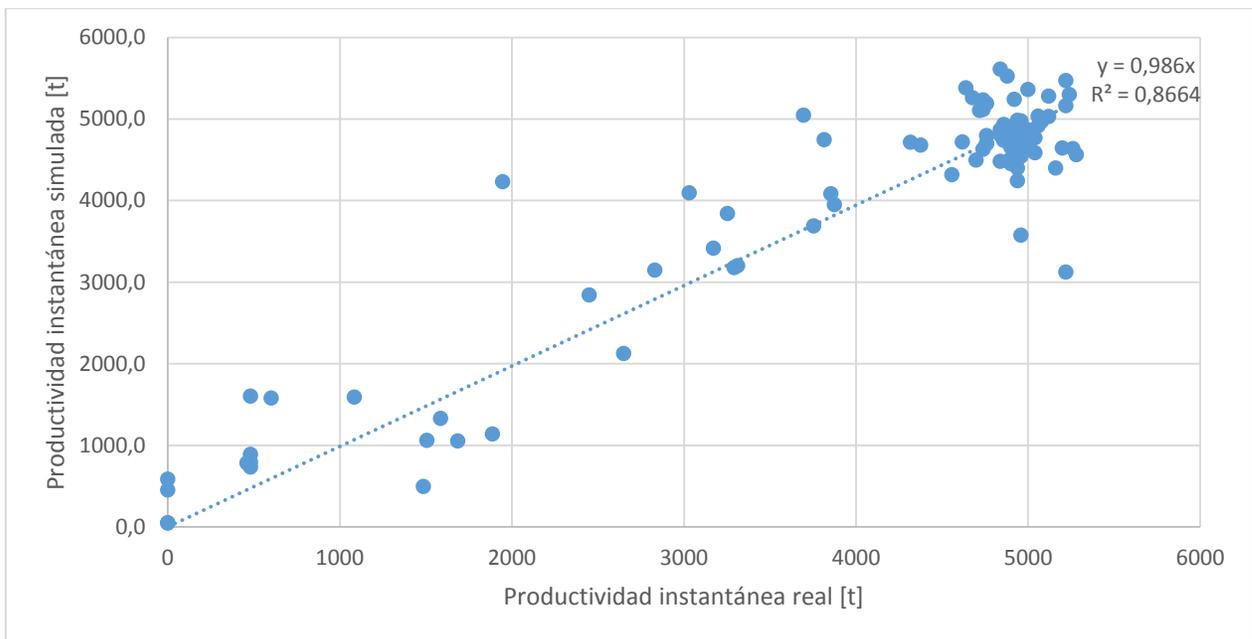


Gráfico 21: Dispersión entre productividades instantáneas simuladas y reales

3.3.4. Escenario cambio de turno cargado

En este escenario se evaluará el impacto de cambiar la regla operacional que el cambio de turno solo se puede realizar si el camión está descargado. El realizar el cambio de turno de esta forma conlleva que la evaluación previa a realizar el cambio de turno sea que se mide si es posible realizar un ciclo más previo a realizar la detención.

Si se relaja esta regla operacional, a través de la adición de una regla donde también se considere la posibilidad de realizar el cambio de turno con el camión cargado, permite que el camión previo al cambio de turno, en las condiciones indicadas, pueda realizar "media vuelta" hasta la estación de

carguío y una vez cargado realice el cambio de turno en un estacionamiento exclusivo para ello.

Para la implementación de este escenario se realizará una modificación al modelo base descrito anteriormente. Particularmente la modificación viene en el sub-modelo dispatch, donde después de cada verificación de si es tiempo de realizar el cambio de turno en base al criterio original, se realiza una nueva consulta que decide si es viable realizar "medio viaje" (Figura 16). En caso de que el camión pueda realizar el viaje a carguío previo al cambio de turno se asigna un atributo que posteriormente será ocupado para el envío al estacionamiento exclusivo para camiones cargados.

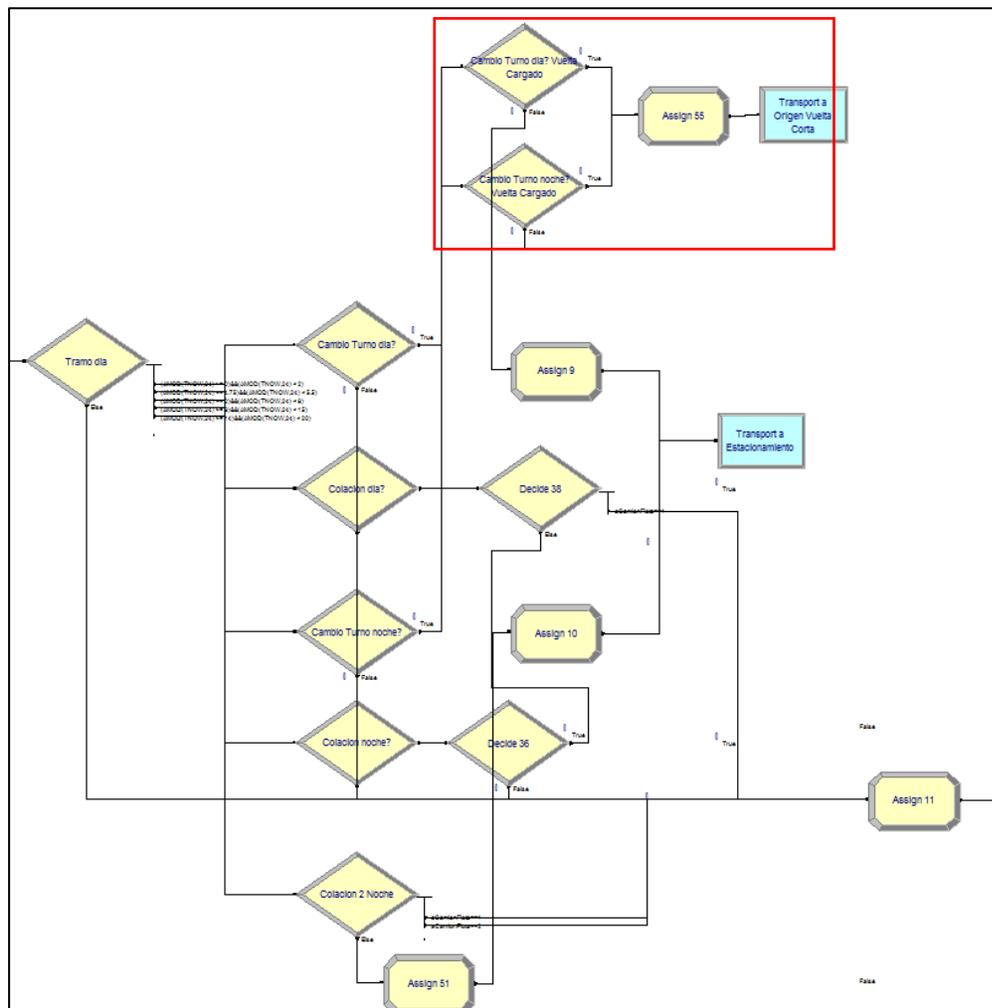


Figura 16: Modificación a sub-modelo dispatch para integrar posibilidad de "medio viaje"

El nuevo criterio corresponde a la evaluación de la mitad del tiempo que se evaluaba originalmente, esto se representa con la siguiente ecuación:

$$T_{Objetivo} - T_{Actual} < \frac{T_{Ciclo\ a\ Origen} * Factor_{Forma}}{2}$$

Por otra parte, es necesario incorporar la opción de que el camión una vez en la pala asignada se traslade hacia el estacionamiento exclusivo para camiones cargados. Para esto solo basta con agregar la opción en el sub-modelo origen a través del atributo definido en el sub-modelo dispatch (Figura 17).

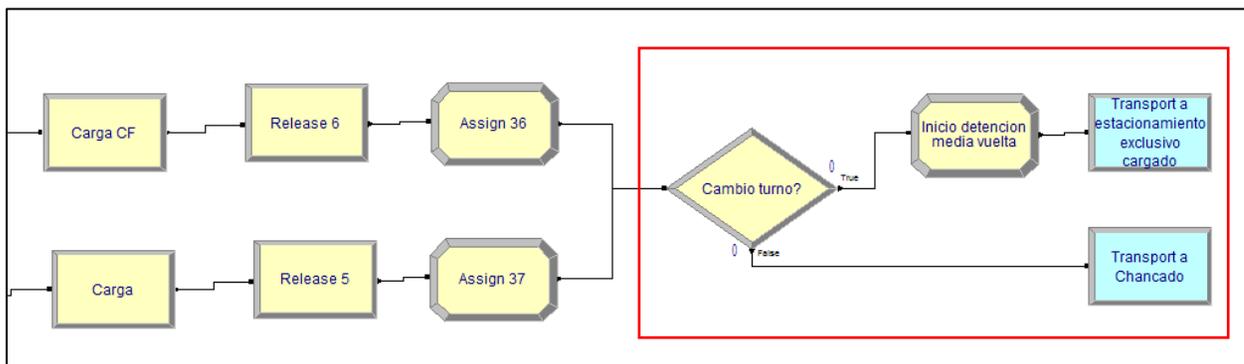


Figura 17: Modificación sub-modelo origen para incorporar viaje a estacionamiento exclusivo camiones cargados

La ubicación del estacionamiento será contigua al estacionamiento actual.

3.3.5. Escenario con variación de posición de estacionamiento

En este escenario se espera evaluar el impacto de la posición del estacionamiento con respecto a la descarga en chancado. El estacionamiento actualmente se encuentra virtualmente en el punto medio entre el chancador y la fase que más alimentación de mineral brinda a este (N06). Para este estudio se realizarán 7 casos que partirán desde un punto muy cercano al chancador hasta casi alcanzar la fase anteriormente descrita (Tabla 8).

Caso	Distancia desde chancador [m]
BASE	2000
1	50
2	500
3	1000
4	1500
5	2500
6	3000
7	3500

Tabla 8: Casos simulados y sus distancias con respecto al chancador respectivas

La implementación en Arena se refleja en cambiar la distancia en los segmentos que unen el chancador con el estacionamiento y aquel que une el estacionamiento con la fase N06.

3.3.6. Escenario cambiando tipos de equipos de transporte

En este escenario se espera medir la incidencia del cambio del tipo de equipo transporte directamente en la duración las detenciones operacionales. La diferencia con los otros escenarios es que no se medirá el impacto en la productividad, esto dado porque los equipos considerados cambian de tamaño de tolva lo que produce un cambio en la flota. La nueva flota equivalente no logrará igualar la producción del caso base, ya que no se puede tener un número decimal de camiones.

El cambio de equipo de transporte será desde un CAT 793 a un CAT 797, los principales cambios están dados por el tamaño de la tolva, y en consecuencia el número de camiones total en la flota para igualar en orden de magnitud de la producción diaria, y la velocidad alcanzada.

El cambio en Arena se refleja como un cambio en el número de "transporters" y en el perfil de velocidades para cada par origen-destino.

3.4. Análisis de los resultados de los nuevos escenarios

El análisis se enfocará principalmente en las diferencias entre el caso base simulado y el nuevo escenario, particularmente se comparará la producción diaria, la duración de las detenciones en estudio y el comportamiento de la productividad instantánea a lo largo del día.

En el caso base se obtuvo que la producción diaria corresponde a 95435.2 t y que la duración de las detenciones en total alcanzan las 5.09 horas en promedio (Tabla 9).

Promedio	Simulado [t]
productividad diaria	95435.2
Detenciones	Promedio de detención por camión [h]
Colación 1 Noche	0.89
Colación 2 Noche	0.69
CT Noche	0.93
Colación Día	1.56
CT Día	1.03
TOTAL	5.09

Tabla 9: Resultados caso base

3.4.1. Resultados escenario cambio de turno cargado

Al realizar la implementación de que los camiones puedan realizar el cambio de turno cargado se observa que existe una disminución en el promedio de la duración de las detenciones ligadas a esta parada cercana a un 20% para cada cambio de turno (Tabla 10). Esta disminución se explica porque ahora existe la posibilidad de que tiempo que antes era ocupado exclusivamente en realizar el cambio de turno, pase a ser ocupado para realizar la carga del camión previo al cambio de turno.

Promedio	Simulado [t]	CASO BASE [t]	Diferencia con
-----------------	---------------------	----------------------	-----------------------

productividad diaria	CASO BASE		
	96951.3	95435.2	101.6%
Promedio detenciones	Simulado por camión [h]	Caso Base por camión [h]	Diferencia por unidad
Colación 1 Noche	0.93	0.89	105.2%
Colación 2 Noche	0.69	0.69	99.8%
CT Noche	0.73	0.93	78.5%
Colación Día	1.56	1.56	99.9%
CT Día	0.83	1.03	81.2%
TOTAL	4.74	5.09	93.1%

Tabla 10: Resultados escenario cambio de turno cargado

Por otra parte, si se observa la diferencia en la producción con el caso base, se ve un aumento de 1.6% (Tabla 10). En este sentido, se observa un aumento diario de 1516 toneladas de mineral solo al agregar la nueva opción de este escenario. La explicación está ligada a la disminución en la duración de las detenciones, ya que una vez que el camión puede realizar el cambio de turno cargado y una vez que retoma la faena el turno siguiente, la productividad del sistema vuelve en un menor tiempo producto de que el camión ahora solo tiene que viajar al chancador para realizar la descarga. Lo anterior se observa gráficamente en la comparativa de la productividad instantánea junto al caso base (Gráfico 22), donde se tiene un aumento justo después de los comienzos de los turnos siguientes. Recordar que la diferencia en área entre las dos curvas representa el tonelaje, producto que es un gráfico de t/h versus h.

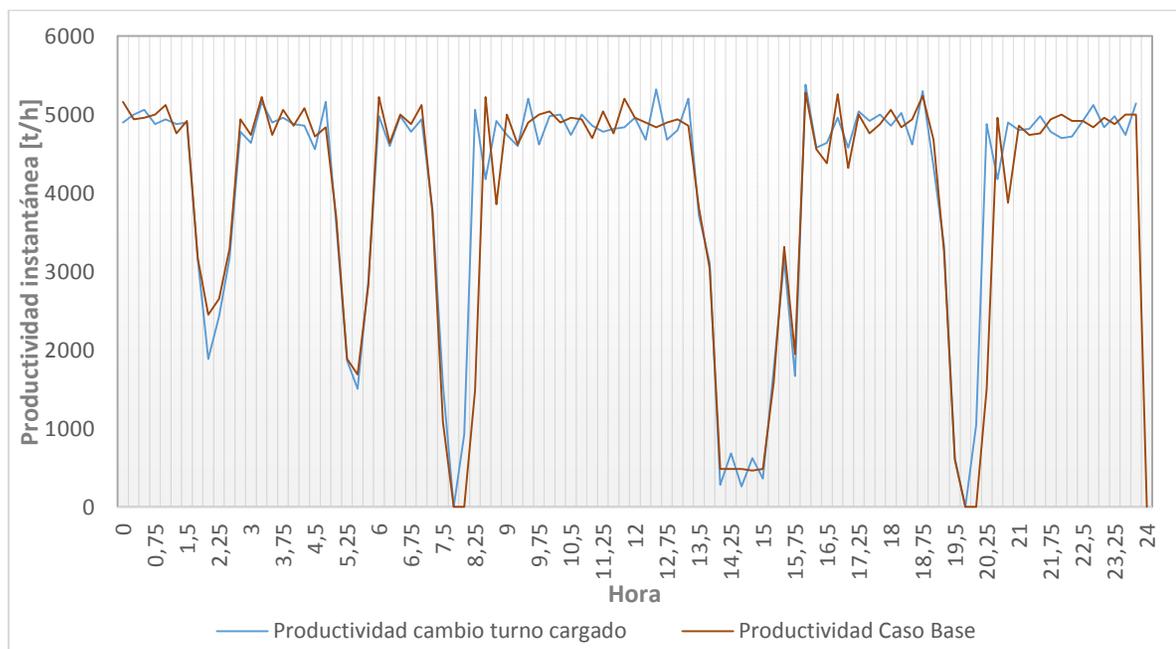


Gráfico 22: Comparativa productividad instantánea entre caso base y caso con cambio turno cargado

3.4.2. Resultado escenario con variación de posición de estacionamiento

Al realizar los casos descritos en 3.3.5, se obtiene que a medida que el estacionamiento se encuentra más cercano al chancador, la productividad diaria aumenta y la duración de las detenciones disminuye (Gráfico 23).

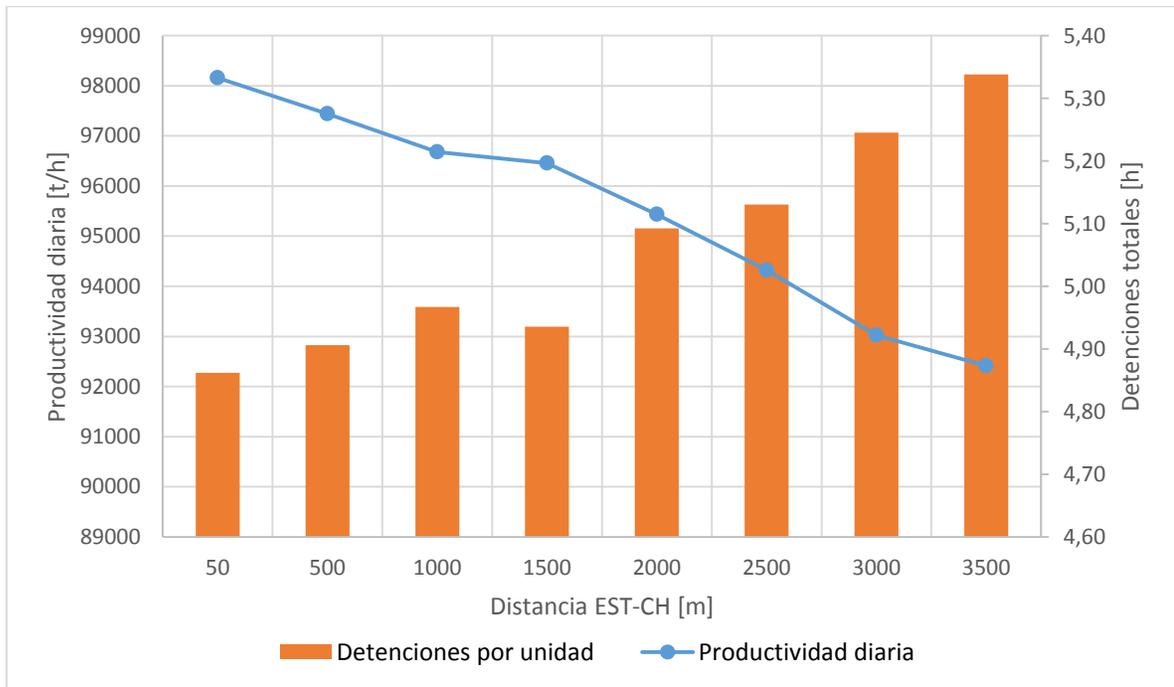


Gráfico 23: Productividad diaria y detenciones operacionales versus distancia entre estacionamiento y chancador

Al realizar un análisis más exhaustivo al mejor caso, distancia de 50 metros entre el chancador y el estacionamiento, se tiene que la productividad diaria aumenta casi un 3%, teniéndose una ganancia en productividad de 2726 toneladas por día (Tabla 11). Mientras tanto en la duración de detenciones se tiene una disminución global de un 4.5%, alcanzando disminuciones cercanas al 20% para el caso de la primera colación durante el turno de noche.

Promedio productividad diaria	Simulado [t]	CASO BASE [t]	Diferencia con CASO BASE
		98161.1	95435.2
Promedio detenciones	Simulado por camión [h]	Caso Base por camión [h]	Diferencia por unidad
Colación 1 Noche	0.73	0.89	81.8%
Colación 2 Noche	0.61	0.69	89.0%
CT Noche	0.94	0.93	100.6%
Colación Día	1.57	1.56	100.6%
CT Día	1.02	1.03	99.2%
TOTAL	4.86	5.09	95.5%

Tabla 11: Resultados mejor caso en escenario de cambio de posición de estacionamiento

Con respecto al comportamiento de la productividad instantánea a lo largo del día se observa que la reanudación luego de las detenciones en estudio se realiza de forma más eficiente, y que la ganancia en la producción diaria se explica nuevamente por la diferencia de área entre las dos curvas (Gráfico 24).

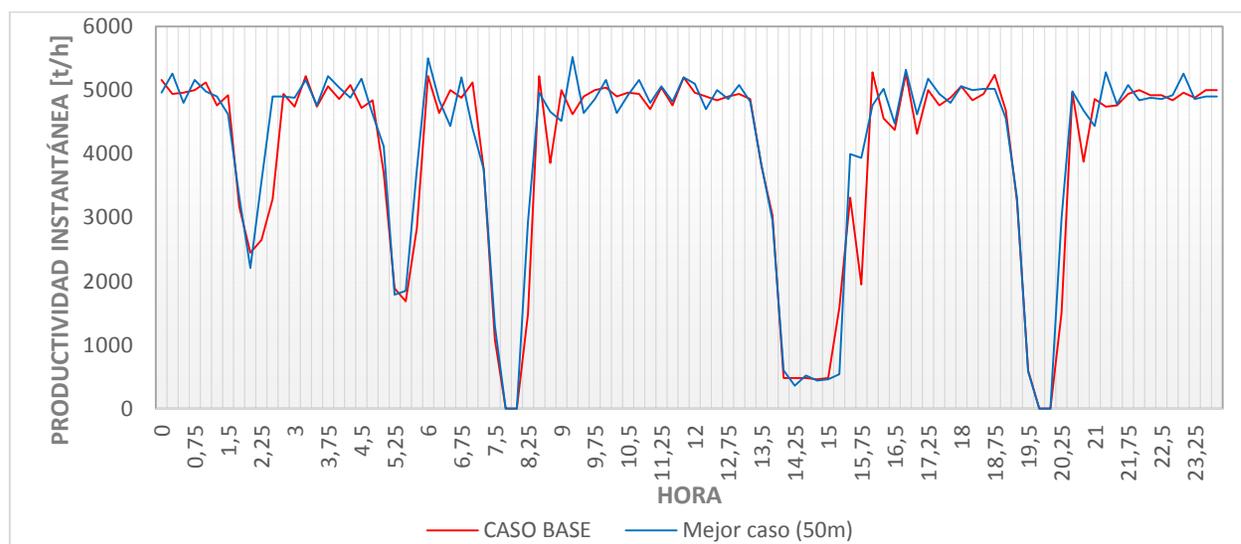


Gráfico 24: Comparativa productividad instantánea entre caso base y mejor caso en escenario variando posición de estacionamiento

3.4.3. Resultados escenario cambiando tipos de equipos de transporte

Como resultado del cambio de equipo de transporte se analizará su impacto en la duración de las detenciones. Aquí se observa que las detenciones globalmente disminuyen en un 13.6% (Tabla 12), y que la disminución por tipo de detención disminuye prácticamente en la misma proporción. Este resultado se explica principalmente porque los nuevos

equipos de transporte poseen una mayor velocidad de traslado, haciendo que el tiempo de traslado hacia el estacionamiento para realizar la detención sea menor.

Promedio detenciones	Simulado por camión [h]	Caso Base por camión [h]	Diferencia por unidad
Colación 1 Noche	0.73	0.89	81.9%
Colación 2 Noche	0.57	0.69	82.8%
CT Noche	0.83	0.93	89.3%
Colación Día	1.35	1.56	86.5%
CT Día	0.92	1.03	89.8%
TOTAL	4.40	5.09	86.4%

Tabla 12: Resultados escenario cambiando equipos de transporte

Cabe destacar que al realizar este tipo de estudios sobre una faena en producción, es prácticamente imposible que se realice un cambio en los equipos de transporte, dada su alta inversión por equipo y sobre todo por flota. Sin embargo, para análisis de equipos de transporte en etapas de pre-factibilidad en revisiones de proyectos mineros será favorable considerar la incidencia directa en los tiempos de detención de la velocidad del equipo de transporte, y en consecuencia, en la productividad diaria.

3.4.4. Resultados escenario combinado: cambio turno cargado y estacionamiento junto a chancador

Finalmente se realiza un nuevo escenario combinando los escenarios de agregar la posibilidad de realizar el cambio de turno cargado y la mejor posición de estacionamiento obtenida. Lo anterior se respalda por los resultados positivos de 3.4.1 y 3.4.2, y agregando que estos escenarios son relativamente simples de implementar a una faena ya en producción.

En este escenario se observa que la productividad diaria del sistema sufre un aumento del 4.2% (Tabla 13), lo que se traduce en un aumento por día de 3991 toneladas de alimentación de mineral en el chancador. Por parte de las detenciones, se observa una disminución en la duración del conjunto de detenciones de un 10.7%, llegando a disminuciones en el caso del cambio de turno de día a noche de casi un 20%.

Ambos resultados van de la mano, ya que el aumento en la productividad diaria se ve directamente explicado en la disminución en el promedio de la duración de las detenciones. Otro resultado destacable es que el aumento observado anteriormente en cada escenario por separado, se observa acá en que es prácticamente la suma de los aumentos.

Promedio productividad diaria	Simulado [t]	CASO BASE [t]	Diferencia con CASO BASE
	99426.1	95435.2	104.2%
Promedio detenciones	Simulado por camión [h]	Caso Base por camión [h]	Diferencia por unidad
Colación 1 Noche	0.73	0.89	82.6%
Colación 2 Noche	0.63	0.69	91.2%
CT Noche	0.77	0.93	83.0%
Colación Día	1.59	1.56	101.9%
CT Día	0.83	1.03	80.6%
TOTAL	4.55	5.09	89.3%

Tabla 13: Resultados escenario combinado

Finalmente, al analizar el gráfico de productividad instantánea se confirman los análisis anteriores, ya que se observa claramente que las diferencias de áreas más importantes se encuentran en las zonas de las detenciones en estudio. Y es más, ya que se ve claramente como las ganancias observadas en los escenarios por separados ahora son más pronunciadas (Gráfico 25).

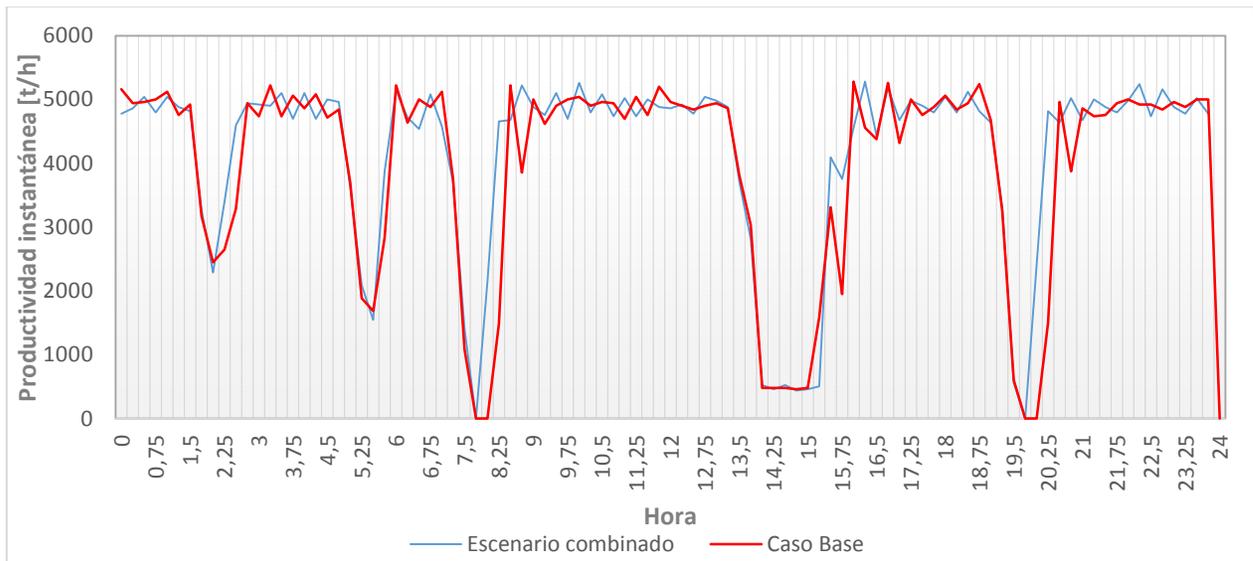


Gráfico 25: Comparativa productividad instantánea entre caso base y escenario combinado

3.4.5. Análisis económico entre los distintos escenarios

Con el fin de comparar los tres escenarios que tuvieron resultados positivos en la productividad diaria es que se realiza un análisis de

comparación del beneficio económico que contraen los resultados. Para esto se calcula el beneficio asociado al aumento de producción mensual a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Beneficio diferencial} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{mes}} \right] = M \left[\frac{t}{\text{día}} \right] * \frac{30[\text{días}]}{[\text{mes}]} * \left(\text{Ley}[\%] * R[\%] * \left(P_{Cu} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] - C_{v \text{ y } f} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{lb}} \right] \right) * \frac{2204.6[\text{lb}]}{[t]} - C_{mina} \left[\frac{\text{US\$}}{t} \right] - C_{planta} \left[\frac{\text{US\$}}{t} \right] \right)$$

donde M : toneladas extras por día del caso

P_{Cu} : precio de venta de la libra de cobre

$C_{v \text{ y } f}$: costo de venta y refinación

C_{mina} : costo de mina

C_{planta} : costo de planta

Con esta información es posible calcular el beneficio para cada caso en comparación al caso base (Gráfico 26), donde se observa el aporte que mensualmente cada caso aportaría. Acá destaca el aumento que contrae acercar el estacionamiento al chancador, cambio operacional que es de relativa simpleza en la faena minera. Cabe destacar que con esto, sumado a información anexa relacionada a la inversión específica que conlleva realizar cada cambio, es posible calcular el tiempo en que se recupera la inversión.

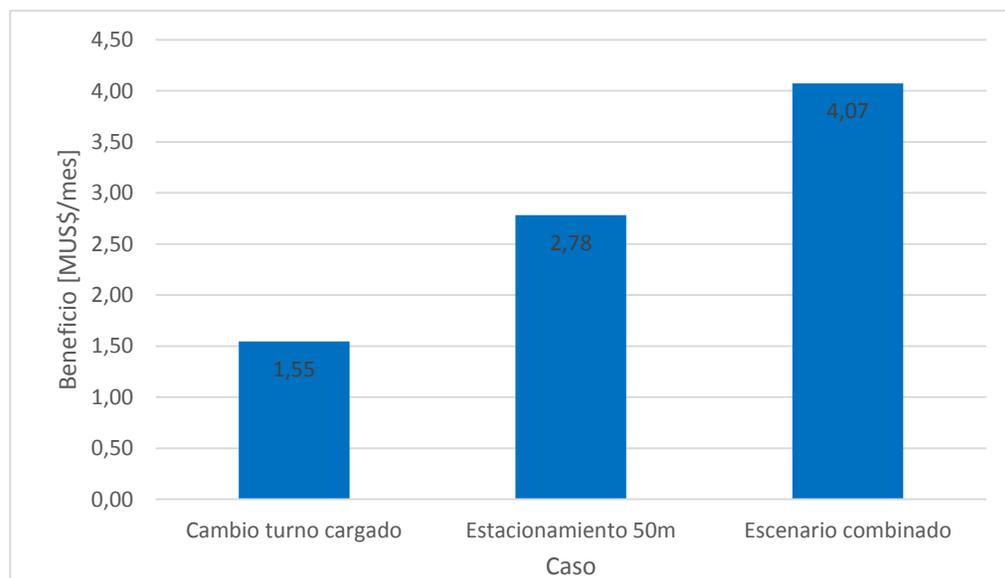


Gráfico 26: Beneficio asociado a cada caso

Por otra parte, si se analiza la implementación de los cambios que implican cada escenario viable se observa que la el agregar la posibilidad de que se haga el cambio de turno cargado se observa un diferencial de beneficio de 1.55 MUS\$/mes en relación al caso base (Gráfico 27). Haciendo el mismo ejercicio comparando la implementación del nuevo estacionamiento

cercano al chancador se tiene que el beneficio aumenta en 1.24 MUS\$/mes en relación a implementar solo la posibilidad del cambio de turno cargado. Finalmente, la implementación de ambas estrategias conlleva un aumento del beneficio de 1.29 MUS\$/mes en relación a solo implementar el acercamiento del estacionamiento al chancador.

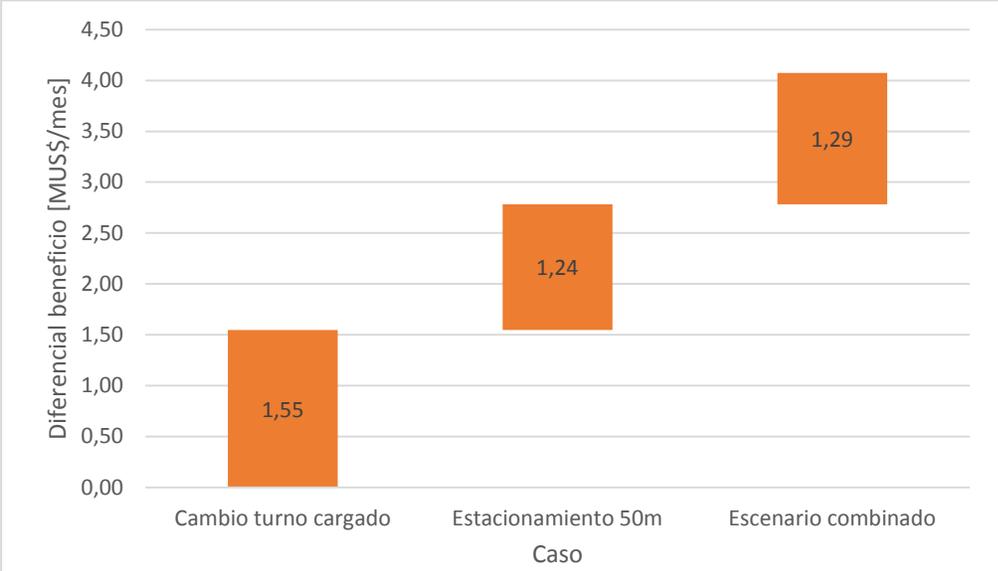


Gráfico 27: Diferencial del beneficio asociado al caso anterior

Estos análisis económicos permiten medir el impacto de los cambios de una manera objetiva haciendo que la decisión de la implementación en cada caso tenga un respaldo analítico.

4. CONCLUSIONES

El trabajo realizado abarcó una limpieza de los datos disponibles siguiendo restricciones físicas, para así poder realizar en primera instancia un análisis exploratorio descriptivo, y luego, un análisis exploratorio analítico modelando la relación entre las detenciones en estudio y la productividad diaria. Luego se realizó un modelo de simulación dinámica de eventos discretos que logró emular la realidad del sistema en estudio, el cual fue validado y calibrado con la información que se tiene del sistema real. A partir de este modelo base, se realizaron nuevos escenarios agregando cambios operacionales, permitiendo cuantificar el impacto de estos. Finalmente se realizó un análisis de resultados que permitió llegar a las conclusiones mostradas a continuación.

Con los análisis a los datos limpios de la información proveniente de dispatch en la faena, se concluye que el tiempo de ciclo total posee una alta correlación negativa con una estimación de la productividad para cada ciclo. Este resultado es esperado y sigue la lógica de la teoría, dado que esta estimación de la productividad se realiza sobre la división entre el tamaño de tolva descargado y el tiempo que tomó en realizar el ciclo.

La construcción de nuevas bases de datos a partir de la base de datos inicial permite realizar análisis más robustos sobre la productividad instantánea definida al comienzo de este estudio. Sin embargo se cae en una pérdida de información que tiene la base de datos inicial, ya que se realiza una discretización temporal que acumula información y reduce el número de datos total a trabajar. Pasando aproximadamente desde 120 mil eventos puntuales a 35328 ($368 \cdot 24 \cdot 4$) en una primera instancia, y a 368 filas que caracterizan el día finalmente.

Lo anterior, sumado a la estimación de las detenciones a través de la productividad instantánea, permite realizar un análisis de clustering o agrupamiento. Con esto se determina la relación entre la productividad diaria, global e instantánea, y la duración de las detenciones, esto a través de la separación entre grupos de días que tienen un comportamiento de su productividad instantánea similar a lo largo del día. El resultado de esto muestra que a medida que la duración de las detenciones en estudio son menores, la productividad diaria aumenta. Esto motiva a continuar con el análisis de la variación de las detenciones a través de cambios en políticas operacionales y así medir la variación en la productividad diaria del sistema.

Teniendo en cuenta la simplicidad de realizar un clustering con el algoritmo de k-medias para la caracterización de los días, es que se recomienda tener en cuenta esta herramienta estadística para análisis donde se tengan bases de datos más consolidadas. Ya que a pesar de su simpleza,

entrega una herramienta viable y de alta utilidad para el análisis de problemas ligados a la ingeniería de minas, esto al agrupar días en conglomerados con distintas productividades. Lo más destacable de esto, es que lo hace sobre la productividad instantánea, variable temporal que permitiría identificar ineficiencias a lo largo del día a través de la identificación de la correlación con variables no consideradas en este estudio por falta de bases de datos. Un ejemplo de lo anterior puede ser un análisis exhaustivo entre los distintos tipos de detenciones (programadas y no programadas) presentes y la productividad instantánea a lo largo del día. Los mismos datos extras en las detenciones servirían para realizar una calibración más completa sobre el modelo de simulación, ya que al agregar información sería posible que el modelo se comportara acorde a estas.

El uso de modelos de simulación permite probar políticas operacionales que son imposibles de probar directamente en el sistema real ya que los impactos económicos que se tiene al alterar la operación misma son muy grandes. Aprovechando esta ventaja es que se definen posibles escenarios de cambio y se mide cuantitativamente su impacto, teniendo en cuenta que es una simplificación de la realidad, pero que a pesar de ello logra emular esta con un alto grado de representatividad. Esto se respalda por la calibración hecha a través de la variable producción diaria y las variables asociadas a los componentes del tiempo de ciclo del equipo de transporte. Por otra parte, también se realiza un número de replicaciones que respaldan esta representatividad de forma estadística, ya que se tienen variaciones bajo el 2% llegada las 50 replicaciones hechas.

A través de la construcción de los nuevos escenarios integrando el cambio de política operacional de realizar el cambio con los camiones cargados, además de acercar la posición del estacionamiento junto al chancador, se logra relacionar estas dos nuevas variables con la productividad diaria del sistema. Finalmente se muestra teóricamente el beneficio operacional y económico de la variación de las dos estrategias.

Se tiene en consideración que la actual regla operacional de realizar los cambios de turnos solamente con los camiones descargados sigue una política de seguridad y simpleza en la operación. A pesar de esto, se considera necesario de medir el impacto de agregar la posibilidad de realizar los cambios de turno con los camiones cargados, ya que de esta forma se puede contrastar el beneficio que contraería implementar esta posibilidad, con todos los cambios asociados y necesarios para que se mantenga la seguridad necesaria para operadores y los mismos equipos.

Finalmente, se recomienda la implementación de los dos cambios que tienen resultados positivos en la operación, de manera conjunta (escenario combinado). Ya que así se logra el mayor aumento en la productividad diaria

y la mayor disminución de la duración de las detenciones del sistema en estudio, y en consecuencia el mayor aumento en los ingresos de la operación. Cabe destacar que aún falta medir los impactos directos en la operación que podrían causar estos cambios, un ejemplo de esto pueden ser los cambios asociados a la logística en los cambios de turnos, ya que se hace necesario agregar una nueva parada para los buses que realizan esta labor.

5. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS POR ORDEN DE APARICIÓN:

1. Ming- Xiang He, Jiu- Chuan Wei, Xin- Ming Lu and Bao-Xiang Huang, 2010. The Genetic Algorithm for Truck Dispatching Problems in Surface Mine. *Information Technology Journal*, 9: 710-714.
2. Ercelebi, S. G. and Bascetin, A. 2009. Optimization of shovel-truck system for surface mining. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 109: 433-439
3. Lizotte Y, Bonates E, 1987. Truck and shovel dispatching rules assessment using simulation. *Mining Science and Technology*. 5: 45-48
4. Moss, A. 2011. An Introduction to Block and Panel Caving. En: BMO Capital Markets 2011 Global Metals & Mining Conference. Hollywood, Florida. USA. BMO Capital Markets.
5. Minsky, M. L. 1965. Matter, Mind and Models. *Proc. International Federation of Information Processing Congress*. 1: 45-49.
6. Shannon R.E., 1988, "Simulación de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementación". Trillas, México.
7. W. David Kelton, Randall P. Sadowski, Nancy B. Swets. *Simulation with Arena*, Fifth Edition. McGraw-Hill.
8. Frawley, W. G., Piatetsky-Shapiro, G., and Matheus, C. J. 1992. Knowledge Discovery in Databases: An Overview. En: *AI Magazine* Volume 13 Number 3. 57-70.
9. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., and Smyth, P. 1996. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. En: *AI Magazine* Volume 17 Number 3. 37-54.
10. Neven Boric. 2009. Nuevo método de clustering basado en programación genética y teoría de la información. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
11. A. K. Jain, M. N. Murty, and P. J. Flynn, "Data clustering: a review," *ACM Computing Surveys*, vol. 31, no. 3, pp. 264-323, 1999.

12. J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," En: Proc. 5th Berkeley Symp. Mathematical Statist. Probability, 1967, pp. 281-297.
13. Wilhelm, S. 2013. Mejoramiento de la gestión de carga viva en acopio Los Colorados, Minera Escondida LTDA. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
14. Solis, R. 2013. Estrategias de aseguramiento de disponibilidad de palas de cable de Mina Radomiro Tomic. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
15. Jaramillo, P. 2006. Estrategia de mantenimiento en Vicepresidencia de Procesos. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
16. Askari-Nasab, H., Torkamani, E. 2013. Truck-shovel operation planning using discrete event simulation. En: 36th APCOM 2013. Porto Alegre, Brasil.
17. Cornejo, M., Cataldo, J.P. 2013. Integrated production capacity for the system crusher platform: Truck Fleet. En: MinePlanning 2013: 3er Seminario Internacional de Planificación Minera. Santiago, Chile.
18. Stéphane Alarie & Michel Gamache (2002) Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16:1, 59-76

6. ANEXOS

6.1. Detalle de las columnas de la base de datos inicial:

- Fecha.
- Turno.
- Cuadrilla.
- Camión.
- Tipo de Camión.
- Pala.
- Tipo de Pala.
- Material.
- Origen.
- Destino.
- Hora registro [h].
- Tiempo de [min]:
 - Fila en carguío.
 - Aculatamiento en carguío.
 - Carga.
 - Aculatamiento más descarga en chancado.
 - Fila en descarga.
 - Viaje de ida.
 - Viaje de vuelta.
 - Ciclo total.
- Distancia total [m].

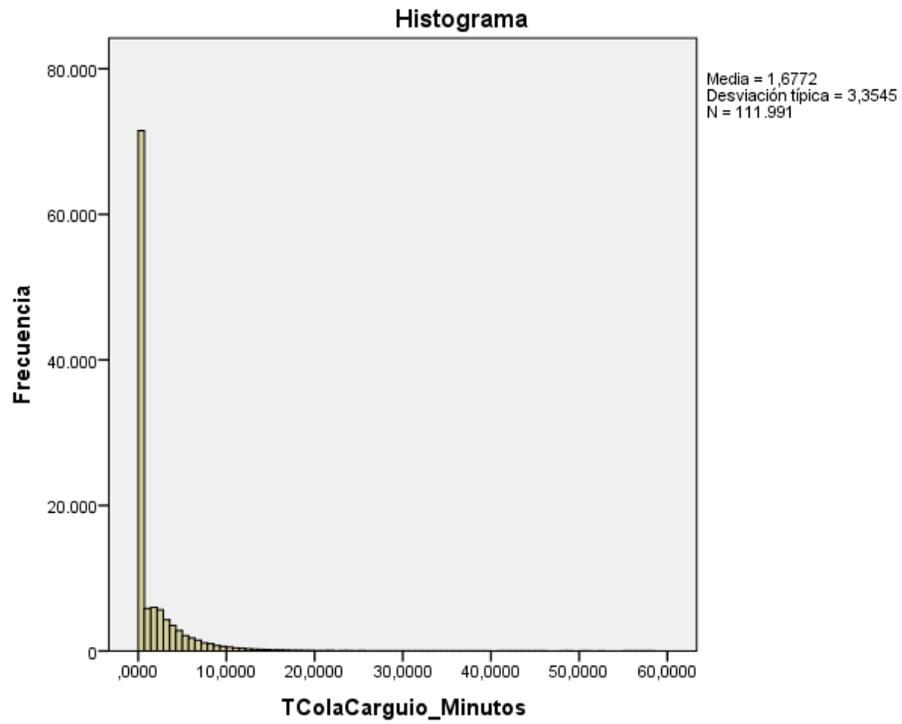


Gráfico 28: Histograma de tiempo de cola en carguío

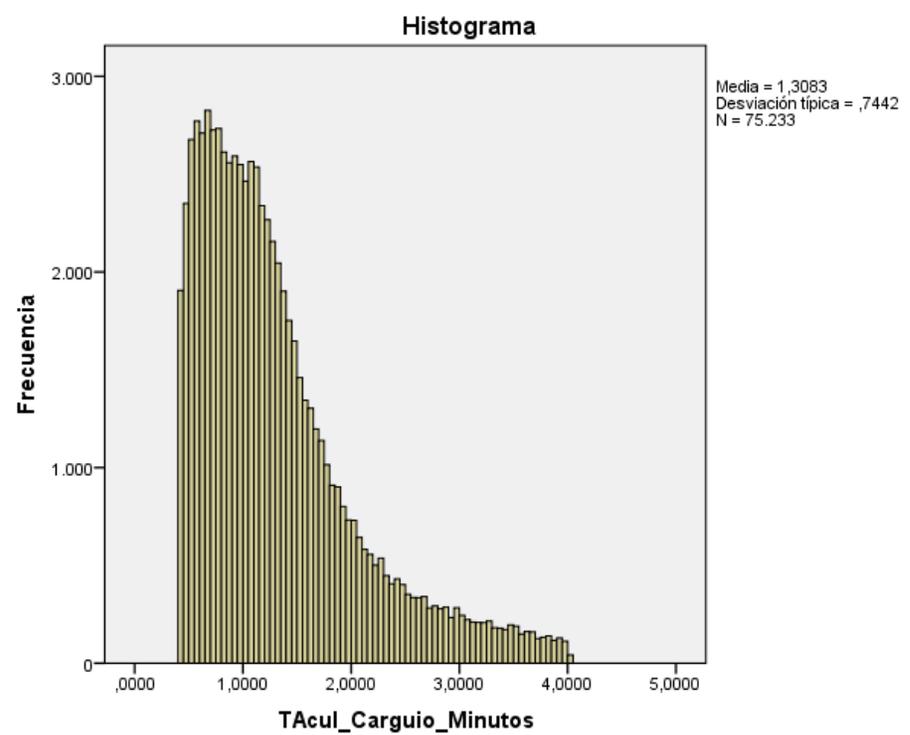


Gráfico 29: Histograma de tiempo de aculatamiento en carguío

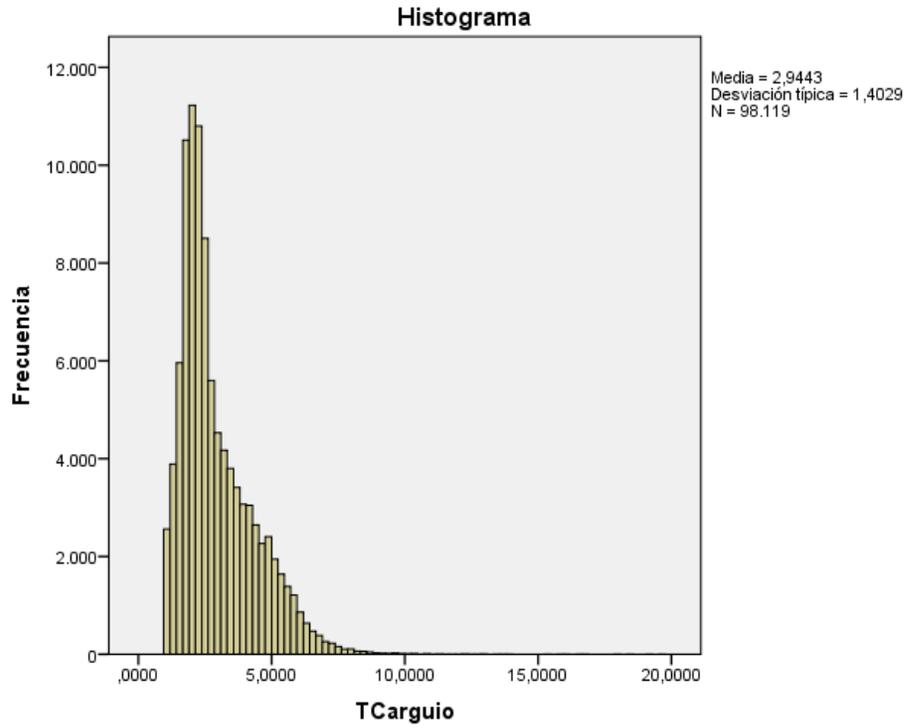


Gráfico 30: Histograma de tiempos de carguío

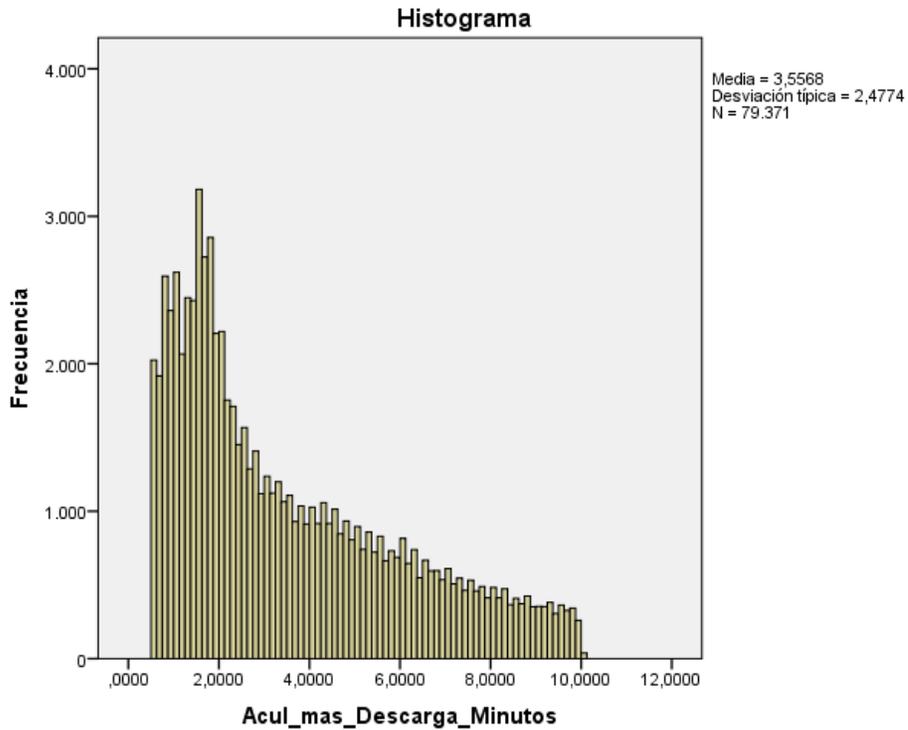


Gráfico 31: Histograma de tiempos de aculatamiento más descarga en chancado

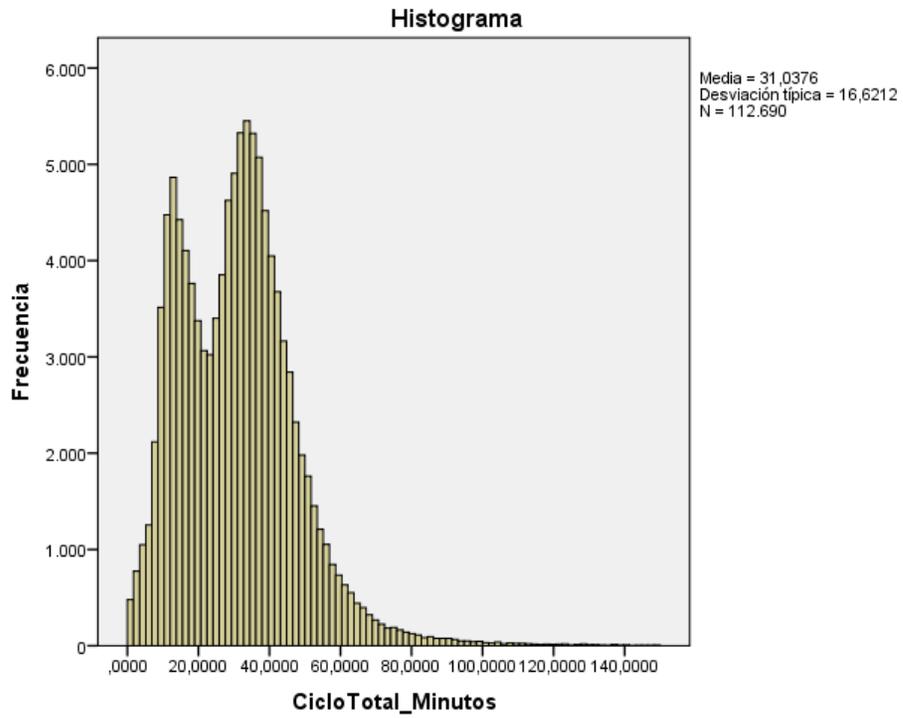


Gráfico 32: Histograma de tiempos de ciclos

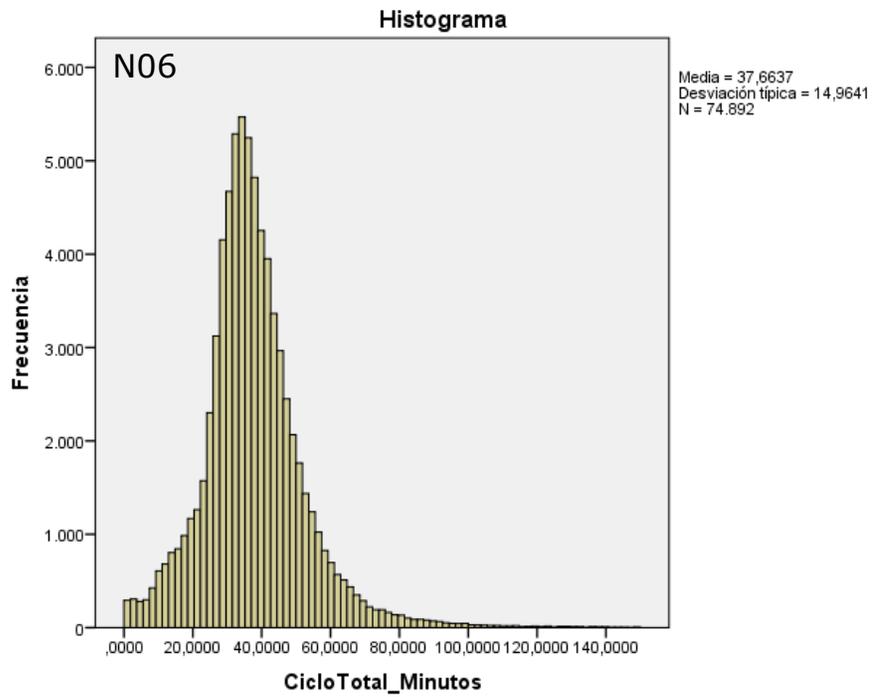


Gráfico 33: Histograma de tiempos de ciclo desde la fase N06

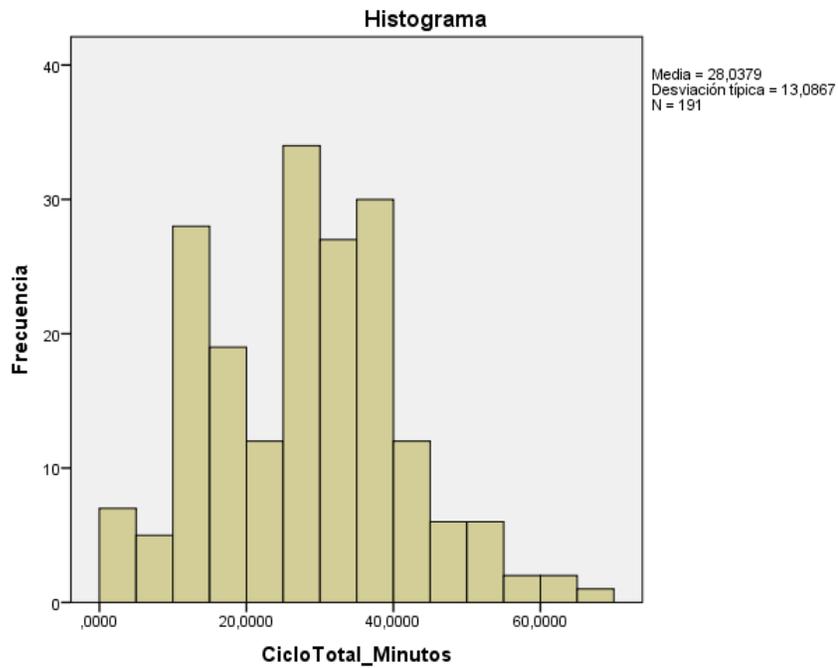


Gráfico 34: Histograma de tiempos de ciclo desde la fase N06

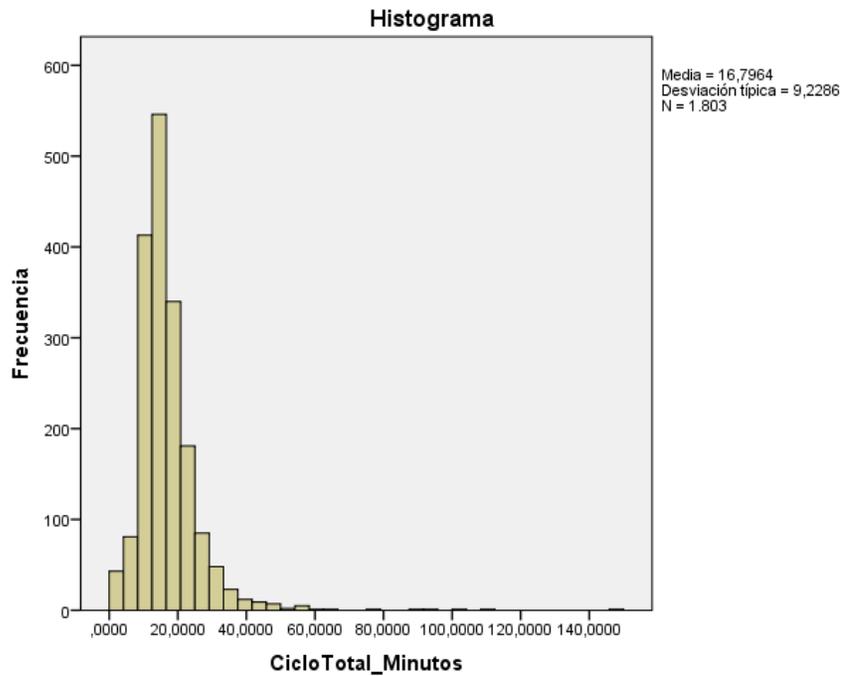


Gráfico 35: Histograma de tiempos de ciclo desde el stock SAL

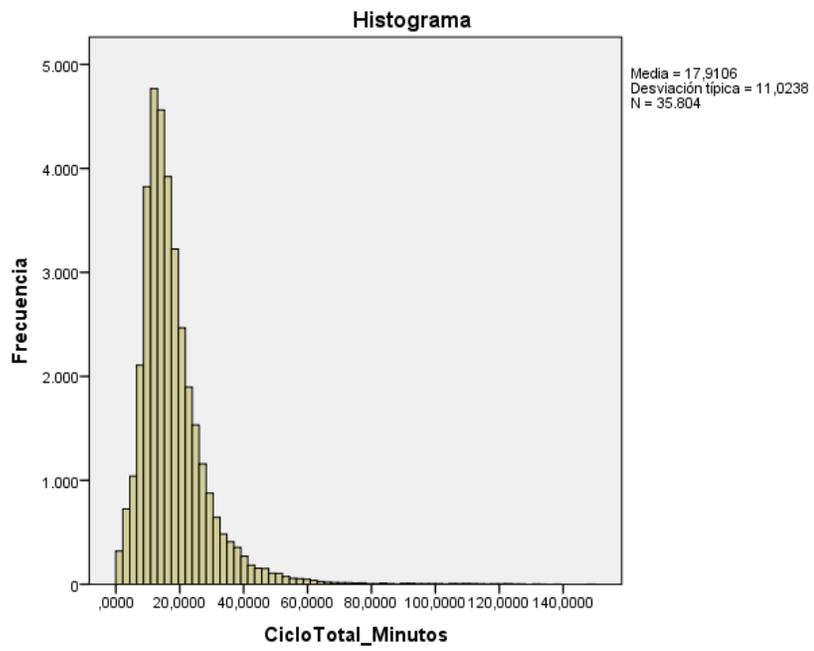


Gráfico 36: Histograma de tiempos de ciclo desde el stock SLM