



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

**IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES CRÍTICOS EN EL  
RENDIMIENTO DE CAMIONES MEDIANTE REDES BAYESIANAS.**

**LOS BRONCES, ANGLO AMERICAN S.A.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

**PAULA FERNANDA CALLEJAS PINILLA**

PROFESOR GUÍA:

**LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

**CRISTÓBAL MIMICA GODOY**

**ANDRÉS REYES GAETE**

SANTIAGO DE CHILE

2020

## **IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES CRÍTICOS EN EL RENDIMIENTO DE CAMIONES MEDIANTE REDES BAYESIANAS.**

Las bajas sostenidas en el precio del cobre hacen necesaria la optimización de procesos en la industria minera para reducir costos y aumentar su productividad. En minería a cielo abierto el acarreo de material mediante camiones constituye uno de los procesos de mayor costo debido al consumo de combustible, mantenciones, neumáticos, etc. Por lo tanto, para compensar los altos costos, el rendimiento de la flota de transporte medido en toneladas por hora debe ser siempre maximizada.

En este contexto de disminución de los costos, Los Bronces se ha propuesto aumentar sus niveles de productividad poniendo como meta ser la operación con la pala eléctrica más productiva de la corporación. Para ello, se ha propuesto un plan de mejoramiento de 5 años en el periodo 2018-2023. Si bien el centro de atención de este plan es la pala, se estableció como objetivo mejorar todos los procesos de la mina relacionados a una pala bench. Esto implica, por consiguiente, que uno de los procesos claves a mejorar es la productividad de la flota de camiones. En busca de mejorar este rendimiento de la flota en la mina operación Los Bronces, y entendiendo que las variables que impactan en el rendimiento no son totalmente independientes, se propone presentar la implementación de redes bayesianas para identificar los parámetros operacionales críticos que impactan en el rendimiento. La aplicación de redes bayesianas se ha utilizado en variados ámbitos y en otras industrias, pero nunca ha sido utilizada en la operación mina de la división Los Bronces.

En cuanto a la metodología aplicada, esta se divide en varias etapas. Primero se definen los parámetros operativos y el horizonte temporal (julio 2019), abogando por la representatividad de la operación en la mina Los Bronces. Luego se definen las variables más importantes del ciclo de transporte y se extrae la base de datos (BD), la que posteriormente se filtra con criterios de validez. Una vez construida la BD se realizaron estudios estadísticos clásicos mediante la obtención de la estadística descriptiva y la construcción de histogramas para ver el comportamiento de las variables y evaluar la robustez de los datos de entrada. Posteriormente, se construye la red bayesiana mediante evaluación de algoritmos de aprendizaje. Las potenciales soluciones se representan en grafos, siendo descartados aquellos que no cumplen con las condiciones iniciales de la BD. El grafo escogido corresponde a uno de tipo Hill-Climbing. Luego se eliminan aquellos arcos que: 1) no representen el comportamiento esperado en minería y 2) su correlación sea baja. Finalmente, se repite el mismo procedimiento para el mes de septiembre 2019 y la temporada de invierno 2019 (abril hasta septiembre).

De acuerdo con la metodología descrita, la aplicación de redes bayesianas demuestra que las variables que más afectan al rendimiento de manera inversa son el tiempo de viaje (-0.77) y la distancias (-0.71) con correlaciones altas y, con menor correlación, los tiempos fijos como los operativos no productivos (-0.17). En cuanto a las variables que más afectan al rendimiento de manera directa son las velocidades (0.17) y el factor de carga (0.16), pero no de la manera que se esperaba pues sus correlaciones son bajas. Este modelo es el paso siguiente a los árboles de valores, pues ahora conocemos las variables más influyentes y las más correlacionadas. Como parte de trabajos futuros se encuentra buscar la forma en que las variables se relacionan mediante estimaciones, teniendo en consideración que podrían existir variables que no estamos incluyendo en este modelo y además funciones que relacionen variables con el TPH y que sean invisibles a la correlación.

## Agradecimientos

Quisiera partir agradeciendo a mis padres, Marcela y Hugo, por su apoyo incondicional, por subirme el ánimo cuando lo necesitaba y por tener una inmensa fe en mí, y en especial a mis dos hermanos pequeños Florencia y Hugo, quiero que sepan que pueden contar conmigo y que siempre estaré para ustedes. A mis abuelas y abuelo por sus cariños y regalones, y a mis animales por transmitir alegría y paz.

Agradecer a Bruno por ser una persona incondicional para mí, por tener fe y confiar en mí desde el comienzo, gracias a tu paciencia infinita para explicarme pedagógicamente conceptos matemáticos que en mi vida pensé entender porque sin ti este trabajo no podría ser posible.

A mis amigas y amigos que hice en Bachillerato y la facultad de ingeniería en especial a las mineras Kathy, Javi y Coni por generar lazos tan fuertes y lindos de amistad. Por ser tan maravillosas personas, valientes, honestas y motivadas.

También agradecer a los miembros de la comisión, a Cristobal Mimica por darme la oportunidad de entrar a Los Bronces y por confiar en mí, a Luis Felipe Orellana, por guiarme en un comienzo y aconsejarme en todo momento, y a Andres Reyes por recibirme en el área de gestión mina con mucho entusiasmo y apoyarme con la confección del trabajo siempre con una mirada ambiciosa.

Y finalmente, quisiera agradecer a la compañía Anglo American y a su División los Bronces por darme la oportunidad de aprender y realizar mi trabajo de título en sus dependencias. Al área de gestión mina por darme desafíos y responsabilidades desde que me integré y por el grato recibimiento, a Nidia, Oscar, Ignacio, Rodrigo, Jorge y Don Nelson. Además, no puedo olvidar agradecer al área de servicios mina con quienes pasaba a diario (Germán, Aldo, Valerio y Ricardo), a Don Rene, Betsabe y a toda el área de dewatering .

## Carta de Compromiso Anglo American S.A

*La siguiente información que esta Memoria recoge y contiene respecto de las operaciones y actividades de Anglo American Chile Ltda. y/o de cualquiera de las divisiones mineras e industriales operativas, así como la integridad e interpretación de la información, los análisis y conclusiones derivadas de ella, solo corresponden a su autor y, en consecuencia son de exclusiva responsabilidad, por lo que no comprometen en forma alguna a Anglo American Chile Limitada, sus divisiones operativas o empresas propietaria, como sus ejecutivos, profesionales o técnicos. Anglo American Chile Ltda. únicamente ha colaborado con el autor en facilitarle acceso a sus instalaciones e información para la realización de esta tesis y no tiene opinión ni participación alguna en su contenido.*

# TABLA DE CONTENIDO

---

1	Introducción .....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.2.1	Objetivo General.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos .....	2
1.3	Alcances .....	2
1.4	Estructura del trabajo de título.....	3
2	Antecedentes .....	3
2.1	Anglo American Sur S.A .....	3
2.1.1	Modelo de Tiempo.....	3
2.1.2	Indicadores Clave de Desempeño (KPI) .....	4
2.1.3	Iniciativa P101 .....	7
2.1.4	División Los Bronces .....	7
3	Marco Teórico .....	18
3.1	Tiempo de Ciclo Sistema de Transporte .....	18
3.1.1	Plan de Gestión del Tránsito.....	19
3.2	Software Dispatch.....	23
3.2.1	Mejor Ruta (MR – Best Path).....	23
3.2.2	Programación Lineal (PL – Lineal Programming).....	23
3.2.3	Programación Dinámica (PD – Dynamic Programming).....	24
3.3	Software <i>R</i> y <i>RStudio</i> .....	24
3.4	Redes Bayesianas.....	26
3.4.1	Definición .....	26
3.4.2	Paquete de Redes Bayesianas – <i>bnlearn</i> .....	27
3.4.3	Algoritmos de Aprendizaje.....	28
3.4.4	Pruebas de independencia condicional .....	30
3.4.5	Puntuaciones de red ( <i>score</i> ).....	31
4	Metodología .....	32
4.1	Selección Horizonte Temporal .....	33
4.2	Construcción de la Base de Datos.....	34
4.3	Análisis de la BD sin modificar con Estadística Clásica .....	40

4.4	Definición de Filtros de la base de datos .....	45
4.5	Análisis de Base de datos filtrada .....	49
4.6	Construcción de Redes Bayesianas.....	54
4.7	Selección de grafos mediante descarte .....	56
4.8	Arcos del grafo escogido .....	56
4.9	Relación entre variables mediante correlaciones.....	57
5	Resultados .....	58
5.1	Resultados mes de julio 2019 .....	58
5.1.1	Aplicación de Algoritmos de Puntaje.....	58
5.1.2	Aplicación de Algoritmos de Restricción.....	61
5.1.3	Aplicación de Algoritmos Híbridos.....	67
5.1.4	Descarte de Algoritmos .....	70
6	Análisis y Discusión de resultados.....	73
6.1	Análisis de arcos grafo Hill-Climbing para mina Los Bronces .....	73
6.2	Análisis del grafo modificado mediante correlaciones .....	74
6.3	Validación Metodología.....	77
6.3.1	Resultados septiembre 2019.....	77
6.3.2	Resultados temporada invierno 2019 .....	80
7	Conclusiones y Recomendaciones .....	85
8	Bibliografía.....	90
9	Anexos.....	92
9.1	Elementos secundarios time model anglo American.....	92
9.2	Antecedentes Mina Los Bronces .....	93
9.3	Histogramas Base de datos sin filtrar julio .....	93
9.4	Histogramas base de datos filtrada Julio.....	97
9.5	Estadística descriptiva de Septiembre.....	101
9.6	Estadística descriptiva de invierno.....	102
9.7	Grafos de Septiembre e invierno mediante hill-climbing.....	103
9.8	Tendencia tiempos de cola en Chancado .....	105
9.9	Árbol de valor de la flota de transporte variando distancias mes de julio .....	106
9.10	Código en <i>RStudio</i> para la extracción de grafos de julio.....	106

## Índice de Tablas

Tabla 1: Descripción del complejo de brechas Los Bronces.....	13
Tabla 2: Detalle equipos principales mina Los Bronces .....	15
Tabla 3: Detalle de los equipos auxiliares en la mina Los Bronces .....	15
Tabla 4: Metros de distancia mínima entre equipos según la condición del piso. ....	22
Tabla 5: Estadísticas básicas de los tiempos fijos y el factor de carga de la BD sin filtrar.....	40
Tabla 6: Estadísticas básicas de las distancias y velocidades de la base de datos sin filtrar ....	40
Tabla 7: Estadísticas básicas de los T de viaje, ciclo, fijos y el rendimiento de la BD sin filtrar. .....	41
Tabla 8: Filtros aplicados por el despacho en la mina Los Bronces.....	46
Tabla 9: Filtros propios aplicados a la base de datos. ....	46
Tabla 10: Filtros aplicados por LB luego de aplicar procedimiento de recuperación de data. 48	
Tabla 11: Filtros propios luego de aplicar procedimiento de recuperación de data .....	48
Tabla 12: Estadísticas básicas de los tiempos fijos y el factor de carga de la BD filtrada. ....	49
Tabla 13: Estadísticas básicas de las distancias y velocidades de la base de datos filtrada. ....	49
Tabla 14: Estadísticas básicas de los tiempos de viajes, ciclo, fijos y rendimiento de la BD filtrada.....	50
Tabla 15: Resumen de los algoritmos aplicados. ....	70
Tabla 16: Padres del Rendimiento según el algoritmo aplicado. ....	71
Tabla 17: Hijos del Rendimiento según el algoritmo aplicado. ....	71
Tabla 18: Score de los algoritmos de puntaje e híbridos.....	72
Tabla 19: Arcos erróneos en el grafo Hill Climbing julio.....	73
Tabla 20: Score de algoritmo Hill-Climbing Modificado julio.....	73
Tabla 21: Correlaciones de todos los arcos del grafo Julio 2019.....	76
Tabla 22: Porcentaje de datos eliminados según filtros de los bronces en BD de septiembre. 77	
Tabla 23: Porcentaje de datos eliminados según filtros propios en base de datos de septiembre. .....	77
Tabla 24: Arcos erróneos en el grafo Hill Climbing septiembre.....	78
Tabla 25: Score de algoritmo Hill-Climbing Modificado septiembre.....	78
Tabla 26: Porcentaje de datos eliminados según filtros de los bronces en BD de invierno. ....	80
Tabla 27: Porcentaje de datos eliminados según filtros propios en base de datos de invierno. 81	
Tabla 28: Arcos erróneos en el grafo Hill Climbing invierno. ....	81
Tabla 29: Score de algoritmo Hill-Climbing Modificado invierno. ....	82
Tabla 30: Correlaciones julio, septiembre e invierno 2019.....	83

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Estructura de modelo de tiempos de Anglo American. (Anglo American Sur, 2015).....	3
Ilustración 2: Tiempos operativos no productivos de camión en el mes de Julio 2019. (Anglo American, 2019).....	6

Ilustración 3: Derrame en pista forma una cola de 7 camiones (OPNP). Fotografía propia. ....	7
Ilustración 4: Ubicación operación minera Los Bronces. (Anglo American S.A., 2019) .....	9
Ilustración 5: Fases en extracción, botaderos y stocks de la mina LB (Pastrán, 2019). .....	10
Ilustración 6: Flowsheet de los dos procesos de extracción del cobre. Elaboración propia. ....	11
Ilustración 7: Diagrama de las plantas de la operación Los Bronces. (Anglo American S.A., 2019).....	12
Ilustración 8: Geología de la mina Los Bronces. (Abarzua, 2014) .....	14
Ilustración 9: Modelo de Operaciones Anglo American ®. (Anglo American S.A., 2019) ....	17
Ilustración 10: Ciclo de los camiones dentro de la mina Los Bronces. Elaboración propia. ...	18
Ilustración 11: Sección tipo camino minero interior fase. (Gerencia Mina, 2019) .....	20
Ilustración 12: Sector de carguío pala 10 en fase infiernillo 5. Fotografía propia. ....	21
Ilustración 13: Frente de avance de los botaderos en mina Los Bronces. (Gerencia Mina, 2019).....	21
Ilustración 14: Sector de vaciado en botadero. Fotografía propia. ....	22
Ilustración 15: Interfaz del software RStudio y sus cuatro paneles de trabajo. Elaboración propia. ....	25
Ilustración 16: Ejemplo de red bayesiana aplicada en biología. Fuente: Bayes Server .....	26
Ilustración 17: Metodología de trabajo. Elaboración propia. ....	33
Ilustración 18: Tendencia del Clima Adverso 2019 .....	33
Ilustración 19: Esquema de flujos de información para la construcción de la BD.....	38
Ilustración 20: Estructura de la BD de ciclo de transporte de camiones julio. Microsoft Excel® versión 1902. ....	39
Ilustración 21: Recuperación de data mediante el promedio de la variable. ....	47
Ilustración 22: Base de datos en Microsoft Excel® versión 1902.....	55
Ilustración 23: Representación gráfica de la correlación de variables. ....	57
Ilustración 24: Características del algoritmo de Puntaje Hill-Climbing.....	58
Ilustración 25: Grafo del algoritmo de Puntaje Hill-Climbing.....	59
Ilustración 26: Características del algoritmo de Puntaje Tabu Search .....	60
Ilustración 27: Grafo del algoritmo de Puntaje Tabu Search .....	60
Ilustración 28: Características del algoritmo de restricción Grow-Shrink .....	61
Ilustración 29: Grafo del algoritmo de Restricción Grow-Shrink .....	61
Ilustración 30: Características del algoritmo de restricción IAMB .....	62
Ilustración 31: Grafo del algoritmo de Restricción Incremental Association .....	62
Ilustración 32: Características del algoritmo de restricción Fast-IAMB .....	63
Ilustración 33: Grafo del algoritmo de Restricción Fast Incremental Association.....	63
Ilustración 34: Características del algoritmo de restricción inter-IAMB .....	64
Ilustración 35: Grafo del algoritmo de Restricción Interleaved Incremental Association .....	64
Ilustración 36: Características del algoritmo de restricción IAMB-FDR.....	65
Ilustración 37: Grafo del algoritmo de Restricción Incremental Association with FDR .....	65
Ilustración 38: Características del algoritmo de restricción PC Stable .....	66
Ilustración 39: Grafo del algoritmo de Restricción PC Stable .....	66
Ilustración 40: Características del algoritmo Híbrido Max-Min Hill Climbing.....	67
Ilustración 41: Grafo del algoritmo de Híbrido Max-Min Hill Climbing .....	67
Ilustración 42: Características del algoritmo híbrido Restricted Maximization.....	68
Ilustración 43: Grafo del algoritmo de Híbrido Restricted Maximization .....	68

Ilustración 44: Características del algoritmo híbrido Hybrid HPC .....	69
Ilustración 45: Grafo del algoritmo Híbrido Hybrid HPC.....	69
Ilustración 46: Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing Modificado Julio .....	74
Ilustración 47: Grafo de algoritmo Hill-Climbing Modificado con correlaciones, julio.....	75
Ilustración 48: Grafo de algoritmo Hill-Climbing Modificado con correlaciones, septiembre	80
Ilustración 49: Grafo de algoritmo Hill-Climbing Modificado con correlaciones, invierno....	83
Ilustración 50: Resumen variables que impactan al rendimiento en mayor y menor proporción. .....	87
Ilustración 51: Árbol de valor de flota de transporte en el mes de julio.....	87
Ilustración 52: Árbol de valor de flota de transporte en el mes de Julio variando el factor de carga.....	88
Ilustración 53: Explicación de correlación baja del factor de carga y el rendimiento.....	88

## Índice de Gráficos

Gráfico 1: Histograma tiempos de acuatamiento datos sin filtrar. ....	41
Gráfico 2: Histograma tiempos de descarga de camiones datos sin filtrar.....	42
Gráfico 3: Histograma de factor de carga de camiones datos sin filtrar.....	42
Gráfico 4: Histograma tiempos de ciclo camiones datos sin filtrar.....	43
Gráfico 5: Histograma distancia total recorrida por camiones datos sin filtrar.....	43
Gráfico 6: Histograma tiempos de viaje total de camiones datos sin filtrar.....	44
Gráfico 7: Histograma velocidad promedio de camiones datos sin filtrar. ....	44
Gráfico 8: Histograma rendimiento de camiones datos sin filtrar.....	45
Gráfico 9: Histograma tiempos de acuatamiento de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.....	50
Gráfico 10: Histograma tiempos de descarga de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.....	51
Gráfico 11: Histograma de factores de carga de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.....	51
Gráfico 12: Histograma tiempos de ciclo de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar. ....	52
Gráfico 13: Histograma distancia total recorrida, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.....	52
Gráfico 14: Histograma tiempos de viaje total, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.....	53
Gráfico 15: Histograma velocidad promedio de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.....	53
Gráfico 16: Histograma rendimiento de camiones, datos filtrados.....	54

## Índice de Ecuación

Ecuación 1: Tiempo controlable (TC) modelo de tiempos Anglo American.....	4
Ecuación 2: Utilización General (UG) modelo de tiempos Anglo American .....	5

Ecuación 3: Efectividad general equipos (OEE) modelo de tiempos Anglo American .....	5
Ecuación 4: Disponibilidad Física (DF) modelo de tiempos Anglo American .....	5
Ecuación 5: Uso de Disponibilidad Física (UDF) modelo de tiempos Anglo American .....	5
Ecuación 6: Rendimiento Operativo (RO) modelo de tiempos Anglo American .....	6
Ecuación 7: Cálculo de tiempos fijos de camiones .....	19
Ecuación 8: Cálculo de tiempo de viaje de camiones .....	19
Ecuación 9: Cálculo de tiempo de ciclo de camiones .....	19
Ecuación 10: Cálculo del Rendimiento operativo de camiones .....	19
Ecuación 11: Cálculo de Velocidad Camión Vacío .....	37
Ecuación 12: Cálculo de Velocidad Camión Lleno.....	37
Ecuación 13: Cálculo de Velocidad Camión Promedio .....	37

## Índice de Anexos

Anexo 1: Detalle de los elementos secundarios del Time Model Anglo American .....	92
Anexo 2: Cálculo de los principales KPI de operaciones según Time Model AA.....	92
Anexo 3: Flowsheet plantas Los bronces y Confluencia.....	93
Anexo 4: Histograma de tiempos de carga base de datos sin filtrar.....	93
Anexo 5:Histograma de tiempos de cola en pala base de datos sin filtrar .....	94
Anexo 6:Histograma de tiempos de cola en descarga base de datos sin filtrar .....	94
Anexo 7:Histograma de tiempos de OPNP base de datos sin filtrar .....	94
Anexo 8:Histograma de tiempos fijos base de datos sin filtrar .....	95
Anexo 9:Histograma de velocidades vacío base de datos sin filtrar .....	95
Anexo 10:Histograma de tiempo de viaje vacío base de datos sin filtrar.....	95
Anexo 11:Histograma de distancias recorridas vacío base de datos sin filtrar .....	96
Anexo 12:Histograma de velocidades lleno base de datos sin filtrar .....	96
Anexo 13:Histograma de tiempo de viaje lleno base de datos sin filtrar .....	96
Anexo 14:Histograma de distancia recorrida lleno base de datos sin filtrar .....	97
Anexo 15:Histograma de tiempos de carga base de datos filtrada .....	97
Anexo 16:Histograma de tiempos de cola en pala base de datos filtrada.....	98
Anexo 17:Histograma de tiempos de cola en descarga base de datos filtrada. ....	98
Anexo 18:Histograma de tiempos OPNP base de datos filtrada. ....	98
Anexo 19:Histograma de tiempos fijos base de datos filtrada. ....	99
Anexo 20:Histograma de velocidad vacío base de datos filtrada. ....	99
Anexo 21:Histograma de tiempos de viaje vacío base de datos filtrada. ....	99
Anexo 22:Histograma de distancias recorridas vacío base de datos filtrada.....	100
Anexo 23:Histograma de velocidad lleno base de datos filtrada.....	100
Anexo 24:Histograma de tiempos de viaje lleno base de datos filtrada. ....	100
Anexo 25: Histograma de distancias recorridas lleno base de datos filtrada. ....	101
Anexo 26: Tabla resumen de la estadística descriptiva de septiembre (1).....	101
Anexo 27:Tabla resumen de la estadística descriptiva de septiembre (2).....	101
Anexo 28: Tabla resumen de la estadística descriptiva de septiembre (3).....	102

Anexo 29: Tabla resumen de la estadística descriptiva de invierno (1) .....	102
Anexo 30: Tabla resumen de la estadística descriptiva de invierno (2) .....	102
Anexo 31: Tabla resumen de la estadística descriptiva de invierno (3) .....	103
Anexo 32: Características del algoritmo de puntaje Hill-Climbing mes de septiembre .....	103
Anexo 33: Grafo de algoritmo de puntaje Hill-Climbing mes de septiembre.....	104
Anexo 34: Características del algoritmo de puntaje Hill-Climbing invierno.....	104
Anexo 35: Grafo de algoritmo de puntaje Hill-Climbing invierno. ....	105
Anexo 36: Tendencia de tiempos de cola en Chancado. Elaboración propia.....	105
Anexo 37: Árbol de valor de la flota de transporte en el mes de julio variando distancias. ..	106

# 1 INTRODUCCIÓN

---

La industria minera del cobre a nivel mundial está experimentando bajas sostenidas del precio del cobre, lo que hace necesaria la optimización de los procesos para reducir sus costos y aumentar su productividad. En minería a cielo abierto, el transporte de mineral mediante camiones es un proceso costoso que posee varias oportunidades de optimización.

Son relevantes en la estructura de costos de la operación de camiones el consumo de combustible, instalación y reparaciones de neumáticos, mantenciones, mano de obra, entre otros. En particular, en la mina Los Bronces también afecta la diversidad climática y geográfica ya que los camiones deben estar preparados para operar en condiciones de alta montaña mediante la utilización de cadenas para nieve que elevan aún más los costos. Por lo que los rendimientos de la flota de transporte de extracción medido en toneladas por hora operativa<sup>1</sup> (t/h) deben ser lo más altas posibles para así compensar los altos costos de operación (\$/t o \$/h).

En busca de mejorar este rendimiento de camiones en la mina Los Bronces, en este trabajo se presenta la implementación de redes bayesianas para identificar los parámetros operacionales críticos que impactan en el rendimiento de camiones de forma mensual a través de la extracción de bases de datos de ciclos de camiones.

## 1.1 MOTIVACIÓN

La gran motivación de la mina Los Bronces es ser una operación bench, en primera instancia contando con la pala eléctrica más productiva a nivel mundial. Se ha realizado un benchmark mundial donde una de las mejores palas eléctricas posee un movimiento anual de 45.4 Mt, por lo que Anglo American desea replicar lo que realiza dicha pala y superar los 46 millones de toneladas por año (Gerencia Mina, Marzo 2019). Para ello, se ha propuesto un plan de 5 años comenzando desde el 2018 al 2023, y esto conlleva a mejorar en todo aspecto de la mina, incluyendo el rendimiento de camiones.

Es por esto que esta memoria además de ayudar al plan de la pala y mejorar el rendimiento de camiones, busca identificar otros problemas relacionados a la operación, por ejemplo, mejorar aspectos relacionados al diseño de la mina, en particular los caminos, ya que se pueden recomendar nuevas rutas. Otros ejemplos como mejoras en maniobras de acuatamiento de camiones, tiempos de cola en chancados, minimizar los tiempos operativos no productivos, los derrames de camiones que impactan en el resto de la flota que se traslada por la ruta afectada, entre otros.

A largo plazo de la investigación, y si la estrategia aquí presentada es exitosa, se busca replicar todas las mejoras implementadas a otras palas eléctricas de la mina y de esta manera aumentar el movimiento de la mina.

---

<sup>1</sup> Modelo de tiempo global de Anglo American (Anglo American Sur, 2015).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo General**

Obtener la correlación parcial entre las variables que afectan el rendimiento de la flota de transporte a través de la aplicación de redes bayesianas a la data real de la operación de la mina Los Bronces en un periodo determinado de tiempo.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Entender la configuración del árbol de valor de la flota de transporte que posee Anglo American.
- Definir cuáles son las variables más importantes en un ciclo de camión que impactan el rendimiento.
- Crear base de datos con los viajes de camiones en un periodo de tiempo.
- Analizar variables de la base de datos que afecten el rendimiento con estadística clásica.
- Establecer un protocolo o criterios de validez a los datos adquiridos.
- Identificar algoritmos de aprendizaje que mejor representen la situación actual de la mina mediante una metodología de descarte de algoritmos.
- Generar el modelo de redes bayesianas con la data de la mina en el software RStudio.
- Analizar los grafos obtenidos añadiendo colores según su condición de proporcionalidad y correlaciones.
- Validar el modelo construido repitiendo la metodología de construcción de base de dato y de descarte de grafos a otros meses y extendiendo el periodo de estudio.

## **1.3 ALCANCES**

Los alcances de esta memoria de título se enlistan a continuación:

- Este modelo es aplicado a la mina a cielo abierto Los Bronces perteneciente a Anglo American S.A.
- La mina posee diversidad climática y geográfica por lo que los camiones están preparados para alta montaña (uso de cadenas). Esto podría influir en los grafos cuya fecha sea en invierno.
- La metodología se aplica a una base de datos del mes de Julio de 2019.
- La mina posee tres tipos de flotas de camiones diferentes, sin embargo, 56 de 69 camiones en total (más del 80% de la flota) corresponden a los Komatsu 930E, por lo tanto, serán la flota por estudiar. Las otras dos flotas dejaron de transportar material en agosto 2019 y se encuentran en reserva.
- La base de datos extraída considera todas las fases de la mina y todas las palas, es decir, todos los orígenes del camión, como también considera todos los destinos. No sería raro encontrar ciclos cortos de remanejos que entreguen rendimientos altos de camiones.

## 1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TÍTULO

A continuación se presenta la estructura del trabajo de título desglosado en capítulos:

- En el capítulo 1 de Introducción presenta una introducción general, motivación, los objetivos y los alcances del presente trabajo de título.
- El capítulo 2 de Antecedentes muestra una breve investigación de Anglo American y en particular de la división Los Bronces.
- En el capítulo 3 se presenta el Marco Teórico necesario para la correcta comprensión del trabajo.
- En el capítulo 4 de Metodología se muestran los pasos a seguir para la obtención de resultados.
- En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de los algoritmos para los meses seleccionados.
- Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 ANGLO AMERICAN SUR S.A

#### 2.1.1 Modelo de Tiempo

La unidad de Anglo American Cobre posee un modelo de tiempos que permite establecer un estándar para la medición del desempeño de los equipos de sus operaciones con el fin de agregar valor en la interpretación de indicadores productivos.

A partir del 1 de enero de 2015 comenzó a regir el modelo de tiempo que se muestra en la ilustración 1 en todas las operaciones de la Unidad de Negocios de Cobre, incluyendo mina Los Bronces (Anglo American Sur, 2015).

Tiempo total calendario (T000)										
Tiempo controlable (T100)									Tiempo no controlable (N000)	
Tiempo físicamente disponible (T200)					Tiempo no disponible (D000)				Eventos no controlables (N200)	No programado para producir (N100)
Tiempo operativo (T300)		Tiempo perdido (L000)			Detención operacional programada (D400)	Detención operacional no programada (D300)	Mantenimiento programada (D200)	Mantenimiento no programada (D100)		
Operación efectiva/primaria (P200)	Operación no productiva/secundaria (P100)	Demora (L300)	Reserva (L200)	Consecuencia (L100)						

Ilustración 1: Estructura de modelo de tiempos de Anglo American. (Anglo American Sur, 2015)

Se dividen en elementos primarios o estados de tiempos, en elementos secundarios o categorías y en elementos terciarios o razones. Los elementos primarios son agrupaciones de elementos secundarios y se describen a continuación, mientras que los elementos secundarios se describen en los Anexos 9.1. En cuanto a los elementos terciarios estos son la segmentación de los elementos secundarios y logran el máximo nivel de detalle de la distribución del tiempo de los equipos.

- **Tiempo Total Calendario (T000):** Es el total potencial de horas disponibles.
  - Anualizado =  $24 \times 365 = 8760$  horas.
  - Mensual =  $24 \times 31 = 744$  horas.
  - Semanal =  $24 \times 7 = 168$  horas.
- **Tiempo Controlable (T100):** Es el tiempo atribuible a cualquier factor controlable por la operación.
- **Tiempo No Controlable (N000):** Es el tiempo en que los equipos no están en condiciones de agregar valor por factores fuera del alcance de gestión de la operación.
- **Tiempo Físicamente Disponible (T200):** Tiempo en que el equipo se encuentra mecánica y operacionalmente disponible para cumplir su función de diseño.
- **Tiempo No Disponible (D000):** Tiempo en que el equipo no se encuentra inmediatamente disponible para la producción. También comúnmente conocido como Tiempo Fuera de Servicio.
- **Tiempo Operativo (T300):** Tiempo en que el equipo se encuentra física y mecánicamente disponible para realizar su función de diseño y está siendo utilizado para alguna tarea, ya sea directa o indirectamente relacionada con la producción.
- **Tiempo Perdido (L000):** Tiempo en que el equipo se encuentra física y mecánicamente disponible para realizar su función de diseño, pero no está siendo utilizado.

## 2.1.2 Indicadores Clave de Desempeño (KPI)

### 2.1.2.1 Indicadores Estratégicos

Son aquellos que facilitan la definición de metas y objetivos del activo físico, y permiten visualizar de manera estratégica las oportunidades de maximizar el potencial del activo físico. Una gestión eficaz de estos indicadores entrega a la planificación metas claras, aumentando la agilidad y precisión del proceso siguiente, que es la planificación del equipo.

- **Tiempo controlable (TC):** Indica el porcentaje del tiempo total calendario (T000) del cual dispone la operación.

*Ecuación 1: Tiempo controlable (TC) modelo de tiempos Anglo American*

$$\text{Tiempo Controlable (TC)} = \frac{\text{Tiempo Controlable}}{\text{Tiempo Calendario}} [\%] \text{ ó } \frac{T100}{T000}$$

- **Utilización General (UG):** Indica el porcentaje de tiempo total calendario en que el equipo opera de forma efectiva/primaria.

*Ecuación 2: Utilización General (UG) modelo de tiempos Anglo American*

$$\text{Utilización General (UG)} = \frac{\text{Tiempo Operación Efectiva}}{\text{Tiempo Calendario}} [\%] \text{ ó } \frac{P200}{T000}$$

- **Efectividad general de los equipos (OEE):** Indica el porcentaje de eficiencia productiva de un equipo o proceso, involucrando indicadores de utilización, rendimiento y calidad (definida por cada unidad productiva).

*Ecuación 3: Efectividad general equipos (OEE) modelo de tiempos Anglo American*

$$\text{Efectividad general} = \text{UG} \times \frac{\text{Producción Real}}{\text{Producción Objetivo}} \times \frac{\text{Calidad Real}}{\text{Calidad Objetivo}} [\%]$$

### 2.1.2.2 Indicadores Tácticos

Son aquellos que están dirigidos a hacer control y seguimiento a la planificación del activo físico. De los 5 indicadores tácticos, 3 corresponden a la Gerencia de Mantenimiento (Anexo 9.1) y 2 a la Gerencia Mina. Estos últimos se definen a continuación.

- **Disponibilidad Física (DF):** Indica el porcentaje del tiempo controlable en que el equipo se encuentra en condiciones inmediatas para realizar su función de diseño.

*Ecuación 4: Disponibilidad Física (DF) modelo de tiempos Anglo American*

$$\text{Disponibilidad Física (DF)} = \frac{\text{Tiempo Físicamente Disponible}}{\text{Tiempo Controlable}} [\%] \text{ ó } \frac{T200}{T100}$$

- **Uso de Disponibilidad Física (UDF):** Indica que porcentaje del tiempo físicamente disponible el equipo se encuentra operativo.

*Ecuación 5: Uso de Disponibilidad Física (UDF) modelo de tiempos Anglo American*

$$\text{Uso de Disponibilidad Física} = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Físicamente Disponible}} [\%] \text{ ó } \frac{T300}{T200}$$

### 2.1.2.3 Indicadores Operativos

Son aquellos que están dirigidos a monitorear la eficiencia del activo físico y representan la cantidad y calidad del tiempo en que el activo ejecutó las labores para los cuales está programado. Los indicadores Operativos se detallan en la sección de anexos 9.1. Sin embargo, es importante mencionar el rendimiento operativo que es la variable principal para estudiar.

- **Rendimiento Operativo (RO):** Indica el rendimiento medido en unidades de producción sobre el tiempo en que el equipo se encuentra operativo.

$$\text{Rendimiento Operativo (RO)} = \frac{\text{Producción (metros o toneladas)}}{\text{Tiempo Operativo}} \left[ \frac{u}{hr} \right] \text{ ó } \frac{U}{T300}$$

Es importante mencionar que el T300 utilizado en el rendimiento corresponde a el tiempo operativo, dicho tiempo es la suma del P200 y el P100, es decir, la suma de la operación efectiva y la operación no productiva, respectivamente. La operación efectiva es el tiempo en el cual los equipos están siendo utilizados para una tarea directamente relacionada con la producción y cumpliendo su función de diseño, mientras que la operación no productiva es el tiempo en el cual los equipos están siendo utilizados para una tarea directa o indirectamente relacionada con la producción, pero no cumpliendo con su función de diseño.

Los tiempos operativos no productivos (OPNP) caen en la categoría de la operación no productiva (P100). Los OPNP corresponden a tiempos en los que el camión se encuentra operativo, pero no cumpliendo su función de diseño. En la ilustración 2 se muestran algunos ejemplos y su impacto en horas pérdidas en el mes de Julio de 2019. Además, se muestra en la ilustración 3 un ejemplo de tiempo OPNP asociado a un derrame en pista.

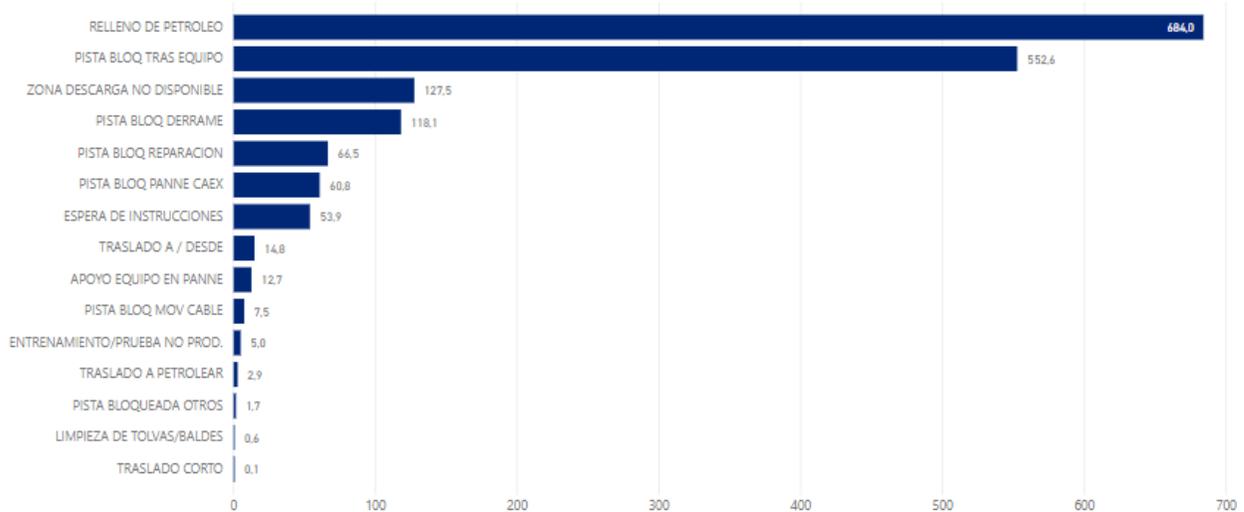


Ilustración 2: Tiempos operativos no productivos de camión en el mes de Julio 2019. (Anglo American, 2019)



*Ilustración 3: Derrame en pista forma una cola de 7 camiones (OPNP). Fotografía propia.*

### **2.1.3 Iniciativa P101**

El proyecto P101 es una transformación a la forma actual de trabajar, buscando la eficiencia de los procesos y aumentando la productividad de la operación, con el fin de enfrentar los desafíos del yacimiento y del mercado. El desafío específico en la mina Los Bronces es aumentar la productividad al máximo. Así se busca que para el año 2023, la operación cuente con al menos una pala eléctrica que entregue un movimiento anual de 46 Mt. Para lograr este aumento de movimiento mina es importante que el sistema de transporte también se comporte como un proceso eficiente y aumente su rendimiento de acuerdo con las demandas de la pala.

Este cambio hacia la excelencia operacional comenzó en el año 2018, logrando alcanzar el récord de 31 millones de toneladas cargadas con la pala eléctrica 10, lo que la ubicó en el quinto lugar de pala más productiva a nivel mundial dentro de Anglo American. El 2019, la meta a alcanzar es lograr un movimiento mayor o igual a los 36 Mt y el equipo escogido para el desafío es la pala eléctrica 11. Para cumplir este objetivo los camiones deben aumentar considerablemente su rendimiento con respecto a los actuales registrados.

Los principales cambios requeridos para lograr llegar a la meta del 2019 son (Gerencia Mina, Marzo 2019):

- Carga de camiones con solo 3 pases.
- Factor de llenado de balde óptimo [100 ton mínimo]
- Práctica única de excavación

### **2.1.4 División Los Bronces**

#### **2.1.4.1 Historia Operación Los Bronces**

Los Bronces está presente hace 150 años en la alta montaña de Lo Barnechea, en la Región Metropolitana. El yacimiento fue descubierto en 1867 por tres inquilinos del fundo Lo

Barnechea quienes vieron por primera vez los brillantes afloramientos de mineral sobresalir entre la nieve. Cuenta la historia que el nombre “Los Bronces” se debe al brillo de tonos dorados que iluminaba el lugar donde se encontraba el mineral hace 150 años (Anglo American Chile, 2019)

Desde su descubrimiento hasta el 1920 aproximadamente, se explotaron de forma rudimentaria varios sectores de minerales de alta ley de cobre, entre 10 a 20% de ley de cobre, los cuales eran enviados a fundición directa. En esa época se construyó la primera planta de flotación con una capacidad de 500 [t/d], la cual trataba minerales de ley 45% cobre, en el que se transportaba por medio de andariveles (Flores, 1991).

En 1916 se fundó La Compañía Minera Disputada de Las Condes S.A y en sus comienzos solo fue propietaria de una porción del yacimiento “Los Bronces”. Posteriormente adquirió el dominio total de este yacimiento (Aranda, 2017). Luego en el año 1952, la Compañía fue adquirida por la firma francesa “Empresa Minera y Metalúrgica de Peñarroya”. Dicha compañía en 1958 adquirió la mina “El Soldado”, la planta “El Cobre” y la fundición “Chagres”.

En 1972, producto de la nacionalización del cobre por parte del estado de Chile, Peñarroya vendió sus acciones al estado, pasando a estar bajo el control de ENAMI (Empresa Nacional de Minería). Esto se mantuvo hasta febrero de 1978, cuando ENAMI licitó su participación mayoritaria en la empresa, adquiriéndola “EXXON Minerals Chile Incorporate”, subsidiaria de la empresa norteamericana “EXXON Corporation” por un monto de US\$ 112 millones (Reyes A. , 2017). Ese mismo año la planta de San Francisco fue destruida por una avalancha, reiniciando sus operaciones un año después a una capacidad de 4800 [t/d] y aumentando a 8400 [t/d] dos años más tarde. Se incorporaron grandes cambios tecnológicos junto con esta ampliación como la etapa de molienda semiautógena la cual transportaba el mineral en forma de pulpa por medio de cañerías (eliminando así el andarivel) hasta la planta San Francisco (Flores, 1991).

El año 1992 se aumentó la capacidad de tratamiento de la planta concentradora a 37 [kt/d]. Para luego en el año 1998 dar inicio al proceso de lixiviación y al año 2002 llegar a un nivel de tratamiento de 54 [kt/d] e iniciar la segunda de etapa de los procesos de lixiviación para la producción de cátodos.

En el año 2002 el consorcio minero sudafricano Anglo American plc adquirió el 100% de la propiedad de la compañía, denominándose Minera Sur Andes Ltda, por un monto de US\$1.3 billones (Anglo American S.A., 2018). El año 2007 se aprobó e inició un proyecto de expansión denominado “Proyecto Desarrollo Los Bronces (PDLB)”, el cual contemplaba la construcción de una nueva planta concentradora y de flotación con una inversión entre 2300 – 2400 MUS\$ permitiendo expandir su tratamiento a 160 [kt/d] .

En la actualidad, el consorcio minero sudafricano Anglo American plc cuenta con el 50.1% de las acciones de la faena, el otro 49.9% se encuentra repartido entre Mitsubishi el cual posee el 20.4 % de las acciones, CODELCO quien cuenta con el 24.5% y junto con su socio japonés Mitsui pasan a controlar el 29.5% de las acciones (Anglo American Cobre, 2018).

En 2018 la Operación Los Bronces produjo 369500 toneladas de cobre fino y 2400 toneladas de molibdeno aumentando en un 20 % con respecto al año anterior (Anglo American Cobre, 2018).

#### 2.1.4.2 Antecedentes Generales

Los Bronces es una mina de cobre y molibdeno que se explota a cielo abierto. Se encuentra ubicada entre 3500 a 4200 metros sobre el nivel del mar aproximadamente y a unos 65 [km] de Santiago, en la Región Metropolitana. Cabe destacar que este cuerpo mineralizado es compartido con la División Andina de Codelco, por lo que se debe lidiar constantemente con el cráter de subsidencia de la explotación subterránea en Andina la cual se ubica en la región de Valparaíso (Anglo American S.A., 2018).

La ruta principal de acceso a la operación minera Los Bronces se realiza desde Santiago por la ruta G-21 camino a Farellones hasta el sector de Corral Quemado para luego tomar la ruta G-244.

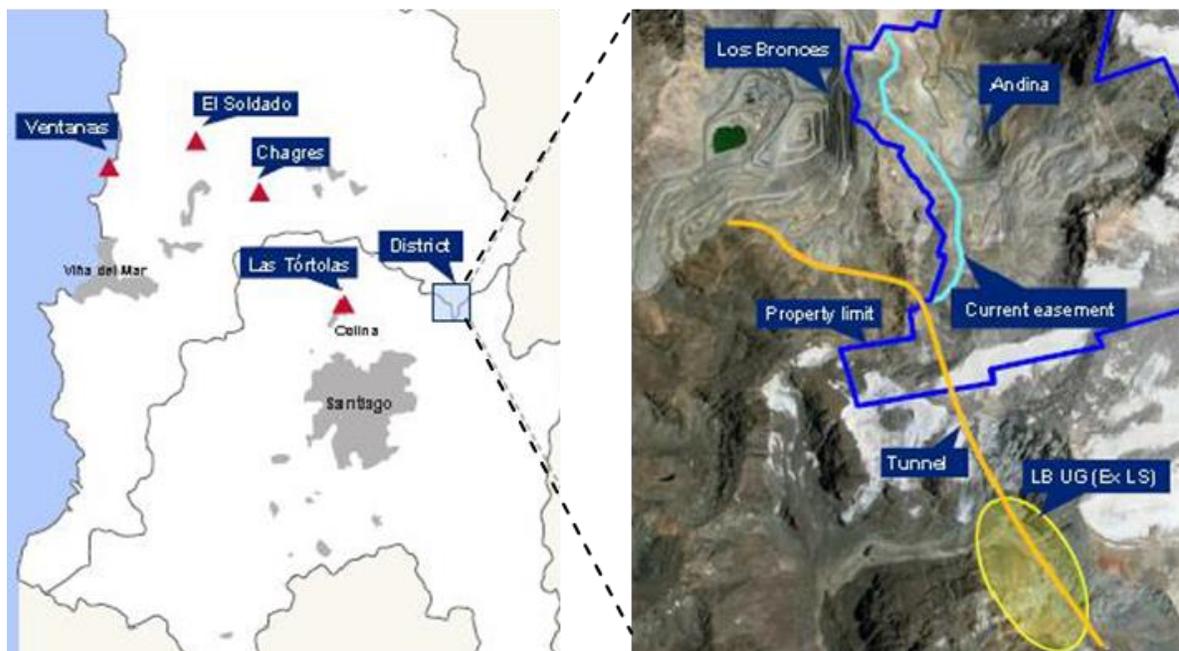


Ilustración 4: Ubicación operación minera Los Bronces. (Anglo American S.A., 2019)

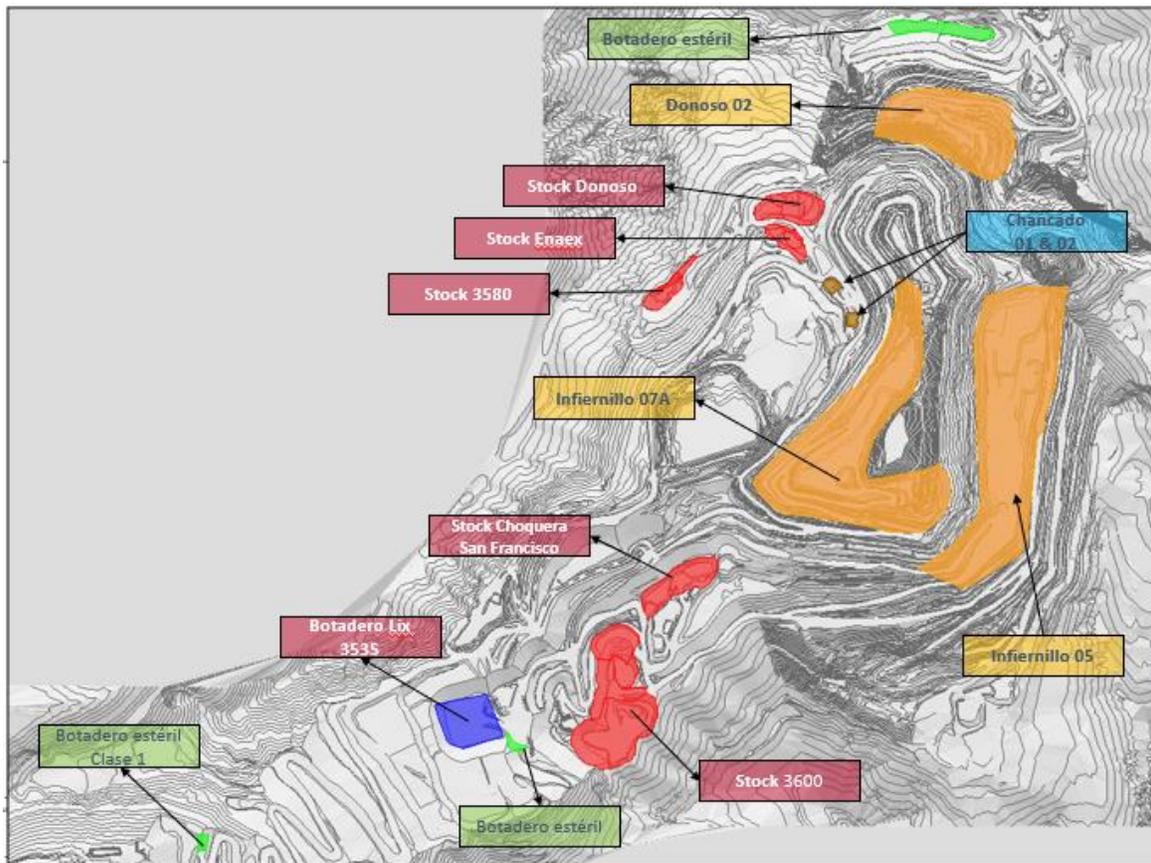
La infraestructura de la operación Los Bronces abarca 3 áreas geográficas (Ramírez, 2018):

- Área Los Bronces: Se ubica la mina a cielo abierto, botaderos, plantas de molienda Los Bronces y Confluencia, planta de producción de cátodos San Francisco, talleres de mantenimiento de camiones, canchas de lixiviación, las oficinas del Titán y el campamento Pérez Caldera.
- Mineroducto: Es un sistema de transporte de pulpa (STP) el cual conecta las plantas de molienda del área Los Bronces en la comuna de Lo Barnechea y la planta de flotación del área Las Tórtolas en la comuna de Colina. El sistema se compone de dos tuberías: la

tubería 1 de 56 [km] con capacidad de 700-900 [L/s] y la tubería 2 de 52 [km] la cual transporta alrededor de 950-1280 [L/s].

- Área Las Tórtolas: Se ubica a 30 [km] al norte de Santiago en la comuna de Colina. En ella encuentra la planta de Flotación, el tranque de relaves y la planta de recuperación de molibdeno, produciendo finalmente concentrados de cobre y molibdeno.

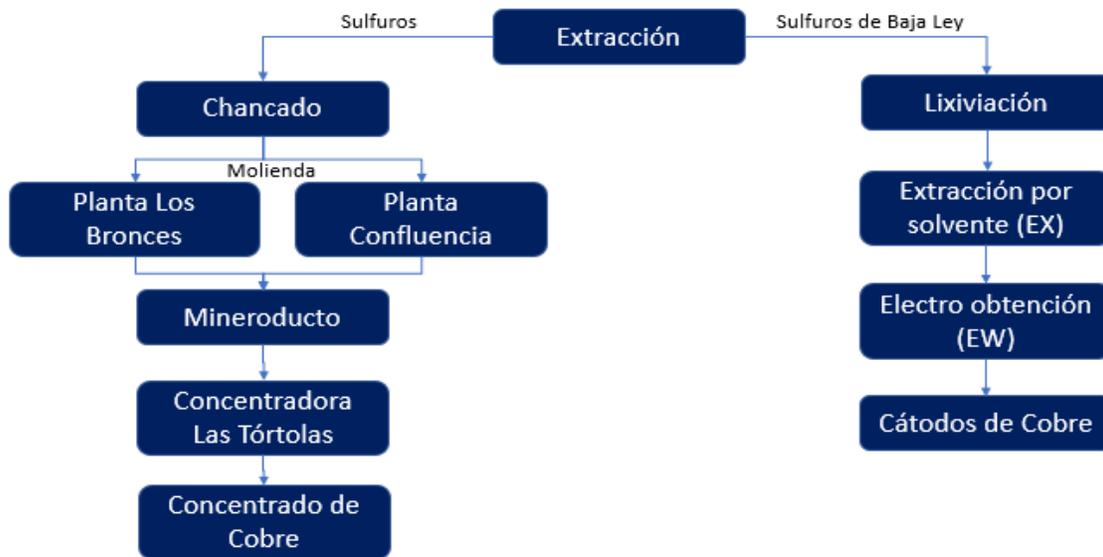
Al año 2019 la mina consta de tres fases, dos de ellas se encuentran en extracción, cuyos nombres son Infiernillo 05 e Infiernillo 07A, la tercera fase se encuentra en desarrollo para entrar en operación la cual ha presentado problemas geomecánicos y además posee espacios reducidos de acceso, esta fase de llama Donoso 02. Estas fases se muestran en la ilustración 5.



*Ilustración 5: Fases en extracción, botaderos y stocks de la mina LB (Pastrán, 2019).*

De las fases activas de la operación se extraen cuatro tipos de materiales (Anglo American Cobre, 2018):

- Mineral sulfurado, el cual se envía a chancado o a stock dependiendo de su ley.
- Lixiviable, sulfuros de baja ley que se envían a las canchas de lixiviación.
- Estéril de baja ley de cobre que se envía a los botaderos.
- Estéril clase 1, material de baja ley con características litológicas para construir la base de los botaderos.



*Ilustración 6: Flowsheet de los dos procesos de extracción del cobre. Elaboración propia.*

Esta mina posee dos procesos el cual se describe en la ilustración 6, el procesamiento de los sulfuros hasta llegar a concentrado de cobre y el procesamiento de sulfuros de baja ley hasta llegar a cátodos de cobre.

La división cuenta con 3 plantas, dos de ellas se ubican en el área Los Bronces y una en el área Las Tórtolas como se muestra en la ilustración 7 (Reyes A. , 2017):

- Planta molienda Los Bronces posee una capacidad de tratamiento de 60.000 [t/d].
- Planta molienda Confluencia posee una capacidad de tratamiento de 100.000 [t/d].
- Planta Cátodos San Francisco recibe la solución obtenida del mineral lixiviable para producir cátodos de cobre.
- Planta Flotación Las Tórtolas la cual se divide en dos líneas, T1 recibe mineral conminuido de la planta Los Bronces y T2 recibe mineral conminuido de la Planta Confluencia.

En Anexo 9.2. se encuentra el flowsheet de las plantas de molienda Los Bronces y Confluencia con sus respectivos equipos.



Ilustración 7: Diagrama de las plantas de la operación Los Bronces. (Anglo American S.A., 2019)

### 2.1.4.3 Geología de la Mina

El mega-yacimiento Río Blanco-Los Bronces se encuentra localizado en el arco magmático de la Cordillera de los Andes del Mioceno tardío al Plioceno temprano. En la zona se encuentran rocas andesíticas, las cuales son intruídas por rocas plutónicas principalmente de tipo cuarzomonzonita y monzonita. Estas rocas plutónicas pertenecen al Batolito San Francisco. Las cuarzomonzonita y monzonita a su vez son cortadas en su parte oriental por un complejo de brechas mineralizadas (Abarzua, 2014).

A lo largo de este sistema se exhibe principalmente alteración hidrotermal propilítica, sericítica, sílica y potásica con mineralización de sulfuro de cobre-molibdeno diseminado y en stockwork en un área de aproximadamente 12 [km<sup>2</sup>] (Warnaars et al, 1985).

#### 2.1.4.3.1 Complejo de Brechas Los Bronces (Warnaars et al., 1985)

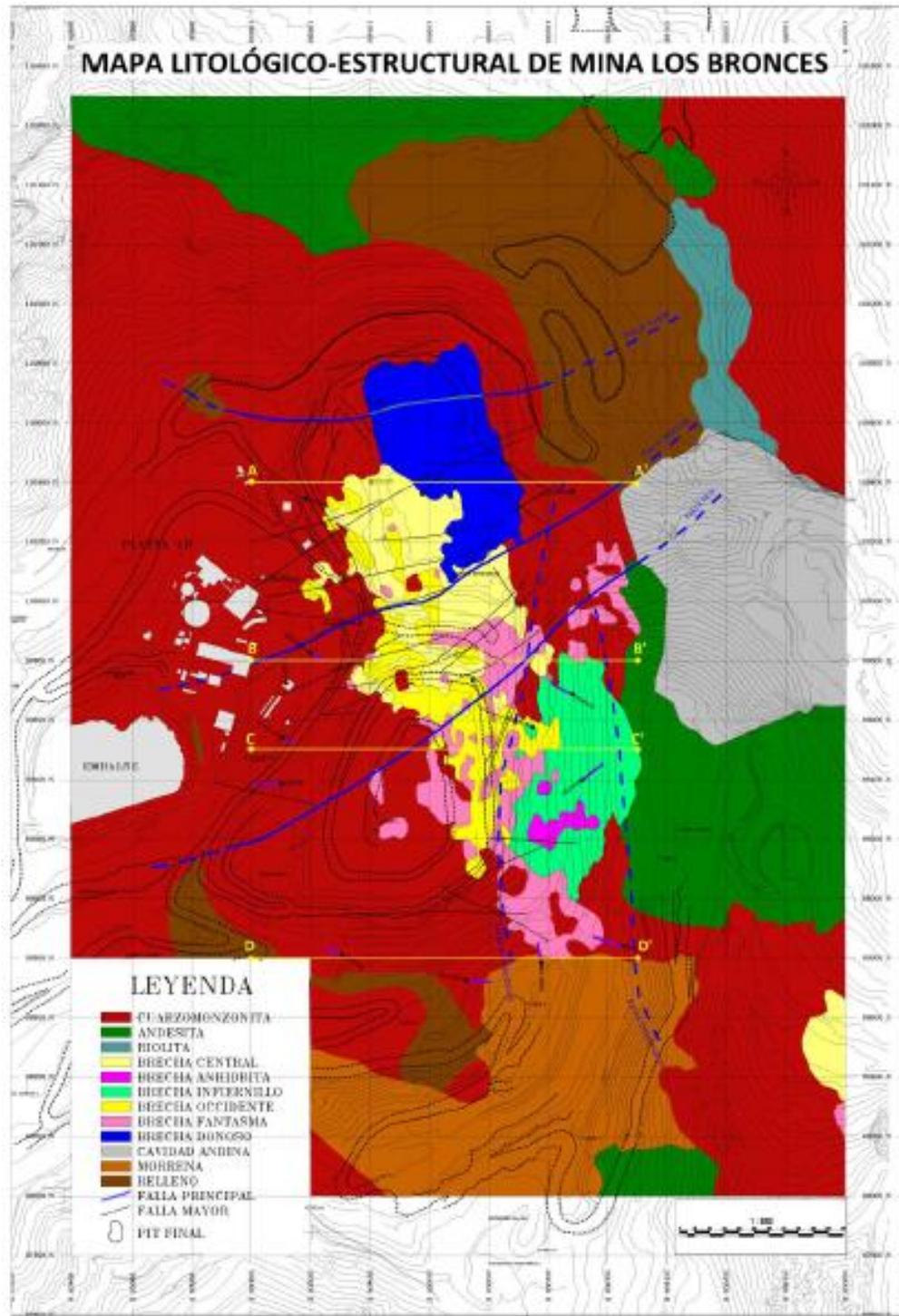
El Complejo de Brechas está compuesto de al menos siete diferentes brechas, las que se distribuyen en superficie con forma de riñón, abarcando un área aproximada de 2 [Km] de largo y 750 [m] de ancho.

El contenido de cobre hipógeno aumenta progresivamente desde la brecha más temprana a la más tardía. Las brechas más tempranas (Fantasma, Central y Oeste) poseen contenidos de cobre hipógeno de hasta 0.2% Cu. Las intermedias (Infiernillo, Anhidrita y Gris Fina) poseen mayores contenidos de calcopirita con contenidos de cobre hipógeno de hasta 0.6% Cu. Finalmente, la

brecha con mayor contenido de cobre hipógeno corresponde a la Brecha Donoso con leyes promedio de 1% Cu. Una breve descripción de los tipos de brechas descritos por Warnaars se muestran en la tabla 1.

*Tabla 1: Descripción del complejo de brechas Los Bronces*

<b>Tipo de Brecha</b>	<b>Descripción</b>
<b>Fantasma</b>	Los clastos de cuarzomonzonita contienen mineralización diseminada y algunas veces en stockwork. La mineralización primaria de cobre y/o molibdeno es mayor que en las rocas adyacentes. Es considerada la más temprana, ya que se han reconocido clastos de ella en todas las otras brechas.
<b>Central</b>	Sus clastos son principalmente cuarzomonzonita con excepción del sector Sur. Son en su mayoría subangulosos y algunos más redondeados que en otras brechas. Los sulfuros están principalmente diseminados siendo la pirita más abundante que la calcopirita.
<b>Occidente</b>	La mayoría de sus clastos son fragmentos de cuarzomonzonita que muestran una alteración clorítica. Los clastos son en su mayoría angulosos y escasamente mineralizados. Se caracteriza por una matriz verde con abundante clorita y polvo de roca. Pirita y calcopirita se encuentran principalmente diseminadas en la matriz.
<b>Infiernillo</b>	Sus clastos corresponden a fragmentos angulosos a sub-angulosos de andesita con menores cantidades de pórfido cuarzomonzonítico y pórfido latita. La matriz consiste principalmente de clorita y cuarzo, con menores cantidades de especularita, turmalina, epidota, pirita, calcopirita y magnetita.
<b>Anhidrita</b>	Consiste en un pequeño cuerpo columnar dentro de la Brecha Infiernillo. El volumen de la matriz varía entre un 5 a 60% y es caracterizado por abundante anhidrita de grano grueso. Los minerales opacos más comunes son especularita, pirita, calcopirita y molibdenita. En superficie la anhidrita se encuentra hidratada a yeso.
<b>Gris Fina</b>	Sus clastos son principalmente cuarzomonzonita y esporádicamente cuarzo-latita porfídica y andesita. Los sulfuros en los fragmentos se encuentran en brechas y como una fina diseminación de pirita y calcopirita. Clorita de grano fino, turmalina, especularita y sulfuros están presentes en cantidades menores.
<b>Donoso</b>	La mayoría de sus clastos son cuarzomonzonita y algunas cuarzo-dioritas, sianitas, y raramente andesita. Los fragmentos son angulosos a sub-angulosos. El contenido de cobre es mayor a cualquier otra brecha, con excepción a algunas partes de la Brecha Infiernillo. Esta brecha es la de más al norte y la más joven del complejo con una orientación NNW-SSE.



*Ilustración 8: Geología de la mina Los Bronces. (Abarzua, 2014)*

#### 2.1.4.4 Equipos de la operación

Los principales equipos propios utilizados en la mina Los Bronces en el 2019 se muestran en la tabla 2 (Anglo American S.A., 2019).

Tabla 2: Detalle equipos principales mina Los Bronces

Equipo	Cantidad	Capacidad	Modelo
Camiones	56	295t	Komatsu 930E
	2	330t	Komatsu 960E
	11	345t	Caterpillar 795F
Perforadoras	1	7 7/8'	Pit Viper 271
	6	10 5/8'	Pit Viper 351
Palas Eléctricas	2	73 yd <sup>3</sup>	Caterpillar 7495
	2	73 yd <sup>3</sup>	Bucyrus 495B
	3	60 yd <sup>3</sup>	Bucyrus 495B
Palas Hidráulica	2	36 yd <sup>3</sup>	Komatsu PC5500 FS
	2	36 yd <sup>3</sup>	Komatsu PC5500 BH
Cargador Frontal	1	33 yd <sup>3</sup>	LeTorneau L1850
<b>Total</b>	<b>88</b>		

Se debe tener en cuenta que en agosto de 2019 los camiones KOM 960E y los CAT 795F fueron sacados de la mina por problemas de altos costos y la producción solo se continuó con los KOM930E siendo este tipo de camión el que se analizará dentro de este trabajo.

En cuanto a los equipos de servicio actuales en el 2019 se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 3: Detalle de los equipos auxiliares en la mina Los Bronces

Flota	Cantidad	Modelo
Bulldozer	2	CAT D10R
	1	CAT D10T
	6	CAT D11T
Wheeldozer	1	CAT 854G
	5	CAT 854K
	1	KOM WD900-3
Motoniveldora	2	CAT 24H
	3	CAT 16M
Cargador Frontal	1	CAT 980H
	1	CAT 992K
	1	CAT 988H
Regador	2	CAT 773D
	2	KOM 875

<b>Retroexcavadora</b>	1	CAT 345-B
	1	PC 450
	1	KOMATSU
<b>Rodillo</b>	1	CAT CS-533D
<b>Total</b>	32	

Se tiene finalmente un total de 120 equipos propios en la mina Los Bronces.

#### **2.1.4.5 Modelo de operaciones Anglo American**

El modelo de operación de Anglo American se basa en la idea de “Hacer el trabajo correcto en el momento correcto y en la forma correcta”, y de esta manera lograr el desempeño requerido. Si el trabajo es planificado, programado y se obtienen los recursos adecuados antes de ejecutarlo, disminuye la improvisación y el resultado deseado se logrará en forma más consistente y a un menor costo (Anglo American S.A., 2019).

Para el modelo se tienen tres conceptos de diseño básico:

1. Proporciona claridad: Los miembros del equipo tienen un claro entendimiento de su propio trabajo y del trabajo de su equipo, produce consistencia, mejoramiento y resultados repetibles.
2. Logra estabilidad: Las operaciones estables producen resultados predecibles. La inestabilidad proviene de condiciones imprevistas o acciones que limitan nuestra capacidad de hacer predicciones confiables.
3. Reducir variación: Una menor variación en el rendimiento operacional aumenta la capacidad y la eficiencia. Todos los procesos tienen variación: La clave es reducir la variación ya sea en la etapa de entrada o durante el proceso, lo cual establece la plataforma para mejorías continuas.

Además, se divide en tres etapas y se especifican en la ilustración 9:

1. Planificación Operacional: Especifica la manera más efectiva y económica de hacer el negocio
2. Gestión del Trabajo: Entregar el trabajo correcto en forma confiable.
3. Retroalimentación: Indica cuando se puede requerir una intervención en el proceso.

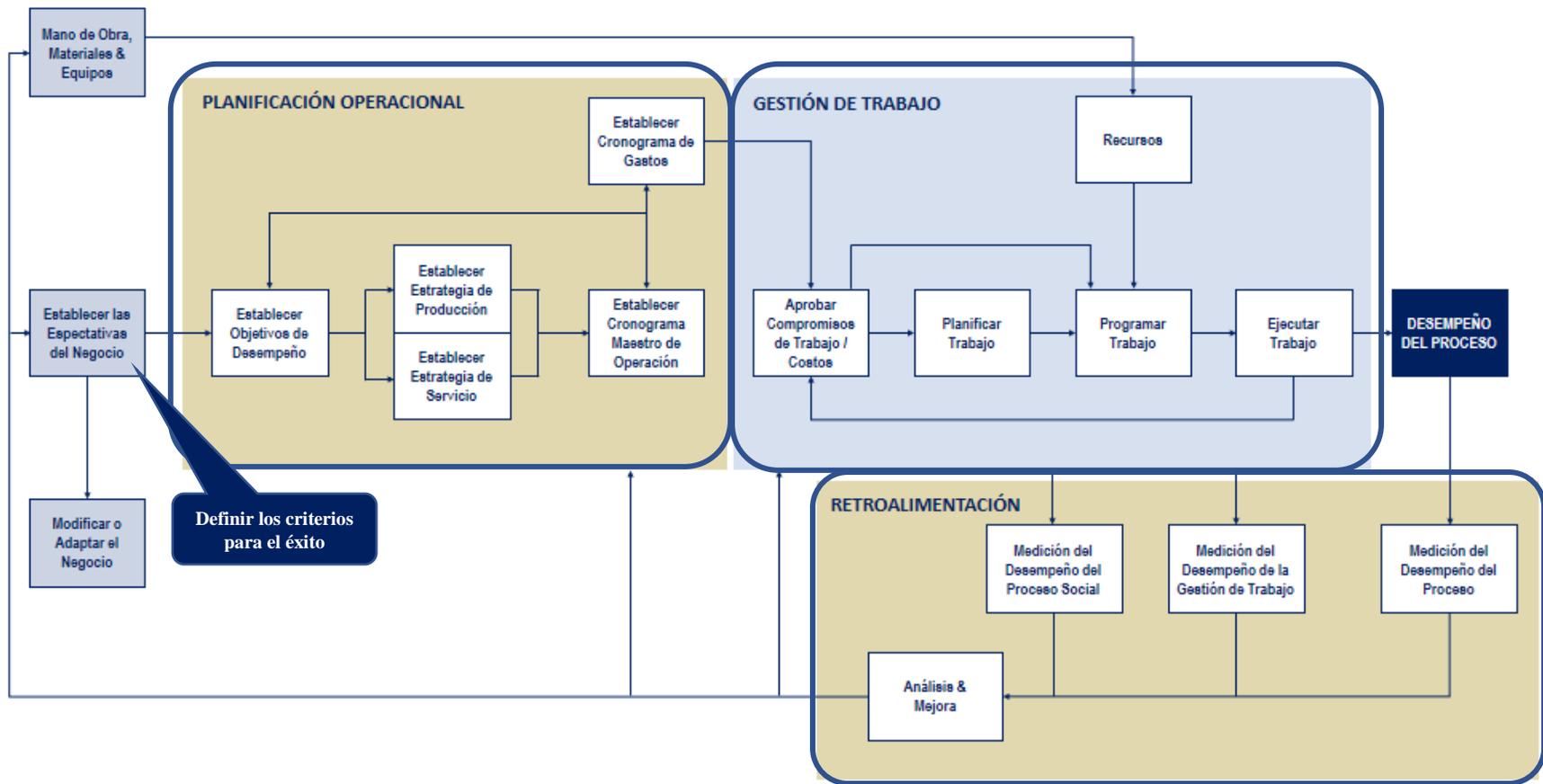


Ilustración 9: Modelo de Operaciones Anglo American ®. (Anglo American S.A., 2019)

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 TIEMPO DE CICLO SISTEMA DE TRANSPORTE

Los tiempos de ciclo pueden comenzar desde donde se desee siempre y cuando se complete el ciclo. Para efectos de minera Los Bronces, el ciclo comienza cuando el camión es cargado por la pala en el lugar de origen, es decir, en el tiempo de carga ( $T_{carga}$ ), luego el camión se desplaza lleno hacia el lugar de descarga a través de una ruta designada a lo largo de un camino minero, dicho tiempo de llama tiempo de viaje lleno ( $T_{viaje\ lleno}$ ). El lugar de la descarga puede ser un stock, un botadero o un chancador, y en este lugar se toma el tiempo de cola en descarga ( $T_{cola\ D}$ ) y el tiempo de descarga del camión ( $T_{descarga}$ ). Una vez que baja la tolva en el punto de descarga comienza el tiempo de viaje vacío ( $T_{viaje\ vacío}$ ), luego el camión se dirige al punto de origen en donde debe ser cargado por una pala, en esta etapa existen tiempos de cola cuando uno o más camiones esperan por ser cargados en una pala ( $T_{cola\ P}$ ) y tiempos de acuatamiento o maniobras del camión ( $T_{acuatamiento}$ ) y el tiempo de ciclo ha finalizado. Cabe mencionar que dentro de los tiempos de viaje es posible tener tiempos operativos no productivos ( $T_{OPNP}$ ). La ilustración 10 muestra un esquema explicativo de los tiempos que forman parte del ciclo.

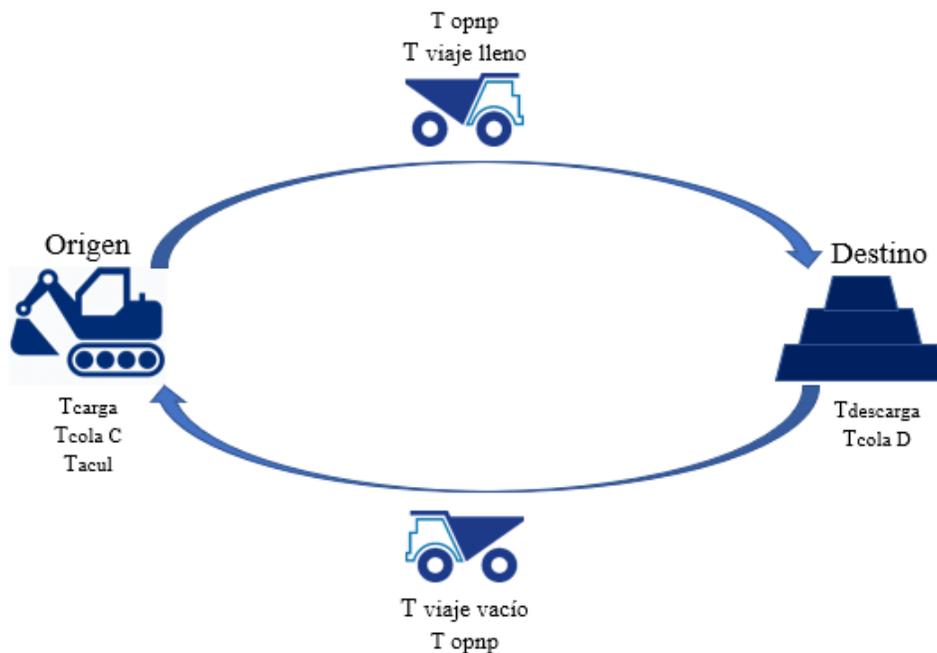


Ilustración 10: Ciclo de los camiones dentro de la mina Los Bronces. Elaboración propia.

Este proceso puede tomar varios minutos. En una mina grande los tiempos de ciclo de transporte pueden superar los 30 minutos y pueden aumentar bastante con el paso del tiempo debido al avance de los puntos de descarga y la profundización del rajo.

A continuación, se definen los tiempos que componen el tiempo de ciclo de transporte:

*Ecuación 7: Cálculo de tiempos fijos de camiones*

$$T_{Fijos} [min] = T_{carga} + T_{cola P} + T_{Acu} + T_{cola D} + T_{descarga} + T_{OPNP}$$

*Ecuación 8: Cálculo de tiempo de viaje de camiones*

$$T_{viaje T} = T_{viaje lleno} + T_{viaje vacío}$$

*Ecuación 9: Cálculo de tiempo de ciclo de camiones*

$$T_{ciclo} [min] = T_{Fijos} + T_{viaje T}$$

Donde:

- $T_{carga}$  = Tiempo de carga del camión [min].
- $T_{cola P}$  = Tiempo de cola en pala [min]
- $T_{Acu}$  = Tiempo de acuatamiento camión [min]
- $T_{cola D}$  = Tiempo de cola en descarga [min]
- $T_{descarga}$  = Tiempo de Descarga en destino [min]
- $T_{OPNP}$  = Tiempos operativos no productivos [min]
- $T_{viaje lleno}$  = Tiempo de viaje del camión cargado [min]
- $T_{viaje vacío}$  = Tiempo de viaje del camión vacío [min]
- $T_{viaje T}$  = Tiempo de viaje total [min]

*Ecuación 10: Cálculo del Rendimiento operativo de camiones*

$$Rendimiento Operativo [t/h] = \frac{FC [t]}{T_{Fijos} [min] + T_{viaje T} [min]} * 60 \left[ \frac{min}{h} \right]$$

### **3.1.1 Plan de Gestión del Tránsito**

El plan de gestión de tránsito de la mina Los Bronces está basado en el documento de “Plan de Gestión del tráfico y acarreo 2019”. A continuación se presenta un resumen de los principales aspectos.

#### **3.1.1.1 Tránsito de Camiones**

La circulación de los vehículos en el área mina es por el costado izquierdo de los caminos y pistas. Existe tres razones para transitar por la izquierda (Gerencia Mina, 2019):

1. En caso de colisión frontal entre camiones de extracción, disminuye potencial de gravedad del accidente, debido a que es menos probable que se impacten las cabinas de los operadores.
2. Buena percepción de profundidad: Permite tomar medidas preventivas oportunas por derrumbes y/o caídas de rocas, observa la orilla del banco y su berma, previene riesgos de grietas, como también caída de un banco a otro, permite una mejor percepción del ancho del camino.

3. Tránsito en Bajada o Subida: Permite controlar la berma u orilla del cerro para tomar medidas y acciones preventivas.

### 3.1.1.2 Caminos de Tránsito

- Camino Principal: Es el camino sometido a tránsito intenso de equipos pesados y vehículos livianos que se mantiene a través del tiempo. Este camino debe tener ancho y pendientes que permitan una circulación segura a los camiones de alto tonelaje. Ancho mínimo 13,5 m por pista con camellones centrales y borde; y pendiente media de 8% y máxima de 10%. Dicha pendiente media se medirá dentro de cada tramo que poseen los caminos al interior de la Mina. En la ilustración 11 se muestra una sección tipo de un camino minero principal interior fase.

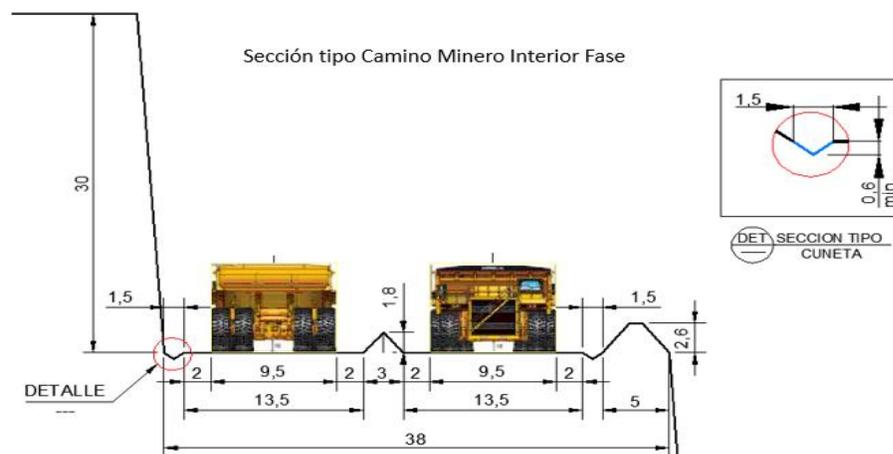


Ilustración 11: Sección tipo camino minero interior fase. (Gerencia Mina, 2019)

- Caminos Secundarios. Son aquellas vías que nacen del camino principal y aquellos que no son de uso habitual, se utilizan principalmente para circulación de vehículos livianos y de servicios.

### 3.1.1.3 Área de Carguío

Es un área restringida, debidamente señalizada, en la que se encuentra trabajando un equipo de carguío. Esta área está limitada por la trayectoria de acercamiento y aculatamiento de los camiones (50mt.)



Ilustración 12: Sector de carguío pala 10 en fase infiernillo 5. Fotografía propia.

#### 3.1.1.4 Área de Vaciado

Es un área restringida, debidamente señalizada y previamente establecida, donde los camiones de transporte vacían su carga, ejemplo: Chancado, stock, botaderos, relleno de caminos y camellones.

Excepcionalmente se define como área de vaciado, sectores donde se descargan paladas de material con cargador (Traspaleo). El área la define Planificación Mina y es controlada por el Jefe de Turno Mina, Coordinador de Servicios y Coordinador de Estándares y debe tener como medidas mínimas 20 [m] de ancho por 30 [m] de largo.

El frente de avance de los botaderos debe ser necesariamente en línea recta o cóncava, en ningún caso se deben dejar narices o superficies convexas como se observa en la siguiente ilustración.

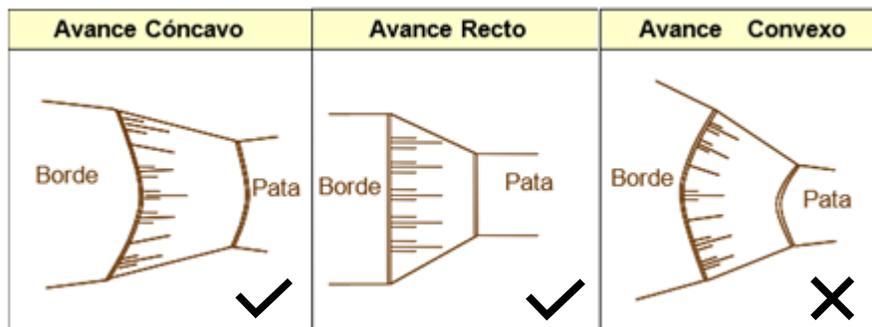


Ilustración 13: Frente de avance de los botaderos en mina Los Bronces. (Gerencia Mina, 2019)



*Ilustración 14: Sector de vaciado en botadero. Fotografía propia.*

### **3.1.1.5 Velocidad Interior Mina**

La velocidad máxima de vehículos livianos es de 50 [km/h]. Los equipos pesados se rigen de acuerdo con las normas de operación vigentes, dependiendo de la carga, pendiente promedio por tramo y estado del camino. La velocidad máxima permitida para camiones pesados bajando cargado y con una pendiente promedio por tramo del 8% es de 19 millas/h (31 km/h) para los camiones Komatsu 930E. Solo en aquellos lugares en que las condiciones lo permitan, la velocidad podría ser diferente, siempre y cuando se cuente con la señalización correspondiente. Los límites en subida y en horizontal son los que desarrolle cada camión.

### **3.1.1.6 Distancia Mínima de Conducción entre equipos Interior Mina**

La distancia entre equipos que circulan al interior de la mina esta restringidas específicamente por condiciones meteorológicas, dado que las pistas, caminos o carpetas de rodado, actúan de manera muy variables bajo diferentes condiciones climáticas.

En condiciones ideales de las pistas, la distancia mínima entre equipos es de 50 [m].

Para condiciones de nieve o pisos congelados las distancias varían aún más dependiendo de las posiciones de los equipos en operación, es decir, las distancias son variables si el equipo va subiendo con carga en condiciones de nieve o piso congelado o si va descendiendo con carga en condiciones de pisos congelados o con nieve.

Las distancias según la condición del piso se muestran en la siguiente tabla.

*Tabla 4: Metros de distancia mínima entre equipos según la condición del piso.*

Condición	Subiendo [m]	Bajando [m]
Normal	50	100
Nieve en Pistas	100	100
Hielo en Pistas	200	200

## **3.2 SOFTWARE DISPATCH**

El software Dispatch® es un sistema de administración minera a gran escala, utiliza la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), comunicaciones de datos y computación para proporcionar asignaciones óptimas y automáticas para camiones en minas a cielo abierto (Modular Mining System, 1999). Este sistema es utilizado en la mina Los Bronces. Los datos de esta memoria han sido recolectados a partir de este software. A continuación, se presentan sus principales características.

El sistema Dispatch® es una potente herramienta de gestión y control, lo que se puede traducir en un administrador importante de la operación minera y un optimizador de rutas. De esta manera, esta herramienta sirve para varias cosas dentro de la operación, por ejemplo (González V. , 2018):

- Recolector de información
- Almacenador de los datos recolectados como una base de datos
- Una solución a problemas en tiempo real

Para comprender el algoritmo utilizado por el sistema Dispatch® se debe tener en consideración que este sistema maneja una gran cantidad de información y variables, de manera de generar una asignación óptima y eficiente. Sobre la base de esta información, es donde el sistema realiza las asignaciones, mediante algoritmos que se encuentran en los tres subsistemas presentes (Caroca, 2017):

1. Mejor Ruta: Cambios en la topografía.
2. Programación Lineal: Cambios importantes en las variables dependientes del tiempo.
3. Programación Dinámica: Asignación en tiempo real.

### **3.2.1 Mejor Ruta (MR – Best Path)**

Este subsistema determina el menor tiempo de traslado de material (tiempo-distancia) utilizando el algoritmo de Dijktras. Este algoritmo calcula el tiempo mínimo de un nodo a otro mediante una red de nodos que describen un árbol direccionado. Luego le entrega al segundo subsistema (PL) información sobre las rutas de acarreo (Caroca, 2017):

- Distancia total mínima
- Estimación tiempo de viaje
- Puntos intermedios de viaje

### **3.2.2 Programación Lineal (PL – Lineal Programming)**

Este subsistema revisa cambios importantes en las variables independientes del tiempo. Utiliza el método simplex, este es un método matemático que resuelve un conjunto de ecuaciones lineales de restricciones para optimizar y minimizar las necesidades de camiones de extracción, sujeto a una función de prioridades y exigencias.

PL tiene como variabilidad la tasa de alimentación del objetivo en [t/h] o [m<sup>3</sup>/h] para cada ruta. PL calcula la razón de alimentación que minimiza el total de camiones adquiridos para cubrir las necesidades de palas, sujeto a las restricciones de la mina.

Dispatch utiliza estas soluciones entregadas por PL para generar asignaciones óptimas de equipos en tiempo real (Caroca, 2017):

- Continuidad de pala y puntos de descarga
- Capacidad máxima de vaciado en los puntos de descarga
- Tipo de material y ley de mineral

### **3.2.3 Programación Dinámica (PD – Dynamic Programming)**

Este subsistema es un proceso de optimización basado en el principio optimizador de Bellman's. Considera la disponibilidad de equipos (cambio de estatus), flujos de alimentación (puntos de carga y descarga), prioridad de pala, distancias de acarreo, etc.

Con el fin de generar una solución primero Dispatch® en vez de asignar camiones a las palas que más lo requieren decide por asignar camiones a los equipos de carguío más necesitados en cualquier momento. Para ello PD genera dos listas, una de ellas en base a la PL, donde incluye rutas ordenadas por prioridad de tiempo y la otra lista que incluye camiones que requieran asignación a través del tiempo. De esta manera PD establece las necesidades de camiones óptimos sobre la base de los que requerirán asignación de carguío o bien puedan variar (Caroca, 2017).

## **3.3 SOFTWARE R Y RSTUDIO**

*R* es un lenguaje de alto nivel y entorno utilizado para el análisis de datos y gráficos. Es el lenguaje más potente y profesional que existe actualmente para realizar tareas estadísticas de todo tipo, desde las más elementales, hasta las más avanzadas. Además, cuenta con la ventaja de ser gratuito y de descarga e instalación sencilla (Sitio web de instalación software *R*: <https://cran.rstudio.com/>)

*R* es un conjunto integrado de programas para manipulación de datos, cálculo y gráficos. Entre otras características dispone de (González M. , 2016):

1. Almacenamiento y manipulación efectiva de datos
2. Operadores para cálculo sobre variables indexadas (Arrays), en particular matrices.
3. Una amplia, coherente e integrada colección de herramientas para análisis de datos.
4. Posibilidades gráficas para análisis de datos, que funcionan directamente sobre pantalla o impresora.
5. Un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas.

*R* es un lenguaje “Orientado a Objetos”: bajo este complejo término se esconde la simplicidad y flexibilidad de *R*. “Orientado a Objetos” significa que las variables, datos, funciones, resultados, etc., se guardan en la memoria activa del computador en forma de objetos con un nombre específico. El usuario puede modificar o manipular estos objetos con operadores (aritméticos, lógicos, y comparativos) y funciones (que a su vez son objetos).

*RStudio* es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para *R*, su interfaz se muestra en la ilustración 15. Es software libre con licencia GPLv3 y se puede ejecutar sobre distintas plataformas (Windows, Mac, o Linux) (Sitio de web de instalación *RStudio*: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/#download>.)

Entre otras cosas encontramos que *RStudio*:

- Permite abrir varios scripts a la vez
- Permite ejecutar partes de código con sólo marcarlo en los scripts
- Muestra el workspace
- Muestra el historial
- Muestra los objetos del workspace
- Integra la ayuda
- Integra la gestión de librerías

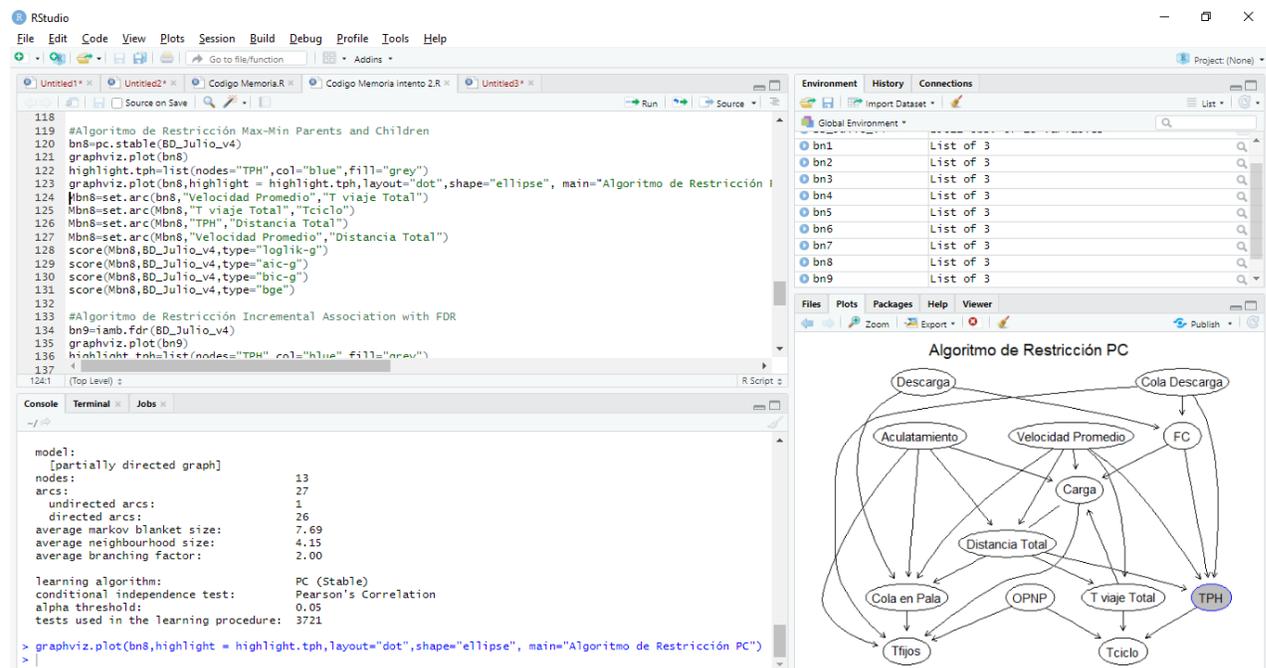


Ilustración 15: Interfaz del software *RStudio* y sus cuatro paneles de trabajo. Elaboración propia.

### 3.4 REDES BAYESIANAS

Las redes bayesianas son modelos gráficos donde los nodos representan variables aleatorias y las flechas representan dependencias probabilísticas entre ellos (Scuriati, 2010). Las redes bayesianas han sido utilizadas en diversos estudios y aplicaciones industriales. A continuación, se enlistan distintas aplicaciones (Santiesteban, 2012):

- Biomedicina
- Predicción de la supervivencia en cáncer de mama.
- Multiclasificador de dos niveles para supervivencia en Unidad de Cuidados Intensivos (UCI).
- Clustering geográfico de la incidencia del cáncer.
- Predicción de la estructura secundaria de las proteínas.
- BayesChess: Programa de ajedrez capaz de adaptar su estrategia al usuario al que se enfrenta y de refinar la función de evaluación que guía el proceso de búsqueda en base a su propia experiencia de juego.
- Investigaciones policiales
- Microsoft: Answer Wizard (Office), diagnóstico de problemas de impresora, etc.
- Intel: Diagnóstico de fallos de procesadores.
- HP: Diagnóstico de problemas de impresora.
- Nasa: Ayuda a la decisión de misiones espaciales.
- Psicología
- Geología para analizar sistemas mineralógicos (Morrison, y otros, 2017).

La ilustración 16 muestra un ejemplo de red bayesiana aplicada a enfermedades en el ámbito de la biología.

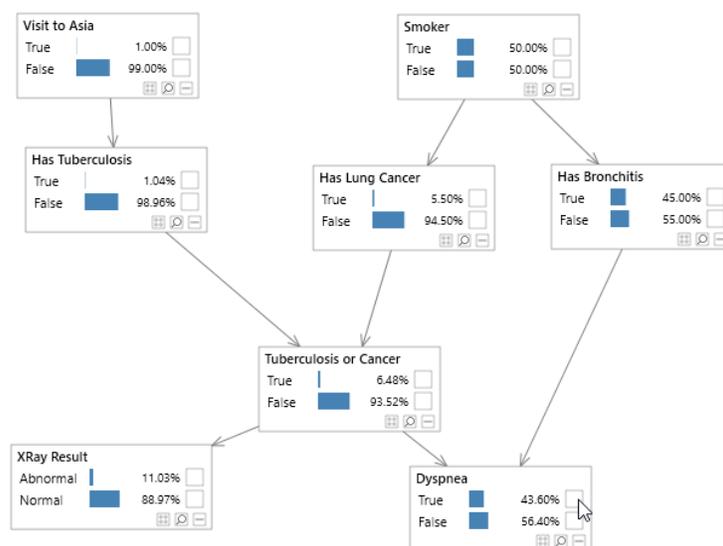


Ilustración 16: Ejemplo de red bayesiana aplicada en biología. Fuente: Bayes Server

#### 3.4.1 Definición

La estructura gráfica  $G = (V, A)$  de una red bayesiana es un gráfico acíclico dirigido (DAG), donde  $V$  es el conjunto de nodos (o vértices) y  $A$  es el conjunto de arcos (o aristas). El DAG

define una factorización de la distribución de probabilidad conjunta de  $V = \{X_1, X_2, \dots, X_v\}$  a menudo llamada distribución de probabilidad global, en un conjunto de distribuciones de probabilidad locales, una para cada variable (Scutari, 2017).

La forma de factorización viene dada por la propiedad de Markov de las redes bayesianas, que establece que cada variable aleatoria  $X_i$  depende directamente solo de sus padres  $\prod X_i$  (Nagarajan, Scutari, & Lèbre, 2013):

$$P(X_1, \dots, X_v) = \prod_{i=1}^v P(X_i | \prod X_i) \quad \text{Para variables discretas}$$

$$f(X_1, \dots, X_v) = \prod_{i=1}^v f(X_i | \prod X_i) \quad \text{Para variables continuas}$$

Hay muchas opciones posibles para las funciones de distribución global y local, sin embargo, la literatura se ha centrado principalmente en dos casos:

- Datos multinomiales (el caso discreto): tanto la distribución global como la local son multinomiales y se representan como tablas de probabilidad o contingencia. Esta es la suposición más común, y las redes bayesianas correspondientes generalmente se denominan redes bayesianas discretas (o simplemente como redes bayesianas).
- Datos normales multivariados (el caso continuo): la distribución global es normal multivariante, y las distribuciones locales son variables aleatorias normales unidas por restricciones lineales, estas redes bayesianas se llaman redes bayesianas gaussianas.

### 3.4.2 Paquete de Redes Bayesianas – *bnlearn*

*bnlearn* es un paquete del software *R* para aprender la estructura gráfica de las redes bayesianas, estimar sus parámetros y realizar alguna inferencia útil. Fue lanzado por primera vez en 2007 y ha estado en continuo desarrollo durante más de 10 años (Scutari, *bnlearn*, 2009-2019).

Se puede extraer más información sobre la estructura de la red de cualquier objeto *bn* con las siguientes funciones:

- si la estructura de la red es acíclica (*acyclic*) o completamente dirigida (*directed*)
- las etiquetas de los nodos (*nodes*), de los nodos raíz (*root.nodes*) y de los nodos hoja (*leaf.nodes*).
- los arcos dirigidos (*directed.arcs*) de la red, los no dirigidos (*undirected.arcs*) o ambos (*arcs*).
- la matriz de adyacencia (*amat*) y el número de parámetros (*nparams*) asociados con la estructura de la red.
- los padres (*parents*), hijos (*children*), manta de Markov (*mb*) y vecindario (*nbr*) de cada nodo.

### 3.4.3 Algoritmos de Aprendizaje

Los algoritmos de aprendizaje de estructura de red bayesiana se pueden agrupar en dos categorías: algoritmos basados en restricciones y algoritmos basados en puntaje.

#### 3.4.3.1 Algoritmos basados en restricciones

Estos algoritmos aprenden la estructura de la red analizando las relaciones probabilísticas implicadas por la propiedad de Markov de las redes bayesianas con pruebas de independencia condicional y luego construyendo un gráfico que satisfaga las declaraciones de d-separación correspondientes (Scutari, 2010).

Los algoritmos basados en restricciones se basan en el algoritmo de causalidad inductiva (IC), que proporciona un marco teórico para aprender los modelos causales de la estructura. Se puede resumir en tres pasos:

1. Primero se aprende el esqueleto de la red. Dado que una búsqueda exhaustiva es computacionalmente inviable para todos los conjuntos de datos, excepto los más simples, todos los algoritmos de aprendizaje utilizan algún tipo de optimización, como restringir la búsqueda a la manta de Markov de cada nodo.
2. Establecer todas las direcciones de los arcos que forman parte de una v-estructura (un triplete de nodos que inciden en una conexión convergente  $X_j \rightarrow X_i \leftarrow X_k$ ).
3. Establecer las direcciones de los otros arcos según sea necesario para satisfacer la restricción de aciclicidad.

*Bnlearn* (paquete de R) implementa los siguientes algoritmos de aprendizaje basados en restricciones:

- **PC** (*pc.stable*): una implementación moderna del primer algoritmo de aprendizaje de estructura basado en restricciones.
- **Grow-Shrink** (*gs*): basado en Grow-Shrink Markov Blanket, el algoritmo más simple de detección de Markov Blanket utilizado en un algoritmo de aprendizaje de estructura. Ejemplos de su utilización son en investigación genética, diagnóstico de enfermedades y campos de investigación que utilizan minería de datos como transporte, agricultura, climatología, ecología, entre otros (Bromberg & Schlüter).
- **Incremental Association Markov Blanket** (*iamb*): basado en el algoritmo combinado de Markov de asociación incremental (IAMB), que se basa en un esquema de selección de dos fases (una selección hacia adelante seguida de un intento de eliminar falsos positivos).
- **Fast Incremental Association** (*fast.iamb*): una variante de IAMB que utiliza la selección especulativa progresiva para reducir el número de pruebas de independencia condicional.

- ***Interleaved Incremental Association*** (*inter.iamb*): otra variante de IAMB que utiliza la selección progresiva hacia adelante para evitar falsos positivos en la fase de detección general de Markov.
- ***Incremental Association with con FDR*** (*iamb.fdr*): una variante de IAMB que ajusta el umbral de significación de las pruebas con FDR.

### 3.4.3.2 Algoritmos basados en puntajes

Estos algoritmos asignan un puntaje a cada red bayesiana candidata e intentan maximizarlo con algún algoritmo de búsqueda heurística (Scutari, 2010).

Los algoritmos basados en puntajes, por otro lado, son simplemente aplicaciones de varios algoritmos de búsqueda heurística de propósito general, tales como *hill-climbing*, *tabu search*, *simulated annealing* y varios *genetic algorithms*. La función de puntaje generalmente es *score-equivalent*, de modo que a las redes que definen la misma distribución de probabilidad se les asigna el mismo puntaje.

*Bnlearn* implementa los siguientes algoritmos de aprendizaje basados en puntajes:

- ***Hill-Climbing*** (*hc*): una búsqueda codiciosa que explora el espacio de los gráficos acíclicos dirigidos mediante la adición, eliminación e inversión de un solo arco; con reinicios aleatorios para evitar óptimos locales. La implementación optimizada utiliza puntajes de almacenamiento, descomposición de puntajes y la equivalencia de puntajes para reducir el número de pruebas duplicadas. Se ha utilizado en problemas de optimización y algoritmos genéticos (Lopez, 2005).
- ***Tabu Search*** (*tabu*): es un hill-climbing modificado capaz de escapar de los óptimos locales seleccionando una red que disminuya mínimamente la función de puntuación. Es utilizado en problemas del agente viajero, secuenciación de la producción y variados problemas de diseño. (Aboytes, Laureano, & Ramírez, 2013).

### 3.4.3.3 Algoritmos de aprendizaje híbridos

Los métodos híbridos intentan obtener lo mejor de ambos algoritmos de aprendizaje, es decir, aprenden un esqueleto con un enfoque de restricciones y se limitan a los gráficos acíclicos dirigidos (DAG) considerados durante la fase de puntaje (Scutari, bnlearn, 2009-2019). Estos algoritmos poseen aplicaciones en biomedicina de trasplantes, agronomía, microbiología predictiva y en descripción de textos, imágenes, proteínas y genes (Reyes O. , 2016)

*Bnlearn* implementa los siguientes algoritmos de aprendizaje híbridos:

- ***Max-Min Hill-Climbing*** (*mmhc*): un algoritmo híbrido que combina el algoritmo Max-Min Parents and Children (para restringir el espacio de búsqueda) y el algoritmo Hill-Climbing (para encontrar la estructura de red óptima en el espacio restringido)

- **Maximización restringida** (*rsmax2*): una implementación general de los algoritmos de candidatos dispersos, que puede usar cualquier combinación de algoritmos basados en restricciones y en puntajes.
- **Híbrido HPC** (*h2pc*): un algoritmo híbrido que combina HPC y Hill-Climbing.

### 3.4.4 Pruebas de independencia condicional

Varias pruebas de independencia condicional de la teoría de la información y las estadísticas clásicas están disponibles para su uso en algoritmos de aprendizaje basados en restricciones.

Las pruebas de independencia condicional para datos discretos son funciones de las tablas de probabilidad condicional implicadas por la estructura gráfica de la red a través de las frecuencias  $\{n_{ijk}, i: 1, \dots, R, j = 1, \dots, C, k = 1, \dots, L\}$  para las variables aleatorias  $X$  e  $Y$  y todas las configuraciones de las variables de condicionamiento  $Z$ .

A continuación, se enumeran las pruebas de independencia condicional para casos discretos. Sin embargo, no se detalla en ellos ya que la base de datos utilizada sólo posee variables continuas las cuales serán detalladas posteriormente.

1. Mutual Information
2. Pearson's  $X^2$
3. Fast Mutual Information (*fmi*)
4. Akaike Information Criterion (*aict*)

En el caso continuo, las pruebas de independencia condicional son funciones de los coeficientes de correlación parcial  $\rho_{XY|Z}$  de  $X$  e  $Y$  dado  $Z$ :

1. Correlación lineal: el coeficiente de correlación lineal  $\rho_{XY|Z}$ . Están disponibles tanto la prueba t de Student asintótica (*cor*) como la prueba de permutación de Monte Carlo (*mc-cor*).
2. Z de Fisher: una transformación del coeficiente de correlación lineal que implementa el algoritmo de aprendizaje basado en restricciones de PC. Se define como:

$$Z(X, Y|Z) = \frac{1}{2} \sqrt{n - |Z| - 3} \log \frac{1 + \rho_{XY|Z}}{1 - \rho_{XY|Z}}$$

Tanto la prueba asintótica normal (*zf*) como la prueba de permutación de Monte Carlo (*mc-zf*) están disponibles en el paquete *bnlearn*.

3. Información mutua (*mi-g*): una medida de distancia teórica de la información definida como

$$MI_g(X, Y|Z) = -\frac{1}{2} \log(1 - \rho_{XY|Z}^2)$$

### 3.4.5 Puntuaciones de red (*score*)

Varias funciones de puntuación están disponibles para su uso en el algoritmo de *Hill-Climbing* y la función de *score*. La puntuación que se utilizará se especifica con 3 argumentos; primero con el argumento algoritmo *hc*, con la base de datos y con el tipo de función de puntuación (la etiqueta asociada con cada puntuación se informa entre paréntesis) como se observa en el siguiente ejemplo de código:

```
bn=hc(BDejemplo)
score(bn,BDejemplo,type="loglik-g")
```

Los puntajes disponibles (y las etiquetas respectivas) para las redes bayesianas gaussianas (variables normales) son:

- La puntuación multivariada de log-verosimilitud gaussiana (*loglik-g*).
- La puntuación correspondiente del Criterio de información de Akaike (*aic-g*).
- La puntuación correspondiente del criterio de información bayesiano (*bic-g*).
- La probabilidad de registro predictiva (*pred-loglik-g*) calculada en un conjunto de prueba separado.
- Puntaje de densidad posterior gaussiana equivalente (*bge*).

## 4 METODOLOGÍA

---

En este apartado se presenta la metodología del estudio. Lo primero es familiarizarse con toda la información que posee la mina, esto significa seguir los estándares de seguridad, modelo operacional, tipo de reportabilidad, condición climática, entre otros.

Luego se define el alcance de la memoria, se analizarán las condiciones en las que los camiones se encuentran operando actualmente, esto es, clima adverso principalmente dada la estación del año en que nos encontramos (julio - diciembre 2019). Además, se define el horizonte temporal en el que se trabajará con el fin de que sea un análisis representativo.

Posteriormente, se definen aquellas variables que son de gran importancia a lo largo de todo el ciclo de transporte, dichas variables son captadas por el software Dispatch. Luego mediante queries que utilizan lenguaje SQL son recopiladas ordenadamente en tablas en archivos Excel, estos archivos se juntan a través de un ID asociado al viaje del camión y se analizan tal y como fueron extraídos del software para corroborar la confiabilidad de los datos. La base de datos creada se filtrará mediante un protocolo o criterios de validez para trabajar con datos representativos de la mina.

Teniendo la base de datos construida se realiza un estudio estadístico clásico de las variables mediante la construcción de histogramas y la obtención de su estadística descriptiva que permiten ver el comportamiento de variables y el rendimiento.

Por otro lado, se investigan las redes bayesianas y sus algoritmos de aprendizaje, y se aplican a la base de datos previamente construida. Se realiza un procedimiento de descarte de algoritmos ya que se busca aquel algoritmo que mejor se acomode a la base de datos minera, por ejemplo, que el grafo no posea arcos no dirigidos, el nodo del rendimiento no puede tener hijos, tener un score lo mas alto posible, entre otros. De esta manera, se escoge uno y se analizan los arcos del grafo, si existe algún arco que no represente el comportamiento esperado en minería y su correlación es baja entonces el arco es eliminado del grafo. Luego, para tener un grafo más agradable a la vista y con más información, se agrega un color azul cuando la correlación sea positiva y un color rojo al arco cuando su correlación sea negativa, además se agranda o se achica el grosor de la flecha de forma proporcional a la variación de la correlación entre 0 y 1.

La metodología anteriormente expuesta representa la obtención de una red bayesiana aplicada solamente a un mes determinado de la mina. Esta se resume en la ilustración 17 . Dicho procedimiento debe ser replicado para poder validar el modelo. Por lo tanto, se repite el mismo procedimiento al mes de septiembre, el cual ha sido el mejor mes de la mina en cuanto a productividad en el año 2019 y también se repite el procedimiento para una base de datos más grande que abarque la temporada de invierno que va desde abril hasta septiembre de 2019.



Ilustración 17: Metodología de trabajo. Elaboración propia.

#### 4.1 SELECCIÓN HORIZONTE TEMPORAL

A partir de la experiencia de la mina Los Bronces, se ha identificado que la principal variable que condiciona la operación es el clima. Esto ocurre fundamentalmente por las condiciones de alta altura geográfica y por su ubicación en la zona cordillerana de la Región Metropolitana. En efecto, las temperaturas son muy variables durante el año, siendo la oscilación térmica promedio de la zona entre -2 y 10 [°C] (Cifuentes, 2019). En invierno, las temperaturas son muy bajas, lo que ocasiona congelamiento de pistas, nevazones, instalación de cadenas a los camiones, entre otros, lo que provoca que en esos momentos no se pueda operar.

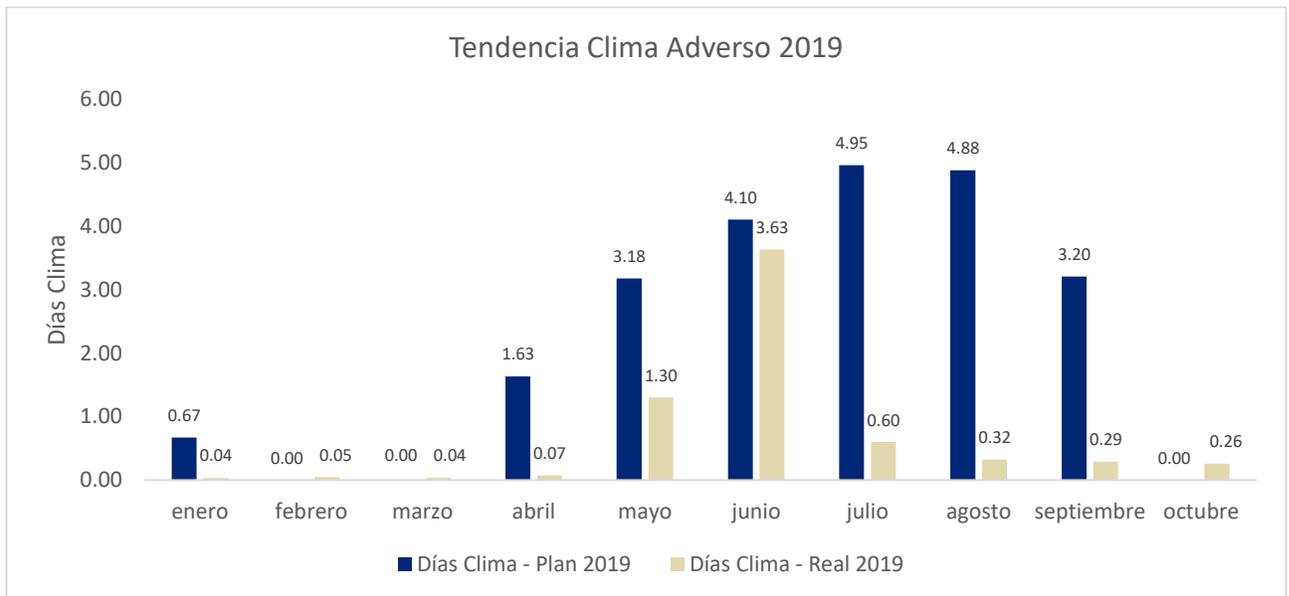


Ilustración 18: Tendencia del Clima Adverso 2019

Por lo que se analizó el clima de los meses de este año desde enero a octubre del 2019, horizonte temporal de la base de datos de 2019 a la fecha de realización de este trabajo. Los resultados

sobre días adversos por razones climáticas se presentan en la ilustración 18. Se observa que la operación Los Bronces tenía varios días planificados a lo largo del año con condición de clima adverso, sin embargo, el año no tuvo el comportamiento esperado y resultó ser más bien un año muy seco generando problemas de tratamiento de mineral.

De los 10 meses que van a lo largo del año, Julio se comporta como el promedio y por esto se extraerá su base de datos y se analizará.

Las imputaciones de camiones asociadas al clima adverso son las siguientes:

- Clima Adverso
- Pista resbaladiza
- Instalación y/o reparación de cadenas
- Detención por cadenas
- Congelamiento
- Visibilidad
- Tormenta eléctrica
- Sin cadenas
- Mantenición Programada de instalación de cadenas

## 4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Para la obtención de datos necesarios para este trabajo fue necesario la exportación de datos reales desde el módulo Dispatch mediante un pequeño código programado durante este trabajo. La base de datos (BD) recuperada es cargada en Excel para luego realizar los análisis estadísticos preliminares.

Los datos fueron extraídos de 5 distintas bases de datos (queries), a continuación se muestra el código para la consulta:

1. BD de cargas de camiones

```
“select ShiftDate, ShiftName, Truck, TruckOperatorName, Excav, ExcavType,
ExcavOperatorName, FieldGpsxex, FieldGpsyex, Phase, Tonnage, LoadingTime,
QueueTime, ShovelIdleTime, SpotTime, left(id,10) as ID1, right(id,9) as ID2,
fulltimestamp
from DLB_ShiftLoads
where month(ShiftDate)=7”
```

2. BD de descarga de camiones

```
“select ShiftDate, DumpLocation, QueueTime, DumpingTime, Truck,
left(prevloadid,10) as ID1, right(prevloadid,9) as ID2, emptytimestamp,
left(nextshiftloadid,10) as ID3, right(nextshiftloadid,9) as ID4
from DLB_ShiftDumps
where month(ShiftDate)=7”
```

3. BD de factores de carga de camiones  
*“select ShiftDate, Truck,PLM, BktCount, Excav, left(LoadId,10) as ID1,right(loadid,9) as ID2  
from DLB\_ShiftLoadBkttions  
where month(ShiftDate)=7”*
  
4. BD Estado de Equipos Mineros  
*“select ShiftDate, StartTime, EndTime, duration, Timecat, Status, unit, unittype, eqmttype, eqmt, Gps X, Gps Y  
from DLB\_ShiftState  
where month(ShiftDate)=7”*
  
5. BD de distancias y tiempos de viaje de camiones  
*“select shiftdate, Valid\_EmptyTravelDuration, Valid\_EmptyTotalDistance, Valid\_FullTotalDistance, Valid\_FullTravelDuration, EmptyTotalDistance, FullTotalDistance, Phase, EmptyTravelDuration, FullTravelDuration, left(loadid,10) as ID1, Right(loadid,9) as ID2  
from DLB\_TruckCycle  
where month(shiftdate)=7  
order by shiftdate”*

De la base de datos de carga de camiones se extrajeron para el mes de julio de 2019 los distintos inputs:

- Fecha (Shiftdate)
- Turno (Shiftname)
- Camiones (Truck)
- Nombre operador camión (TruckOperatorName)
- Pala (Excav)
- Tipo de pala (ExcavType)
- Nombre operador pala (ExcavOperatorName)
- Fase (Phase)
- Tiempo de carga (LoadingTime)
- Tiempo de cola en pala (QueueTime)
- Tiempo de espera en pala (ShovelIdleTime)
- Tiempo de aculatamiento (SpotTime)
- Fecha y hora de llenado (fulltimestamp)
- ID carga (IDload)

De la base de datos de descarga de camiones se extrajeron para el mes de julio de 2019 los siguientes inputs:

- Fecha (Shiftdate)
- Destino (DumpLocation)
- Tiempo de cola descarga (QueueTime)
- Tiempo de descarga (DumpingTime)
- Fecha y hora de descarga (emptytimestamp)
- ID carga (IDload)
- ID carga siguiente (NextShiftLoadId)

De la base de datos de factores de carga de camiones se extrajeron para el mes de julio de 2019 los siguientes inputs:

- Fecha (Shiftdate)
- Camión (Truck)
- Factor de Carga (PLM)
- ID carga (IDload)

De la base de datos de estados de equipos mineros se extrajeron para el mes de julio de 2019 los siguientes inputs:

- Fecha (Shiftdate)
- Camión (Truck)
- Hora inicio OPNP
- Hora término OPNP
- Duración

De la base de datos distancias y velocidades de camiones se extrajeron para el mes de julio de 2019 los siguientes inputs:

- Fecha (Shiftdate)
- Distancia total vacío (EmptyTotalDistance)
- Distancia total lleno (FullTotalDistance)
- Tiempo total vacío (EmptyTravelDuration)
- Tiempo total lleno (FullTravelDuration)
- ID carga (IDload)

De esta última base de dato es posible obtener la distancia total de los camiones en sus respectivos recorridos como la suma de las distancias vacías y llena, esto mismo ocurre con tiempo total que les tomó realizar el recorrido, organizándose en dos columnas distintas:

- Tiempo total
- Distancia total

Por otra parte, también es posible obtener las velocidades de los camiones en sus recorridos vacíos, llenos y promedio de la siguiente manera:

*Ecuación 11: Cálculo de Velocidad Camión Vacío*

$$\text{Velocidad vacío} = \frac{\text{Distancia total vacío}}{\text{Tiempo total vacío}}$$

*Ecuación 12: Cálculo de Velocidad Camión Lleno*

$$\text{Velocidad lleno} = \frac{\text{Distancia total lleno}}{\text{Tiempo total lleno}}$$

*Ecuación 13: Cálculo de Velocidad Camión Promedio*

$$\text{Velocidad promedio} = \frac{\text{Distancia total}}{\text{Tiempo total}}$$

Finalmente, la unión de estas BD se realizó mediante el ID Carga (IDLoad) que fue extraído en todas las bases de datos por separado, teniendo las siguientes columnas para la base de datos final:

- Fecha (Shiftdate)
- Turno (Shiftname)
- Camiones (Truck)
- Nombre operador camión (TruckOperatorName)
- Pala (Excav)
- Tipo de pala (ExcavType)
- Nombre operador pala (ExcavOperatorName)
- Fase (Phase)
- Tiempo de carga (LoadingTime)
- Tiempo de cola en pala (QueueTime)
- Tiempo de espera en pala (ShovelIdleTime)
- Tiempo de aculatamiento (SpotTime)
- ID carga (IDLoad)
- Destino (DumpLocation)
- Tiempo de cola descarga (QueueTime)
- Tiempo de descarga (DumpingTime)
- Factor de Carga (PLM)
- Distancia total vacío (EmptyTotalDistance)

- Distancia total lleno (FullTotalDistance)
- Tiempo total vacío (EmptyTravelDuration)
- Tiempo total lleno (FullTravelDuration)
- Tiempo total
- Distancia total
- Velocidad camión vacío
- Velocidad camión lleno
- Velocidad promedio
- Hora de carga
- Hora de descarga
- Hora de carga siguiente
- Tiempo operativo no productivo
- Tiempo de ciclo
- Tiempos fijos
- Rendimiento Camión (TPH)

En donde el tiempo de ciclo, el tiempo fijo y el rendimiento del camión se calcularon con las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 del marco teórico.

A continuación, un esquema de flujos de información (ilustración 19) y la estructura de las bases de datos consultada (ilustración 20) .

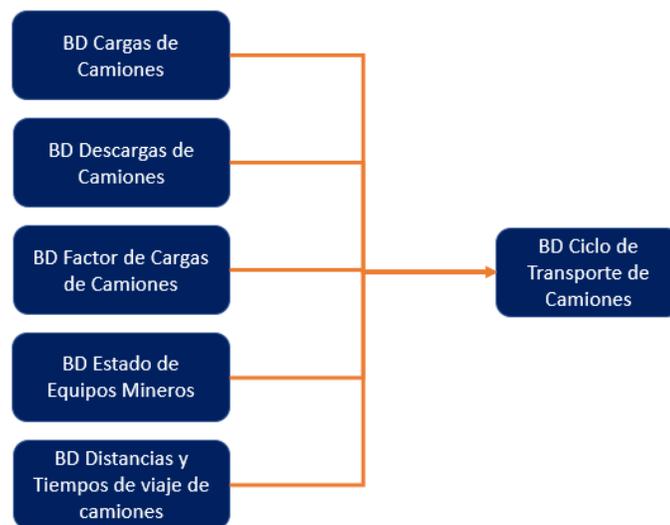


Ilustración 19: Esquema de flujos de información para la construcción de la BD.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG		
	Shift	Shift	Truc	Truc	Erea	Erea	Erea	Phas	Carg	Cola	Espe	Acul	ID C.	Dest	Cola	Desc	FC	Dist	Dist	Dist	T via	T via	T via	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo	Yelo
1	7H2019	190701a	CDH39	TORRES PHK13	KOMPC VIDELA I7A				230	0	485	45	'9070100 BOT-35		0	64	275	11.427	5.727	17.154	0.42556	0.31222	0.73778	26.852	18.3427	23.2509	16.30	16.50	6.50	0	5.65	49.9167	330.551		
2	7H2019	190701a	CDH39	SASIA IV PAB10	BUCYRL GONZAL I55				64	0	53	180	'9070100 PRIM		0	14	311	5.305	8.098	13.403	0.20778	0.41278	0.62056	25.5321	19.6183	21.5984	10.36	11.07	11.07	406	11.0667	48.3	386.335		
3	7H2019	190701a	CDH39	SASIA IV PAB10	BUCYRL NAVARR I55				78	295	0	118	'9070100 STDJEN	44	70	314	7.307	8.983	16.29	0.46306	0.60611	1.06917	15.78	14.8207	15.2362	13.38	14.19	14.19	0	10.0833	74.2333	253.794			
4	7H2019	190701a	CDH39	SASIA IV PAB05	BUCYRL SALGAC I55				120	0	36	56	'9070100 PRIMDI		0	18	311	7.054	7.054	14.108	0.35444	0.38222	0.73667	19.9016	18.4552	19.1511	12.34	13.02	13.02	269	7.71667	51.9167	359.422		
5	7H2019	190701a	CDH39	SASIA IV PAB05	BUCYRL SALGAC I55				96	77	0	142	'9070100 PRIMDI	98	63	308	7.77	7.054	14.824	0.5075	0.40833	0.91583	15.3103	17.2751	16.1864	11.43	12.10	12.10	0	7.93333	62.8833	293.878			
6	7H2019	190701a	CDH39	SASIA IV CFL08	LT 1850 OLIVA P I55				732	0	788	20	'9070100 BOT-35		0	55	299	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.54	10.09	10.09	392	19.9833	19.9833	897.748	
7	7H2019	190701a	CDH39	TORRES PAB11	BUCYRL GARATI I55				92	338	0	47	'9070100 PRIM	286	68	287	8.671	8.115	16.786	0.40389	0.37833	0.78222	21.4688	21.4493	21.4594	14.51	15.20	15.20	0	13.85	60.7833	283.301			
8	7H2019	190701b	CDH39	VLADIV PAB12	BUCYRL VALDES I7A				77	0	101	73	'9070100 PRIMDI	448	69	332	4.631	4.563	9.194	0.36444	0.34306	0.7075	12.707	13.3011	12.9951	23.29	23.59	23.59	0	11.167	53.5667	371.873			
9	7H2019	190701b	CDH39	VLADIV PHK13	KOMPC CARCAI I7A				309	0	228	38	'9070100 BOT-35		119	52	275	3.813	4.497	8.31	0.14611	0.37139	0.5175	26.0966	12.1086	16.058	0.13	0.38	0.38	0	8.63333	39.6833	415.792		
10	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PHK15	KOMPC MENDO I55				816	0	0	0	'9070100 BOT-35		0	8	321	4.426	4.193	8.619	0.25417	0.14333	0.3975	17.4138	29.2535	21.683	4.45	4.54	4.54	0	13.7333	37.5833	512.461		
11	7H2019	190701b	CDH39	VLADIV PAB11	BUCYRL MUNOZ I55				50	0	0	0	'9070100 PRIM	108	73	260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21.47	22.12	22.12	0	3.85	3.85	4051.95	
12	7H2019	190701b	CDH39	VLADIV PAB11	BUCYRL MUNOZ I55				68	186	0	46	'9070100 PRIM		0	268	284	8.115	8.115	16.23	0.335	0.38889	0.72389	24.2239	20.8671	22.4206	22.37	23.05	23.05	0	9.46667	52.9	322.117		
13	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB11	BUCYRL MUNOZ I55				71	81	0	53	'9070100 PRIMDI	521	58	284	6.268	8.03	14.298	0.5	0.36778	0.86778	12.536	21.8338	16.4766	1.12	1.43	1.43	0	13.0667	65.1333	226.617			
14	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB10	BUCYRL DELGAC I55				72	0	6	93	'9070100 BOT-35		0	58	272	4.128	4.128	8.256	0.16961	0.22361	0.39222	24.4824	18.4606	21.0493	7.06	7.21	7.21	0	3.71667	27.25	598.899		
15	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB10	BUCYRL DELGAC I55				111	0	50	154	'9070100 BOT-35		3	43	281	4.128	4.128	8.256	0.19389	0.1925	0.38639	21.2905	21.4442	21.3671	6.41	6.53	6.53	0	5.18333	28.3667	594.36		
16	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB10	BUCYRL DELGAC I55				155	256	105	87	'9070100 BOT-35		0	0	244	4.128	5.64	9.768	0.16056	0.13472	0.29528	25.7107	41.8639	33.0807	7.39	8.19	6.50	0	8.3	26.0167	562.716		
17	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB10	BUCYRL DELGAC I55				143	217	0	73	'9070100 BOT-35		0	58	299	4.128	4.128	8.256	0.18917	0.26083	0.45	21.822	15.8262	18.3467	3.59	4.16	4.16	0	8.18333	35.1833	509.901		
18	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB11	BUCYRL AGUAYC I55				75	20	0	46	'9070100 BOT-35		0	70	295	5.244	5.244	10.488	0.21833	0.28611	0.50444	24.0183	18.3285	20.7912	6.04	6.23	6.23	0	3.51667	33.7833	523.327		
19	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB11	BUCYRL AGUAYC I55				58	0	0	0	'9070100 BOT-35		0	58	269	5.011	5.244	10.255	0.35667	0.29667	0.65333	14.0495	17.6764	15.6964	5.18	5.37	5.37	0	1.93333	41.1333	392.382		
20	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB11	BUCYRL AGUAYC I55				63	13	0	37	'9070100 BOT-35		0	108	269	7.903	5.244	13.147	0.46806	0.24194	0.71	16.8847	21.6744	18.5169	2.17	2.34	2.34	0	3.68333	46.2833	348.722		
21	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB11	BUCYRL AGUAYC I55				78	146	0	47	'9070100 BOT-35		0	56	302	5.244	5.244	10.488	0.16806	0.25028	0.41833	31.204	20.9527	25.0709	2.48	3.04	3.04	0	5.45	30.55	593.126		
22	7H2019	190701b	CDH39	VILCHEE PAB11	BUCYRL AGUAYC I55				75	271	77	86	'9070100 BOT-35		80	56	311	5.244	5.244	10.488	0.2	0.25	0.45	26.22	20.976	23.3067	3.24	3.41	3.41	0	9.46667	36.4667	511.7		
23	7I2/2019	190702a	CDH39	SEPULV PAB11	BUCYRL CORTEE I55				6	136	4	39	'9070200 PRIMDI	1145	354	326	5.244	7.928	13.172	0.21556	0.44472	0.63028	24.3278	18.1164	20.8987	17.50	18.40	18.40	0	28	65.8167	297.189			
24	7I2/2019	190702a	CDH39	SEPULV PAB11	BUCYRL CORTEE I55				72	0	19	50	'9070200 PRIMDI	85	30	323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.20	16.51	16.51	0	3.95	3.95	4906.33	
25	7I2/2019	190702a	CDH39	FERREIF PAB11	BUCYRL CORTEE I55				85	81	0	47	'9070200 PRIMDI	202	25	320	5.244	9.256	14.5	0.20806	0.53417	0.74222	25.2048	17.3279	19.5359	14.01	14.43	14.43	0	7	51.5333	372.574			
26	7I2/2019	190702a	CDH39	FERREIF PAB11	BUCYRL ALBORN I55				61	45	0	38	'9070200 STD/360	96	48	260	4.123	4.123	8.246	0.16778	0.20528	0.37306	24.5742	20.085	22.1039	12.27	12.42	12.42	0	4.8	27.1833	573.881			
27	7I2/2019	190702a	CDH39	FERREIF PAB11	BUCYRL ALBORN I55				90	64	0	37	'9070200 PRIM	743	397	309	5.244	7.996	13.24	0.27417	0.41083	0.685	19.1271	19.4629	19.3285	9.18	10.02	10.02	0	22.1833	63.2833	292.368			
28	7I2/2019	190702a	CDH39	FERREIF PAB11	BUCYRL ALBORN I55				68	144	0	34	'9070200 STD/360	0	70	303	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.50	12.15	12.15	0	5.26667	5.26667	3451.9		
29	7I2/2019	190702a	CDH39	FERREIF PAB12	BUCYRL SAAVEC I7A				125	0	0	0	'9070200 BOT-35		0	186	299	5.693	5.226	10.919	0.38389	0.58444	0.96833	14.8298	8.94183	11.2761	13.07	13.45	13.45	0	5.18333	63.2833	283.487		
30	7I2/2019	190702a	CDH39	SEPULV PHK13	KOMPC DELGAC I7A				187	0	1172	90	'9070200 BOT-35		0	22	296	3.805	4.547	8.352	0.14667	0.3625	0.50917	25.9432	12.5434	16.4033	17.05	17.35	17.35	458	12.6167	43.1667	411.429		
31	7I2/2019	190702a	CDH39	FERREIF PAB10	BUCYRL GELDES I55				101	118	0	59	'9070200 BOT-35		26	57	323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.44	8.58	8.58	0	6.01667	6.01667	3221.05	
32	7I2/2019	190702a	CDH39	SEPULV PHK15	KOMPC CASTILL I55				500	0	902	23	'9070200 BOT-35		224	46	44	7.902	4.39	12.292	0.40722	0.20222	0.60944	19.4046	21.7088	20.1692	15.17	15.33	15.33	0	13.2167	49.7833	53.0298		
33	7I2/2019	190702a	CDH39	SEPULV PAB12	BUCYRL JAÑA JL I7A				94	110	47	26	'9070200 PRIM	657	456	310	4.563	5.367	9.93	0.25333	0.38806	0.64139	18.0118	13.8305	15.482	18.59	19.41	6.50	0	22.3833	60.8667	305.586			
34	7I2/2019	190702a	CDH39	SEPULV PAB10	BUCYRL GALVEZ I55				11	0	311	4	'9070200 BOTADI		0	51	0	6.543	0.842	7.385	0.44167	0.08639	0.52806	14.8143	9.74662	13.9853	16.11	16.17	16.17						

### 4.3 ANÁLISIS DE LA BD SIN MODIFICAR CON ESTADÍSTICA CLÁSICA

Una vez construida la base de datos, comienza la etapa de testeo de estos datos en base a un estudio estadístico clásico. A continuación, se muestran las tablas de estadísticas básicas de las variables importantes y los histogramas de las variables que muestran mayor cantidad de valores erróneos y en que intervalo se encuentran.

En la tabla 5 se observan las estadísticas básicas de todos los tiempos considerados en los tiempos fijos de los camiones y el factor de carga de los camiones. En la tabla 6 se observan las estadísticas básicas de las distancias recorridas por los camiones en cada viaje tanto vacío como cargado y la distancia total, también se muestra la velocidad de camiones vacíos, llenos y el promedio. En la tabla 7 se muestran las estadísticas básicas de los tiempos de viaje de los camiones cuando van vacíos, llenos y el total, también se muestra el tiempo de ciclo y los tiempos fijos para finalmente mostrar el rendimiento de camiones.

Tabla 5: Estadísticas básicas de los tiempos fijos y el factor de carga de la BD sin filtrar.

Parámetros	Carga [min]	Cola en pala [min]	Acuatamiento [min]	Cola Descarga [min]	Descarga [min]	OPNP [min]	FC [t]
Promedio	2.21	2.861	1.070	2.098	1.136	2.30	301.93
Mediana	1.70	0.550	0.917	0.683	0.933	0	282
Moda	1.28	0	0	0	0.95	0	0
Desviación Estándar	1.89	4.64	1.21	4.01	1.69	12.59	1617.46
Varianza	3.58	21.51	1.45	16.05	2.87	158.39	2616189.50
Mínimo	0.00	0	0	0	0	0	0
Máximo	49.47	75.83	42.17	99.12	91.12	297.37	65535

Tabla 6: Estadísticas básicas de las distancias y velocidades de la base de datos sin filtrar

Parámetros	Distancia Vacío [km]	Distancia Lleno [km]	Distancia Total [km]	Velocidad vacío [km/h]	Velocidad Lleno [km/h]	Velocidad Promedio [km/h]
Promedio	4.69	4.29	8.98	21.85	16.43	17.13
Mediana	4.744	4.698	9.859	21.57	16.14	18.43
Moda	0	0	0	0	0	0
Desviación Estándar	3.16	2.61	5.29	24.33	16.98	10.58
Varianza	9.96	6.81	27.94	592.13	288.35	112.04
Mínimo	0	0	0	0	0	0
Máximo	19.95	19.57	33.56	1014.90	573.27	280.86

Tabla 7: Estadísticas básicas de los T de viaje, ciclo, fijos y el rendimiento de la BD sin filtrar.

Parámetros	T Viaje vacío [h]	T Viaje Lleno [h]	T Viaje Total [h]	T Ciclo [min]	T Fijos [min]	TPH [t/h]
Promedio	0.21	0.26	0.47	39.93	11.67	811.25
Mediana	0.21	0.26	0.51	40.40	8.57	398.76
Moda	0	0	0	0	0	0
Desviación Estándar	0.16	0.17	0.29	22.1	14.4	6935.5
Varianza	0.02	0.03	0.08	486.4	206.4	48101283.60
Mínimo	0	0	0	0	0	0
Máximo	1.00	1.00	1.67	397.30	358.10	679756.77

A continuación, se muestran los histogramas de las variables con mayor porcentaje de error. Estos son tiempos de acuatamiento (gráfico 1), tiempos de descarga (gráfico 2), factor de carga (gráfico 3), tiempos de ciclo (gráfico 4), distancia total (gráfico 5), tiempos de viaje total (gráfico 6), velocidad promedio (gráfico 7) y rendimientos (gráfico 8), el resto de los histogramas se muestran en la sección de anexos 9.3.

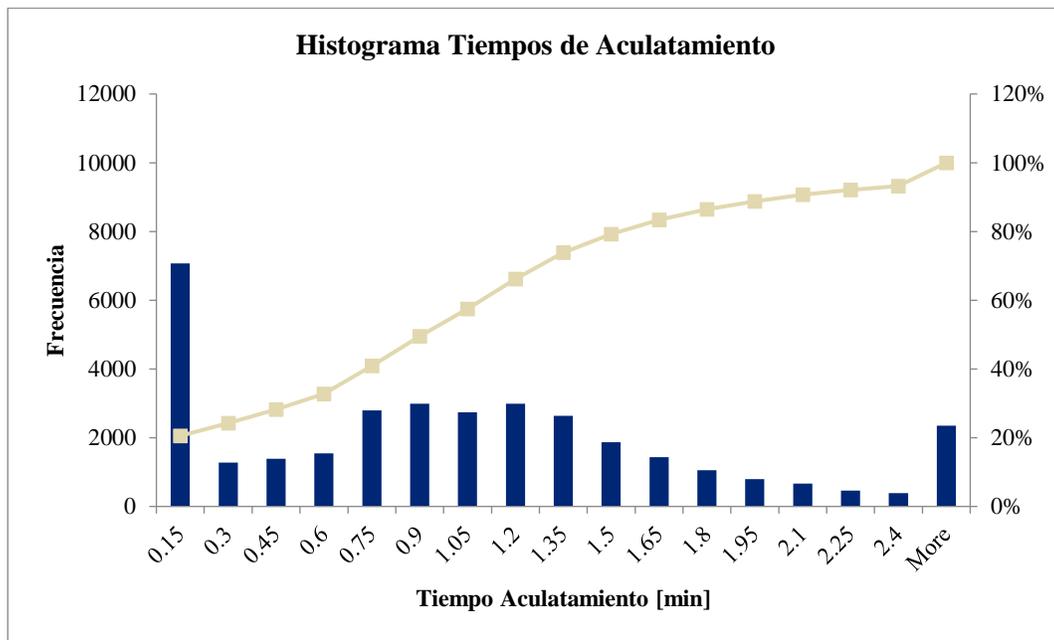


Gráfico 1: Histograma tiempos de acuatamiento datos sin filtrar.

En el gráfico 1 sobre los tiempos de acuatamiento se observa una gran cantidad de datos menores a 10 segundos de acuatamiento, en específico hay 3444 datos donde el tiempo de acuatamiento es 0, lo que en realidad es imposible. Por otro lado, hay camiones que tardan en acuatarse más de 3 minutos producto de quedar muy lejos de la pala o muy cerca de la misma por lo que los camiones deben realizar maniobras adicionales de acuatamiento. El promedio es

aproximadamente 1 minuto el cual es bastante alto y debería disminuir si se quiere lograr un resultado P101.

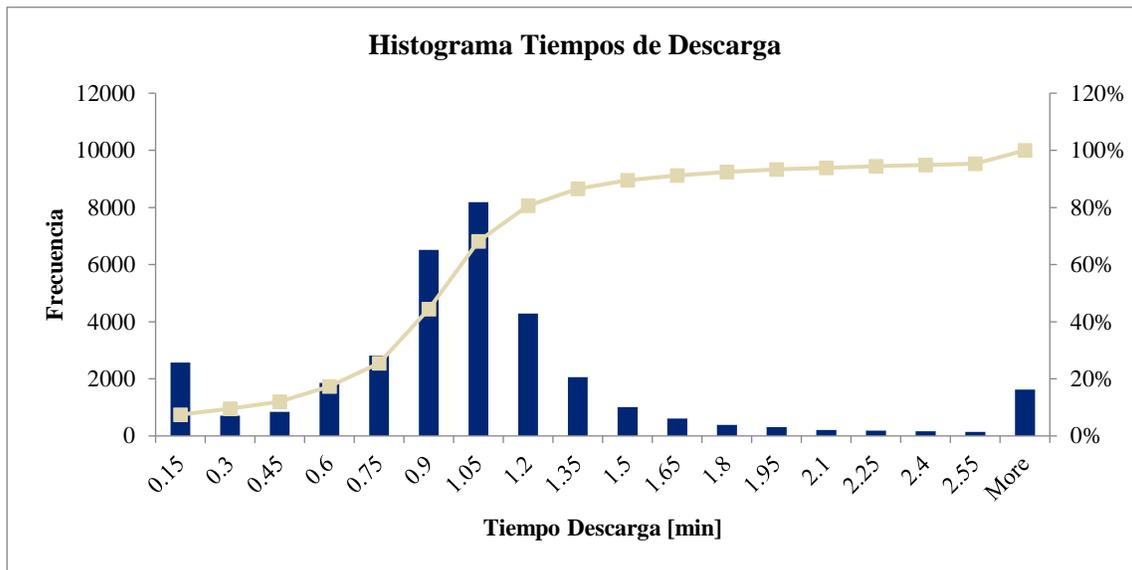


Gráfico 2: Histograma tiempos de descarga de camiones datos sin filtrar.

A partir del gráfico 2 sobre tiempos de descarga se observan datos inusuales con tiempos menores a 0.15 minutos y datos mayores a 3 minutos. En específico hay 871 datos con valor 0 y 1281 datos sobre los 3 minutos, estos datos son erróneos y no debieran considerarse en la base de datos.

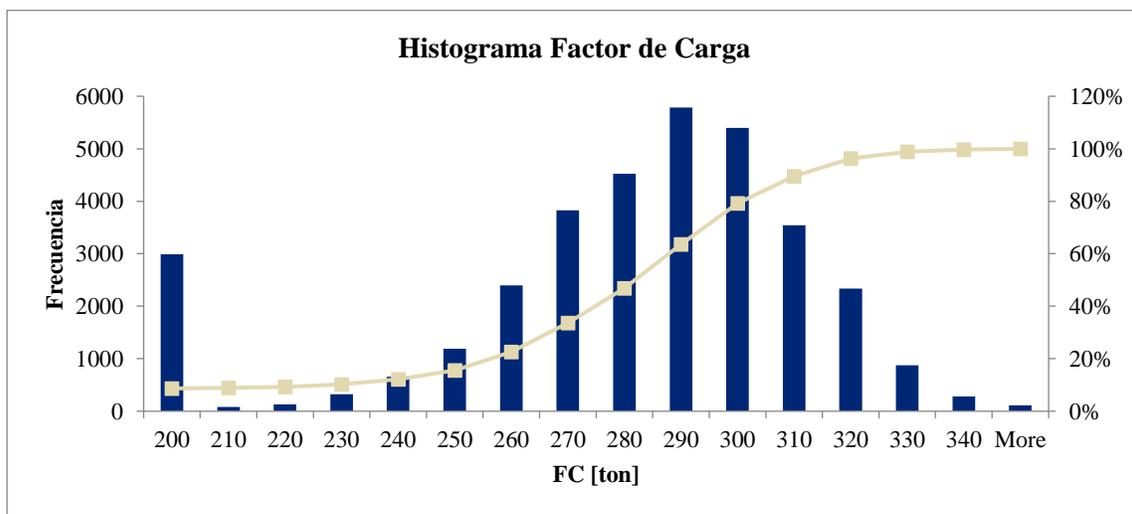


Gráfico 3: Histograma de factor de carga de camiones datos sin filtrar.

En el gráfico 3 sobre factores de carga se observan alrededor de 4524 datos menores a 245 toneladas de factor de carga de camiones, y alrededor de 2452 datos cuyo factor de carga del camión es 0. Esto en la realidad significa que el camión no estuvo trasladando carga por lo que es posible que el pesómetro del camión se encuentre averiado o no registre datos.

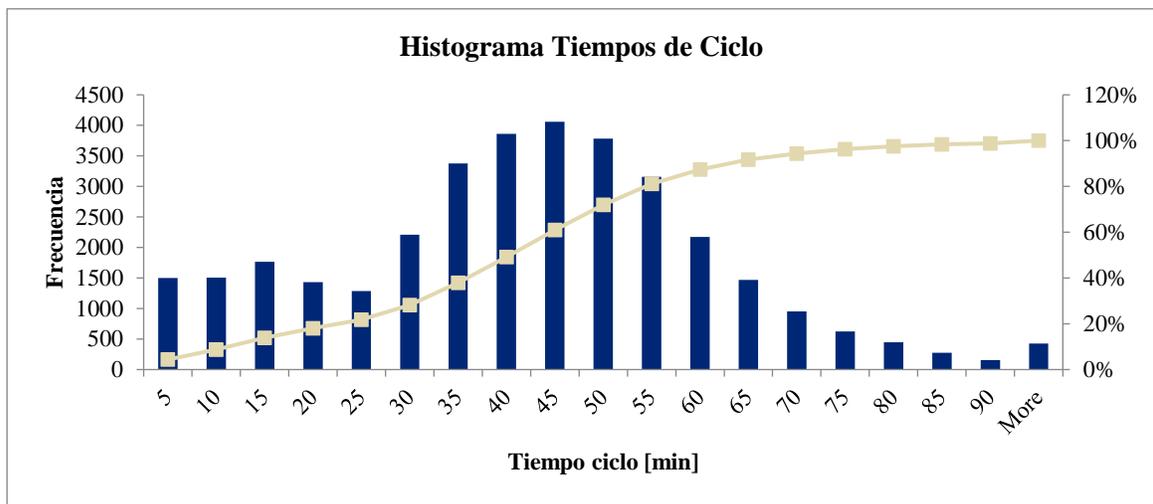


Gráfico 4: Histograma tiempos de ciclo camiones datos sin filtrar.

En el gráfico 4 sobre tiempos de ciclo se observan dos densidades de población de datos. Lo anterior se debe a que hay ciclos cortos de camiones o de remanejo, es decir, de camiones que van desde un stock al chancado.

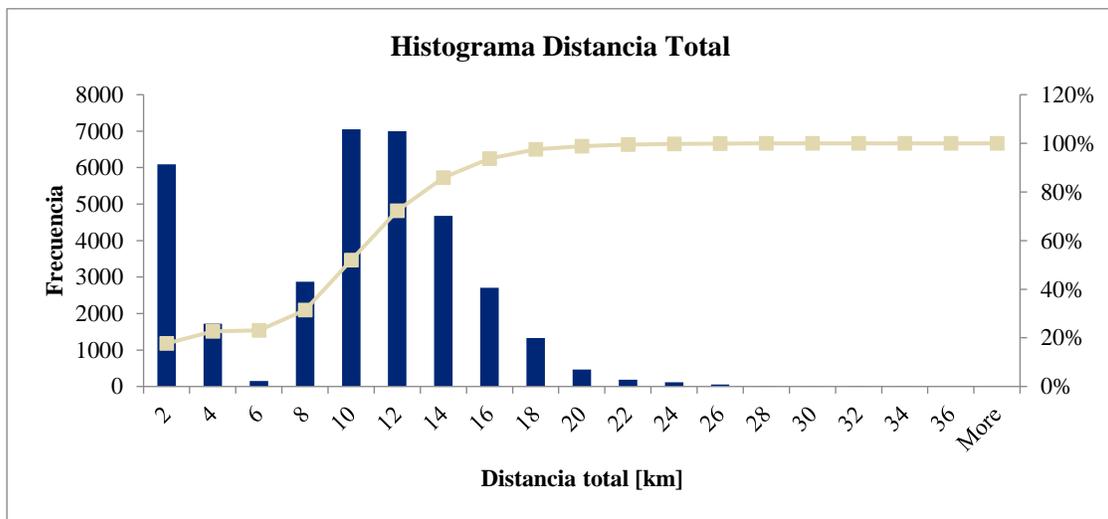


Gráfico 5: Histograma distancia total recorrida por camiones datos sin filtrar.

En el gráfico 5 de distancias se observa una gran densidad de distancias menores a 4 kilómetros. Dichas distancias se deben a esto se debe a los ciclos cortos productos de remanejos al interior de la mina. Sin embargo, de esa cantidad de datos hay 5164 datos con valor 0, por lo que no deberían ser considerados.

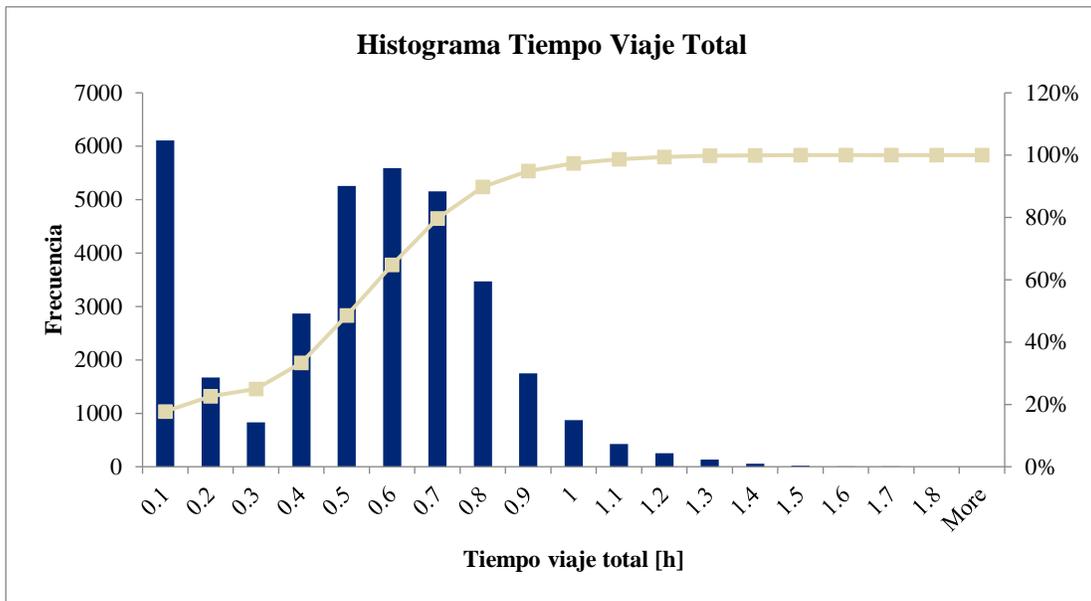


Gráfico 6: Histograma tiempos de viaje total de camiones datos sin filtrar.

En el gráfico 6 de tiempos de viaje se observa una gran cantidad de tiempos de viaje iguales a cero, totalizando 5164 entradas. Estos datos corresponden a la misma data errónea de las distancias del gráfico anterior por lo que tampoco deben ser considerados.

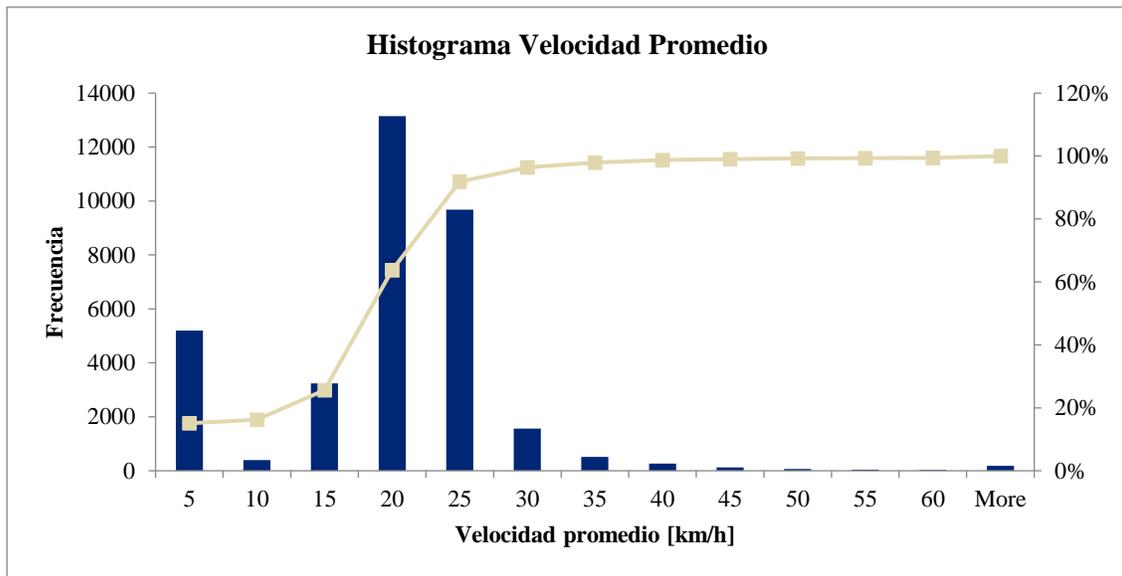


Gráfico 7: Histograma velocidad promedio de camiones datos sin filtrar.

En el gráfico 7 de velocidad promedio se observan esos mismos 5164 datos que corresponden a datos 0 al igual que el histograma de tiempos de viaje, estos datos son eliminados.

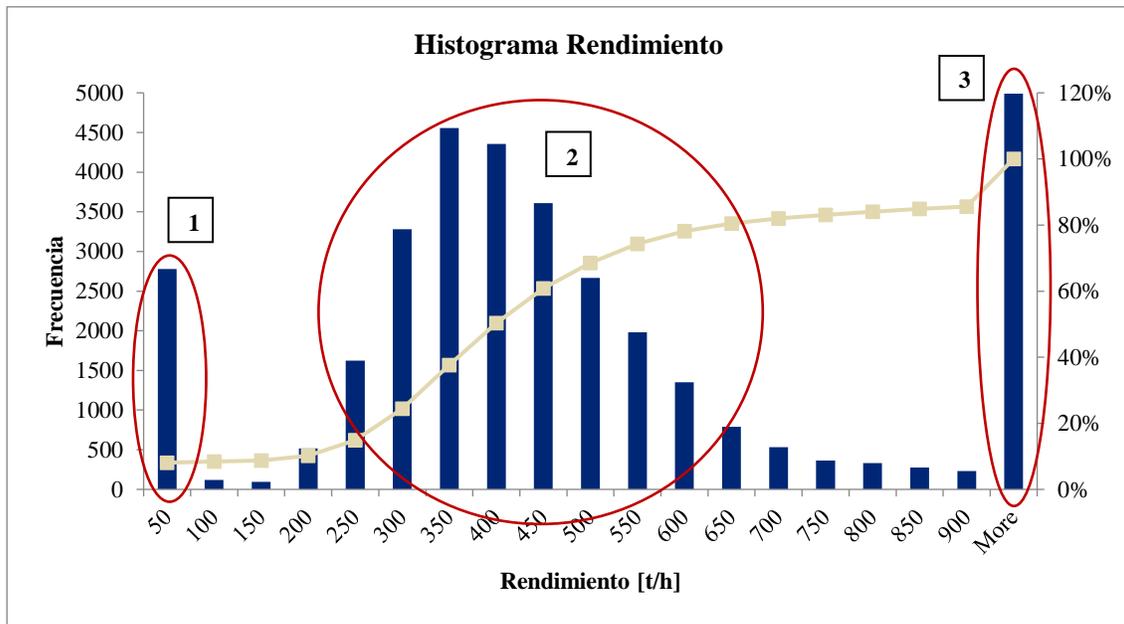


Gráfico 8: Histograma rendimiento de camiones datos sin filtrar.

Finalmente, el gráfico 8 muestra el histograma de rendimiento [t/h] se observan 3 densidades de datos, primero aquellos datos bajo los 200 [t/h], luego aquellos datos que se encuentran en rangos aceptables y los datos sobre 900 [t/h]. Al aplicar distintos filtros determinados en la siguiente sección, la primera y la tercera densidad de datos debería dejar de existir o bien disminuir. El promedio del rendimiento de camiones llega a 811[t/h] que para la mina Los Bronces es muy complejo de conseguir.

#### 4.4 DEFINICIÓN DE FILTROS DE LA BASE DE DATOS

Como se comentó en la sección anterior existe una gran cantidad de datos erróneos tomados por el software Dispatch. Por lo que a la base de datos construida se le deben aplicar filtros con el fin de que sea confiable y representativa de la operación de camiones de la mina.

En la tabla 8 se observan los filtros aplicados por el área de despacho en la mina Los Bronces. Cabe destacar que estos filtros se aplican por variable en cada columna y se elimina solamente el dato en específico que no cumple con el requisito por lo que su porcentaje de error es bastante bajo. Según el Área de Despacho de la mina Los Bronces, los tiempos de ciclo poseen un error del 5-7%. Sin embargo, para este trabajo es necesario eliminar toda la fila si es que un dato no cumple la condición, ya que se requiere saber la relación de una variable con todas las otras.

Se observan variables cuyos filtros eliminan el 42% de la data total como lo es el tiempo de acuatamiento de camiones. De esta manera de los 34456 datos se eliminan 21888 datos que corresponden al 63.5%, teniendo finalmente solo 12568 datos confiables (36.5%) de la base de datos completa.

Tabla 8: Filtros aplicados por el despacho en la mina Los Bronces

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad filas eliminadas	Porcentaje Eliminada [%]
Carga [s]	$x \geq 650$	206	0.60
Cola en carga [s]	$x \geq 1020$	678	1.97
Aculatamiento [s]	$35 \geq x$	10849	31.49
	$120 \leq x$	3614	10.49
Cola en descarga [s]	$x \geq 1600$	107	0.31
Descarga [s]	$x \leq 25$	3754	10.89
	$x \geq 90$	3623	10.51
Factor de carga [t]	$x < 250$	5331	15.47
	$x > 345$	67	0.19
Distancias [km]	$x = 0$	5164	14.98
Tiempos [h]	$x = 0$	5164	14.98
Velocidades [km/h]	$x = 0$	5164	14.98

Dada la baja confiabilidad de los datos con los filtros aplicados anteriormente, se decide aplicar otros filtros. Los filtros de tiempos de carga, tiempos de cola en carga y tiempos de cola en descarga se deciden mantener ya que la data eliminada se encuentra bajo el 2%.

Los intervalos de aceptación para los tiempos de aculatamiento, tiempos de descarga y factor de carga de camiones se modificaron. A modo de ejemplo, el límite superior de los tiempos de descarga aumentó de 1.5 [min] a 3 [min] debido a la gran cantidad de datos cuyo destino es el chancador. Suele ocurrir que dadas las condiciones límites de capacidad en el chancado, la tolva del camión no se descarga por completo en 1 minuto, si no que a veces suele descargar en dos movimientos para no saturar el chancado, por lo tanto, se tiene un tiempo de descarga mucho mayor que cuando un camión descarga en un botadero. Los filtros nuevos aplicados a la base de datos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9: Filtros propios aplicados a la base de datos.

Variable	Criterio de rechazo LB	Criterio de rechazo nuevo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Carga [s]	$x \geq 650$	$x \geq 650$	206	0.60
Cola en carga [s]	$x \geq 1020$	$x \geq 1020$	678	1.97
Aculatamiento [s]	$35 \geq x$	$x = 0$	3444	9.99
	$120 \leq x$	$180 \leq x$	1443	4.19
Cola en descarga [s]	$x \geq 1600$	$x \geq 1600$	107	0.31
Descarga [s]	$x \leq 25$	$x = 0$	871	2.53
	$x \geq 90$	$x \geq 180$	1291	3.75

<b>Factor de carga [t]</b>	x < 250	x < 245	4524	13.13
	x > 345	x > 350	59	0.17
<b>Distancias [km]</b>	x = 0	x < 0.1	5164	14.98
<b>Tiempos [h]</b>	x = 0	x = 0	5164	14.98
<b>Velocidades [km/h]</b>	x = 0	x > 65	160	0.46
		x < 2	5165	14.99

De esta manera de los 34456 datos se eliminan 13395 datos que corresponden al 38.9%, teniendo finalmente 21061 datos confiables (61.1%) de la base de datos completa. Por lo tanto, se recuperan 8493 (24.6%) datos válidos a la base de datos antes filtrada.

Decir que el 58% de la data de una mina es confiable sigue siendo bajo aún. Por lo que para el caso de los tiempos fijos se toma la decisión de recuperar datos. A modo de ejemplo, en una fila puede que solo haya uno de los tiempos fijos faltante y para no eliminar esa fila se decide entonces colocar el promedio de esa variable en la casilla. Como se observa en la ilustración 21 en la primera tabla se eliminarían 2 de 3 filas por el dato faltante, sin embargo, realizando este procedimiento no se eliminaría ninguna fila de la tabla.

<b>Carga [min]</b>	<b>Acumulamiento [min]</b>	<b>Cola en Pala [min]</b>	<b>Cola Descarga [min]</b>	<b>Descarga [min]</b>	<b>OPNP [min]</b>
8.25	0.733333	0	0		0
1.533333	0.616667	2.498	0	1	3.033333
1.516667		0	0.083333	1.05	2.033333

<b>Carga [min]</b>	<b>Acumulamiento [min]</b>	<b>Cola en Pala [min]</b>	<b>Cola Descarga [min]</b>	<b>Descarga [min]</b>	<b>OPNP [min]</b>
8.25	0.733333	0	0	0.943	0
1.533333	0.616667	2.498	0	1	3.033333
1.516667	1.133	0	0.083333	1.05	2.033333

*Ilustración 21: Recuperación de data mediante el promedio de la variable.*

De esta manera la base de datos según los filtros aplicados por Los Bronces quedaría con 25239 datos confiables que corresponden al 73.2% de la data total y los filtros quedarían según la tabla 10.

Tabla 10: Filtros aplicados por LB luego de aplicar procedimiento de recuperación de data.

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Carga [s]	$x \geq 650$	0	0
Cola en carga [s]	$x \geq 1020$	0	0
Aculatamiento [s]	$x = 0$	0	0
	$180 \leq x$	0	0
Cola en descarga [s]	$x \geq 1600$	0	0
Descarga [s]	$x = 0$	0	0
	$x \geq 180$	0	0
Factor de carga [t]	$x < 250$	5331	15.47
	$x > 345$	67	0.19
Distancias [km]	$x = 0$	5164	14.98
Tiempos [h]	$x = 0$	5164	14.98
Velocidades [km/h]	$x = 0$	5164	14.98

De la misma forma, la data según los filtros propios aplicados corresponde a 25811 datos que corresponden al 75% de la data total inicial (34456 datos). Esta corresponde a la BD que será finalmente analizada por los grafos. Los filtros aplicados en este trabajo quedaron según la tabla 11.

Tabla 11: Filtros propios luego de aplicar procedimiento de recuperación de data

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Carga [s]	$x \geq 650$	0	0
Cola en carga [s]	$x \geq 1020$	0	0
Aculatamiento [s]	$x = 0$	0	0
	$180 \leq x$	0	0
Cola en descarga [s]	$x \geq 1600$	0	0
Descarga [s]	$x = 0$	0	0
	$x \geq 180$	0	0
Factor de carga [t]	$x < 245$	4524	13.13
	$x > 350$	59	0.17
Distancias [km]	$x < 0.1$	5164	14.98
Tiempos [h]	$x = 0$	5164	14.98
Velocidades [km/h]	$x > 65$	160	0.46
	$x < 2$	5165	14.99

## 4.5 ANÁLISIS DE BASE DE DATOS FILTRADA

Una vez filtrada la base de datos se vuelven a testear los datos mediante un estudio estadístico clásico. A continuación, se muestran las tablas de estadísticas básicas de las variables que afectan al rendimiento y los histogramas de las mismas variables vistas en la sección anterior con el fin de ver la mejora de sus distribuciones.

En la tabla 12 se observan las estadísticas básicas de todos los tiempos considerados en los tiempos fijos de los camiones y el factor de carga de los camiones con todos los filtros aplicados. En la tabla 13 se observan las estadísticas básicas de las distancias recorridas por los camiones en cada viaje tanto vacío como cargado y la distancia total, también se muestra la velocidad de camiones vacíos, llenos y el promedio. En la tabla 14 se muestran las estadísticas básicas de los tiempos de viaje de los camiones cuando van vacíos, llenos y el total, también se muestra el tiempo de ciclo y los tiempos fijos para finalmente mostrar el rendimiento de camiones con todos los filtros.

Tabla 12: Estadísticas básicas de los tiempos fijos y el factor de carga de la BD filtrada.

Parámetros	Carga [min]	Cola en pala [min]	Acuatamiento [min]	Cola Descarga [min]	Descarga [min]	OPNP [min]	FC [t]
Promedio	2.15	2.50	1.14	2.10	0.94	2.13	286.14
Mediana	1.73	0.80	1.13	0.78	0.94	0	286.00
Moda	1.28	0.00	1.13	0	0.94	0	284
Desviación Estándar	1.40	3.51	0.28	3.40	0.20	11.53	19.59
Varianza	1.97	12.31	0.08	11.58	0.04	132.99	383.74
Mínimo	0	0	0.58	0	0.42	0	245
Máximo	10.8	16.98	2	26.62	1.5	282.32	350

Tabla 13: Estadísticas básicas de las distancias y velocidades de la base de datos filtrada.

Parámetros	Distancia Vacío [km]	Distancia Lleno [km]	Distancia Total [km]	Velocidad vacío [km/h]	Velocidad Lleno [km/h]	Velocidad Promedio [km/h]
Promedio	5.50	5.03	10.54	25.04	18.38	19.67
Mediana	5.14	4.94	10.56	22.92	17.20	19.25
Moda	4.45	4.45	8.89	21.6	18	17.67
Desviación Estándar	2.68	2.06	4.05	21.40	12.38	5.12
Varianza	7.20	4.23	16.40	457.83	153.20	26.25
Mínimo	0.25	0.25	0.5	1.18	1.52	2.95
Máximo	19.95	19.57	33.56	874.56	543.54	64.89

Tabla 14: Estadísticas básicas de los tiempos de viajes, ciclo, fijos y rendimiento de la BD filtrada.

Parámetros	T Viaje vacío [h]	T Viaje Lleno [h]	T Viaje Total [h]	T Ciclo [min]	T Fijos [min]	TPH [t/h]
Promedio	0.25	0.30	0.55	44.21	10.96	459.54
Mediana	0.23	0.30	0.56	42.97	8.33	399.67
Moda	0.22	0.21	0.59	33.12	4.40	461.54
Desviación Estándar	0.14	0.14	0.23	18.32	12.53	238.69
Varianza	0.02	0.02	0.05	335.54	157.01	56973.71
Mínimo	0.02	0.02	0.04	8.08	1.57	50.23
Máximo	1.00	1.00	1.67	321.94	287.31	2308.45

A continuación, se muestran los histogramas de las mismas variables antes analizadas para ver la variación después de aplicar los filtros, el resto de los histogramas se muestran en la sección de anexos 9.4.

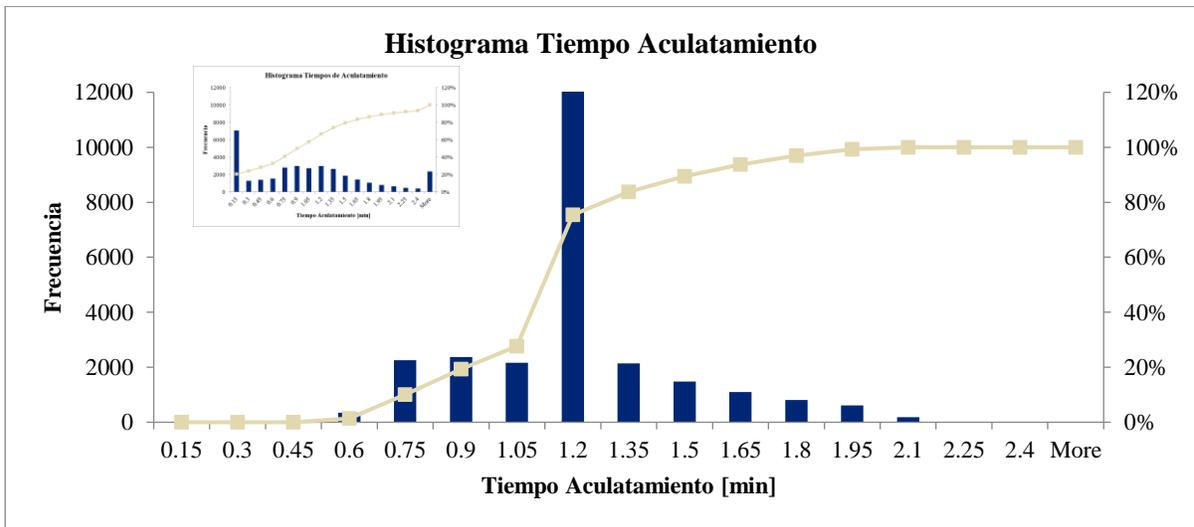


Gráfico 9: Histograma tiempos de acuatamiento de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

El gráfico 9 muestra que los tiempos de acuatamiento de camiones mejoraron bastante ya que los tiempos menores a 0.15 min ya no existen y la data se comporta como el promedio según el procedimiento realizado. Por otro lado, ya no se tienen tantos tiempos mayores a 3 minutos.

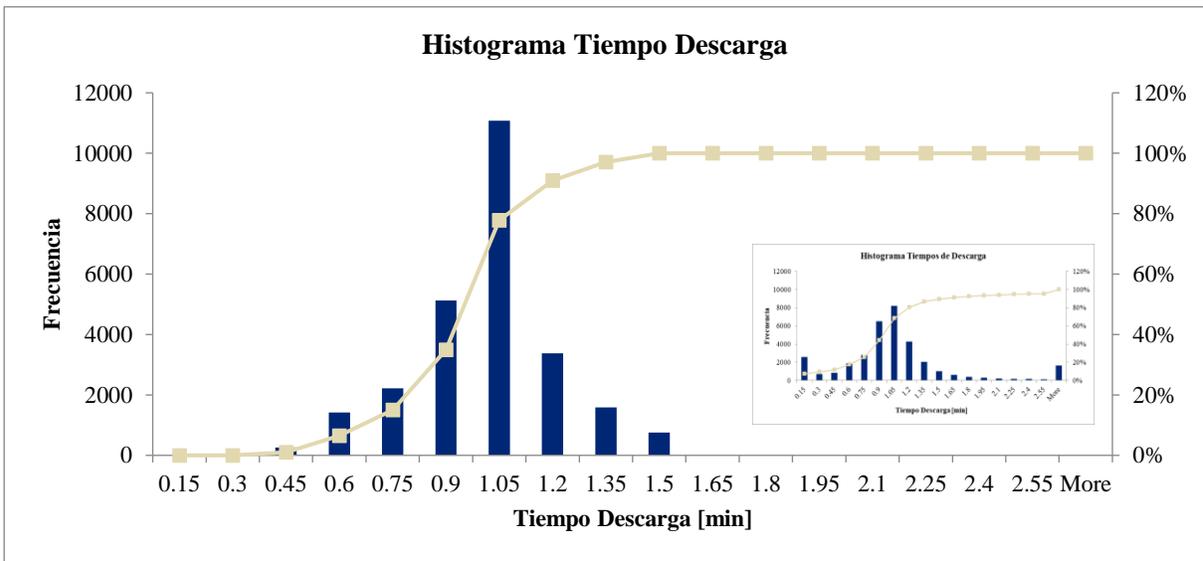


Gráfico 10: Histograma tiempos de descarga de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

El gráfico 10 muestra los tiempos de descarga mejoraron bastante frente al anterior ya que no existen datos menores 0.15 minutos ni tampoco tiempos mayores a 3 minutos y, por lo tanto, la data se comporta como el promedio según el procedimiento realizado para los tiempos fijos.

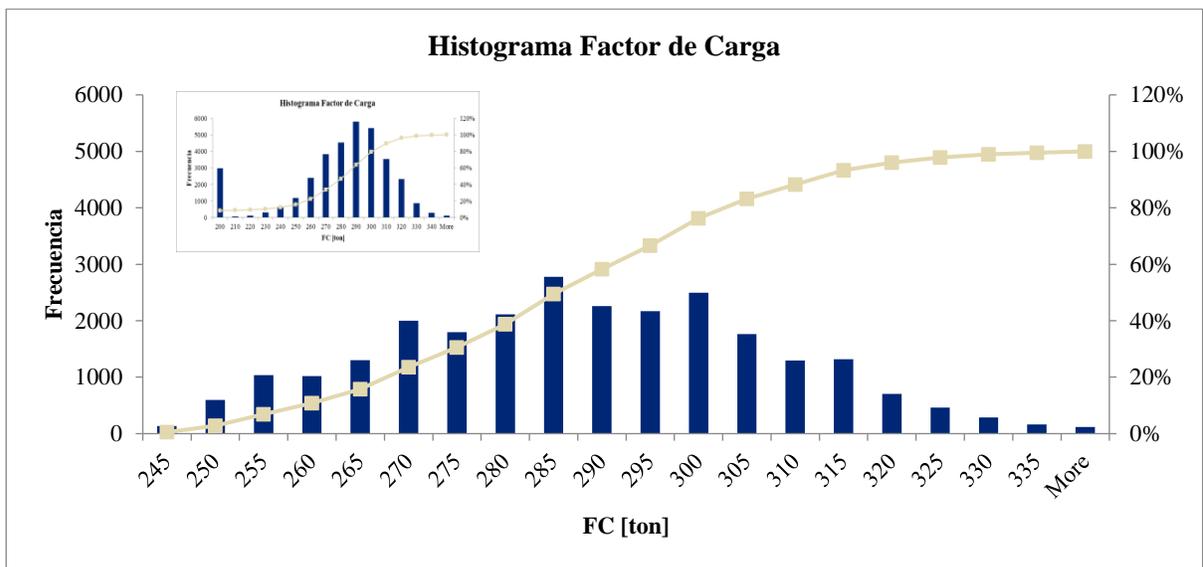


Gráfico 11: Histograma de factores de carga de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

El gráfico 11 de factores de carga mejoró bastante su forma y ya no posee esa gran cantidad de datos bajo las 200 toneladas (3000 datos).

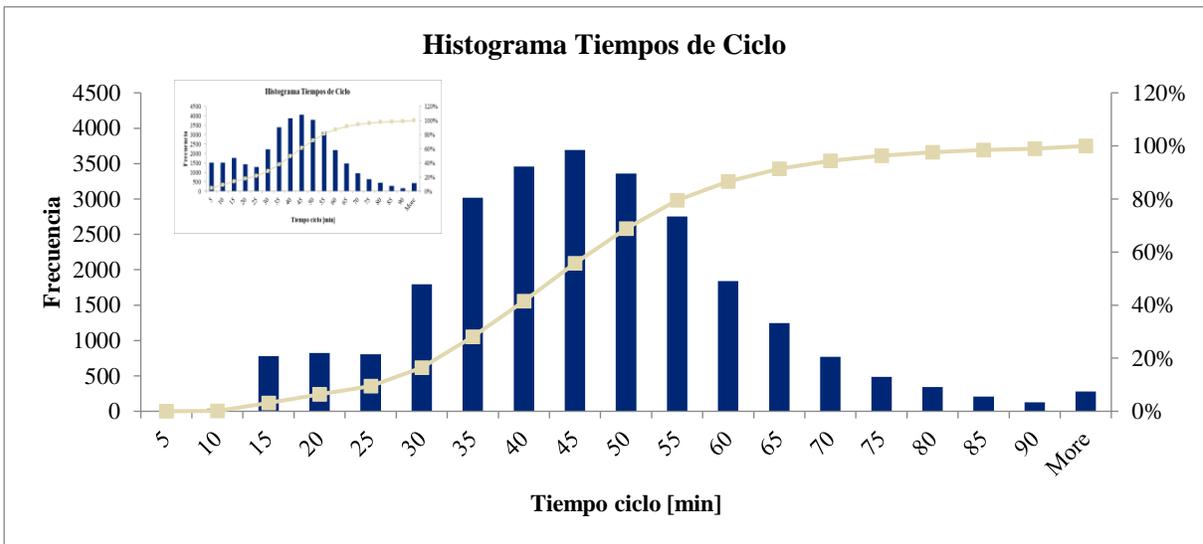


Gráfico 12: Histograma tiempos de ciclo de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

En el gráfico 12 de tiempos de ciclo se observa que una de las densidades que antes se notaba bien marcada tiende a desaparecer, sin embargo, quedan datos entre 10 y 25 minutos que corresponden a ciclos cortos principalmente de remanejo de la pala 07 y el cargador frontal ubicados cerca de los chancadores.

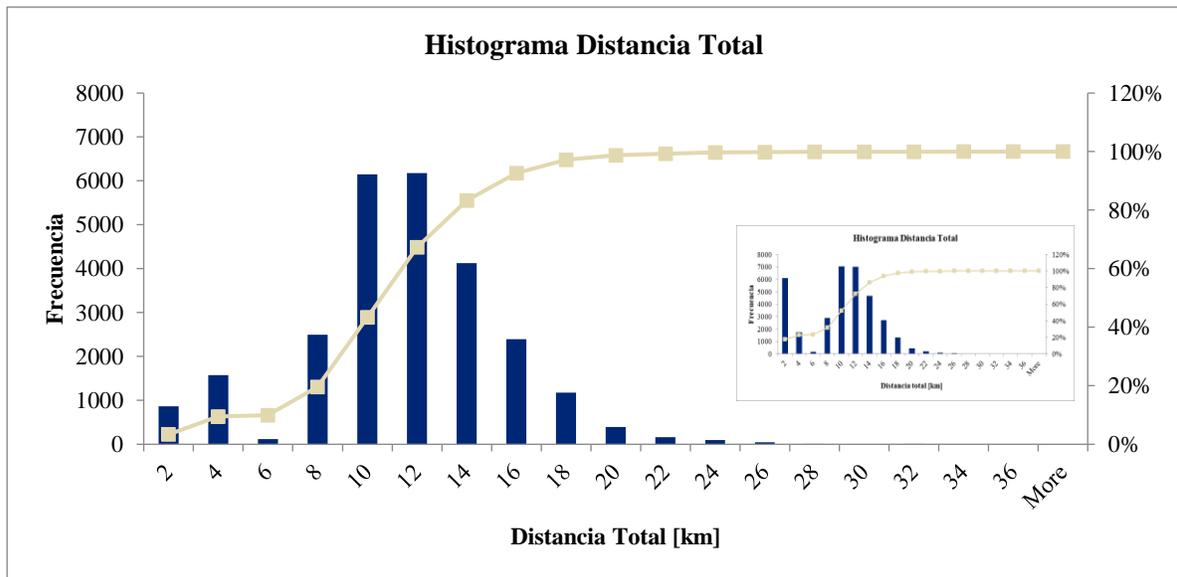


Gráfico 13: Histograma distancia total recorrida, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

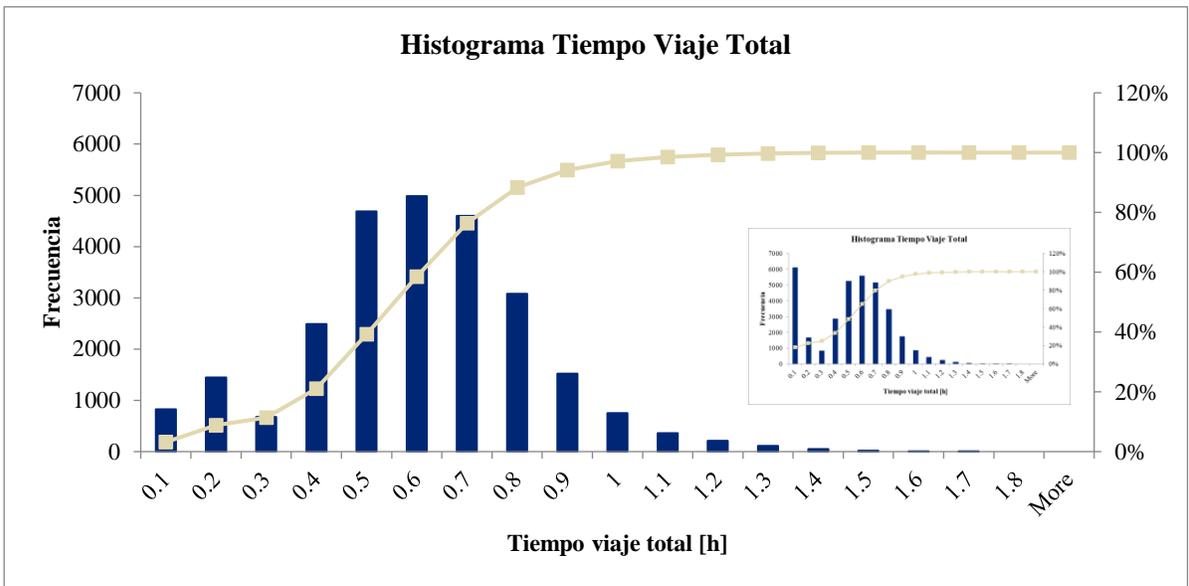


Gráfico 14: Histograma tiempos de viaje total, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

En el caso de los gráficos 13 y 14 de distancias recorridas y tiempos de viaje en el ciclo se observan mejoras principalmente en el lado izquierdo de los histogramas ya que no se consideran las malas imputaciones que entregaban un dato cero. Ambos histogramas poseen similares comportamientos. Se observa además una vecindad pequeña de ciclos cortos antes mencionada.

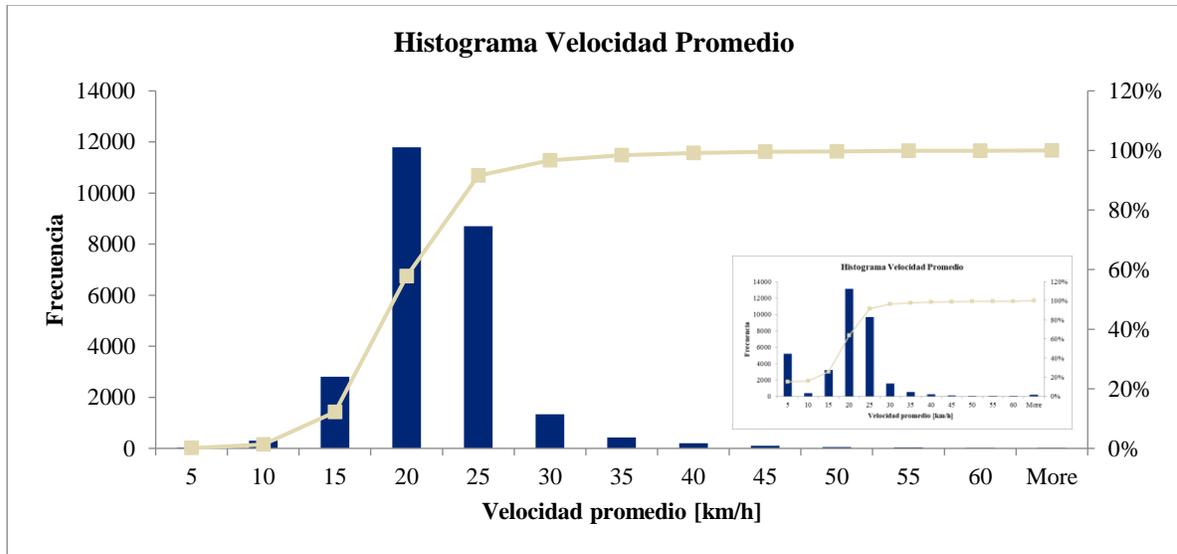


Gráfico 15: Histograma velocidad promedio de camiones, datos filtrados. El gráfico interno, datos sin filtrar.

En el gráfico 15 de velocidades de camiones promedio se observa que la mayoría se encuentra entre 15 y 25 [km/h] y ya no existen velocidades menores a 2 [km/h] ni tampoco mayores a 65 [km/h].

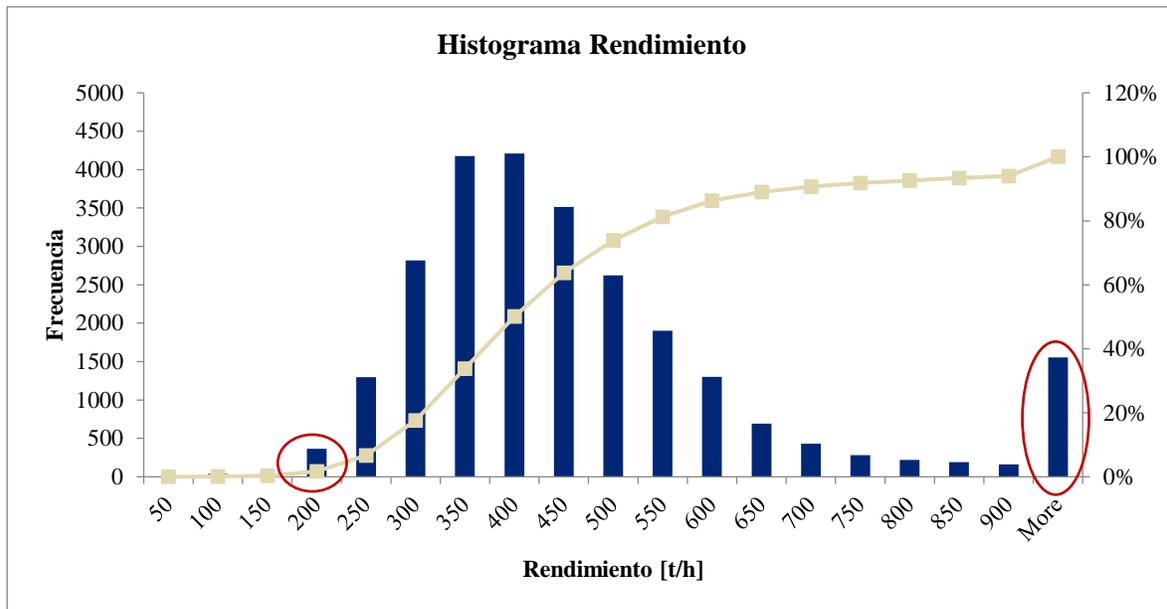


Gráfico 16: Histograma rendimiento de camiones, datos filtrados.

Finalmente, del gráfico 16 de rendimiento se observa que su forma mejoró y su rendimiento ahora es de 459 [t/h] siendo un rendimiento realista para Los Bronces, sin embargo, se siguen manteniendo dos comportamientos:

- Rendimientos mayores a 900 [t/h] se deben a:
  - Circuitos cortos principalmente desde stock (PAB07 y CFL08) a chancado que corresponden al 93% de la data, en donde se recorren distancias de 2.5 [km] aproximadamente el ciclo completo.
- Rendimientos menores a 200 [t/h] se deben a:
  - Se incluyen los tiempos operativos no productivos al tiempo de ciclo correspondiendo al 82% de la data. El tiempo de llenado de combustible suma alrededor de 15 minutos adicionales por evento.

#### 4.6 CONSTRUCCIÓN DE REDES BAYESIANAS

Con la ayuda de software *RStudio* es posible obtener los grafos mediante la implementación de diferentes algoritmos. Estos algoritmos requieren de una base de datos previamente armada. La base de datos es un archivo Excel donde en la primera fila van los nombres de las variables a analizar las cuales serán los nodos de los grafos, las filas siguientes corresponden a todos los viajes realizados por los camiones de extracción en un periodo definido. Las variables son continuas por lo que cada casilla posee un valor numérico, como se observa en la ilustración 22.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Carga	Cola en Pala	Aculatamiento	Cola Descarga	Descarga	FC	Distancia Total	T viaje Total	Velocidad Promedio	OPNP	Tfijos	Tciclo	TPH	
2	3.83	0.00	0.75	0.00	1.07	275.00	17.15	0.74	23.25	0.00	5.65	49.92	330.55	
3	1.07	0.00	1.13	0.00	0.94	311.00	13.40	0.62	21.60	6.77	9.91	47.14	395.82	
4	1.30	4.92	1.97	0.73	1.17	314.00	16.29	1.07	15.24	0.00	10.08	74.23	253.79	
5	2.00	0.00	0.93	0.00	0.94	311.00	14.11	0.74	19.15	4.48	8.36	52.56	355.03	
6	1.60	1.28	1.13	1.63	1.05	308.00	14.82	0.92	16.19	0.00	6.70	61.65	299.76	
7	1.53	5.63	0.78	4.77	1.13	287.00	16.79	0.78	21.46	0.00	13.85	60.78	283.30	
8	1.28	0.00	1.22	7.47	1.15	332.00	9.19	0.71	13.00	0.00	11.12	53.57	371.87	
9	5.15	0.00	0.63	1.98	0.87	275.00	8.31	0.52	16.06	0.00	8.63	39.68	415.79	
10	2.15	0.00	1.13	0.00	0.94	321.00	8.62	0.40	21.68	0.00	4.23	28.08	686.00	
11	1.13	3.10	0.77	0.00	0.94	284.00	16.23	0.72	22.42	0.00	5.94	49.38	345.10	
12	1.18	1.35	0.88	8.68	0.97	284.00	14.30	0.87	16.48	0.00	13.07	65.13	261.62	
13	1.20	0.00	1.55	0.00	0.97	272.00	8.26	0.39	21.05	0.00	3.72	27.25	598.90	
14	1.85	0.00	1.13	0.05	0.72	281.00	8.26	0.39	21.37	0.00	3.75	26.93	626.00	
15	2.38	3.62	1.22	0.00	0.97	299.00	8.26	0.45	18.35	0.00	8.18	35.18	509.90	
16	1.25	0.33	0.77	0.00	1.17	295.00	10.49	0.50	20.79	0.00	3.52	33.78	523.93	
17	0.97	0.00	1.13	0.00	0.97	269.00	10.26	0.65	15.70	0.00	3.07	42.27	381.86	
18	1.05	0.22	0.62	0.00	0.94	269.00	13.15	0.71	18.52	0.00	2.83	45.43	355.30	
19	1.30	2.43	0.78	0.00	0.93	302.00	10.49	0.42	25.07	0.00	5.45	30.55	593.13	
20	1.25	4.52	1.43	1.33	0.93	311.00	10.49	0.45	23.31	0.00	9.47	36.47	511.70	
21	5.92	0.00	1.03	0.08	0.92	288.00	11.39	0.51	22.31	0.00	7.95	38.58	447.86	
22	3.60	0.00	1.13	0.00	1.02	281.00	10.77	0.58	19.55	0.00	5.77	40.60	420.05	

Ilustración 22: Base de datos en Microsoft Excel® versión 1902.

De esta manera se han considerado 13 variables influyentes en el cálculo del rendimiento de camiones. Sin embargo, se pueden agregar más variables si se desea y ver su influencia en el rendimiento. Los nodos de los grafos considerados se enlistan a continuación:

- **Carga:** Tiempo de que se demora la pala en cargar al camión.
- **Cola en Pala:** Tiempo de espera de los camiones en la fase para ser cargados por la pala.
- **Cola en Descarga:** Tiempo de espera de los camiones en el vaciado para descargar la tolva.
- **Aculatamiento:** Tiempos de maniobra del camión para estacionarse al lado de la pala y ser cargado.
- **Descarga:** Tiempo que se demora el camión en descargar de la tolva en los puntos de vaciado.
- **OPNP:** Tiempos operativos no productivos
- **Factor de Carga:** Cantidad de material o Tonelaje que traslada un camión.
- **Distancia Total:** Distancia total del ciclo que recorre un camión.
- **Velocidad Promedio:** Velocidad promedio de traslado de camión durante todo el ciclo.

- **Tiempo de Ciclo:** Corresponde a la suma de todos los tiempos fijos con los tiempos de viaje del camión en un ciclo.
- **Tiempos Fijos:** Corresponden a la suma de los tiempos fijos del camión en el ciclo.
- **Tiempos de Viaje:** Corresponde al tiempo de viaje del camión en el ciclo.
- **TPH:** Corresponde al rendimiento de los camiones en el ciclo.

El código utilizado en el software *RStudio* se muestra en los Anexos 9.10.

#### 4.7 SELECCIÓN DE GRAFOS MEDIANTE DESCARTE

En esta sección se muestra la metodología de descarte de los algoritmos que menos se acomodan a la base de datos de los viajes de camiones en la mina Los Bronces en el periodo de julio 2019.

Los criterios utilizados para este análisis son los siguientes:

- El grafo estudiado no puede tener arcos no dirigidos, ya que de esta manera no se condicionan las variables y, por lo tanto, podría generar un ciclo o bucle. Por ejemplo, en el algoritmo de Restricción *Fast Incremental Association* (ilustración 33) si nos fijamos en el arco del acuatamiento y el OPNP tenemos un arco no dirigido, si el arco condicionara desde acuatamiento hacia el OPNP entonces se estaría formando un ciclo entre el tiempo de acuatamiento, tiempo OPNP y tiempos fijos, es decir, que cada tiempo depende del otro y a su vez del otro y así sucesivamente.
- El nodo de rendimiento o “TPH” no puede tener hijos, es decir, que otras variables dependan del rendimiento ya que en este trabajo lo que se busca es ver la variación de rendimiento a partir de otras variables.
- En el caso de los algoritmos de puntaje e híbridos el score debe ser el valor más grande posible porque los algoritmos están basados en maximizar el puntaje.
- Una baja cantidad de padres de “TPH” indican baja información de dependencia del rendimiento, en este caso buscamos la mayor cantidad de variables que hagan depender directamente al rendimiento, por lo que si un algoritmo posee una cantidad de padre de rendimiento menor a 4 será descartado.
- Un criterio menos relevante es la cantidad de pruebas de independencia condicional, ya que a mayor cantidad de c.i. test, mayor es el tiempo que demore el programa en construir el grafo.

#### 4.8 ARCOS DEL GRAFO ESCOGIDO

Una vez escogido el grafo que mejor se acomode a la base de datos de ciclos mineros se analizan sus arcos uno a uno. Si se encuentra un arco que no posea un comportamiento esperado en minería se analiza la correlación del arco, y si es baja (menor a 0.1) el arco es eliminado.

Al eliminar los arcos se debe corroborar que el *score* de la red bayesiana no varíe demasiado. Si esto ocurre significa que uno de los arcos que se eliminó era uno de los arcos fundamentales de la red y esa relación ocurre con frecuencia en el ciclo minero. Al eliminar los arcos erróneos llamaremos el nuevo grafo como grafo modificado.

#### 4.9 RELACIÓN ENTRE VARIABLES MEDIANTE CORRELACIONES

Teniendo el grafo modificado las aristas o arcos del grafo representarán la influencia o incidencia de una variable sobre otra, esto se verá reflejado mediante el ensanchamiento de la flecha si es mayor la influencia y con un color diferente si la correlación es positiva o negativa con el fin de remarcar aquellas variables más relacionadas.

A modo de ejemplo, en la ilustración 23 se muestra con color rojo una correlación negativa o variables inversamente proporcionales, es decir, a mayor distancia menor es el rendimiento. Por otro lado, en color azul muestra una correlación positiva o variables directamente proporcionales, es decir, a mayor factor de carga entonces mayor es el rendimiento. Mientras más ensanchada sea la flecha mayor es la correlación de las variables o incidencia de una sobre otra, este valor va de 0 a 1.

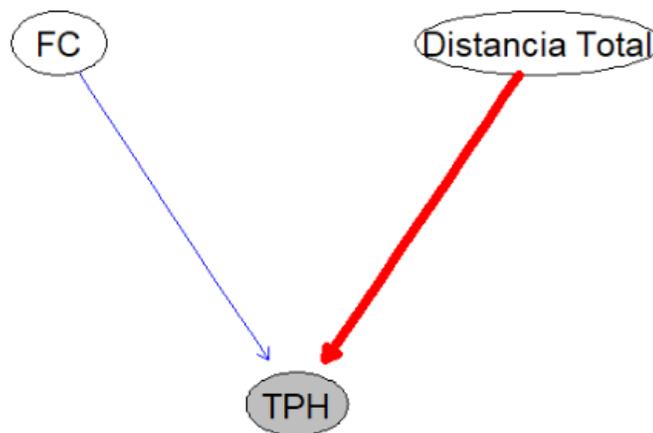


Ilustración 23: Representación gráfica de la correlación de variables.

## 5 RESULTADOS

---

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al aplicar los algoritmos a la base de datos filtrada del mes de julio 2019. Además, se muestra la validación del modelo aplicando la misma metodología a al mes de septiembre 2019 y el periodo de invierno 2019.

### 5.1 RESULTADOS MES DE JULIO 2019

#### 5.1.1 Aplicación de Algoritmos de Puntaje

A continuación, se muestra el resultado obtenido al aplicar los distintos algoritmos de puntaje. En esta sección, solamente se mostrarán los grafos y sus características obtenidas por el software *RStudio*.

```
Bayesian network learned via Score-based methods

model:
[Carga|Acuatamiento|Carga][Distancia Total|Carga:Acuatamiento][OPNP|Distancia Total]
[Velocidad Promedio|Carga:Distancia Total][Cola Descarga|Distancia Total:Velocidad Promedio]
[T viaje Total|Carga:Cola Descarga:OPNP:Distancia Total:Velocidad Promedio]
[FC|Carga:Cola Descarga:T viaje Total][Cola en Pala|Acuatamiento:FC:Distancia Total:Velocidad Promedio]
[Descarga|FC:T viaje Total][Tciclo|Carga:Acuatamiento:Cola en Pala:Cola Descarga:OPNP:FC:T viaje Total]
[Tfijos|Carga:Acuatamiento:Cola en Pala:Cola Descarga:OPNP:Tciclo:FC:Distancia Total:Velocidad Promedio]
[TPH|Cola Descarga:OPNP:Tfijos:FC:Distancia Total:T viaje Total:Velocidad Promedio]
nodes:                               13
arcs:                                  45
  undirected arcs:                     0
  directed arcs:                       45
average markov blanket size:           9.85
average neighbourhood size:            6.92
average branching factor:              3.46

learning algorithm:                    Hill-Climbing
score:                                  BIC (Gauss.)
penalization coefficient:              5.079278
tests used in the learning procedure:  618
optimized:                             TRUE
```

*Ilustración 24: Características del algoritmo de Puntaje Hill-Climbing*

## Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing

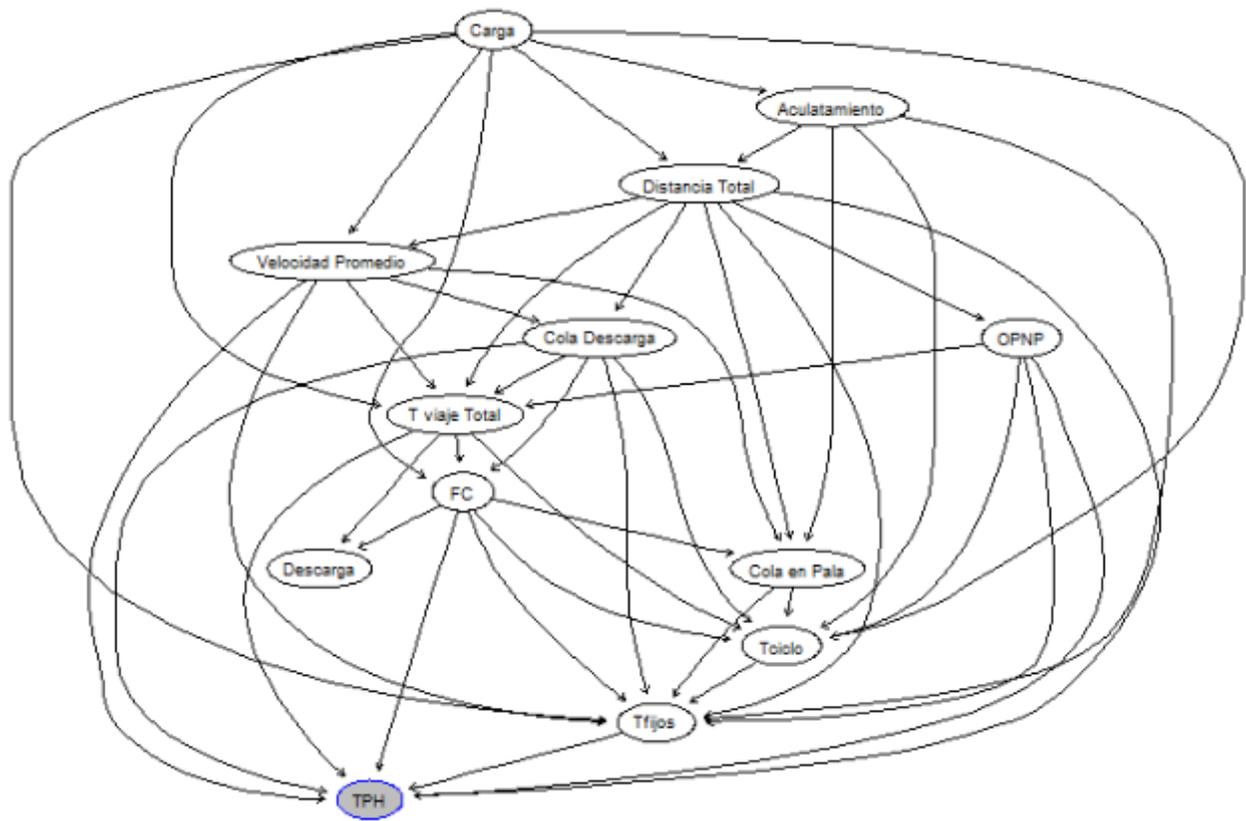


Ilustración 25: Grafo del algoritmo de Puntaje Hill-Climbing

Bayesian network learned via Score-based methods

```

model:
[Carga][Cola Descarga][Distancia Total|Carga:Cola Descarga][OPNP|Distancia Total]
[T viaje Total|Carga:Distancia Total][FC|Carga:Cola Descarga:T viaje Total]
[Velocidad Promedio|Carga:Cola Descarga:OPNP:Distancia Total:T viaje Total]
[Cola en Pala|FC:Distancia Total:Velocidad Promedio][Acuatamiento|Carga:Cola en Pala:Distancia Total]
[Tciclo|Carga:Acuatamiento:Cola en Pala:Cola Descarga:OPNP:FC:T viaje Total]
[Tfijos|Carga:Acuatamiento:Cola en Pala:Cola Descarga:OPNP:Tciclo:FC:Distancia Total:Velocidad Promedio]
[TPH|Cola Descarga:OPNP:Tfijos:FC:Distancia Total:T viaje Total:Velocidad Promedio]
[Descarga|Cola en Pala:TPH:FC]
nodes:                                13
arcs:                                  45
  undirected arcs:                      0
  directed arcs:                         45
average markov blanket size:            10.15
average neighbourhood size:             6.92
average branching factor:               3.46

learning algorithm:                    Tabu Search
score:                                  BIC (Gauss.)
penalization coefficient:               5.079278
tests used in the learning procedure:   1513
optimized:                              TRUE
  
```

Ilustración 26: Características del algoritmo de Puntaje Tabu Search

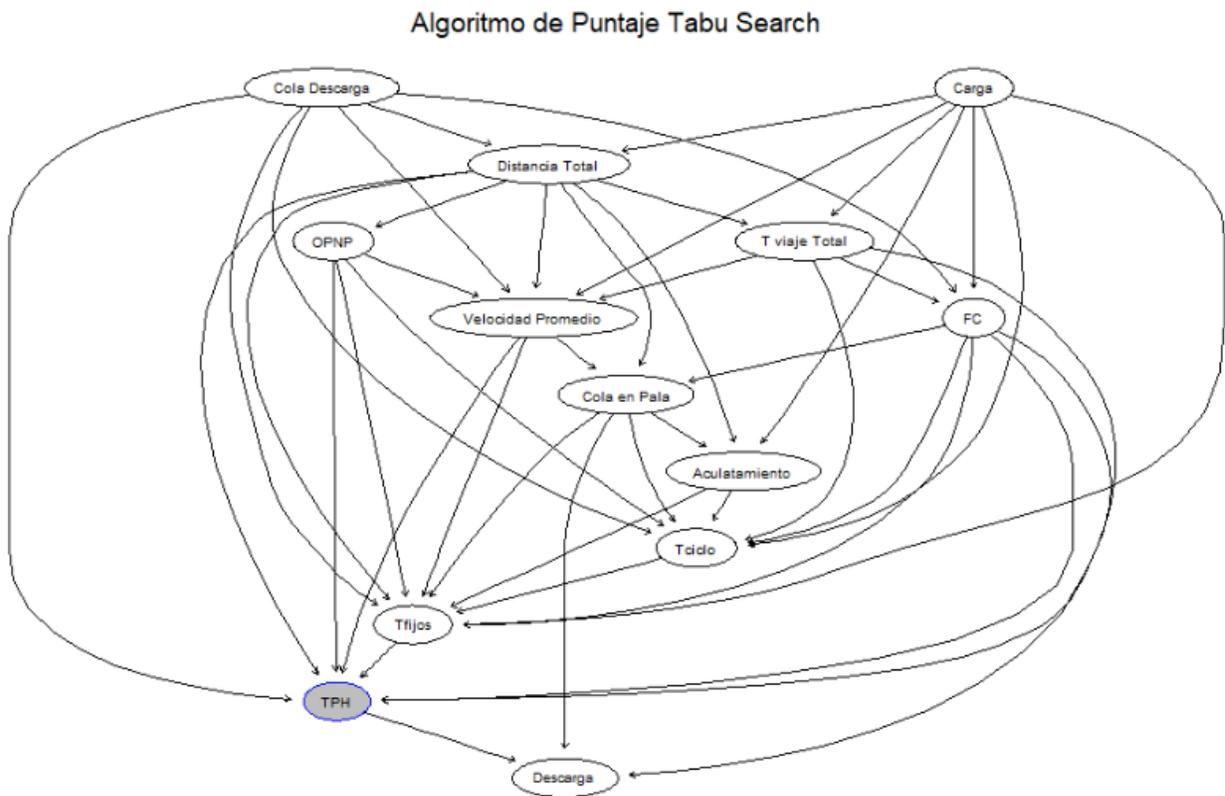


Ilustración 27: Grafo del algoritmo de Puntaje Tabu Search

### 5.1.2 Aplicación de Algoritmos de Restricción

A continuación, se muestra el resultado obtenido al aplicar los distintos algoritmos de restricción. En esta sección, solamente se mostrarán los grafos y sus características obtenidas por el software *RStudio*.

```
Bayesian network learned via Constraint-based methods

model:
  [partially directed graph]
nodes:                               13
arcs:                                  17
  undirected arcs:                     4
  directed arcs:                       13
average markov blanket size:           4.46
average neighbourhood size:            2.62
average branching factor:              1.00

learning algorithm:                   Grow-Shrink
conditional independence test:         Pearson's Correlation
alpha threshold:                      0.05
tests used in the learning procedure:  16038
```

Ilustración 28: Características del algoritmo de restricción Grow-Shrink

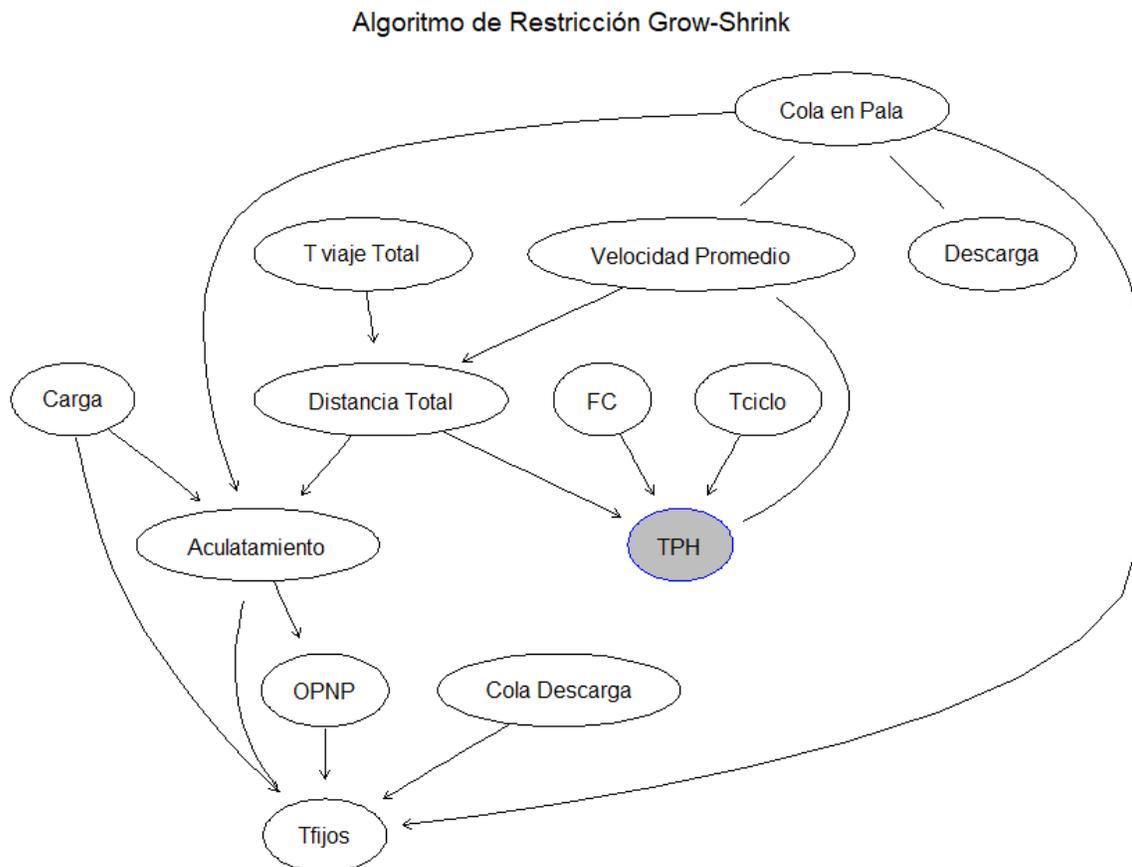


Ilustración 29: Grafo del algoritmo de Restricción Grow-Shrink

Bayesian network learned via Constraint-based methods

```
model:
  [partially directed graph]
nodes:                               13
arcs:                                 22
  undirected arcs:                   8
  directed arcs:                     14
average markov blanket size:          5.54
average neighbourhood size:           3.38
average branching factor:             1.08

learning algorithm:                   IAMB
conditional independence test:         Pearson's Correlation
alpha threshold:                      0.05
tests used in the learning procedure:  14543
```

Ilustración 30: Características del algoritmo de restricción IAMB

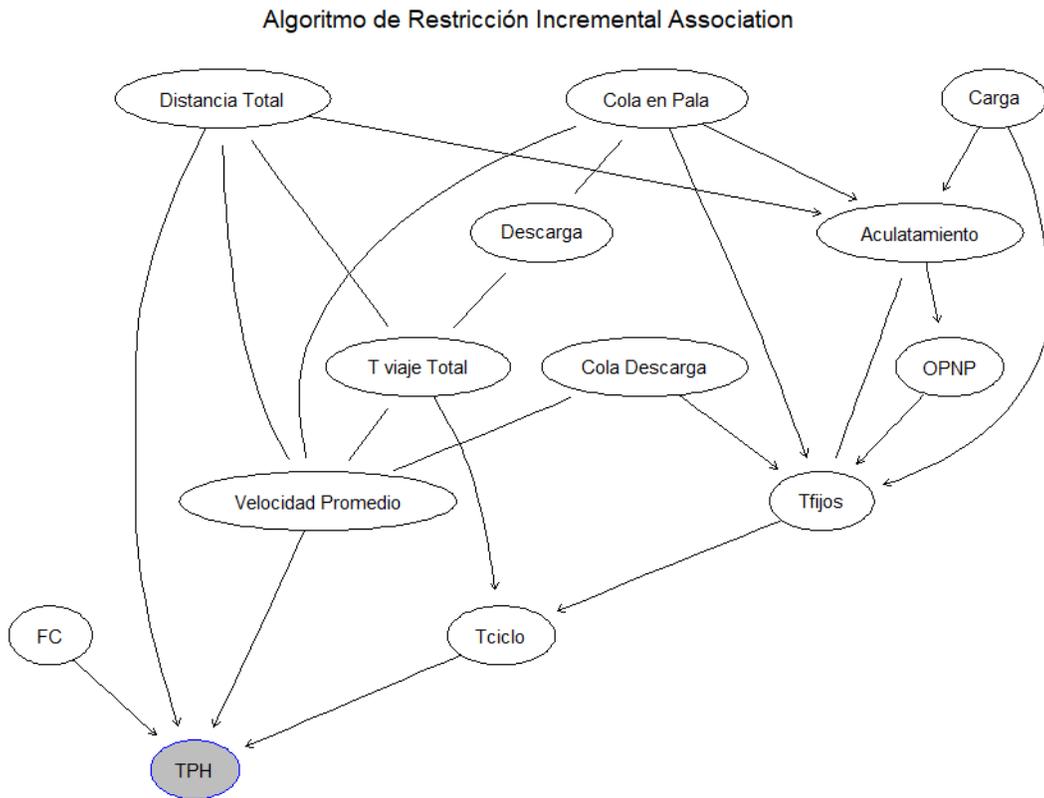


Ilustración 31: Grafo del algoritmo de Restricción Incremental Association

### Bayesian network learned via Constraint-based methods

```
model:  
  [partially directed graph]  
nodes: 13  
arcs: 22  
  undirected arcs: 4  
  directed arcs: 18  
average markov blanket size: 5.38  
average neighbourhood size: 3.38  
average branching factor: 1.38  
  
learning algorithm: Fast-IAMB  
conditional independence test: Pearson's Correlation  
alpha threshold: 0.05  
tests used in the learning procedure: 12324
```

Ilustración 32: Características del algoritmo de restricción Fast-IAMB

### Algoritmo de Restricción Fast Incremental Association

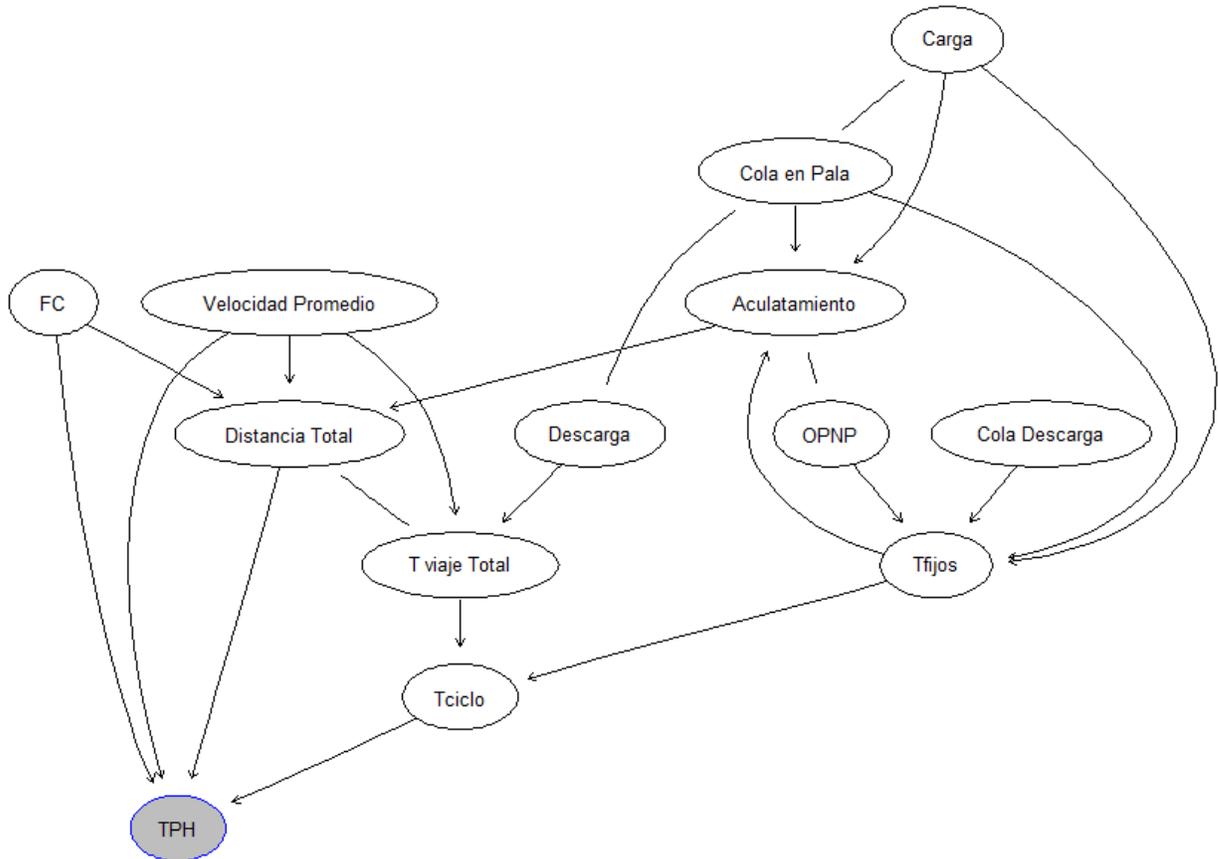


Ilustración 33: Grafo del algoritmo de Restricción Fast Incremental Association

### Bayesian network learned via Constraint-based methods

```
model:
  [partially directed graph]
nodes:                               13
arcs:                                 24
  undirected arcs:                    1
  directed arcs:                       23
average markov blanket size:          6.31
average neighbourhood size:           3.69
average branching factor:              1.77

learning algorithm:                   Inter-IAMB
conditional independence test:         Pearson's Correlation
alpha threshold:                       0.05
tests used in the learning procedure:  15912
```

Ilustración 34: Características del algoritmo de restricción inter-IAMB

### Algoritmo de Restricción Interleaved Incremental Association

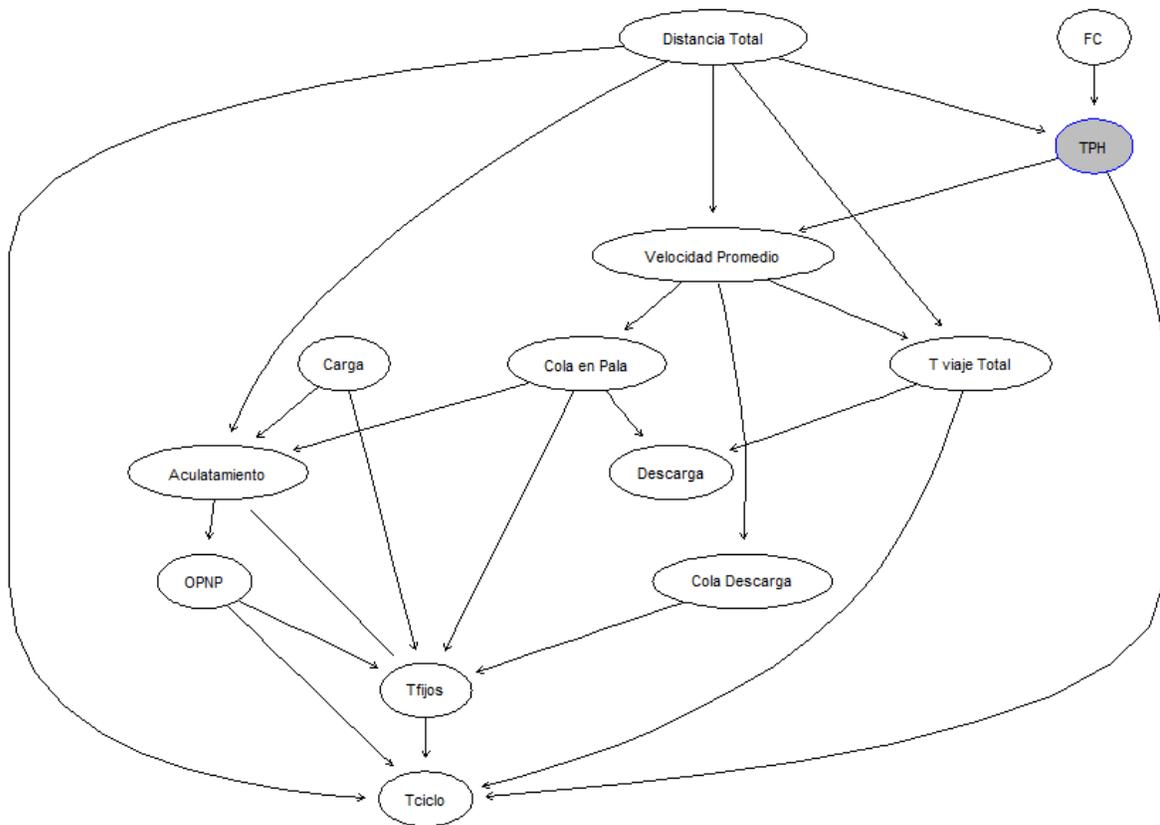


Ilustración 35: Grafo del algoritmo de Restricción Interleaved Incremental Association

### Bayesian network learned via Constraint-based methods

```
model:
  [partially directed graph]
nodes:                               13
arcs:                                 24
  undirected arcs:                    9
  directed arcs:                       15
average markov blanket size:          6.31
average neighbourhood size:           3.69
average branching factor:              1.15

learning algorithm:                   IAMB-FDR
conditional independence test:         Pearson's Correlation
alpha threshold:                       0.05
tests used in the learning procedure:  14237
```

Ilustración 36: Características del algoritmo de restricción IAMB-FDR

### Algoritmo de Restricción Incremental Association with FDR

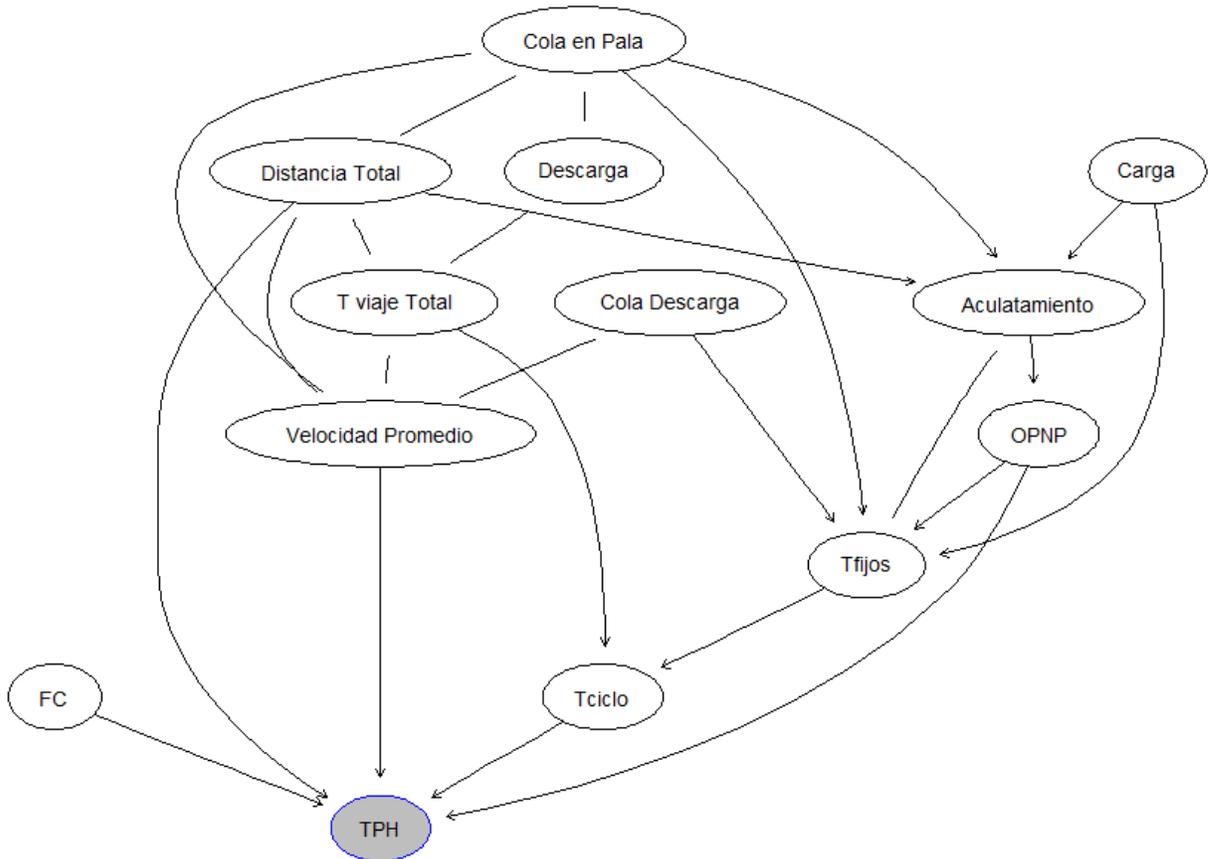


Ilustración 37: Grafo del algoritmo de Restricción Incremental Association with FDR

Bayesian network learned via Constraint-based methods

```
model:
  [partially directed graph]
nodes: 13
arcs: 27
  undirected arcs: 1
  directed arcs: 26
average markov blanket size: 7.69
average neighbourhood size: 4.15
average branching factor: 2.00

learning algorithm: PC (Stable)
conditional independence test: Pearson's Correlation
alpha threshold: 0.05
tests used in the learning procedure: 3742
```

Ilustración 38: Características del algoritmo de restricción PC Stable

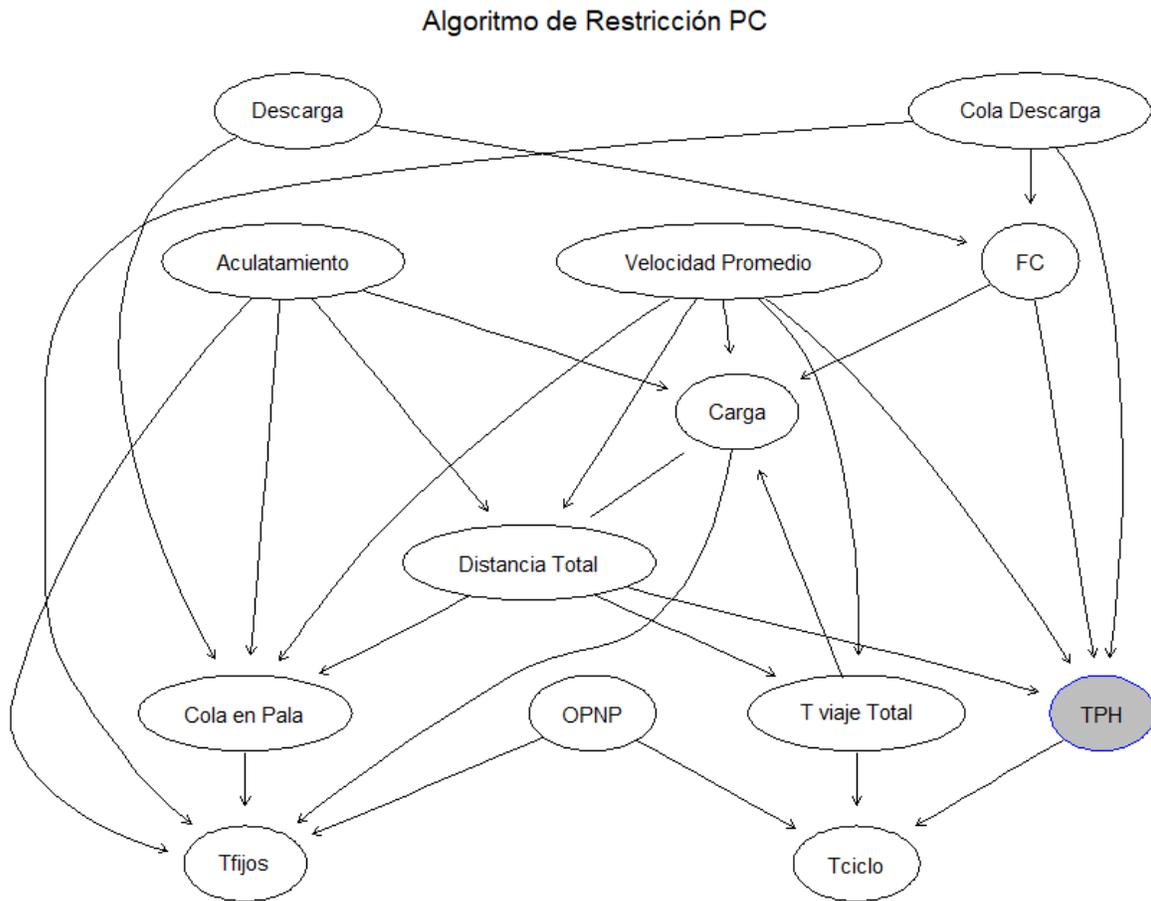


Ilustración 39: Grafo del algoritmo de Restricción PC Stable

### 5.1.3 Aplicación de Algoritmos Híbridos

A continuación, se muestra el resultado obtenido al aplicar los distintos algoritmos híbridos, solamente se mostrarán los grafos y sus características obtenidas por el software *RStudio*.

```
Bayesian network learned via Hybrid methods

model:
[Carga] [OPNP] [Acuatamiento|Carga] [FC|Carga] [Descarga|FC]
[Distancia Total|Carga:Acuatamiento]
[Cola en Pala|Acuatamiento:Descarga:Distancia Total]
[Velocidad Promedio|Carga:Cola en Pala:Distancia Total]
[T viaje Total|Carga:Distancia Total:Velocidad Promedio]
[Tciclo|T viaje Total:OPNP] [TPH|FC:Distancia Total:Velocidad Promedio:OPNP:Tciclo]
[Cola Descarga|FC:TPH] [Tfijos|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga:OPNP]

nodos:          13
arcs:           28
  undirected arcs: 0
  directed arcs:  28
average markov blanket size: 7.23
average neighbourhood size:  4.31
average branching factor:   2.15

learning algorithm:      Max-Min Hill-Climbing
constraint-based method: Max-Min Parent Children
conditional independence test: Pearson's Correlation
score-based method:     Hill-Climbing
score:                   BIC (Gauss.)
alpha threshold:        0.05
penalization coefficient: 5.079278
tests used in the learning procedure: 4643
optimized:               TRUE
```

Ilustración 40: Características del algoritmo Híbrido Max-Min Hill Climbing

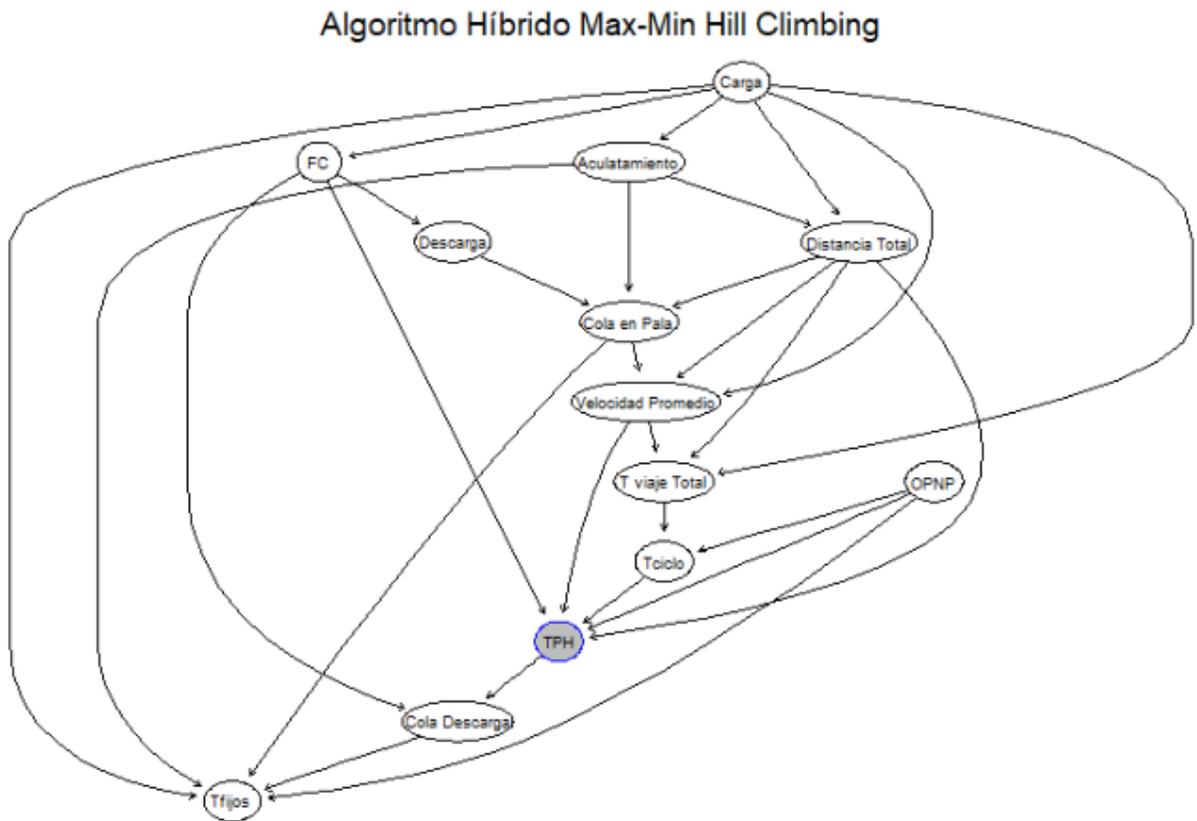


Ilustración 41: Grafo del algoritmo de Híbrido Max-Min Hill Climbing

Bayesian network learned via Hybrid methods

```
model:
[Carga][Cola Descarga][OPNP][Acuatamiento|Carga][FC|Carga:Cola Descarga][Descarga|FC][Distancia Total|Carga:Acuatamiento]
[Cola en Pala|Acuatamiento:Descarga:Distancia Total][Velocidad Promedio|Cola en Pala:Distancia Total][Tfijos|Carga:Cola en Pala:Acu]
atamiento:Cola Descarga:OPNP]
[T viaje Total|Carga:Distancia Total:Velocidad Promedio][Tciclo|T viaje Total:OPNP][TPH|FC:Distancia Total:Velocidad Promedio:Tciclo]
nodes:
13
arcs:
25
  undirected arcs:
0
  directed arcs:
25
average markov blanket size:
6.46
average neighbourhood size:
3.85
average branching factor:
1.92

learning algorithm:
Two-Phase Restricted Maximization
constraint-based method:
Semi-Interleaved HITON-PC
conditional independence test:
Pearson's Correlation
score-based method:
Hill-Climbing
score:
BIC (Gauss.)
alpha threshold:
0.05
penalization coefficient:
5.079278
tests used in the learning procedure:
4664
optimized:
TRUE
```

Ilustración 42: Características del algoritmo híbrido Restricted Maximization

### Algoritmo Híbrido Restricted Maximization

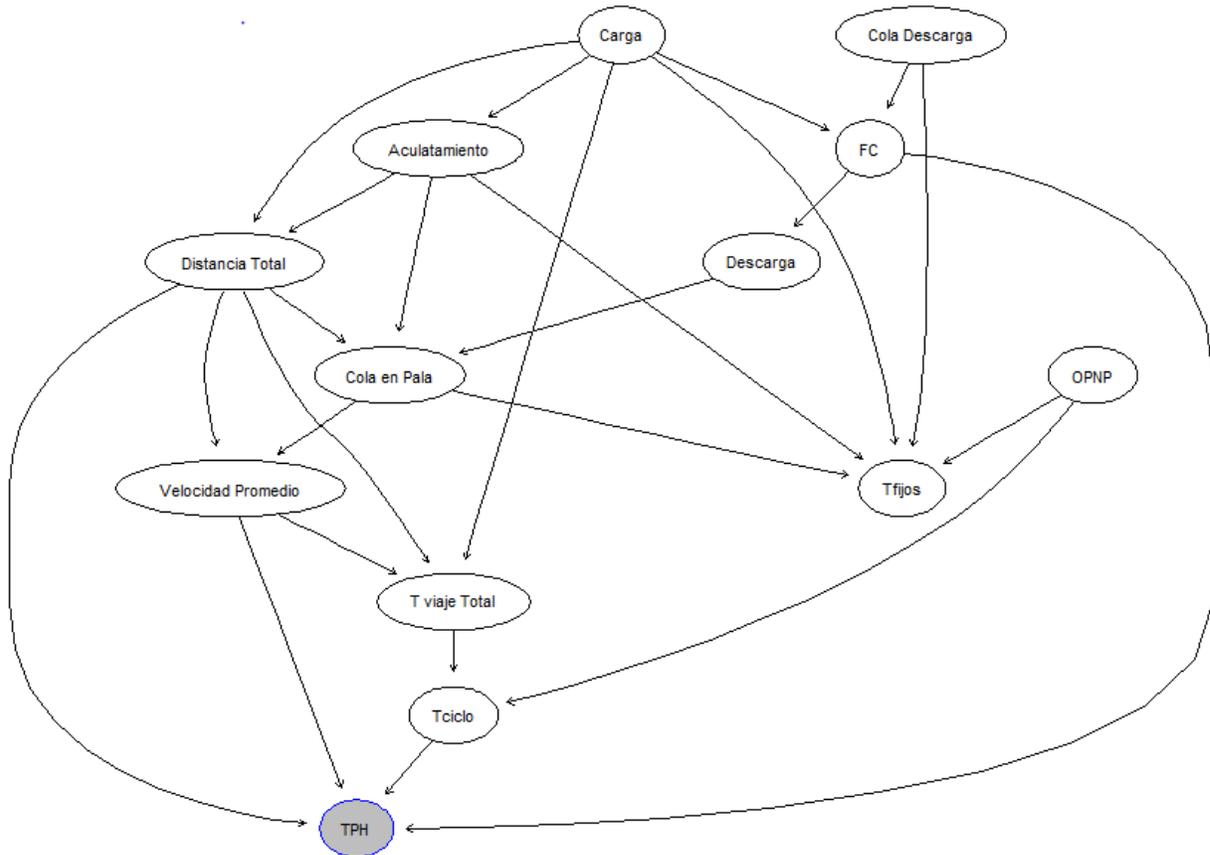


Ilustración 43: Grafo del algoritmo de Híbrido Restricted Maximization

Bayesian network learned via Hybrid methods

```

model:
[Carga][OPNP][Acuatamiento|Carga][FC|Carga][Descarga|FC][Distancia Total|Carga:Acuatamiento]
[Cola en Pala|Acuatamiento:Descarga:Distancia Total][Velocidad Promedio|Cola en Pala:Distancia Total]
[T viaje Total|Distancia Total:Velocidad Promedio][Tciclo|T viaje Total][TPH|FC:Distancia Total:Velocidad Promedio:OPNP:Tciclo]
[Cola Descarga|TPH][Tfijos|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga:OPNP:Tciclo]
nodes:
25
arcs:
25
  undirected arcs:
0
  directed arcs:
25
average markov blanket size:
7.38
average neighbourhood size:
3.85
average branching factor:
1.92

learning algorithm:
Hybrid^2 Parent Children
constraint-based method:
Hybrid Parents and Children
conditional independence test:
Pearson's Correlation
score-based method:
Hill-Climbing
score:
BIC (Gauss.)
alpha threshold:
0.05
penalization coefficient:
5.079278
tests used in the learning procedure:
103916
optimized:
TRUE
  
```

Ilustración 44: Características del algoritmo híbrido Hybrid HPC

### Algoritmo Híbrido Hybrid HPC

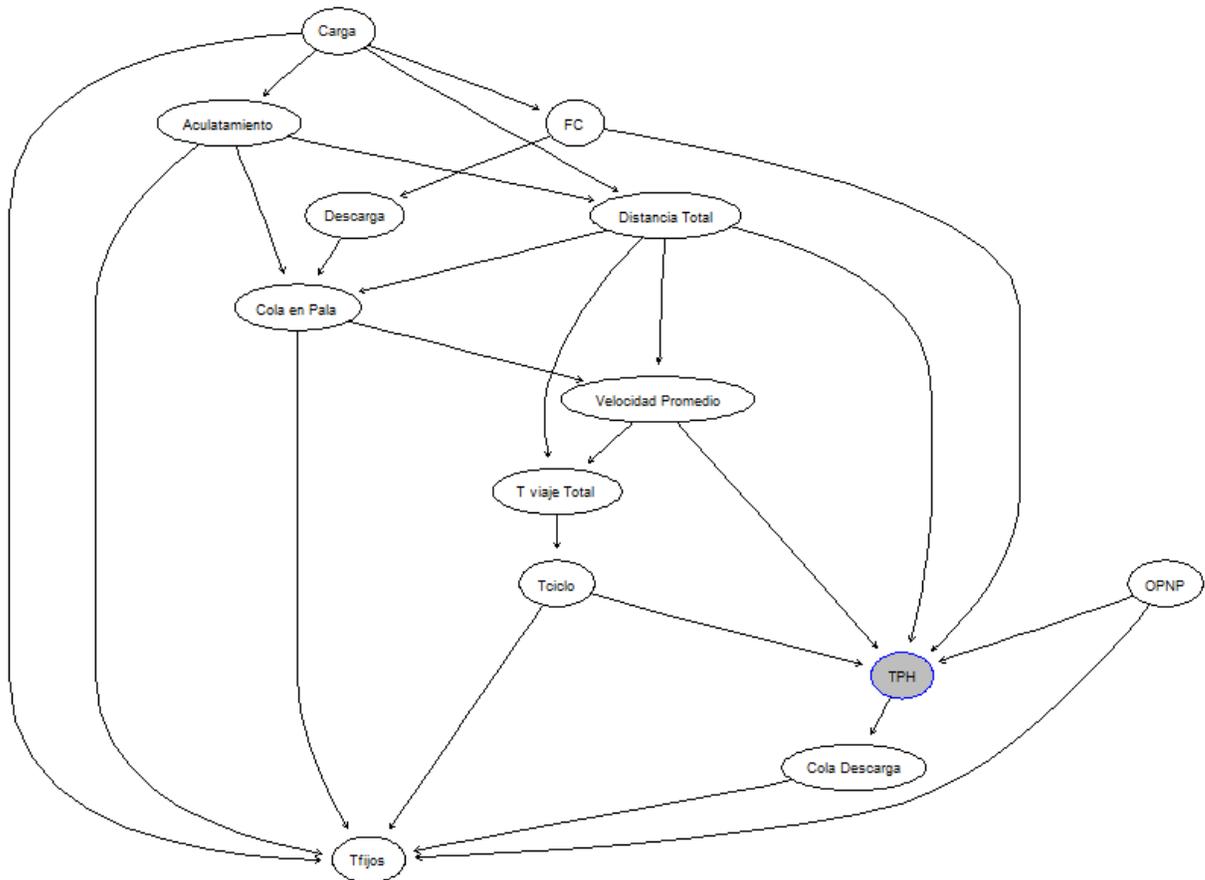


Ilustración 45: Grafo del algoritmo Híbrido Hybrid HPC

### 5.1.4 Descarte de Algoritmos

En esta sección se muestra el descarte de los algoritmos que menos se acomodan a la base de datos de los viajes de camiones en la mina Los Bronces en el periodo de julio 2019.

La tabla 15 muestra un resumen de las ilustraciones anteriormente mostradas en donde las variables a comparar son la cantidad de nodos (Nodos), cantidad de arcos dirigidos (Arcos D), cantidad de arcos no dirigidos (Arcos ND), la cantidad de test de independencia condicional aplicados (C.I. Test), los padres del rendimiento (TPHi), los hijos del rendimiento (TPH) y en el caso de los algoritmo de puntaje e híbridos se entrega un score (puntaje).

Tabla 15: Resumen de los algoritmos aplicados.

Parámetros	HC	Tabu	GS	iamb	Fast-iamb	Inter-iamb	Iamb-fdr	PC	Mmhc	Rsmx2	H2pc
<b>Nodos</b>	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
<b>Arcos D</b>	45	45	13	14	18	23	15	26	28	25	25
<b>Arcos ND</b>	0	0	4	8	4	1	9	1	0	0	0
<b>C.I Test</b>	618	1513	16038	14543	12324	15912	14237	3742	4643	4664	103916
<b>Padres de TPH</b>	7	7	3	4	4	2	5	4	5	4	5
<b>Hijos de TPH</b>	0	1	0	1	0	1	2	1	1	0	1
<b>Score</b>	-660329	-663818	-	-	-	-	-	-	-744788	-745435	-768177

A partir de la tabla 15 se obtienen directamente los arcos no dirigidos de los algoritmos de los cuales se descartan los siguientes:

- PC (pc.stable)
- Grow-Shrink (gs)
- Incremental Association Markov Blanket (iamb)
- Fast Incremental Association (fast.iamb)
- Interleaved Incremental Association (inter.iamb)
- Incremental Association with con FDR (iamb.fdr)

A partir de la tabla 16, se obtienen todos los padres del rendimiento (TPH) indicados con una “X” según el algoritmo aplicado y en la tabla 17 se obtienen todos los hijos del rendimiento indicados también con una “X”. De esta manera se obtiene que los algoritmos descartados según los criterios descritos anteriormente son:

- PC (pc.stable)
- Grow-Shrink (gs)
- Incremental Association Markov Blanket (iamb)
- Interleaved Incremental Association (inter.iamb)
- Incremental Association with con FDR (iamb.fdr)

- Tabu Search (tabu)
- Max-Min Hill-Climbing (mmhc)
- Híbrido HPC (h2pc)

Tabla 16: Padres del Rendimiento según el algoritmo aplicado.

Padres de TPH	HC	Tabu	GS	IAMB	Fast-iamb	Inter-iamb	Iamb-fdr	PC	Mmhc	Rsmx2	H2pc
Carga											
Cola en Carga											
Cola en Descarga	X	X						X			
Acuatamiento											
Descarga											
OPNP	X	X					X		X		X
Factor de Carga	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tiempos Fijos	X	X									
Tiempos de Ciclo			X	X	X		X		X	X	X
Distancia Total	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Velocidad Promedio	X	X		X	X		X	X	X	X	X
Tiempos de Viaje	X	X									

Tabla 17: Hijos del Rendimiento según el algoritmo aplicado.

Hijos de TPH	HC	Tabu	GS	IAMB	Fast-iamb	Inter-iamb	Iamb-fdr	PC	Mmhc	Rsmx2	H2pc
Carga											
Cola en Carga											
Cola en Descarga									X		X
Acuatamiento											
Descarga		X									
OPNP											
Factor de Carga											
Tiempos Fijos											
Tiempos de Ciclo						X		X			
Distancia Total											
Velocidad Promedio						X					
Tiempos de Viaje											

En la tabla 18 se observan los Score según las diferentes puntuaciones de red explicadas en el marco teórico. Se tiene que los algoritmos híbridos poseen un valor menor por lo que se descartan. En cuanto a los algoritmos de puntaje se observan bastante similares siendo el algoritmo de hill-climbing el mayor.

Algoritmos descartados de acuerdo su score:

- Tabu Search (tabu)
- Max-Min Hill-Climbing (mmhc)
- Maximización Restringida (rsmax2)
- Híbrido HPC (h2pc)

*Tabla 18: Score de los algoritmos de puntaje e híbridos.*

Score	HC	Tabu	Mmhc	Rsmx2	H2pc
<b>Loglik-g</b>	-660225	-660211	-744569	-745477	-767975
<b>Aig-g</b>	-660296	-660282	-744623	-745498	-768026
<b>Bic-g</b>	-660585	-660572	-744843	-745707	-768234
<b>bge</b>	-660211	-674208	-745115	-745059	-768471
<b>Promedio</b>	-660329	-663818	-744788	-745435	-768177

Finalmente, siguiendo la metodología se obtiene que el algoritmo de Hill Climbing se adecúa de mejor manera a los datos de la mina. Dicho algoritmo y los resultados obtenidos serán analizados en profundidad en la siguiente sección.

## 6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 ANÁLISIS DE ARCOS GRAFO HILL-CLIMBING PARA MINA LOS BRONCES

Al analizar el grafo obtenido por el algoritmo Hill-Climbing en la ilustración 25 se observan 45 arcos entre nodos de los cuales hay 9 arcos cuyo comportamiento no es el esperado en minería. Dichos arcos se enumeran en la tabla 19 con su respectiva correlación. Estos arcos serán eliminados del grafo por baja correlación y por su poca relación al viaje de un camión.

Tabla 19: Arcos erróneos en el grafo Hill Climbing julio.

N°	Arcos	Correlaciones
1	Tciclo → Tfijos (arco invertido)	0.67
2	T viaje total → Descarga	0.029
3	Distancia Total → Cola en Pala	0.065
4	Velocidad Promedio → Cola en Pala	0.108
5	Cola Descarga → FC	0.043
6	T viaje Total → FC	-0.021
7	Cola Descarga → T viaje Total	-0.033
8	Velocidad Promedio → Cola Descarga	-0.048
9	Acuatamiento → Distancia Total	-0.075

A modo de ejemplo, en el segundo arco de la tabla 19 el tiempo que demora el camión en descargar no debería depender directamente del tiempo que el camión está viajando y por eso mismo su correlación es de 0.029. Eliminando los 9 arcos en la tabla 20 se muestra que su score disminuye poco siendo aún mayor que los otros algoritmos híbridos. La ilustración 46 muestra el grafo Hill-Climbing modificado resultante de eliminar los 9 arcos.

Tabla 20: Score de algoritmo Hill-Climbing Modificado julio.

Score	HC	HC Modificado
Loglik-g	-660225	-660586
Aig-g	-660296	-660648
Bic-g	-660585	-660901
bge	-660211	-674504
Promedio	-660329	-664160



Ilustración 46: Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing Modificado Julio

## 6.2 ANÁLISIS DEL GRAFO MODIFICADO MEDIANTE CORRELACIONES

La ilustración 47 muestra el grafo del algoritmo de hill-climbing modificado aplicando las relaciones entre variables mediante correlaciones en el mes de julio 2019. Además, en la tabla 21 se muestran las correlaciones de todos los arcos para tener la información exacta de lo que se muestra en el grafo.

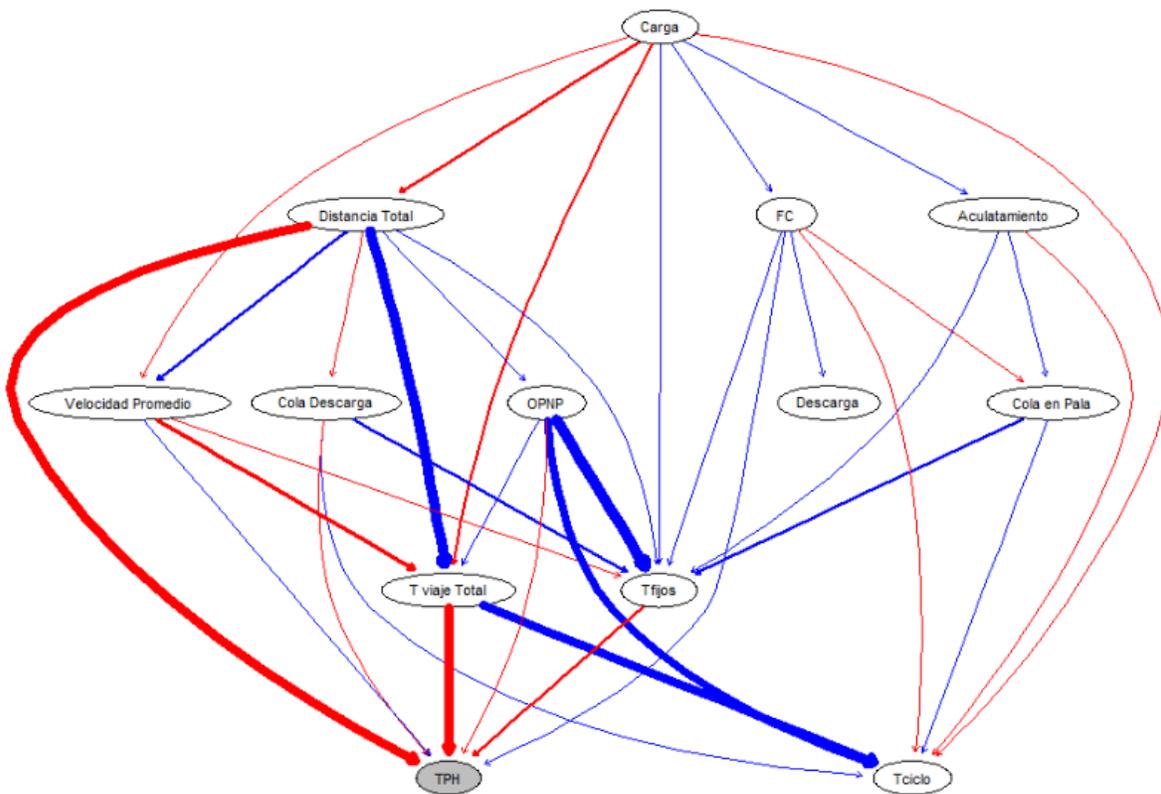


Ilustración 47: Grafo de algoritmo Hill-Climbing Modificado con correlaciones, julio

Se observa que las variables que más impactan en el mes de julio en el rendimiento de camiones fueron las distancias recorridas por los camiones y los desvíos de camiones por algún imprevisto en la mina. Como se encuentra en color rojo indica que a mayor distancia recorrida por los camiones el rendimiento disminuye con una correlación de  $-0.711$ . La distancia va de la mano con el tiempo de viaje que el camión recorra por lo que también tiene una correlación alta ( $-0.771$ ) y de color rojo que indicaría que a mayor tiempo de viaje menor es el rendimiento de camiones.

En cuanto a las dependencias positivas o bien arcos de color azul hacia el rendimiento se encuentra la velocidad promedio y el factor de carga, el hallazgo importante es que no poseen correlaciones tan altas como era de esperar con  $0.17$  para la velocidad y  $0.16$  para el factor de carga.

Otros arcos importantes que se marcan con gran correlación son los del tiempo operativo no productivo hacia el tiempo de ciclo y hacia el tiempo fijo. Esto indica que con una correlación de  $0.641$  el tiempo OPNP impacta de manera directamente proporcional al tiempo total del ciclo de camiones y también que con una correlación  $0.914$  el tiempo OPNP impacta de manera directamente proporcional a los tiempos fijos del camión.

Tabla 21: Correlaciones de todos los arcos del grafo Julio 2019

Hijo	Padre	Correlaciones
<b>TPH</b>	Velocidad Promedio	0.170
	FC	0.164
	Cola Descarga	-0.086
	Tfijos	-0.220
	T viaje Total	-0.771
	OPNP	-0.169
	Distancia Total	-0.711
<b>Tciclos</b>	T viaje Total	0.729
	OPNP	0.641
	Cola Descarga	0.156
	Aculatamiento	-0.007
	FC	-0.002
	Cola en Pala	0.184
	Carga	-0.097
<b>Tfijos</b>	Velocidad Promedio	0.028
	OPNP	0.914
	Cola Descarga	0.265
	Aculatamiento	0.060
	FC	0.020
	Cola en Pala	0.268
	Carga	0.094
<b>T viaje Total</b>	Distancia Total	0.002
	Velocidad Promedio	-0.316
	OPNP	0.021
	Carga	-0.218
<b>Velocidad Promedio</b>	Distancia Total	0.810
	Carga	-0.030
<b>OPNP</b>	Distancia Total	0.220
<b>Cola Descarga</b>	Distancia Total	0.025
<b>Cola en Pala</b>	Distancia Total	-0.044
	Aculatamiento	0.052
<b>Descarga</b>	FC	-0.032
	FC	0.024
<b>Aculatamiento</b>	Carga	0.087
<b>FC</b>	Carga	0.190
<b>Distancia Total</b>	Carga	-0.239

### 6.3 VALIDACIÓN METODOLOGÍA

Para la validación del modelo propuesto se ha decidido comparar con el mes de septiembre 2019 y con la temporada de invierno 2019. El mes de septiembre se escoge ya que en términos operacionales los resultados fueron positivos para la mina Los Bronces, siendo un caso favorable de operación. En tanto la temporada de invierno (abril 2019 hasta septiembre 2019), se evalúa ya que es considerada una etapa compleja de la operación.

#### 6.3.1 Resultados septiembre 2019

Se ha seguido la misma metodología explicada en las secciones anteriores para extraer la base de datos de viajes de camiones en el periodo de septiembre obteniendo un total de 31794 datos, los cuales deben ser filtrados de acuerdo con los criterios antes mencionado. La tabla 24 muestra la cantidad de datos eliminada según los filtros aplicados en la mina Los Bronces y la tabla 25 muestra la cantidad de datos eliminada según filtros propios en la base de datos de septiembre.

Tabla 22: Porcentaje de datos eliminados según filtros de los bronces en BD de septiembre

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Factor de carga	$x < 250$	4445	10.39
	$x > 345$	46	0.26
Distancias	$x = 0$	3830	13.69
Tiempos	$x = 0$	3830	13.69
Velocidades	$x = 0$	3830	13.69

Tabla 23: Porcentaje de datos eliminados según filtros propios en base de datos de septiembre.

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Factor de carga	$x < 245$	3417	8.00
	$x > 350$	33	0.19
Distancias	$x < 0.1$	3830	13.69
Tiempos	$x = 0$	3830	13.69
Velocidades	$x > 65$	112	0.40
	$x < 2$	3830	13.69

Se tiene que de un total de 31794 hay 24102 datos validos que corresponden al 75.8% según los filtros aplicados por los bronces en el mes de septiembre. En cambio, según los filtros propios la data asciende a 24843 que corresponde al 78.1%, obteniendo un porcentaje de confiabilidad similar al obtenido por la base de datos de julio 2019. La estadística descriptiva de septiembre antes y después de filtrar se encuentran en el anexo 9.5.

Teniendo la data ya filtrada se procede a obtener los grafos y a analizar los arcos cuyo comportamiento no es el esperado en minería estos grafos se observan en el anexo 9.7 con sus respectivas características. La tabla 26 muestra los arcos eliminados para la base de datos de septiembre.

Tabla 24: Arcos erróneos en el grafo Hill Climbing septiembre.

N°	Arcos	Correlaciones
1	Tciclo → Tfijos (arco invertido)	0.619
2	Distancia Total → Aculatamiento	-0.070
3	Cola Descarga → T viaje Total	-0.098
4	Cola Descarga → Cola en Pala	0.014
5	FC → Cola Descarga	0.031
6	Velocidad Promedio → Cola Descarga	-0.004
7	Tciclo → Descarga	0.035
8	Cola en Pala → Descarga	-0.012
9	T viaje Total → Cola en Pala	0.032
10	Aculatamiento → T viaje Total	-0.035
11	FC → Aculatamiento	0.078
12	T viaje Total → OPNP	0.039
13	Distancia total → Cola en Pala	0.075

De la tabla 26 se observan 13 arcos que poseen un comportamiento esperado en el mes de septiembre 2019 y dada su baja correlación serán arcos eliminados del grafo. Producto de esta eliminación el score del grafo no se ve tan afectado disminuyendo solo en 258 como se observa en la tabla 27.

Tabla 25: Score de algoritmo Hill-Climbing Modificado septiembre

Score	HC Sept	HC sept Modificado
Loglik-g	-621652	-621953
Aig-g	-621722	-622010
Bic-g	-622007	-622241
bge	-635251	-635460
Promedio	-625158	-625416

La ilustración 48 muestra el grafo del algoritmo de Hill-climbing modificado aplicado a una base de datos de ciclos de camiones en el mes de septiembre 2019. Se observa que las variables que más impactan en el mes de septiembre en el rendimiento de camiones fueron las distancias recorridas por los camiones al igual que lo observado en el mes de julio. Como se encuentra en color rojo indica que a mayor distancia recorrida por los camiones el rendimiento disminuye con una correlación de -0.658 que es un poco menor que el mes de julio.

El tiempo de viaje que el camión recorra va de la mano con la distancia por lo que también tiene una correlación alta (-0.757) y de color rojo que indicaría que a mayor tiempo de viaje menor es el rendimiento de camiones. El tiempo que un camión se demore en realizar un ciclo por su parte afecta al rendimiento con una correlación -0.781, siendo un resultado esperado.

Se observa además que a diferencia del mes de julio apareció el arco de los tiempos de cola en pala afectando al rendimiento, mientras que en julio afectaba el arco de tiempos de cola en descarga teniendo tiempos de espera en chancado en promedio de 4 minutos a diferencia del mes de septiembre con 2.6 minutos, el arco de tiempos de cola en descarga desapareció en el mes de septiembre debido a un plan para disminuir dichos tiempos de chancado como se observa en el gráfico en los anexos 9.8.

En cuanto a las dependencias positivas o bien arcos de color azul hacia el rendimiento, al igual que el mes de julio, se encuentra la velocidad promedio y el factor de carga con correlaciones bajas, sin embargo, en el mes de septiembre el arco de factor de carga ha aumentado su correlación de 0.16 a 0.21 producto que el factor de carga fue afectado por un plan de implementación de 3 pases en las palas 10 y 11, por lo que su factor de carga disminuyó afectando el rendimiento de camiones.

Otros arcos importantes (al igual que julio) que se marcan con gran correlación son los del tiempo operativo no productivo hacia el tiempo de ciclo y hacia el tiempo fijo con 0.575 y 0.885, respectivamente. El tiempo de ciclo también se ve afectado por el tiempo de viaje total que recorran los camiones con 0.788.

En cuanto al nodo de descarga se ve que no posee arcos entrantes ni salientes, es decir, que no posee ni padres ni hijos. Esto significa que las otras variables no afectaron el tiempo de descarga y tampoco el tiempo de descarga afectó a otras variables, por lo que en el mes de septiembre el tiempo de descarga se comportó de manera independiente.

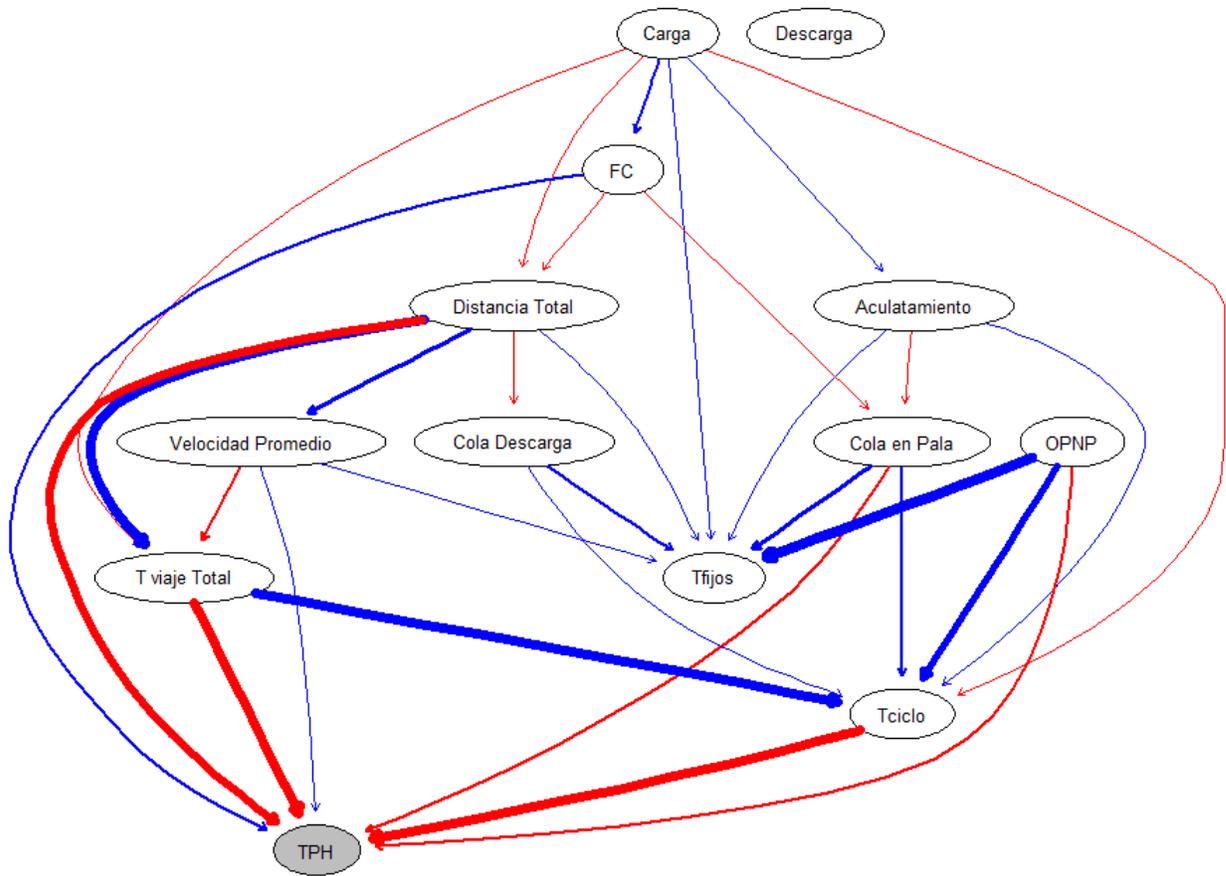


Ilustración 48: Grafo de algoritmo Hill-Climbing Modificado con correlaciones, septiembre

### 6.3.2 Resultados temporada invierno 2019

Se ha seguido la misma metodología explicada en las secciones anteriores para extraer la base de datos de viajes de camiones en todo el periodo de invierno obteniendo un total de 186889 datos, los cuales deben ser filtrados de acuerdo con los criterios antes mencionado. La tabla 22 muestra la cantidad de datos eliminada según los filtros aplicados en la mina Los Bronces y la tabla 23 muestra la cantidad de datos eliminada según filtros propios en la base de datos de invierno.

Tabla 26: Porcentaje de datos eliminados según filtros de los bronces en BD de invierno.

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Factor de carga	$x < 250$	19428	10.39
	$x > 345$	488	0.26
Distancias	$x = 0$	25599	13.69
Tiempos	$x = 0$	25599	13.69
Velocidades	$x = 0$	25599	13.69

Tabla 27: Porcentaje de datos eliminados según filtros propios en base de datos de invierno.

Variable	Criterio de rechazo	Cantidad eliminados	Porcentaje Eliminados [%]
Factor de carga	$x < 245$	14953	8.00
	$x > 350$	366	0.19
Distancias	$x < 0.1$	25599	13.69
Tiempos	$x = 0$	25599	13.69
Velocidades	$x > 65$	748	0.40
	$x < 2$	25604	13.70

De esta manera, según los filtros aplicados por la mina Los Bronces, de los 186889 datos se eliminan 42306 datos que corresponden al 22.6%, teniendo 144583 datos confiables (77.3%) de la base de datos completa.

Por otro lado, aplicando los filtros propios se tiene que de los 186889 datos se eliminan 38936 datos que corresponden al 20.8%, teniendo finalmente 147953 que corresponde al 79.2% de la base de datos completa. Por lo tanto, se incluyen 3370 datos adicionales de la base de datos con filtros de Los Bronces. La estadística descriptiva del periodo de invierno antes y después de filtrar se encuentran en el anexo 9.6.

Teniendo la data ya filtrada se procede a obtener los grafos y a analizar los arcos cuyo comportamiento no es el esperado en minería estos grafos se observan en el anexo 9.7 con sus respectivas características. La tabla 28 muestra los arcos eliminados para la base de datos de invierno.

Tabla 28: Arcos erróneos en el grafo Hill Climbing invierno.

N°	Arcos	Correlaciones
1	Tciclo → Tfijos (arco invertido)	0.669
2	Distancia Total → Aculatamiento	-0.083
3	Cola Descarga → Velocidad Promedio	-0.011
4	Cola Descarga → T viaje Total	0.011
5	Velocidad Promedio → Cola en Pala	0.095
6	Cola Descarga → FC	0.015
7	Distancia Total → Cola en Pala	0.085
8	T viaje Total → Descarga	0.029
9	Tciclo → Descarga	0.029
10	Cola en Pala → Descarga	-0.019
11	T viaje Total → Cola en Pala	0.027
12	Aculatamiento → FC	0.042
13	T viaje Total → OPNP	0.045
14	Cola Descarga → Aculatamiento	-0.016

15	Cola Descarga → Carga	-0.017
16	Cola Descarga → OPNP	0.012
17	Velocidad Promedio → Carga	-0.010
18	T viaje Total → Aculatamiento	-0.066
19	TPH → Descarga	-0.024
20	OPNP → Descarga	0.001
21	Cola en Pala → Cola Descarga	0.016
22	Cola Descarga → Distancia Total	0.024

De la tabla 28 se observan 13 arcos que poseen un comportamiento esperado en el mes de septiembre 2019 y dada su baja correlación serán arcos eliminados del grafo. Producto de esta eliminación el score del grafo no se ve tan afectado disminuyendo solo en 258 como se observa en la tabla 29.

*Tabla 29: Score de algoritmo Hill-Climbing Modificado invierno.*

Score	HC invierno	HC invierno Modificado
Loglik-g	-3788045	-3821936
Aig-g	-3788130	-3821999
Bic-g	-3788551	-3822311
bge	-3812462	-3842524
Promedio	-3794297	-3827193

La ilustración 49 muestra el grafo del algoritmo de Hill-climbing modificado aplicado a una base de datos de ciclos de camiones en el periodo de invierno 2019. Se observa el mismo comportamiento que en los grafos anteriores donde las variables que más impactaron de forma inversa durante el periodo de invierno en el rendimiento de camiones fueron las distancias recorridas, el tiempo de viaje total, los operativos no productivos y el tiempo fijo.

En cuanto a las variables que impactan en forma directa al rendimiento de camiones se repite el factor de carga y la velocidad promedio con 0.184 y 0.09. Sin embargo, aparece un arco nuevo que es el aculatamiento donde su correlación es bastante baja (0.02) por lo que no indica una verdadera dependencia. También el mismo nodo de aculatamiento muestra que a mayor tiempo de aculatamiento menor es el tiempo de ciclo con una correlación de -0.02, esto no es lo esperado en minería y su correlación es bastante baja, por lo que ambos arcos deberían ser eliminados por no representar dependencias reales. No obstante, es importante mencionar que el nodo del aculatamiento es el conflictivo ya que fue uno de los tiempos que más relleno de casillas tuvo. Esto refuerza el hecho de que la data no debe ser modificada y en lo posible trabajar con los datos como la mina los entrega.

Se destacan los mismos arcos de los meses de julio y septiembre, estos son, los dos arcos del operativo no productivo hacia los tiempos fijos y el tiempo de ciclo, y el tiempo de viaje total en el tiempo de ciclo de camiones.

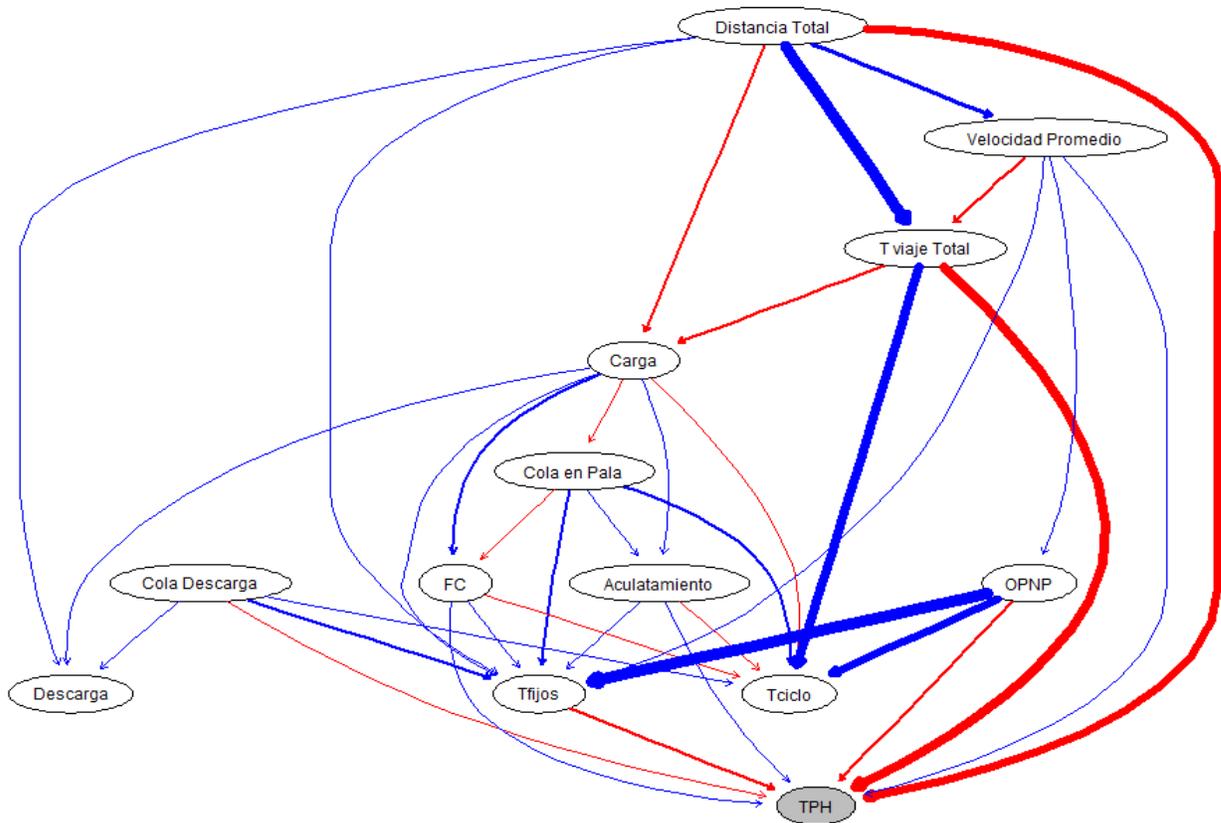


Ilustración 49: Grafo de algoritmo Hill-Climbing Modificado con correlaciones, invierno.

Finalmente, en la tabla 30 se muestran las correlaciones de todos los arcos para tener la información exacta de lo que se muestra en los grafos de julio, septiembre e invierno.

Tabla 30: Correlaciones julio, septiembre e invierno 2019.

Hijo	Padre	Correlaciones Julio	Correlaciones Septiembre	Correlaciones Invierno
TPH	Velocidad Promedio	0.170	0.126	0.093
	FC	0.164	0.214	0.184
	Cola Descarga	-0.086	-	-0.109
	Tfijos	-0.220	-	-0.279
	T viaje Total	-0.771	-0.757	-0.757
	OPNP	-0.169	-0.258	-0.231
	Distancia Total	-0.711	-0.658	-0.674
	Cola en Pala	-	-0.224	-
	Tciclo	-	-0.781	-
	Aculatamiento	-	-	0.025
Tciclos	T viaje Total	0.729	0.788	0.758
	OPNP	0.641	0.575	0.629
	Cola Descarga	0.156	0.093	0.189
	Aculatamiento	-0.007	0.004	-0.021

	FC	-0.002	-0.038	-0.030	
	Cola en Pala	0.184	0.245	0.207	
	Carga	-0.097	-0.008	-0.116	
<b>Tfijos</b>	Velocidad Promedio	0.028	0.014	0.027	
	OPNP	0.914	0.885	0.914	
	Cola Descarga	0.265	0.278	0.277	
	Acuatamiento	0.060	0.051	0.043	
	FC	0.020	-	0.014	
	Cola en Pala	0.268	0.358	0.287	
	Carga	0.094	0.127	0.085	
	Distancia Total	0.002	0.015	0.042	
	<b>T viaje Total</b>	Velocidad Promedio	-0.316	-0.280	-0.203
		OPNP	0.021	-	-
Carga		-0.218	-0.110	-	
Distancia Total		0.810	0.748	0.809	
<b>Velocidad Promedio</b>	Carga	-0.030	-	-	
	Distancia Total	0.220	0.363	0.336	
<b>OPNP</b>	Distancia Total	0.025	-	-	
	Velocidad Promedio	-	-	0.005	
<b>Cola Descarga</b>	Distancia Total	-0.044	-0.086	-	
<b>Cola en Pala</b>	Acuatamiento	0.052	-	-	
	FC	-0.032	-0.050	-	
	Carga	-	-	-0.060	
<b>Descarga</b>	FC	0.024	-	-	
	Carga	-	-	0.009	
	Distancia Total	-	-	0.021	
	Cola Descarga	-	-	0.005	
<b>Acuatamiento</b>	Carga	0.087	0.182	0.099	
	Cola en Pala	-	-0.041	0.054	
<b>FC</b>	Carga	0.190	0.235	0.212	
	Cola en Pala	-	-	-0.037	
<b>Carga</b>	Distancia Total	-	-	-0.231	
	T viaje Total	-	-	-0.231	
<b>Distancia Total</b>	Carga	-0.239	-0.138	-	
	FC	-	-0.094	-	
	Cola Descarga	-	-	0.024	

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

El objetivo de este trabajo es aplicar redes bayesianas a la data real de la mina Los Bronces a fin de identificar parámetros operacionales críticos que impactan en el rendimiento de camiones. La metodología desarrollada y propuesta presenta como resultado un grafo con arcos que indican las dependencias de variables con el rendimiento y además entre ellas mediante correlaciones. Así, es posible no solo identificar, sino que también cuantificar las relaciones entre las variables operacionales que condicionan la operación de carguío y transporte en mina Los Bronces.

Definir el horizonte temporal es una parte importante del modelo. En efecto, este modelo puede potencialmente entregar la dependencia de variables para distintos periodos, desde días hasta años. Sin embargo, es necesario que se cumpla la misma metodología de forma rigurosa. Realizar análisis mensuales con este modelo agrega bastante valor a la mina, no obstante, mientras más data se analice aparecerán más arcos con correlaciones muy pequeñas (caso periodo invierno) y por otro lado, al hacer un análisis diario con pocos datos estaría sobre estimando lo que ocurre en la mina.

Las variables consideradas en este modelo son las más básicas dentro del ciclo de camiones y se encuentran controladas mediante el software Dispatch, las cuales se pueden extraer y analizar. Sin embargo, cada una de las variables se puede desglosar en otras variables que pueden afectar el rendimiento de camiones, generando una mayor variedad y volumen de datos e impactando en la velocidad de los análisis. Por ejemplo, el tiempo de carguío depende del número de pases que realice la pala, de la altura del banco, de la granulometría, etc. La velocidad del camión se podría desglosar en velocidad vacío o lleno, en subida o bajada, e incluso, según la inclinación de las pendientes (ej.:  $\pm 2,4,6$  u  $8\%$ ). Armar una nueva base de datos considerando más parámetros operacionales en el ciclo de camión podría ser un nuevo desafío.

Este modelo sin dudas tiene posibilidades de optimización y un ejemplo claro es la construcción de la base de datos. Es ineficiente descargar 5 queries diferentes para luego unirlos con un ID cuando el programa SQL existente en la mina puede construir la base de datos de ciclos de camiones e incluso entregarla filtrada con los criterios antes mencionados. Para ello se debe construir un código basado en SQL que permita extraer la base de datos de ciclos en un periodo de tiempo deseado.

Aplicar filtros a la base de datos es relevante ya que nos permite ver y analizar de forma representativa lo que ocurre en la mina eliminando los datos outliers o aberrantes ocurridos por algún suceso en particular o por errores de medición. En particular, el rendimiento de camiones calculado con la base de datos sin aplicar ningún filtro llega en promedio a 811 [t/h] lo que es el doble de lo que reportó en la mina en el mes de julio, cuando se aplican los filtros se llega a 459 [t/h] que se encuentra en un rango esperado por Los Bronces.

El hecho de tener tantas casillas en blanco en el caso de los tiempos fijos impide poder realizar un buen análisis estadístico, pues los errores estadísticos siempre disminuyen a medida que

aumento la cantidad de datos y de esta manera se disminuyen los sesgos. Considerando que el análisis consistía en comparar variables dentro de un vector de datos, si no se poseen todos los datos de la fila entonces debe ser eliminada completamente por lo que fue necesario tener que rellenar casillas en el caso de los tiempos fijos. Como el promedio es un estimador insesgado se rellena cada casilla con el promedio de la variable en el periodo deseado intentando converger al valor esperado de la variable.

Luego, es importante destacar que se deben evaluar o corregir filtros que aplica el despacho de la mina Los Bronces. Se debe colocar especial énfasis en la medición de tiempos de aculatación de camiones y en tiempos de descarga que son aquellos tiempos que poseen los más altos errores con 42% y 21%, respectivamente. En lo posible buscar una nueva forma de medición de estos tiempos o bien agrandar los intervalos de tiempos esperados ya que se puede estar sobre estimando.

La aplicación de redes bayesianas ha sido utilizada en distintos ámbitos y en diferentes industrias, por ejemplo, en la predicción de cánceres, en investigaciones policiales, en geología, en diagnósticos de fallas de impresoras y procesadores, entre otros. En minería aún no se desarrolla de forma detallada por lo que era necesario generar una metodología de selección del algoritmo que mejor se acomode a una base de datos minera. En este trabajo se desarrolla una metodología de descarte de algoritmos, la cual permite identificar aquel algoritmo de aprendizaje que mejor se adapta a la base de datos de la mina Los Bronces. Así, es el algoritmo de puntaje Hill Climbing el cual es seleccionado en este trabajo. Este algoritmo no posee arcos no dirigidos, el nodo del rendimiento no posee hijos y posee hartos padres, y su puntaje de red o *score* es el más alto de todos.

A pesar de que Hill-Climbing es el mejor algoritmo para la base de datos de mina Los Bronces, el grafo escogido posee ciertas incongruencias en tanto representa comportamientos no esperados en minería. Luego, es necesario corregir el grafo eliminando los arcos incongruentes. Esto último es soportado y además coincide con bajas correlaciones de arco entre variables. Además la variación del puntaje de red final del grafo es afectado en menos del 0.5%.

En el caso particular de la mina Los Bronces, se determina que las variables que más afectan al rendimiento de manera inversa son la distancia que los camiones recorra, el tiempo de viaje y el tiempo de ciclo con correlaciones bastante altas y en menor proporción tiempos fijos como los operativos no productivos y los tiempos de cola tanto en la pala como en descarga. En cuanto a las variables que más afectan al rendimiento de manera directa son las velocidades y el factor de carga, pero no de la manera que se esperaba pues sus correlaciones son bajas. Esto se resume en la ilustración 50.



Tiempo de viaje (Cor negativa)  
 Distancias recorridas (Cor negativa)  
 Tiempo de ciclo (Cor negativa)  
 Velocidades (Cor positiva)  
 Factor de Carga (Cor positiva)

Operativos no productivos (Cor negativa)  
 Tiempos de cola en descarga (Cor negativa)  
 Tiempos de cola en pala (Cor negativa)

Ilustración 50: Resumen variables que impactan al rendimiento en mayor y menor proporción.

El hecho de validar el modelo construido repitiendo la metodología de construcción de las bases de datos y de descarte de algoritmos/grafos a otros meses y a otros periodos de estudio permite demostrar que este modelo posee bastante potencial y que se puede utilizar como una herramienta efectiva para el análisis de datos en el área de gestión mina.

Este modelo es el paso siguiente a los árboles de valores construidos en el área de gestión mina (ilustración 51), los cuales solo calculan la variación de una variable frente al rendimiento manteniendo todas las otras variables fijas. A partir de este trabajo, ahora conocemos las variables más influyentes en el rendimiento y entre ellas, y además conocemos aquellas que están más correlacionadas para un determinado horizonte de tiempo.

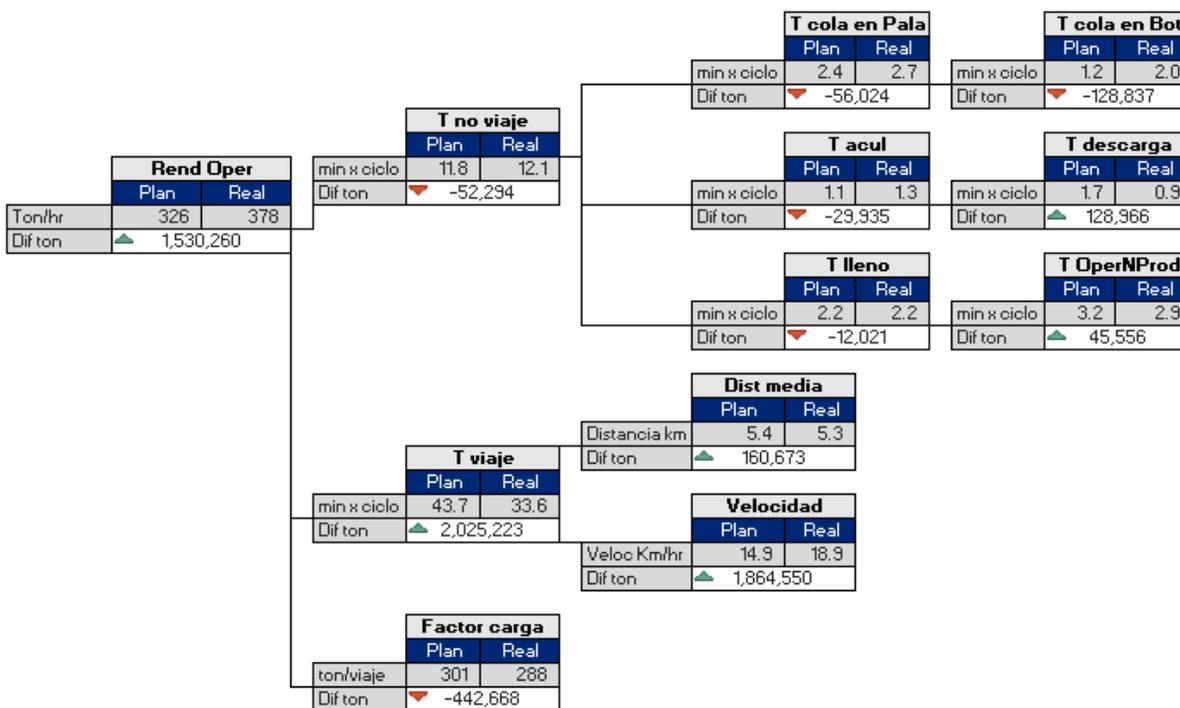


Ilustración 51: Árbol de valor de flota de transporte en el mes de julio.

A modo de ejemplo, en la ilustración 52 se muestra el árbol de valor del mes de julio indicando con una flecha roja la variación de ciertas variables frente al aumento del factor de carga de camiones de extracción (flecha azul), y adicionalmente se indica su respectiva correlación de

acuerdo con el grafo obtenido para el mes de julio. En la sección de anexos 9.9 se muestra otro ejemplo variando la distancia total la cual es una de las variables que más impacto tienen en el rendimiento.

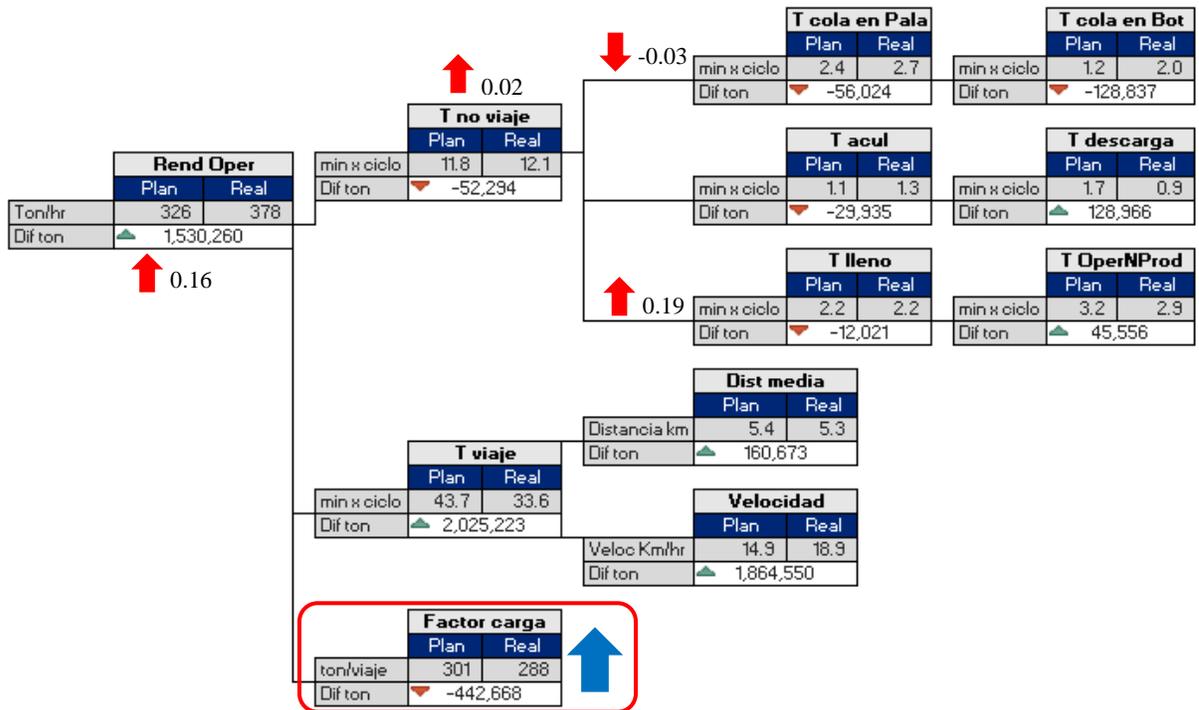


Ilustración 52: Árbol de valor de flota de transporte en el mes de Julio variando el factor de carga.

El siguiente paso sería buscar la forma en que las variables se relacionan mediante estimaciones, sin embargo, este es un proceso complejo ya que podrían existir variables que no se incluyen en este modelo y además funciones que relacionen variables con el TPH y que sean invisibles a la correlación. A modo de ejemplo, en la ilustración 53 se tiene la fórmula que relaciona el factor de carga con el rendimiento. La figura indica que hay relación directa entre ellos, incluso si aumentamos el factor de carga al doble, el rendimiento debería aumentar al doble con correlación 1. Esto no es correcto pues podría existir algún tiempo en el denominador que se calcule en función del factor de carga y por lo tanto disminuir la correlación entre el factor de carga y el rendimiento.



Ilustración 53: Explicación de correlación baja del factor de carga y el rendimiento.

Se recomienda como trabajo a futuro replantearse los filtros aplicados ya que existe una gran oportunidad de mejora del área de despacho y generar una base de datos filtrada del ciclo de camiones sin tener que consultar y unir otras bases de datos. Adicionalmente se recomienda revisar la forma de cálculo de tiempo de ciclo de camiones en despacho.

También, se recomienda realizar un análisis de los sucesos o eventos particulares ocurridos por mes, por ejemplo, de todo el 2019, que expliquen los cambios de arcos ya sea en correlación o en incidencia hacia otras. De esta manera se puede evitar volver a cometer dichos eventos que nos producen pérdidas en el rendimiento como también volver a realizar eventos que producen ganancias. Finalmente, se recomienda realizar un análisis histórico de la vida productiva de la mina, con horizontes de datos de 3 a 5 años atrás. Con ello, identificar y concluir sobre potenciales acciones o medidas preventivas, el impacto de pérdidas, o la identificación de eventos recurrentes o aislados en la operación de mina Los Bronces.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

- Abarzua, Á. (2014). *Zonación y temporalidad relativa de los tipos de alteración hidrotermal en el sector de Los Bronces complejo porfídico Cu-Mo Río Blanco-Los Bronces, Región Metropolitana, Chile*. Santiago: Universidad de Chile.
- Aboytes, M., Laureano, A., & Ramírez, J. (2013). *Algoritmo de búsqueda Tabú para una variante del problema de coloración*. Mexico: Revista de matemática: Teoría y aplicaciones.
- Anglo American Chile. (2019). *Historia Operación Los Bronces*. Obtenido de <https://chile.angloamerican.com/es-es/operaciones/los-bronces>
- Anglo American Cobre. (2018). *Reporte de Sustentabilidad Anglo American*. Santiago: Anglo American Cobre.
- Anglo American S.A. (2018). *Inducción Anglo American*. Santiago: Recursos Humanos.
- Anglo American S.A. (2019). *Gerencia Mina Los Bronces Onboarding*. Santiago, Chile: Anglo American S.A.
- Anglo American S.A. (2019). *Modelo de operación: Gestión del trabajo (work management) en operaciones mina y planificación mina*. Santiago.
- Anglo American Sur. (2015). *MODELO DE TIEMPO GLOBAL ANGLO AMERICAN: Aplicación en Unidad de Negocio Cobre – Mina y Planta*. Santiago.
- Aranda, M. (2017). *Aumento de horas operativas de camiones de extracción durante cambio de turno y relevos mina, Los Bronces*. Santiago: Universidad de Santiago.
- Barrientos, V. (2014). *Análisis de factores Operacionales en detenciones y productividad de sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto*. Santiago: Universidad de Chile.
- Bromberg, F., & Schlüter, F. (s.f.). *Variante del Grow Shrink para mejorar la calidad de Markov Blankets*. Mendoza, Argentina: Dept. Sistemas de Información, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional.
- Caroca, V. (2017). *Sistema Dispatch: Carguío y Transporte*. Viña del Mar: Universidad Federico Santa María.
- Cifuentes, J. (2019). *Servicio de meteorología Los Bronces*. Santiago: Los Bronces.
- Flores, O. (1991). *Simulación y asignación de camiones en mina Los Bronces*. Santiago: Universidad de Chile.
- Gazmuri, R. G. (2016). *Optimización de las horas operativas de los caex en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible, mediante la utilización de modelamientos compuestos y redes neuronales*. Santiago: Universidad de Chile.
- Gerencia Mina. (2019). *Plan de Gestión de Tráfico y Acarreo*. Santiago: Anglo American Operación Los Bronces.
- Gerencia Mina. (Marzo 2019). *P101 Operación Los Bronces*. Santiago: AngloAmerican Cobre.

- González, M. (Agosto de 2016). *RStudio*. Obtenido de Capítulo I: Introducción a R y *RStudio*: [https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/195980\\_3f4cd84bc3ca434daeec55c6c211d13e.html](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/195980_3f4cd84bc3ca434daeec55c6c211d13e.html)
- González, V. (2018). *Modelo Evaluativo para el cálculo de flota de equipos de carguío y transporte en compañía minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago: Universidad de Chile.
- Lopez, B. (2005). *Inteligencia Artificial, Hill Climbing*. Instituto tecnologico de nuevo laredo.
- Mihaljevic, B. (2018). *Bayesian networks with R*.
- Minería Chilena. (6 de Diciembre de 2011). *Alto rendimiento para grandes exigencias*. Obtenido de Minería Chilena: <http://www.mch.cl/reportajes/alto-rendimiento-para-grandes-exigencias/>
- Modular Mining System. (1999). *Utilizando DISPATCH (Primera Parte)*. Tucson, Arizona: Modular Mining System Inc.
- Morrison, S., Liu, C., Eleish, A., Prabhu, A., Li, C., Ralph, J., . . . Hazen, R. (2017). *Networks Analysis of mineralogical systems*. American Mineralogist.
- Nagarajan, R., Scutari, M., & Lèbre, S. (2013). *Bayesian Networks in R with applications in systems Biology*. New York: Springer.
- Pastrán, J. (2019). *Evaluación del cumplimiento de planes de producción de corto plazo utilizando herramientas de simulación de ciclos de carguío y transporte, mina Los Bronces*. Santiago: Universidad de Santiago de Chile.
- Ramírez, I. (2018). *Diseño y desarrollo de un nuevo reporte compacto y automático de planificación mina*. Santiago: Universidad de Chile.
- Reyes, A. (2017). *Reducción de Tiempos operativos no productivos - Camiones de extracción mina, Los Bronces*. Santiago: Universidad de Santiago.
- Reyes, O. (2016). *Nuevos modelos de aprendizaje Híbridos para clasificación y orenamiento de multi-etiqueta*. Córdoba: Universidad de Córdoba, Escuela politécnica Superior, Departamento de informática y análisis numérico.
- Santiesteban, J. (21 de Junio de 2012). *Definición de Redes Bayesianas y sus aplicaciones*. Obtenido de Revista Vinculando: <http://vinculando.org/articulos/redes-bayesianas.html>
- Scutari, M. (2009-2019). *bnlearn*. Obtenido de an R package for Bayesian network learning and inference: <http://www.bnlearn.com/>
- Scutari, M. (2010). *Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package*. University of Padova: Journal of Statistical Software.
- Scutari, M. (2017). *Understanding Bayesian Networks with examples in R*. Department of Statistic, University of Oxford.
- Vasquez Coronado, P., & Tenorio, V. (2015). *Optimization of open pit haulage cycle using a KPI controlling alert system and a discrete-event operations simulator*. Tucson, USA: Mining and Geological Engineering Department/University of Arizona.

## 9 ANEXOS

### 9.1 ELEMENTOS SECUNDARIOS TIME MODEL ANGLO AMERICAN

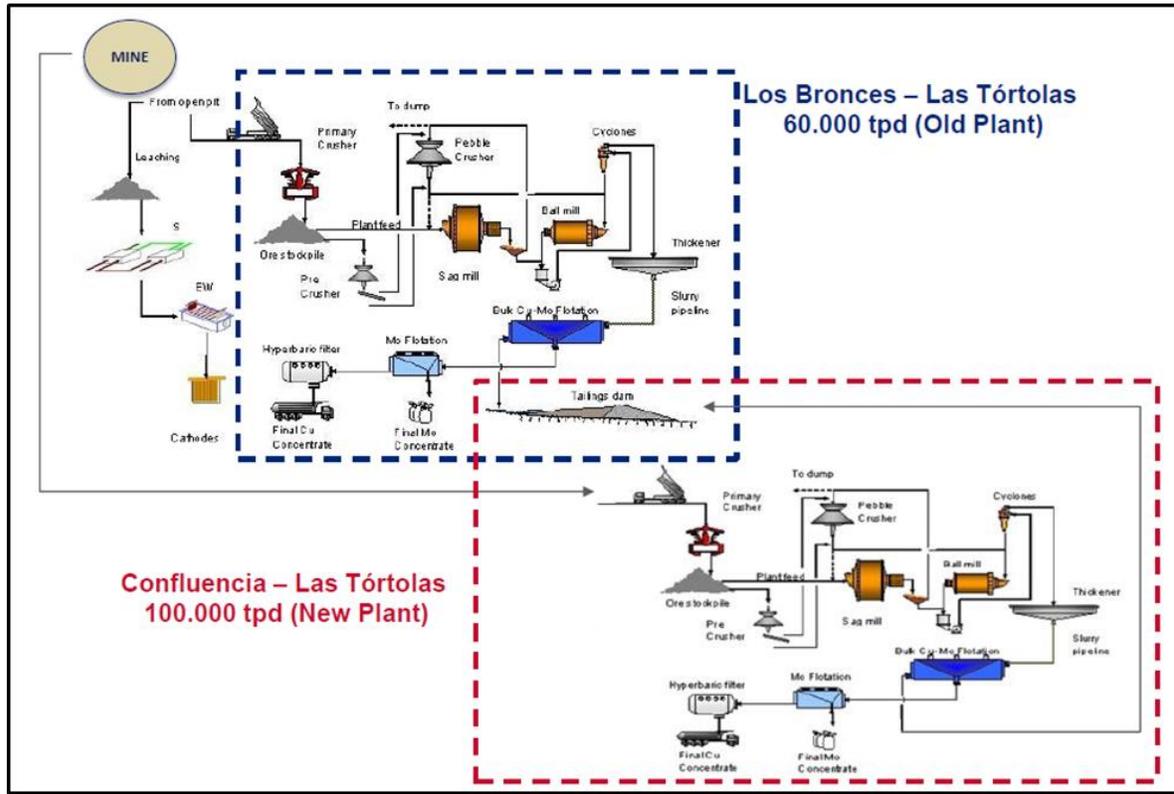
	Categorías	Nom	Descripción
Tiempo disponible	Operación efectiva / primaria	P200	Tiempo en el cual los equipos están operativos y siendo utilizados para <b>producción</b> .
	Operación no productiva / secundaria	P100	Tiempo en el cual los equipos están operativos y realizando actividades <b>no productivas</b> o secundarias. Nota: Considera las pérdidas operacionales inherentes al proceso.
	Demora	L300	Tiempo que implica un <b>retraso</b> en la producción.
	Reserva	L200	Tiempo asignado a equipos de <b>repuesto</b> . Inmediatamente disponibles para producción.
	Consecuencia	L100	Tiempo de detención del equipo producto de <b>eventos externos</b> a él.
Tiempo no disponible	Detención operacional programada	D400	Tiempo de detención programada causada o requerida por <b>operaciones</b> , que implica que los equipos queden inoperables.
	Detención operacional no programada	D300	Tiempo de detención no programada causada o requerida por <b>operaciones</b> , que implica que los equipos queden inoperables.
	Mantenimiento programado	D200	Tiempo producto de trabajos de mantenimiento <b>incluidos</b> en el plan de mantenimiento semanal confirmado. Nota: Considera las PM's, Inspecciones, Backlogs, Modificaciones y Continuidad de tareas.
	Mantenimiento no programado	D100	Tiempo producto de trabajos de mantenimiento <b>no incluidos</b> en el plan de mantenimiento semanal confirmado.
Tiempo no controlable	Evento no controlable	N200	Tiempo atribuible a <b>factores externos</b> y fuera del control de la operación que afecta a toda la operación.
	No programado para producir	N100	Tiempo en el cual el equipo no está <b>programado</b> dentro del plan de producción.

Anexo 1: Detalle de los elementos secundarios del Time Model Anglo American

	Kpi	Abrev.	Descripción	Fórmula
Mantenimiento	Relación de mantenimiento	RM	Es el tiempo de mantenimiento programada sobre el total del tiempo empleado para actividades de mantenimiento.	$D200 / (D100 + D200)$
	Tiempo medio entre detenciones	TMED	Es el tiempo promedio operativo del equipo que transcurre entre una detención y la siguiente.	$T300 / \text{Count}(D000)$
	Tiempo medio para reparar detenciones	TMPR	Es el tiempo promedio de detención del equipo empleado para reparar eventos que provocan la detención.	$D000 / \text{Count}(D000)$
	Disponibilidad física	DF	Porcentaje del tiempo controlable en que el equipo está en condiciones físicas para estar operativo.	$T200 / T100$
	Disponibilidad mecánica/eléctrica	DME	Porcentaje del tiempo controlable en que el equipo está en condiciones mecánicas y/o eléctricas para estar operativo.	$(T200 + D300 + D400) / T100$
Operación	Uso de disponibilidad física	UDF	Porcentaje del tiempo físicamente disponible en que el equipo se encuentra operativo.	$T300 / T200$
	Eficiencia	EF	Porcentaje del tiempo operativo en que el equipo opera de forma efectiva / primaria.	$P200 / T300$
	Utilización efectiva	UE	Porcentaje del tiempo total calendario en que el equipo opera de forma efectiva / primaria.	$P200 / T000$
	Rendimiento operativo	RO	Unidades de producción sobre el tiempo operativo.	$\text{Unidades de producción} / T300$
	Rendimiento efectivo	RE	Unidades de producción sobre el tiempo de operación efectiva / primaria.	$\text{Unidades de producción} / P200$
	Efectividad general de los equipos	OEE	Relación porcentual que mide la eficiencia productiva de un equipo o proceso, involucrando indicadores de utilización, rendimiento y calidad.	$UE \times \frac{\text{Producción real}}{\text{Producción objetivo}} \times \frac{\text{Calidad real}}{\text{Calidad objetivo}}$

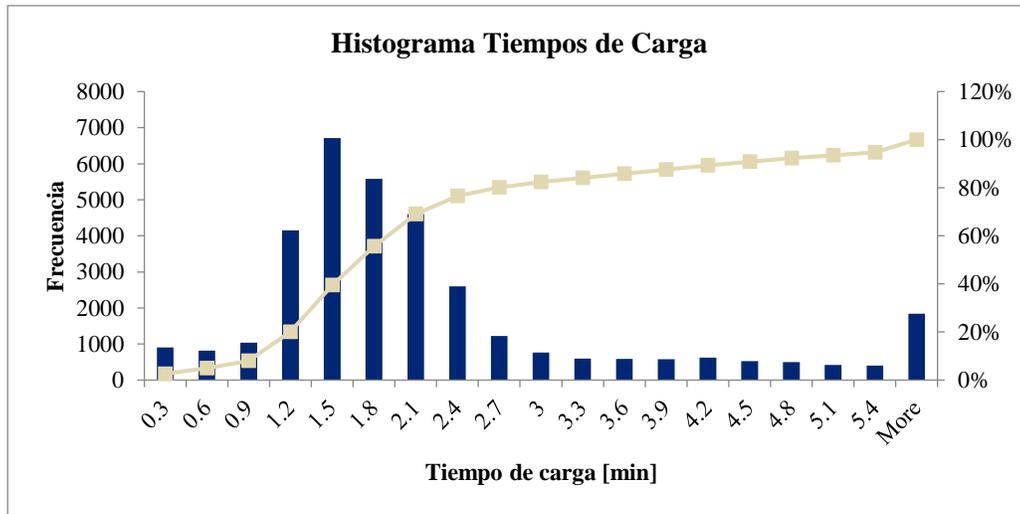
Anexo 2: Cálculo de los principales KPI de operaciones según Time Model AA.

## 9.2 ANTECEDENTES MINA LOS BRONCES

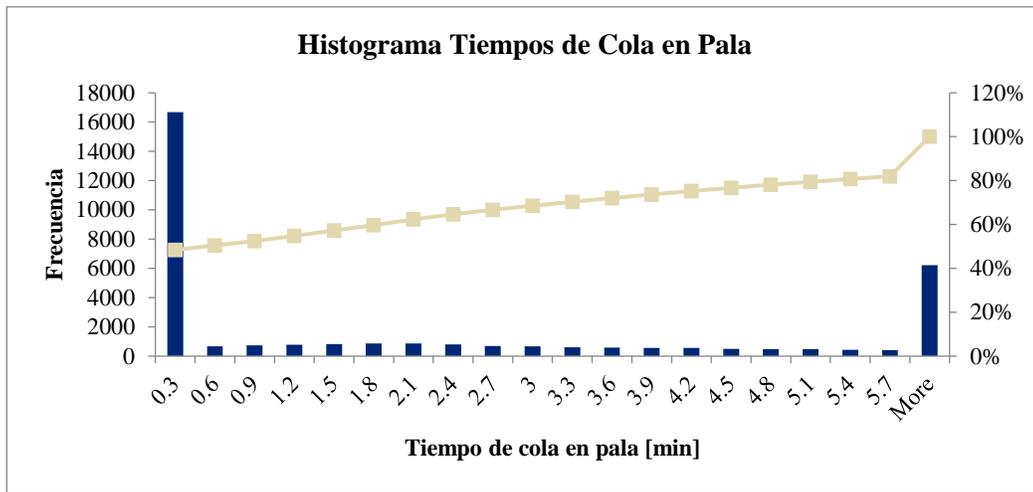


Anexo 3: Flowsheet plantas Los bronces y Confluencia.

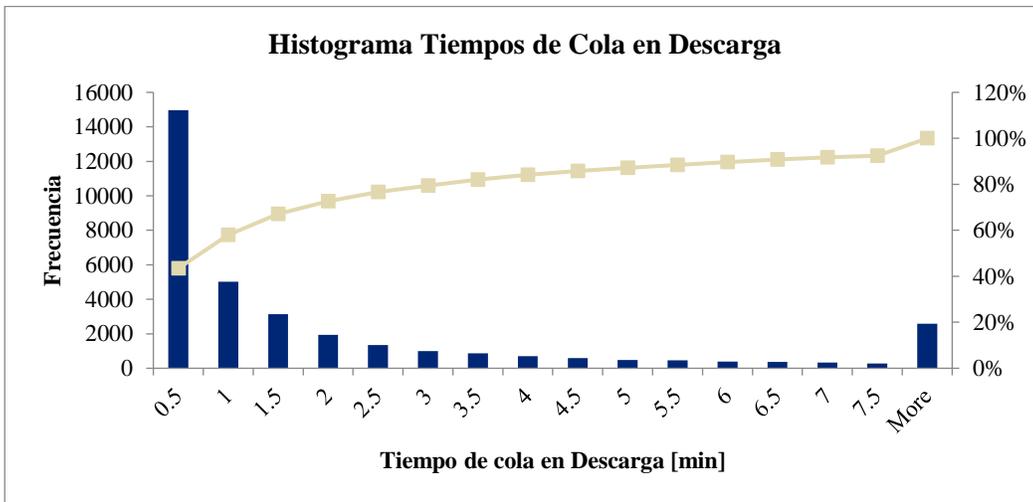
## 9.3 HISTOGRAMAS BASE DE DATOS SIN FILTRAR JULIO



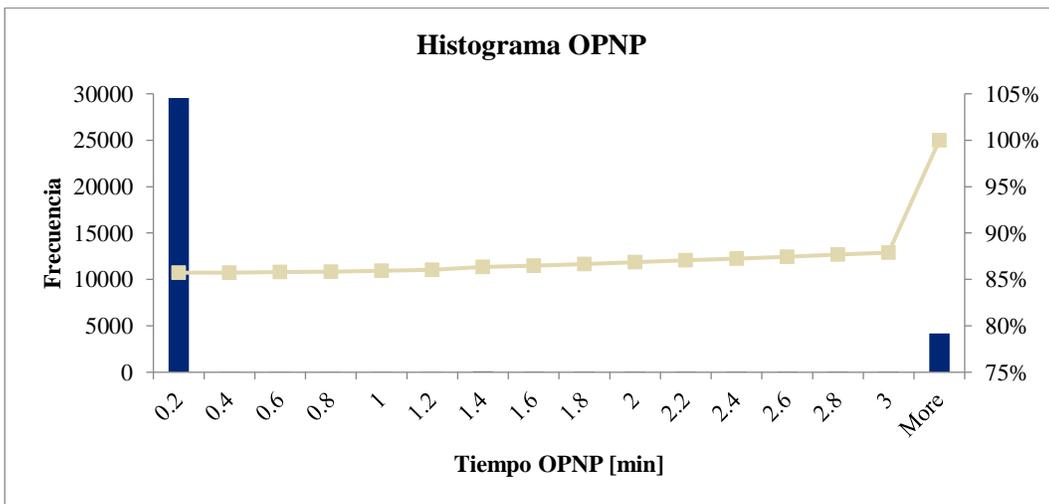
Anexo 4: Histograma de tiempos de carga base de datos sin filtrar



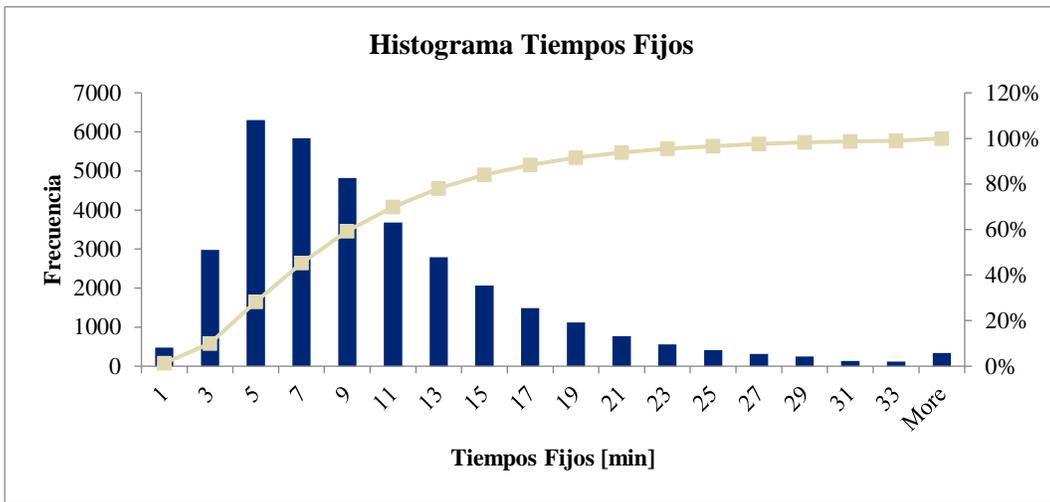
Anexo 5: Histograma de tiempos de cola en pala base de datos sin filtrar



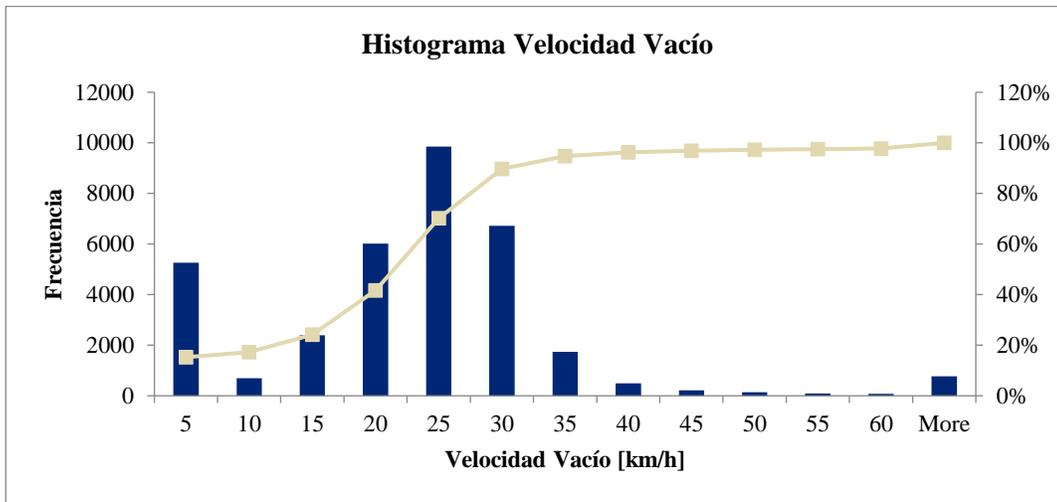
Anexo 6: Histograma de tiempos de cola en descarga base de datos sin filtrar



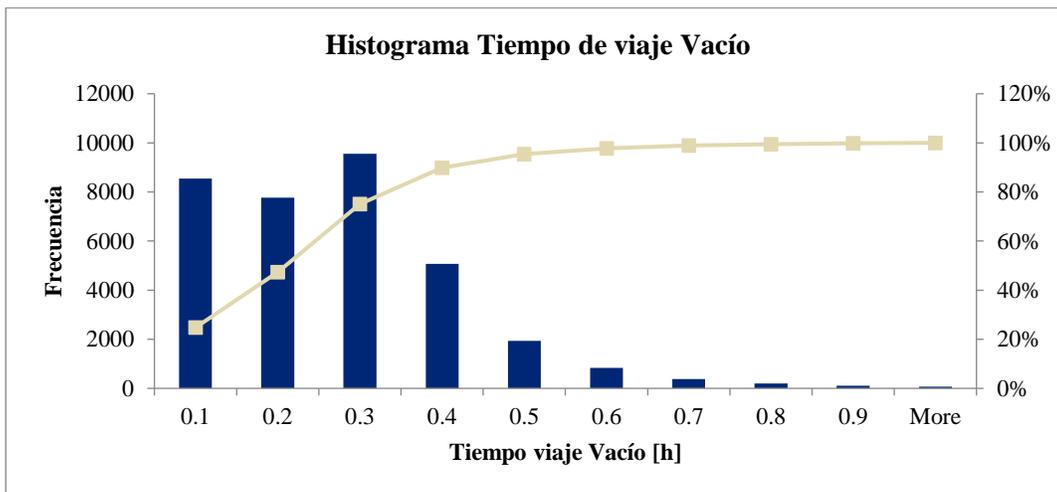
Anexo 7: Histograma de tiempos de OPNP base de datos sin filtrar



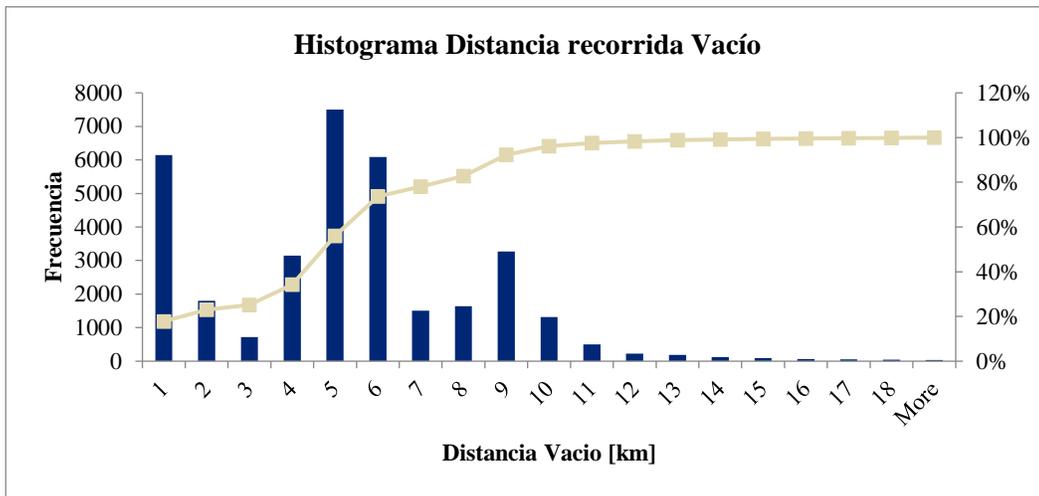
Anexo 8: Histograma de tiempos fijos base de datos sin filtrar



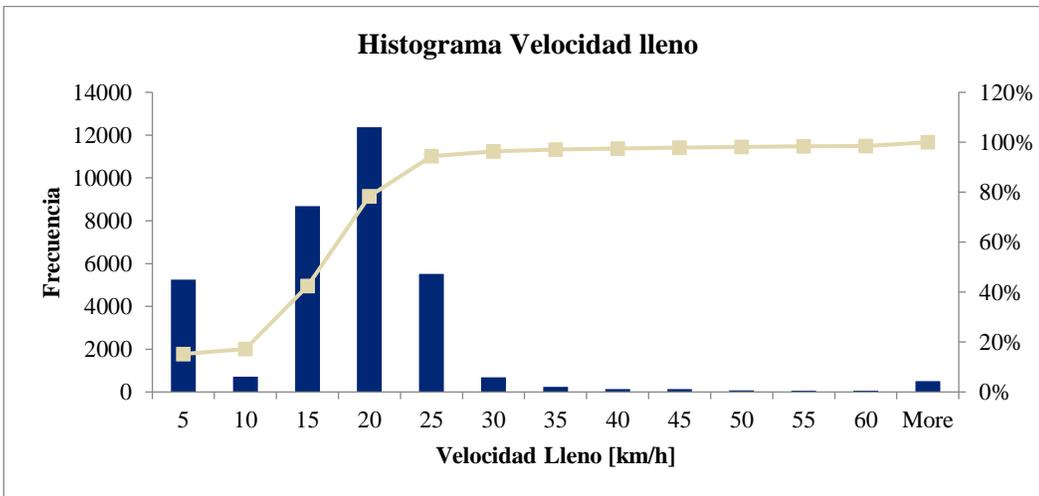
Anexo 9: Histograma de velocidades vacío base de datos sin filtrar



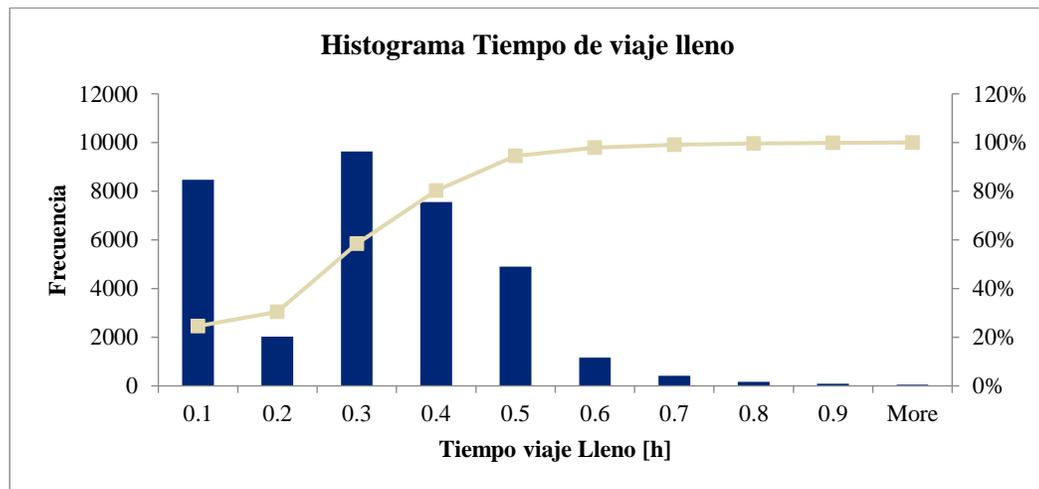
Anexo 10: Histograma de tiempo de viaje vacío base de datos sin filtrar



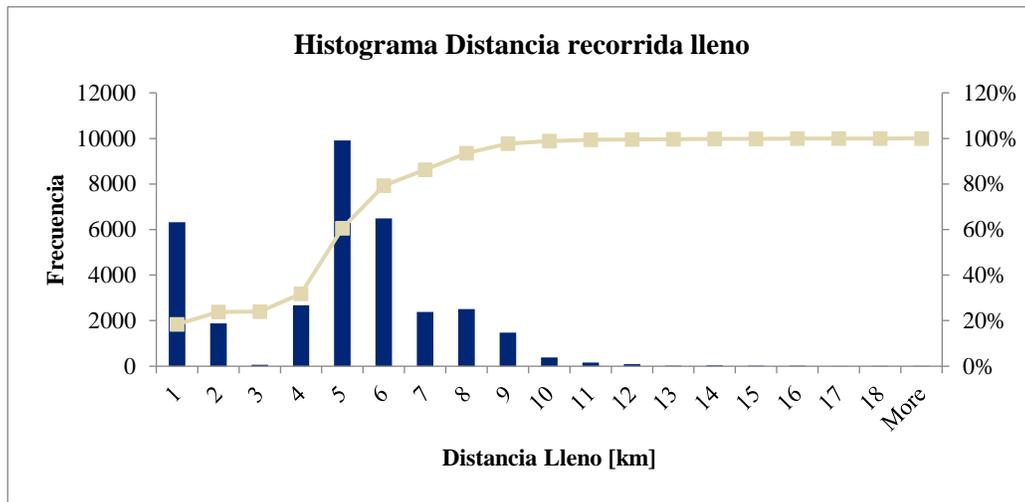
Anexo 11: Histograma de distancias recorridas vacío base de datos sin filtrar



Anexo 12: Histograma de velocidades lleno base de datos sin filtrar

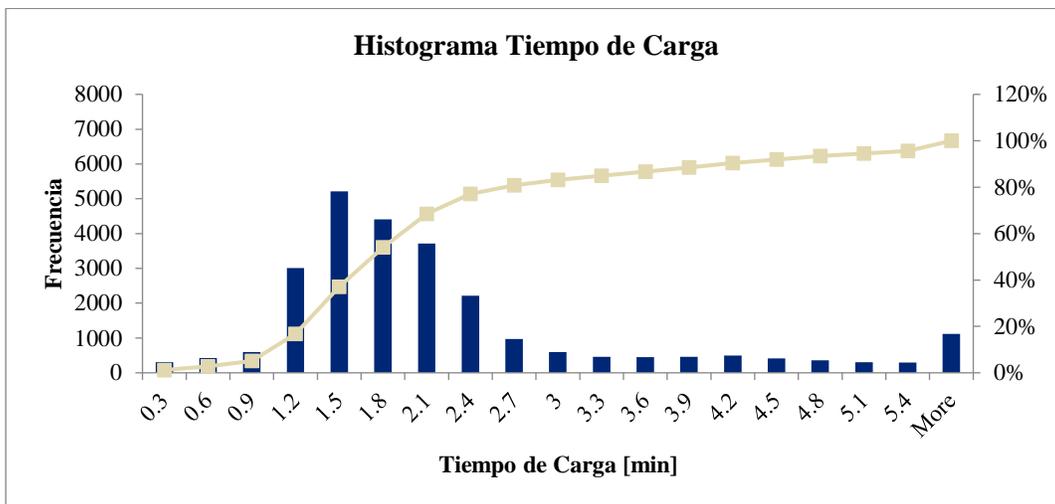


Anexo 13: Histograma de tiempo de viaje lleno base de datos sin filtrar

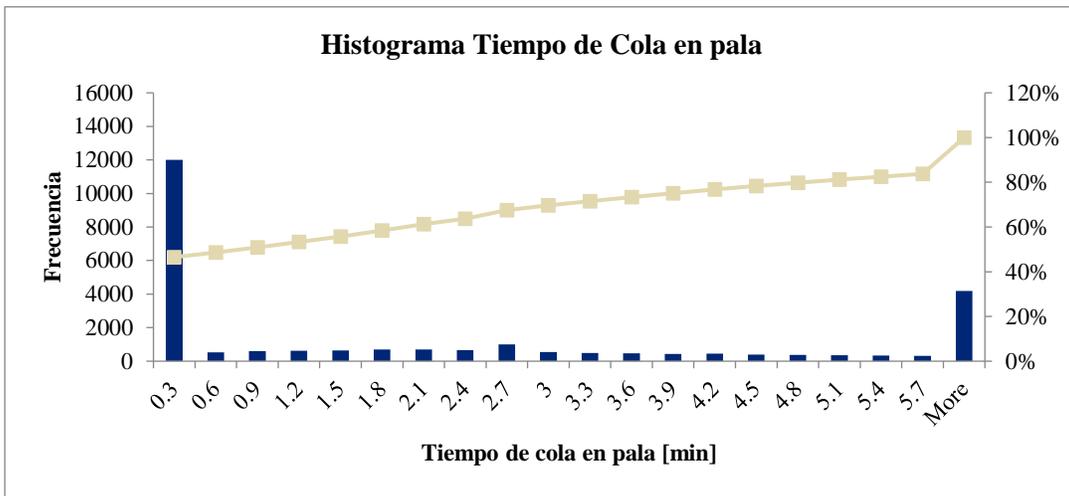


Anexo 14: Histograma de distancia recorrida lleno base de datos sin filtrar

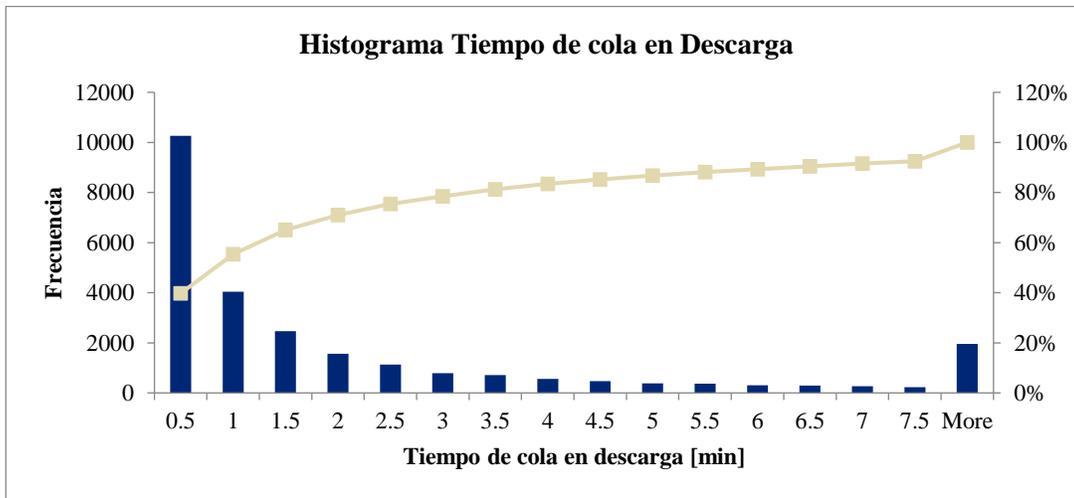
## 9.4 HISTOGRAMAS BASE DE DATOS FILTRADA JULIO



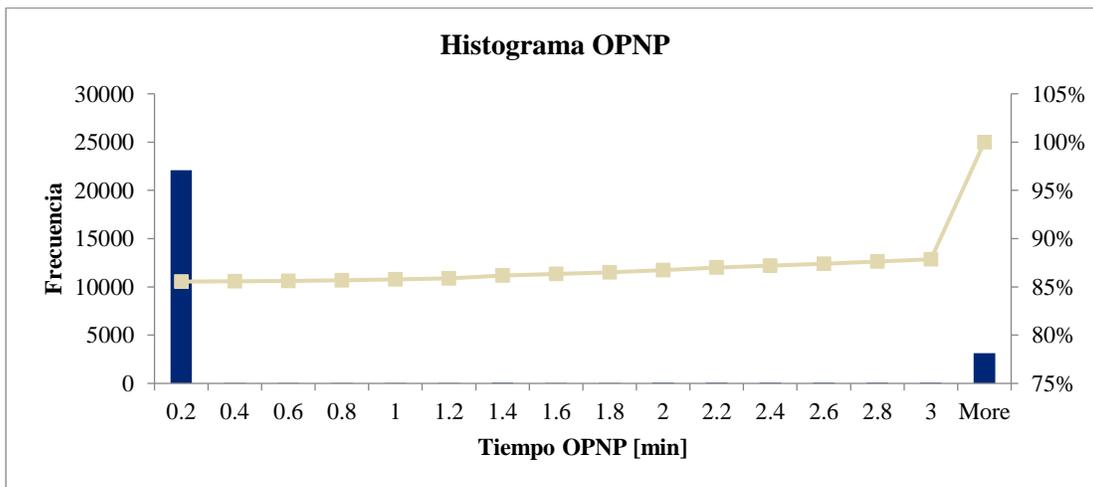
Anexo 15: Histograma de tiempos de carga base de datos filtrada



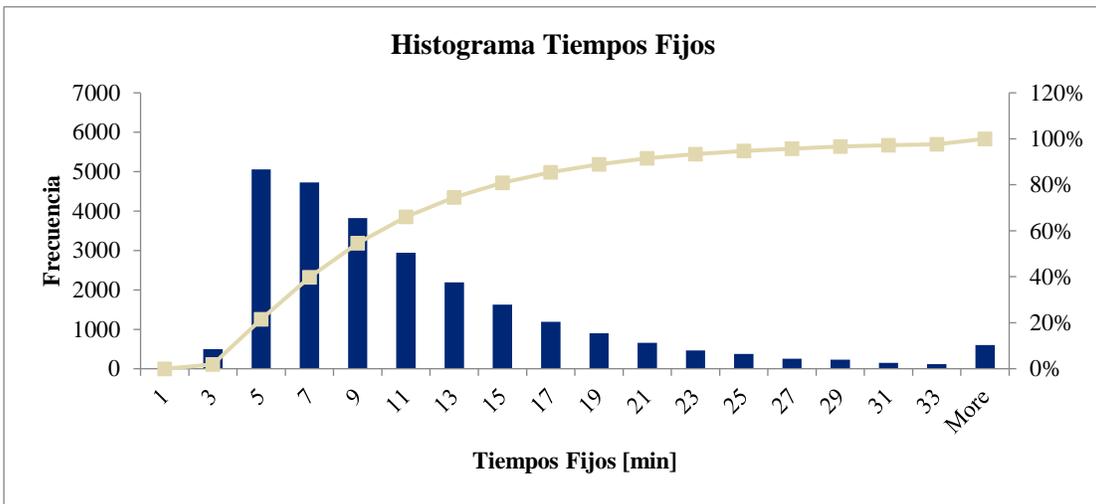
Anexo 16: Histograma de tiempos de cola en pala base de datos filtrada.



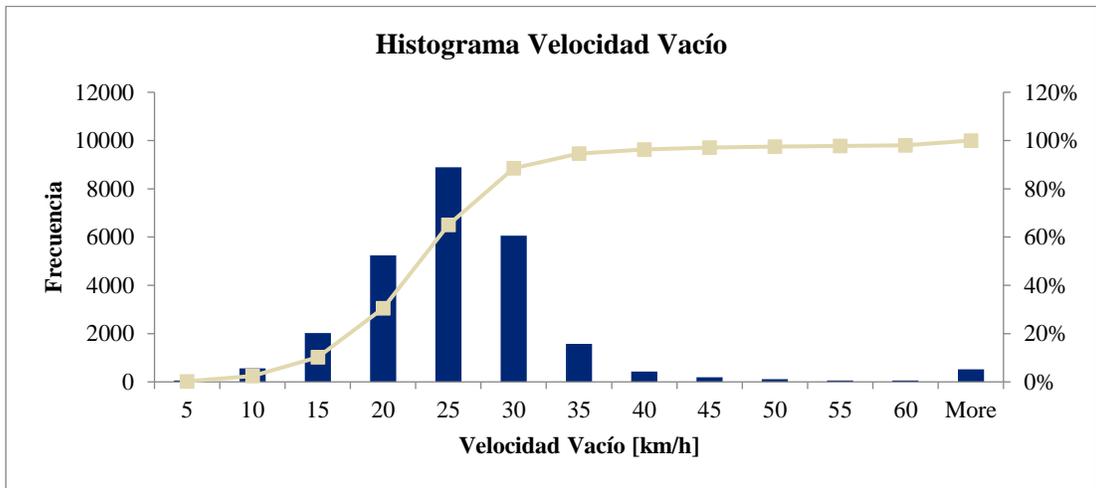
Anexo 17: Histograma de tiempos de cola en descarga base de datos filtrada.



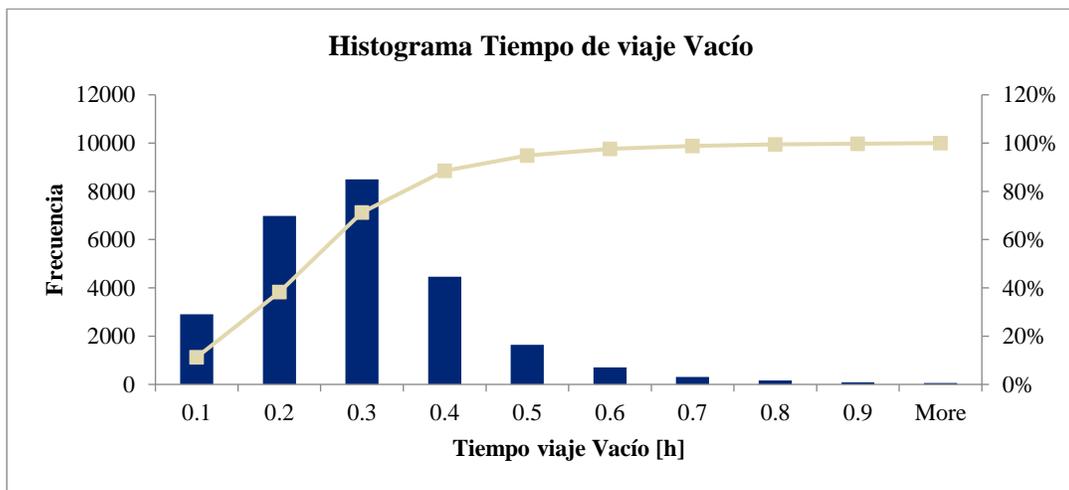
Anexo 18: Histograma de tiempos OPNP base de datos filtrada.



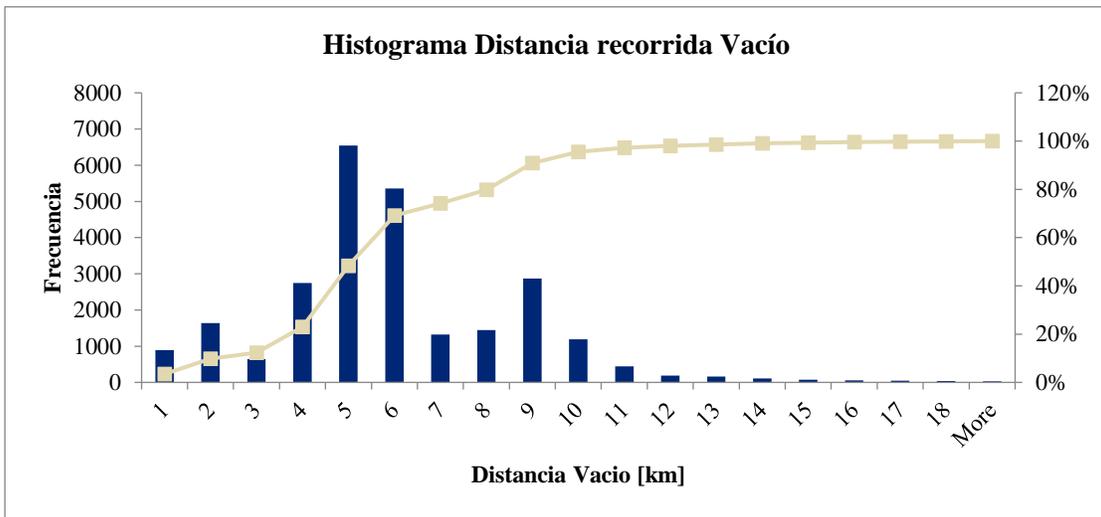
Anexo 19: Histograma de tiempos fijos base de datos filtrada.



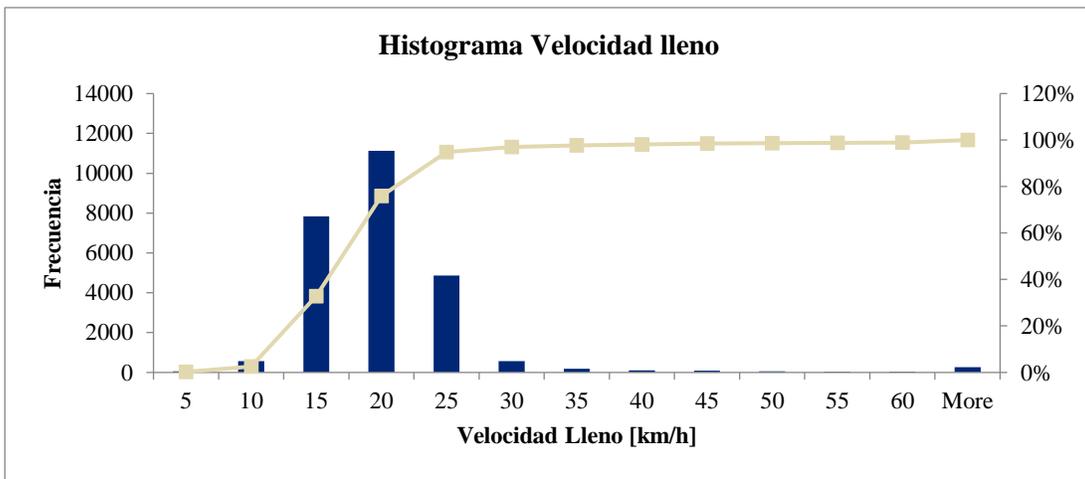
Anexo 20: Histograma de velocidad vacío base de datos filtrada.



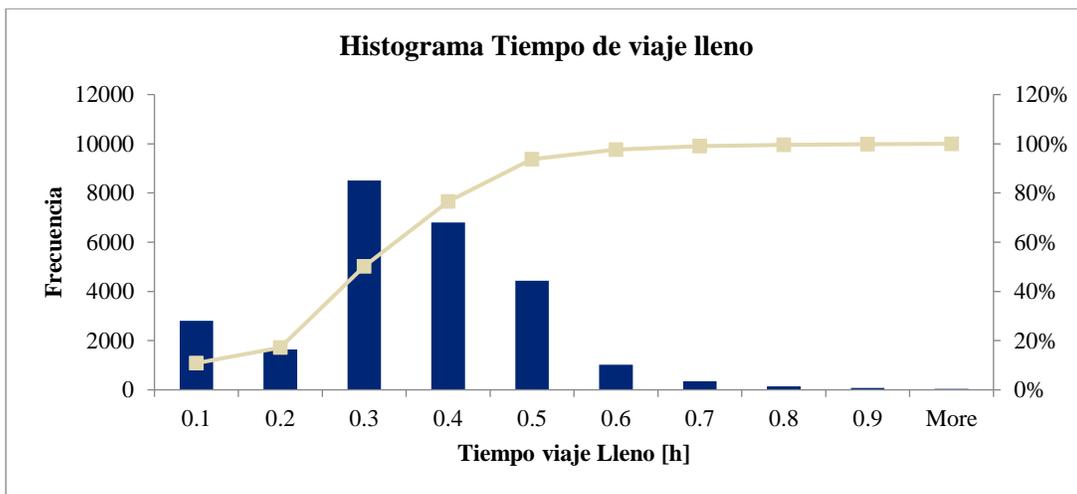
Anexo 21: Histograma de tiempos de viaje vacío base de datos filtrada.



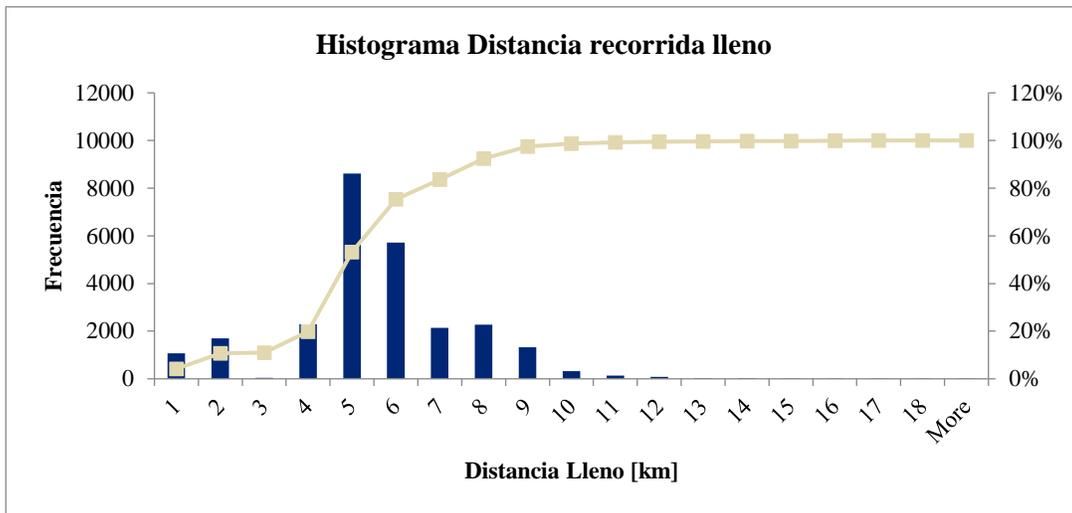
Anexo 22: Histograma de distancias recorridas vacío base de datos filtrada.



Anexo 23: Histograma de velocidad lleno base de datos filtrada.



Anexo 24: Histograma de tiempos de viaje lleno base de datos filtrada.



Anexo 25: Histograma de distancias recorridas lleno base de datos filtrada.

## 9.5 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE SEPTIEMBRE

Parámetros	Carga [min]	Cola en pala [min]	Acuatamiento [min]	Cola Descarga [min]	Descarga [min]	OPNP [min]	FC [t]
Promedio	2.04	1.18	2.59	1.43	0.94	3.04	282.78
Mediana	1.57	1.27	1.05	0.55	0.98	0	284
Moda	1.17	1.27	0	0	0.98	0	285
Desviación Estándar	1.41	0.28	3.51	2.50	0.20	8.61	18.82
Varianza	1.98	0.08	12.35	6.24	0.04	74.20	354.06
Mínimo	0	0.58	0	0	0.42	0	245
Máximo	10.83	2	17	25.57	1.50	139.22	350

Anexo 26: Tabla resumen de la estadística descriptiva de septiembre (1)

Parámetros	Distancia Vacío [km]	Distancia Lleno [km]	Distancia Total [km]	Velocidad vacío [km/h]	Velocidad Lleno [km/h]	Velocidad Promedio [km/h]
Promedio	5.66	5.22	10.88	0.26	0.30	0.56
Mediana	5.28	5.33	10.90	0.23	0.30	0.57
Moda	4.78	5.58	2.02	0.19	0.22	0.59
Desviación Estándar	2.76	2.22	4.09	0.14	0.13	0.21
Varianza	7.62	4.91	16.76	0.02	0.02	0.04
Mínimo	0.26	0.26	0.61	0.02	0.02	0.04
Máximo	19.77	19.83	34.95	0.99	0.97	1.53

Anexo 27: Tabla resumen de la estadística descriptiva de septiembre (2)

Parámetros	T Viaje vacío [h]	T Viaje Lleno [h]	T Viaje Total [h]	T Ciclo [min]	T Fijos [min]	TPH [t/h]
Promedio	24.14	19.07	20.07	11.22	44.72	448.10
Mediana	22.83	17.48	19.31	8.18	43.87	384.68
Moda	21.6	18	19.2	4.22	42.77	337.50
Desviación Estándar	15.73	13.00	5.59	9.77	15.88	247.47
Varianza	247.52	168.88	31.29	95.46	252.30	61242.44
Mínimo	1.76	1.45	2.56	1.68	8.15	107.32
Máximo	789	789.23	64.58	142.92	171.08	2423.43

Anexo 28: Tabla resumen de la estadística descriptiva de septiembre (3)

## 9.6 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE INVIERNO

Parámetros	Carga [min]	Cola en pala [min]	Acumulamiento [min]	Cola Descarga [min]	Descarga [min]	OPNP [min]	FC [t]
Promedio	2.10	1.13	2.48	1.87	0.94	3.25	286.04
Mediana	1.65	1.13	0.87	0.63	0.94	0	287
Moda	1.22	1.13	0	0	0.94	0	285
Desviación Estándar	1.45	0.28	3.47	3.18	0.20	11.01	19.58
Varianza	2.10	0.08	12.01	10.12	0.04	121.14	383.27
Mínimo	0	0.58	0	0	0.42	0	245
Máximo	10.83	2.00	17.00	26.65	1.50	318.68	366

Anexo 29: Tabla resumen de la estadística descriptiva de invierno (1)

Parámetros	Distancia Vacío [km]	Distancia Lleno [km]	Distancia Total [km]	Velocidad vacío [km/h]	Velocidad Lleno [km/h]	Velocidad Promedio [km/h]
Promedio	5.96	5.51	11.47	0.26	0.32	0.58
Mediana	5.37	5.22	11.10	0.24	0.32	0.58
Moda	4.45	4.37	6.90	0.19	0.27	0.59
Desviación Estándar	2.92	2.51	4.69	0.14	0.14	0.23
Varianza	8.55	6.31	21.99	0.02	0.02	0.05
Mínimo	0.25	0.25	0.50	0.02	0.02	0.04
Máximo	20.00	19.98	38.32	1.00	1.00	1.88

Anexo 30: Tabla resumen de la estadística descriptiva de invierno (2)

Parámetros	T Viaje vacío [h]	T Viaje Lleno [h]	T Viaje Total [h]	T Ciclo [min]	T Fijos [min]	TPH [t/h]
Promedio	25.20	18.90	20.22	11.77	46.57	440.88
Mediana	23.55	17.59	19.69	8.52	45.00	379.53
Moda	21.60	18.00	21.60	4.08	44.23	327.27
Desviación Estándar	18.46	12.97	5.51	12.07	18.51	244.25
Varianza	340.75	168.28	30.39	145.60	342.66	59659.41
Mínimo	0.89	1.04	2.09	1.57	6.85	38.30
Máximo	874.56	789.23	64.94	345.02	408.92	2787.24

Anexo 31: Tabla resumen de la estadística descriptiva de invierno (3)

## 9.7 GRAFOS DE SEPTIEMBRE E INVIERNO MEDIANTE HILL-CLIMBING

Bayesian network learned via Score-based methods

```

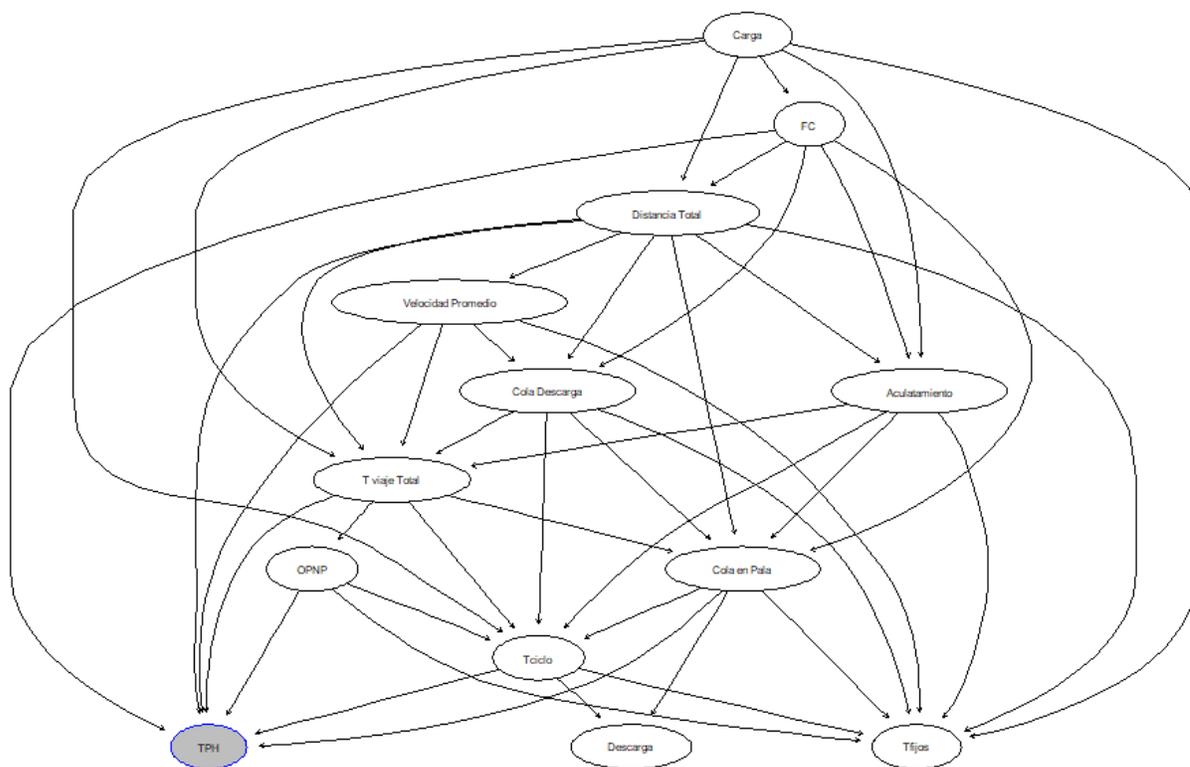
model:
  [Carga][FC|Carga][Distancia Total|Carga:FC][Acuatamiento|Carga:FC:Distancia Total][Velocidad Promedio|Distancia Total]
  [Cola Descarga|FC:Distancia Total:Velocidad Promedio]
  [T viaje Total|Carga:Acuatamiento:Cola Descarga:Distancia Total:Velocidad Promedio]
  [Cola en Pala|Acuatamiento:Cola Descarga:FC:Distancia Total:T viaje Total][OPNP|T viaje Total]
  [Tciclo|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga:T viaje Total:OPNP][Descarga|Cola en Pala:Tciclo]
  [Tfijos|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga:Distancia Total:Velocidad Promedio:OPNP:Tciclo]
  [TPH|Cola en Pala:FC:Distancia Total:T viaje Total:Velocidad Promedio:OPNP:Tciclo]
nodes:
  13
arcs:
  44
  undirected arcs:
    0
  directed arcs:
    44
average markov blanket size:
  9.54
average neighbourhood size:
  6.77
average branching factor:
  3.38

learning algorithm:
  Hill-Climbing
score:
  BIC (Gauss.)
penalization coefficient:
  5.060166
tests used in the learning procedure:
  654
optimized:
  TRUE

```

Anexo 32: Características del algoritmo de puntaje Hill-Climbing mes de septiembre

### Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing Septiembre



Anexo 33: Grafo de algoritmo de puntaje Hill-Climbing mes de septiembre.

#### Bayesian network learned via Score-based methods

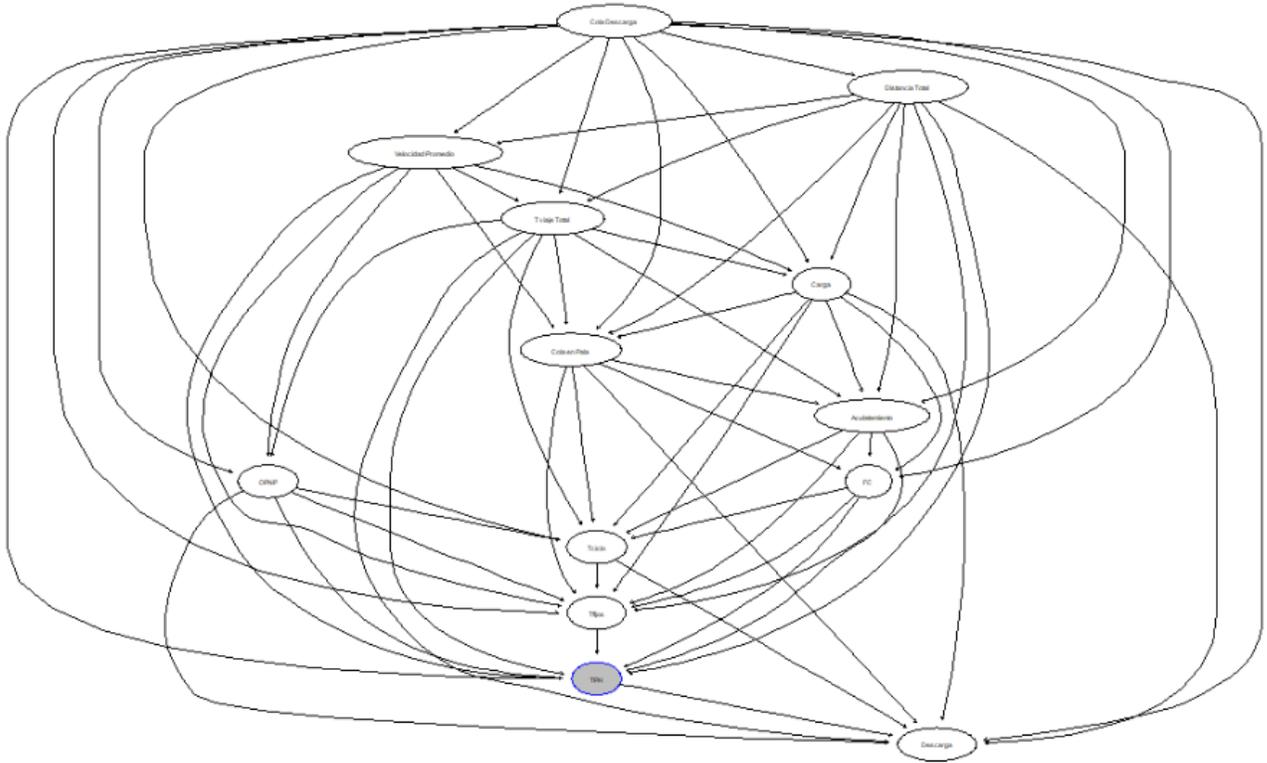
```

model:
[Cola Descarga|Distancia Total|Cola Descarga|Velocidad Promedio|Cola Descarga:Distancia Total]
[T viaje Total|Cola Descarga:Distancia Total:Velocidad Promedio]
[Carga|Cola Descarga:Distancia Total:T viaje Total:Velocidad Promedio]
[OPNP|Cola Descarga:T viaje Total:Velocidad Promedio]
[Cola en Pala|Carga:Cola Descarga:Distancia Total:T viaje Total:Velocidad Promedio]
[Acuatamiento|Carga:Cola en Pala:Cola Descarga:Distancia Total:T viaje Total]
[FC|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga]
[Tciclo|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga:FC:T viaje Total:OPNP]
[Tfijos|Carga:Cola en Pala:Acuatamiento:Cola Descarga:FC:Distancia Total:Velocidad Promedio:OPNP:Tciclo]
[TPH|Acuatamiento:Cola Descarga:FC:Distancia Total:T viaje Total:Velocidad Promedio:OPNP:Tfijos]
[Descarga|Carga:Cola en Pala:Cola Descarga:Distancia Total:T viaje Total:OPNP:Tciclo:TPH]
nodes:          13
arcs:           59
  undirected arcs: 0
  directed arcs:  59
average markov blanket size: 11.38
average neighbourhood size:  9.08
average branching factor:   4.54

learning algorithm: Hill-Climbing
score:              BIC (Gauss.)
penalization coefficient: 5.952325
tests used in the learning procedure: 786
optimized:         TRUE
    
```

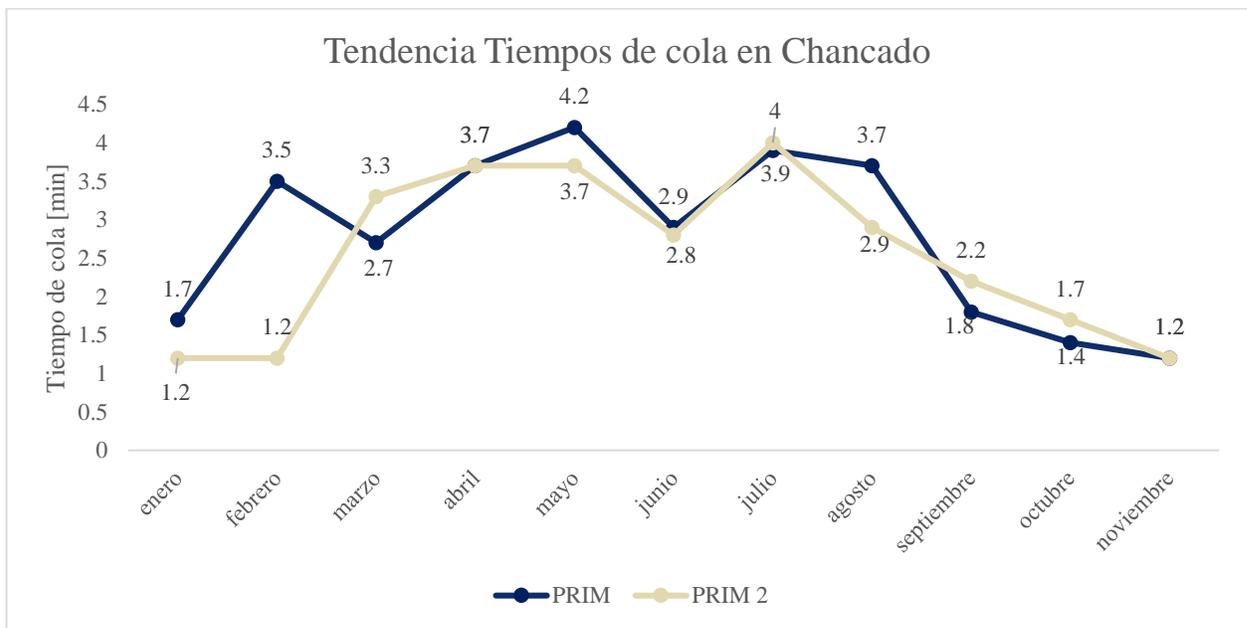
Anexo 34: Características del algoritmo de puntaje Hill-Climbing invierno

### Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing Invierno



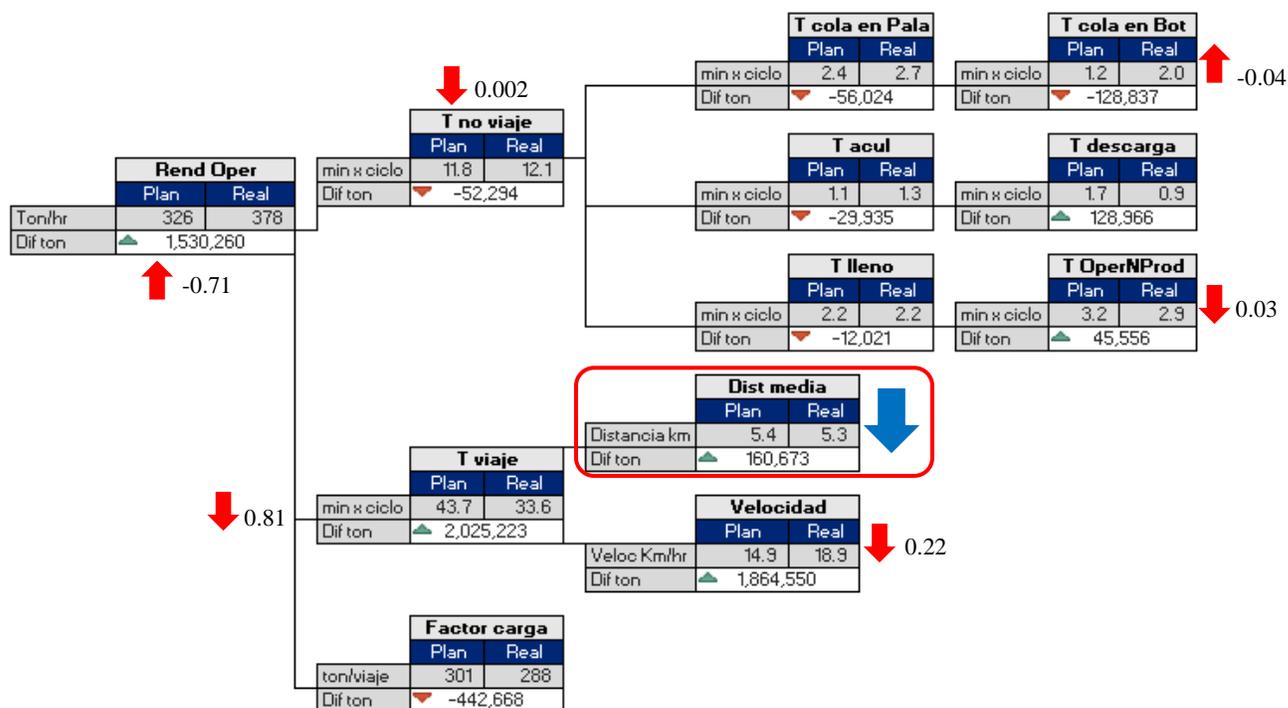
Anexo 35: Grafo de algoritmo de puntaje Hill-Climbing invierno.

## 9.8 TENDENCIA TIEMPOS DE COLA EN CHANCADO



Anexo 36: Tendencia de tiempos de cola en Chancado. Elaboración propia.

## 9.9 ÁRBOL DE VALOR DE LA FLOTA DE TRANSPORTE VARIANDO DISTANCIAS MES DE JULIO



Anexo 37: Árbol de valor de la flota de transporte en el mes de julio variando distancias.

## 9.10 CÓDIGO EN RSTUDIO PARA LA EXTRACCIÓN DE GRAFOS DE JULIO.

### #Código Memoria mes de julio

```
if (!requireNamespace("BiocManager", quietly = TRUE))
  install.packages("BiocManager")
BiocManager::install("Rgraphviz")
install.packages("bnlearn")
library(bnlearn)
library(readxl)
```

### #Importar base de datos

```
BD_Julio_v4 <- read_excel("C:/Users/pcalleja/Desktop/Avance Memoria/BD_Julio_v4.xlsx",
  sheet = "Grafos LB")
Predicciones <- read_excel("C:/Users/pcalleja/Desktop/Avance Memoria/Predicciones.xlsx",
  sheet = "Sheet2")
```

### #Algoritmo de Puntaje Hill Climbing

```
bn1=hc(BD_Julio_v4)
#Para ver el grafo
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
```

```
graphviz.plot(bn1,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing")
```

### **#Puntaje del Grafo**

```
score(bn1,BD_Julio_v4,type="loglik-g")  
score(bn1,BD_Julio_v4,type="aic-g")  
score(bn1,BD_Julio_v4,type="bic-g")  
score(bn1,BD_Julio_v4,type="bge")
```

### **#Eliminación de arcos**

```
Mbn1=drop.arc(bn1,"Aculatamiento","Distancia Total")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"Velocidad Promedio","Cola Descarga")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"Cola Descarga","T viaje Total")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"T viaje Total","FC")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"Velocidad Promedio","Cola en Pala")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"Cola Descarga","FC")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"Distancia Total","Cola en Pala")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"T viaje Total","Descarga")  
Mbn1=drop.arc(Mbn1,"Tciclo","Tfijos")
```

### **#Visualización del grafo luego de la eliminación de arcos**

```
graphviz.plot(Mbn1,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Puntaje Hill-Climbing")
```

### **#Puntaje de Grafo con eliminación de arcos**

```
score(Mbn1,BD_Julio_v4,type="loglik-g")  
score(Mbn1,BD_Julio_v4,type="aic-g")  
score(Mbn1,BD_Julio_v4,type="bic-g")  
score(Mbn1,BD_Julio_v4,type="bge")
```

### **#Visualización del Grafo con las correlaciones**

```
hl1=list(nodes="TPH",arcs=arcs(Mbn1),col="black",fill="grey")  
GrafoJulio=graphviz.plot(Mbn1,highlight = hl1,layout="dot",shape="ellipse")  
edgeRenderInfo(GrafoJulio)=list(col=c("FC~TPH"="blue","Velocidad Promedio~TPH"="blue","Cola Descarga~TPH"="red","Tfijos~TPH"="red","T viaje Total~TPH"="red","OPNP~TPH"="red","Distancia Total~TPH"="red","T viaje Total~Tciclo"="blue","OPNP~Tciclo"="blue","Cola Descarga~Tciclo"="blue","Cola en Pala~Tciclo"="blue","Aculatamiento~Tciclo"="red","FC~Tciclo"="red","Carga~Tciclo"="red","Velocidad Promedio~Tfijos"="red","OPNP~Tfijos"="blue","Cola Descarga~Tfijos"="blue","Cola en Pala~Tfijos"="blue","Aculatamiento~Tfijos"="blue","FC~Tfijos"="blue","Carga~Tfijos"="blue","Distancia Total~Tfijos"="blue","Velocidad Promedio~T viaje Total"="red","Carga~T
```

```

viaje Total"="red", "Distancia Total~T viaje Total"="blue", "OPNP~T viaje
Total"="blue", "Carga~Velocidad Promedio"="red", "Distancia Total~Velocidad
Promedio"="blue", "Distancia Total~OPNP"="blue", "Distancia Total~Cola
Descarga"="red", "Acuatamiento~Cola en Pala"="blue", "FC~Cola en
Pala"="red", "FC~Descarga"="blue", "Carga~Acuatamiento"="blue", "Carga~FC"="blue", "Car
ga~Distancia Total"="red"), lwd=c("FC~TPH"=1.637, "Velocidad
Promedio~TPH"=1.695, "Cola Descarga~TPH"=0.862, "Tfijos~TPH"=2.197, "T viaje
Total~TPH"=7.7067, "OPNP~TPH"=1.6871, "Distancia Total~TPH"=7.1146, "T viaje
Total~Tciclo"=7.295, "OPNP~Tciclo"=6.4057, "Cola Descarga~Tciclo"=1.561, "Cola en
Pala~Tciclo"=1.844, "Acuatamiento~Tciclo"=0.0665, "FC~Tciclo"=0.0151, "Carga~Tciclo"=0
.973, "Velocidad Promedio~Tfijos"=0.284, "OPNP~Tfijos"=9.139, "Cola
Descarga~Tfijos"=2.648, "Cola en
Pala~Tfijos"=2.684, "Acuatamiento~Tfijos"=0.599, "FC~Tfijos"=0.204, "Carga~Tfijos"=0.937
, "Distancia Total~Tfijos"=0.016, "Velocidad Promedio~T viaje Total"=3.155, "Carga~T viaje
Total"=2.181, "Distancia Total~T viaje Total"=8.1042, "OPNP~T viaje
Total"=0.208, "Carga~Velocidad Promedio"=0.305, "Distancia Total~Velocidad
Promedio"=2.198, "Distancia Total~OPNP"=0.253, "Distancia Total~Cola
Descarga"=0.435, "Acuatamiento~Cola en Pala"=0.520, "FC~Cola en
Pala"=0.321, "FC~Descarga"=0.239, "Carga~Acuatamiento"=0.873, "Carga~FC"=1.896, "Carg
a~Distancia Total"=2.3973))
renderGraph(GrafoJulio)

```

### **#Correlaciones de todos los arcos**

```

ci.test("Tciclo", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("T viaje Total", "Descarga", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "Cola en Pala", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Velocidad Promedio", "Cola en Pala", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola Descarga", "FC", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("T viaje Total", "FC", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola Descarga", "T viaje Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Velocidad Promedio", "Cola Descarga", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Acuatamiento", "Distancia Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Carga", "Distancia Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("FC", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Velocidad Promedio", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola Descarga", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Tfijos", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("T viaje Total", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("OPNP", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "TPH", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("T viaje Total", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("OPNP", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")

```

```

ci.test("Cola Descarga", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Aculatamiento", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola en Pala", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("FC", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Carga", "Tciclo", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Velocidad Promedio", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("OPNP", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola Descarga", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Aculatamiento", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola en Pala", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("FC", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Carga", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "Tfijos", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Velocidad Promedio", "T viaje Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("OPNP", "T viaje Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Carga", "T viaje Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "T viaje Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Carga", "Velocidad Promedio", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "Velocidad Promedio", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("OPNP", "Distancia Total", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "Cola Descarga", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola en Pala", "Aculatamiento", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Cola en Pala", "FC", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Descarga", "FC", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Aculatamiento", "Carga", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("FC", "Carga", data=BD_Julio_v4, test="cor")
ci.test("Distancia Total", "Carga", data=BD_Julio_v4, test="cor")

```

### **#Algoritmo de Puntaje Tabu Search**

```

bn2=tabu(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH", col="blue", fill="grey")
graphviz.plot(bn2, highlight = highlight.tph, layout="dot", shape="ellipse", main="Algoritmo
de Puntaje Tabu Search")
score(bn2, BD_Julio_v4, type="loglik-g")
score(bn2, BD_Julio_v4, type="aic-g")
score(bn2, BD_Julio_v4, type="bic-g")
score(bn2, BD_Julio_v4, type="bge")

```

### **#Algoritmo de Restricción Grow-Shrink**

```

bn3=gs(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH", col="blue", fill="grey")

```

```
graphviz.plot(bn3,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Restricción Grow-Shrink")
```

#### **#Algoritmo de Restricción Incremental Association**

```
bn4=iamb(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn4,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Restricción Incremental Association")
```

#### **#Algoritmo de Restricción Fast Incremental Association**

```
bn5=fast.iamb(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn5,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Restricción Fast Incremental Association")
```

#### **#Algoritmo de Restricción Interleaved Incremental Association**

```
bn6=inter.iamb(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn6,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Restricción Interleaved Incremental Association")
```

#### **#Algoritmo de Restricción Incremental Association with FDR**

```
bn7=iamb.fdr(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn7,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Restricción Incremental Association with FDR")
```

#### **#Algoritmo de Restricción PC Stable**

```
bn8=pc.stable(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn8,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo de Restricción PC")
```

#### **#Algoritmo Híbrido Max-Min Hill Climbing**

```
bn9=mmhc(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn9,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo Híbrido Max-Min Hill Climbing")
score(bn9,BD_Julio_v4,type="loglik-g")
score(bn9,BD_Julio_v4,type="aic-g")
score(bn9,BD_Julio_v4,type="bic-g")
score(bn9,BD_Julio_v4,type="bge")
```

### **#Algoritmo Híbrido Restricted Maximization**

```
bn10=rsmax2(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn10,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo
Híbrido Restricted Maximization")
score(bn10,BD_Julio_v4,type="loglik-g")
score(bn10,BD_Julio_v4,type="aic-g")
score(bn10,BD_Julio_v4,type="bic-g")
score(bn10,BD_Julio_v4,type="bge")
```

### **#Algoritmo Híbrido Hybrid HPC**

```
bn11=h2pc(BD_Julio_v4)
highlight.tph=list(nodes="TPH",col="blue",fill="grey")
graphviz.plot(bn11,highlight = highlight.tph,layout="dot",shape="ellipse", main="Algoritmo
Híbrido Hybrid HPC")
score(bn11,BD_Julio_v4,type="loglik-g")
score(bn11,BD_Julio_v4,type="aic-g")
score(bn11,BD_Julio_v4,type="bic-g")
score(bn11,BD_Julio_v4,type="bge")
```