



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

**METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN PARA
CAMIONES AUTÓNOMOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

ZINTHIA PAOLA OPORTUS ASTETE

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MAKARINA ORELLANA FARÍAS
MANUEL SEPÚLVEDA DE LA FUENTE

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniera Civil de Minas
POR: Zinthia Paola Oportus Astete
FECHA: 28/10/2019
PROFESOR GUÍA: Raúl Castro

METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN PARA CAMIONES AUTÓNOMOS

El presente trabajo de título se desarrolló en la Superintendencia de Ingeniería y Gestión Procesos Mina de Empresa del Rubro Minero (ERM). El objetivo principal es generar una metodología de construcción de modelo de simulación mediante el software Orchestra de TI Mining, replicable en el tiempo para utilizarla como método de validación de movimiento mina y velocidad de planes mensuales para ERM. Actualmente, ERM tiene un error de 26% de estimación de velocidad en sus planes mensuales, con la incorporación de la simulación de procesos a la planificación, se pretende disminuir este error.

La ERM, es una faena minera dedicada a la extracción de cobre mediante el método a cielo abierto. Está ubicada en el sector de Pampa Elvira, dentro de la comuna de Sierra Gorda, en la Región de Antofagasta a una altura geográfica de 2660 m.s.n.m. La flota de carguío y transporte cuenta actualmente con 18 camiones modelo Komatsu 930E-4 AT de 300 [t], 1 pala hidráulica y 2 eléctricas, además de 2 cargadores frontales.

La metodología propuesta se dividió en 3 partes, la primera de ellas fue una recopilación de los datos necesarios para la construcción de los modelos de simulación. La segunda parte pretendía proponer una metodología de simulación con 2 variables de control para establecer cuándo un modelo estaba correctamente calibrando; las dos variables utilizadas fueron la velocidad media y el tonelaje total transportado. Los meses utilizados para esta etapa fueron los de diciembre 2018 a enero-febrero 2019. Al terminar esta etapa los modelos fueron verificados y validados con los datos reales de operación. Los resultados indicaron que la metodología de simulación generada disminuye el error de estimación inicial de velocidad a un máximo de 6,5 %, disminuyendo considerablemente la brecha inicial existente, mientras que el tonelaje presenta un error de estimación de un máximo de -0,8%. La última parte de este estudio permitió verificar la efectividad de la aplicación de la metodología de simulación sobre la base de planes mensuales, en este caso, los meses utilizados fueron los planes de marzo a mayo 2019. El error de estimación de velocidad resultó en un máximo de 2%, mientras que el tonelaje varió entre un 1% a un 37%.

Finalmente se puede concluir que se logró generar una metodología de simulación replicable en el tiempo, que disminuye el error de estimación de velocidad, sin embargo, los resultados indican que el tonelaje total no entrega resultados con una precisión deseable en comparación con la lograda para estimar la velocidad.

ABSTRACT
METODOLOGÍA DE CONSTRUCCIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN PARA
CAMIONES AUTÓNOMOS

This undergraduate thesis was developed in the Superintendence of Engineering and Process Management Mine of the Mining Industry Company (MIC). The main objective is to generate a simulation model construction methodology through time-replicating Mining IT Orchestra software to use it as a method of validating mine movement and speed of monthly plans for MIC. Currently, MIC has a 26% speed estimation error in its monthly plans, with the incorporation of process simulation into planning, this error is intended to be reduced.

The MIC is an open pit copper's mine dedicated to the extraction of copper through the open pit method. It is located in the Pampa Elvira sector, within the Sierra Gorda commune, in the Antofagasta region at a geographical height of 2660 m.a.s.l. The MIC' mining fleet currently has a transport fleet currently has 18 Komatsu 930E-4 AT model trucks of 300 tons, 1 hydraulic and 2 electric shovels, as well as 2 front loaders.

The proposed methodology was divided into 3 parts, the first of which was a compilation of the necessary data for the construction of simulation models. The second part was intended to propose a simulation methodology with 2 control variables to establish when a model was correctly calibrating; The two variables used were the average speed and the total tonnage transported. The months used for this stage were those from December 2018 to January-February 2019. At the end of this stage the models were verified and validated with the actual operating data. The results indicated that the simulation methodology generated decreases the initial speed estimation error to a maximum of 6.5%, considerably reducing the existing initial gap, while the tonnage presents an estimation error of a maximum of -0.8 %. The last part of this study allowed to verify the effectiveness of the application of the simulation methodology based on monthly plans, in this case, the months used were the plans from March to May 2019. The speed estimation error resulted in a maximum of 2%, while the tonnage ranged from 1% to 37%.

Finally, it can be concluded that it was possible to generate a replicable simulation methodology over time, which decreases the error of speed estimation, however, the results indicate that the total tonnage does not deliver results with desirable precision compared to that achieved to estimate speed.

AGRADECIMIENTOS

Esto va a dedicado a mi familia, sin ustedes no habría llegado al final. Gracias por siempre creer en mí y por nunca dudar ni dejar que me rindiera. Kata, siempre pienso en ti y eres de las razones que me dieron fuerza para terminar mi carrera, espero que siempre hablemos como españolisimas, que veamos películas juntas y que nunca faltes en mi vida, te adoro. Mamá y Papá, podría decirles mil cosas pero creo que esto lo dice todo, son los mejores papas del mundo, amo sus defectos y virtudes, gracias por levantarme cuando todo parecia perdido para mi, espero poder recompensarlos siempre por todo lo que han y siguen haciendo por mi. Los amo.

A mis perros que aún están conmigo y a los que ya partieron, gracias por acompañarme en mis largas noches de estudio y por darme su amor incondicional tanto en mis momentos de alegría como de tristeza. Son mi familia, ustedes llegaron a darnos alegría y hacernos mejores personas. Gracias.

Katy y Gaby, mis amigas de la vida, que me tienen una paciencia infinita y que a pasear de que hemos crecido y cambiado, seguimos queriéndonos y necesítándonos como siempre. Gracias por recibirme en sus vidas.

A las personas hermosas que conocí en la universidad, Las Niñas, Machin y Mati, quien diría que íbamos a sobrevivir a plan común. A mis amigos y amigas de minas, creo que en este periodo fue donde más difícil fue para mi, por suerte los encontré a ustedes.

A mi Naty, por que nuestra relación ha sido casi tan dramática como un pololeo pero también tan bonita como un mojito bien hecho, te adoro mucho. Romi, mi minera favorita, gracias por convertirte en mi partner en estos últimos años de la U y presentarme a la Javi, con la que espero que nuestra amistad siga creciendo hasta que el feminismo replete las grandes alamedas.

A la Gerencia Mina de ERM, a los profesionales que me ayudaron a lograr terminar mi carrera, en especial a Alex por ser mi tutor y a Palmenia, gracias por tu compañía y cariño en esos 7 meses que compartimos. A mi comisión, Raúl, Makarina y Manuel por sus consejos y guía.

Claudio, te conocí al final de la universidad, pero lo mejor siempre llega al final. Gracias por tu amor, espero poder seguir creciendo contigo muchos, muchos años más.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivo	3
1.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Alcances del Trabajo	3
Capítulo 2	ANTECEDENTES.....	4
2.1	Antecedentes técnicos.....	4
2.2	Proceso productivo	5
2.3	Flotas de carguío y transporte.....	6
2.4	Minería a cielo abierto.....	7
2.4.1	Operaciones unitarias en minería a cielo abierto.....	7
2.5	Definición de velocidad cargado, descargado y media	7
2.6	Modelo de clasificación de horas	8
2.7	Camiones autónomos.....	10
2.7.1	Frontrunner	11
2.7.1.1	Sistemas de gestión de permisos	12
2.7.1.2	Sistema de interacción manual	13
2.7.1.3	Sistema de detección de colisiones.....	14
2.7.1.4	Sistema de detección de obstáculos.....	14
2.7.1.5	Botón de emergencia	14
2.7.2	Dispatch	14
2.7.3	Provision.....	14
2.8	Curvas de travel performance y brake performance.....	14

2.9	Distribuciones de probabilidad.....	17
2.9.1	Distribución Normal.....	17
2.9.2	Distribución Gamma.....	18
2.9.3	Distribución Weibull	18
2.10	Simulación de procesos	18
2.10.1	Software Orchestra Ti mining	19
2.10.1.1	Módulo de análisis.....	19
2.10.1.1.1	Filtros.....	19
2.10.1.1.2	Tiempos	20
2.10.1.1.3	Velocidad.....	20
2.10.1.1.4	Producción.....	20
2.10.1.2	Módulo de simulación	20
2.11	Conclusiones del capítulo.....	21
Capítulo 3	METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....	22
3.1	Recopilación de datos.....	22
3.1.1	Análisis exploratorio de datos	22
3.1.2	Perfiles de velocidad.....	23
3.1.3	Grupos de trabajo.....	23
3.2	Construcción, verificación y validación del modelo	24
3.2.1	Construcción y verificación.....	24
3.2.2	Validación.....	25
3.3	Proyección de efectividad de la metodología de simulación.....	25
Capítulo 4	RECOPIACIÓN DE DATOS	26

4.1	Análisis exploratorio de datos	26
4.1.1	Tiempos	26
4.1.2	Capacidad de carga.....	28
4.2	Perfiles de velocidad.....	29
4.2.1	Determinación de perfil velocidad base	29
4.2.2	Perfiles de velocidad secundarios.....	34
4.3	Grupos de trabajo.....	37
4.4	Conclusiones del capítulo.....	39
Capítulo 5	CONSTRUCCIÓN, VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	40
5.1	Construcción y verificación.....	40
5.1.1	Creación de nuevo proyecto	40
5.1.1.1	Cargar topografía.....	41
5.1.1.2	Ubicación de equipos de carguío y zonas de descarga.....	41
5.1.2	Parámetros	43
5.1.2.1	Flota.....	43
5.1.2.2	Plan minero.....	43
5.1.2.3	Disponibilidad de pala	44
5.1.3	Editor	45
5.1.3.1	Dibujar caminos principales	45
5.1.3.2	Dibujar caminos de locaciones de carga.....	45
5.1.3.3	Crear interacción autónoma.....	47
5.1.3.4	Zonas de reducción de velocidad.....	47
5.1.4	Ejecución	55

5.1.4.1	Tiempo de simulación	55
5.1.4.2	Verificación	58
5.1.4.3	Simulación	58
5.2	Validación del modelo	58
5.3	Conclusiones del capítulo	60
Capítulo 6	PROYECCIÓN DE EFECTIVIDAD	61
6.1	Conclusiones del capítulo	63
Capítulo 7	CONCLUSIONES	64
Capítulo 8	RECOMENDACIONES	66
Capítulo 9	BIBLIOGRAFÍA	67
Capítulo 10	ANEXOS	68

Índice de Tablas

Tabla 1. Perfil de velocidades utilizado por planificación en ERM.	2
Tabla 2. Equipos de carguío ERM.....	6
Tabla 3. Equipo de transporte ERM.	6
Tabla 4. Razones por tiempo por categoría para la ERM.....	10
Tabla 5. Valores de Rolling Resistance típicos.	15
Tabla 6. Media y desviación estándar de los tiempos de carguío.....	26
Tabla 7. Resumen tiempo carguío.	27
Tabla 8. Media y desviación estándar de los tiempos de descarga en chancado, botadero – stock y aculatamiento en punto de carga.	27
Tabla 9. Resumen tiempo de descarga y aculatamiento en zona de carga.	28
Tabla 10. Perfil de velocidad subiendo con Rolling Resistance de 0%.	29
Tabla 11. Perfil de velocidad bajando con Rolling Resistance de 0%.	30
Tabla 12. Datos usados en la iteración para obtener el factor Rolling Resistance.	33
Tabla 13. Perfil de velocidad por pendiente-subiendo Komatsu 930E-4 AT.....	34
Tabla 14. Perfil de velocidad por pendiente-bajando Komatsu 930E-4 AT.	34
Tabla 15. Grupos de trabajo para“Construcción, verificación y validación del modelo”.	38
Tabla 16. Grupos de trabajo para “Proyección de efectividad del modelo de simulación”.	39
Tabla 17. Codificación de los equipos de carguío.....	42
Tabla 18. Plan minero para PC_01.....	44
Tabla 19. Periodo de disponibilidad de PC_01 en ambas locaciones.	44
Tabla 20. Zonas de reducción de velocidad y perfil de velocidad asociado.	48
Tabla 21. Ecuaciones para determinar el tiempo de simulación.	57

Tabla 22. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo CF_01.....	68
Tabla 23. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo CF_02.....	68
Tabla 24. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo PA_01.....	69
Tabla 25. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo PA_02.....	70
Tabla 26. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo PC_8000.....	71
Tabla 27. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de tiempo de descarga en chancado.	72
Tabla 28. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de tiempo de descarga stock-botadero.	73
Tabla 29. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de tiempo de aculatamiento en punto de carga..	74
Tabla 30. Perfil de velocidad subiendo “Salida pala o cargador frontal”.....	75
Tabla 31. Perfil de velocidad bajando “Salida pala o cargador frontal”.	76
Tabla 32. Perfil de velocidad subiendo “Aumento salida”.....	76
Tabla 33. Perfil de velocidad bajando “Aumento salida”.	76
Tabla 34. Perfil de velocidad subiendo “Entrada pala”.....	77
Tabla 35. Perfil de velocidad bajando “Entrada pala”.....	77
Tabla 36. Perfil de velocidad subiendo “Aumento entrada”.	77
Tabla 37. Perfil de velocidad subiendo “Entrada salida botadero”.	78
Tabla 38. Perfil de velocidad bajando “Entrada salida botadero”.	78
Tabla 39. Perfil de velocidad bajando “Aumento entrada”.	78
Tabla 40. Perfil de velocidad subiendo “Curva”.	79

Tabla 41. Perfil de velocidad bajando “Curva”.....	79
Tabla 42. Perfil de velocidad subiendo “Chancado”.....	79
Tabla 43. Perfil de velocidad bajando “Entrada salida Chancado”.....	80
Tabla 44. Datos reales grupos de simulación utilizados para la metodología de simulación propuesta.....	80
Tabla 45. Datos obtenidos de los modelos de simulación para la metodología de simulación propuesta.....	81
Tabla 46. Resultados y comparación para la verificación del modelo de simulación.....	82
Tabla 47. Velocidades reportadas por Komatsu para el camión 930E-4 AT con un rolling resistance de 2%.	84

Índice de Figuras

Figura 1. Vista desde Google Earth de la Empresa del Rubro Minero.	4
Figura 2. Proceso productivo de Empresa del Rubro Minero.	6
Figura 3. Ciclo de carguío y transporte.	7
Figura 4. Clasificación de horas ERM.....	9
Figura 5. Aplicación de usuario frontrunner.	11
Figura 6. Sistema de permisos.....	13
Figura 7. Curva de travel performance para el camión Komatsu 930E-4 AT.....	16
Figura 8. Curva de brake performance para el camión Komatsu 930E-4 AT.....	17
Figura 9. Esquema de la metodología de trabajo.....	22
Figura 10. Ruta seleccionada.....	31
Figura 11. Esquema de la metodología para construcción de modelo de simulación.	40
Figura 12. Topografía cargada a Orchestra.	41
Figura 13. Ubicación de equipos de carguío y locaciones de descarga.....	42
Figura 14. Caminos principales.....	45
Figura 15. Ejemplo de locación de descarga obtenida desde frontrunner.	46
Figura 16. Caminos de locaciones de carga.	46
Figura 17. Disco pare y ceda el paso.	47
Figura 18. Locaciones de carguío para ejemplo de zonas.	48
Figura 19. Zona de “Salida pala o cargador frontal” para ejemplo de zonas.	49
Figura 20. Zona de “Aumento salida” para ejemplo de zonas.	50
Figura 21. Zona de “Entrada pala” para ejemplo de zonas.	51
Figura 22. Zona de “Aumento entrada” para ejemplo de zonas.	52

Figura 23. Ejemplo zonas “Curva”.....	53
Figura 24. Ejemplo zonas “Entrada salida botadero”Chancador	53
Figura 25. Zona Chancador.	54
Figura 26. Ejemplo de modelo de simulación con todas las zonas de reducción de velocidad incluidas.....	55

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Diferencia entre la velocidad planificada y real del año 2018.	2
Gráfico 2. Distribución de tonelaje transportado por los camiones.	28
Gráfico 3. Velocidad de las muestras seleccionadas de playbacks.	32
Gráfico 4. Velocidad del camión cargado para los perfiles de velocidad secundarios	36
Gráfico 5. Velocidad del camión descargado para los perfiles de velocidad secundarios.	37
Gráfico 6. Tiempo de simulación en función de las horas efectivas para el caso de 0-1 palas en superficie.	57
Gráfico 7. Tiempo de simulación en función de las horas efectivas para el caso de 2 palas en superficie.	57
Gráfico 8. Error de estimación velocidad media, cargado y descargado de los modelos de simulación.....	59
Gráfico 9. Error de estimación de tonelaje [t] total de los modelos de simulación.....	60
Gráfico 10. Velocidad real, simulada y planificada de los meses marzo a mayo 2019.	61
Gráfico 11. Horas efectivas reales v/s simuladas y movimiento mina real y simulado de los meses marzo a mayo 2019.....	62
Gráfico 12. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo CF_01	68
Gráfico 13. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo CF_02.	69
Gráfico 14. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo PA_01.	70
Gráfico 15. Función de distribución de probabilidad Normal para equipo PA_02.....	71
Gráfico 16. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo PC_8000.	72
Gráfico 17. Función de distribución de probabilidad para tiempo de descarga en chancado.	73
Gráfico 18. Función de distribución de probabilidad para descarga en stock-botadero.....	74

Gráfico 19. Función de distribución de probabilidad para tiempo de acuatamiento en punto de carga..... 75

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Fórmula de cálculo Velocidad Cargado.	8
Ecuación 2. Fórmula de cálculo Velocidad Descargado.	8
Ecuación 3. Fórmula de cálculo Velocidad Media.	8
Ecuación 4. Distribución Normal.	18
Ecuación 5. Distribución Gamma.	18
Ecuación 6. Distribución Weibull.	18
Ecuación 7. Cálculo de rimpull.	29
Ecuación 8. Ecuación de rimpull para equipo bajando cargado.	33
Ecuación 9. Ecuación de rimpull para equipo subiendo vacío.	33
Ecuación 10. Número de camiones.	43
Ecuación 11. UEBD general.	56
Ecuación 12. Horas disponibles totales.	56
Ecuación 13. Error.	58

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

La planificación minera a cielo abierto se define como el proceso de Ingeniería de Minas que transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo, alineado con los objetivos estratégicos de la empresa, sean estos maximizar el valor presente neto (VAN), el volumen total de reserva, maximizar el tiempo de explotación, minimizar el riesgo de la inversión, etc, e integrando las restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno (Vargas Vergara, 2011).

Del proceso de planificación minera a cielo abierto se extrae el plan minero, el cual define que material se va a extraer, en qué momento será extraído y como. Dependiendo del horizonte de evaluación existen distintos planes, los cuales se mencionan a continuación:

- **Largo Plazo:** genera planes que abarcan todo el LOM de la mina, quinquenales y anuales. Se utilizan variables promedio o generales, debido a la extensión de tiempo que engloba no posibilita un mayor nivel de detalle.
- **Mediano Plazo:** el objetivo es generar planes de producción orientados a obtener las metas productivas definidas en el largo plazo dentro del corto plazo. Permite asegurar el presupuesto de operaciones y retroalimentar la planificación de largo plazo.
- **Corto plazo:** el horizonte de tiempo de planificación es diario, semanal, mensual y trimestral. Es en esta instancia en donde se deben analizar los recursos utilizados en la operación mina. Debe recopilar información operacional de modo de retroalimentar la planificación de corto y mediano plazo.

Como se mencionó anteriormente, la planificación a corto plazo debe recopilar la información recolectada de la operación para realizar planes mineros. Dentro de la información fundamental que debe ser reunida y que determina la cantidad de tonelaje que es capaz de transportar un sistema minero es el rendimiento de los camiones, el cual se define como la cantidad de mineral que son capaces de transportar los camiones mineros en el tiempo efectivo de operación. El tiempo de viaje vacío y descargado son dos componentes del tiempo efectivo, a su vez, estos dos tiempos quedan determinados por la velocidad de los camiones, por esto, conocer la velocidad de los equipos de transporte es requisito para estimar de manera correcta el rendimiento efectivo y, en consecuencia, realizar una apropiada planificación minera.

El siguiente trabajo de título se desarrolla en la Superintendencia de Ingeniería y Gestión Procesos Mina perteneciente a Empresa del Rubro Minero (ERM) dedicada a la extracción de un depósito de cobre por medio de un rajo abierto en la Región de Antofagasta, Chile.

Actualmente ERM presenta diferencias entre la velocidad planificada de los equipos de transporte y los alcanzados en operación. El Gráfico 1 muestra el error de estimación de la velocidad media desde abril hasta diciembre del 2018, la cual alcanza en promedio un error de estimación del 26%.

Comparación entre velocidad planificada y real del año 2018

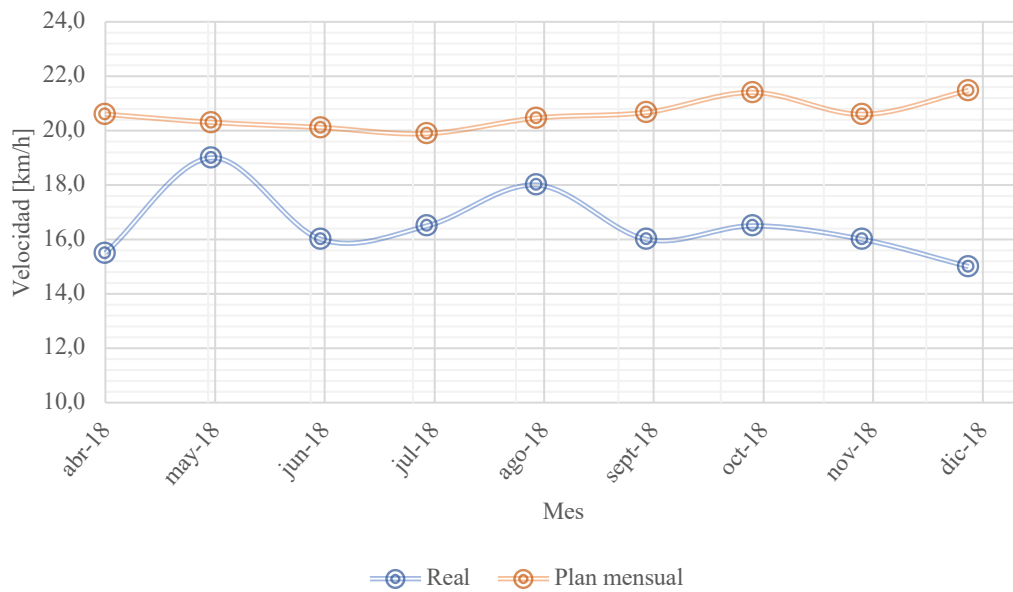


Gráfico 1. Diferencia entre la velocidad planificada y real del año 2018.

Para calcular los tiempos de viaje cargado y descargado se utilizan velocidades fijas no diferenciadas por pendiente en los planes mensuales. La Tabla 1 muestra los perfiles de velocidad utilizados por la gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo, encargada de desarrollar los planes mensuales.

Tabla 1. Perfil de velocidades utilizado por planificación en ERM.

Velocidades Típicas		
Saliendo Cargado (200 m)	km/h	20,27
Bajando Cargado	km/h	13,21
Subiendo Cargado	km/h	10,00
Horizontal Cargado	km/h	35,34
Saliendo Vacío (200 m)	km/h	34,50
Bajando Vacío	km/h	27,44
Subiendo Vacío	km/h	18,88
Horizontal Vacío	km/h	40,92

La presente memoria profesional pretende incorporar la simulación de procesos para estimar la velocidad media de camiones autónomos para fines de planificación, diferenciándola por pendientes y basándose en esto para poder determinar la cantidad de material que es capaz de transportar la flota de camiones.

1.1 Objetivo

Proponer una metodología de construcción de modelo de simulación mediante el software Orchestra de TI Mining replicable en el tiempo para utilizarla como método de validación de movimiento mina y velocidad de planes mensuales para ERM.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis exploratorio de datos de tiempo de carguío, descarga y aculatamiento para los equipos de ERM.
- Encontrar un perfil de velocidad representativo basándose en las curvas rimpull (velocidad esperada del camión a cierta pendiente y peso) del camión Komatsu 930E-4 AT.
- Validar la metodología de construcción de modelo de simulación con los meses de diciembre 2018 y enero-febrero 2019.
- Verificar la efectividad del modelo de simulación según planes mensuales de marzo, abril y mayo 2019.

1.3 Alcances del Trabajo

- El periodo de validación abarca los meses de diciembre 2018 a enero-febrero 2019.
- Para verificar la metodología de simulación solo se consideraron los planes mensuales desde marzo hasta mayo 2019.
- No se realiza una evaluación con enfoque económico de la aplicación de esta metodología.
- Los resultados obtenidos están sujetos a las pendientes que indicaban las topografías consideradas para realizar los modelos de simulación.
- El sistema de carguío y transporte de ERM simulado considero solo el existente. No se estudió el efecto de adquirir nuevos equipos.
- El sistema simulado solo abarca las operaciones de carguío y transporte.
- No se consideran interacciones de los CAEX con equipos tripulados.
- No se consideran impactos en la operación por condiciones climáticas.
- El tiempo representado por el programa considera solo tiempo efectivo y pérdidas operaciones.

Capítulo 2 ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes técnicos

La Empresa del Rubro Minero, es una faena minera dedicada a la extracción de cobre mediante el método a cielo abierto. Está ubicada en el sector de Pampa Elvira, dentro de la comuna de Sierra Gorda, en la Región de Antofagasta a una altura geográfica de 2660 m.s.n.m.



Figura 1. Vista desde Google Earth de la Empresa del Rubro Minero.

El yacimiento fue descubierto en 1995 y sus operaciones comenzaron en el año 2008. El inicio de esta operación marca un hito histórico ya que es la primera faena minera del mundo en operar con el 100% de su flota de camiones de manera autónoma.

La producción de ERM se centra en la venta de cátodos de cobre, los que han sido certificados por la Bolsa de Metales de Londres (LME) con el premio de Cátodo Registrado en la LME, reconociendo su alta calidad química y buen aspecto físico, exigencias requeridas por el organismo internacional. Los cátodos de cobre se obtienen mediante el procesamiento de minerales oxidados con una ley media de 0,34%. La producción del año 2018 estuvo en torno a 107.247 [t] de cobre fino.

2.2 Proceso productivo

El proceso de productivo de ERM se puede dividir en dos etapas, la primera de ellas es la que tiene que ver con las operaciones unitarias para extraer el mineral del depósito minero y transportarlo al lugar de procesamiento, estas subetapas son 4, explicadas brevemente a continuación:

- **Perforación:** es la operación que da inicio al proceso productivo de una faena minera, su finalidad es generar huecos cilíndricos en la roca para depositar explosivos.
- **Tronadura:** es la primera fragmentación que se le realiza a la roca con el fin de poder transportar el material y permitir realizar los procesos posteriores de reducción de tamaño. Consiste en cargar explosivos dentro de las perforaciones realizadas en la etapa anterior y detonarlas.
- **Carguío:** este proceso implica cargar el material tronado con palas o cargadores frontales a los equipos de transporte.
- **Transporte:** es la operación de trasladar el material tronado a los diferentes sitios de descarga según sea indicado en el plan minero.

La segunda etapa es el procesamiento de minerales, el mineral puede provenir de dos sectores, desde un stock o directo desde la mina, al mineral de ERM se le realizan 3 etapas de chancado: primario, secundario y terciario. Posterior al chancado, el mineral es aglomerado en tambores rotatorios con una mezcla de agua y ácido sulfúrico.

Luego de la aglomeración, el mineral es dispuesto en pilas de lixiviación dinámicas, con el fin de obtener una solución rica en cobre que es tratada en la planta de extracción por solventes (SX), en donde se produce un electrolito rico en cobre, el cual finalmente es tratado mediante electro-obtención (EW) para obtener cátodos de cobre.

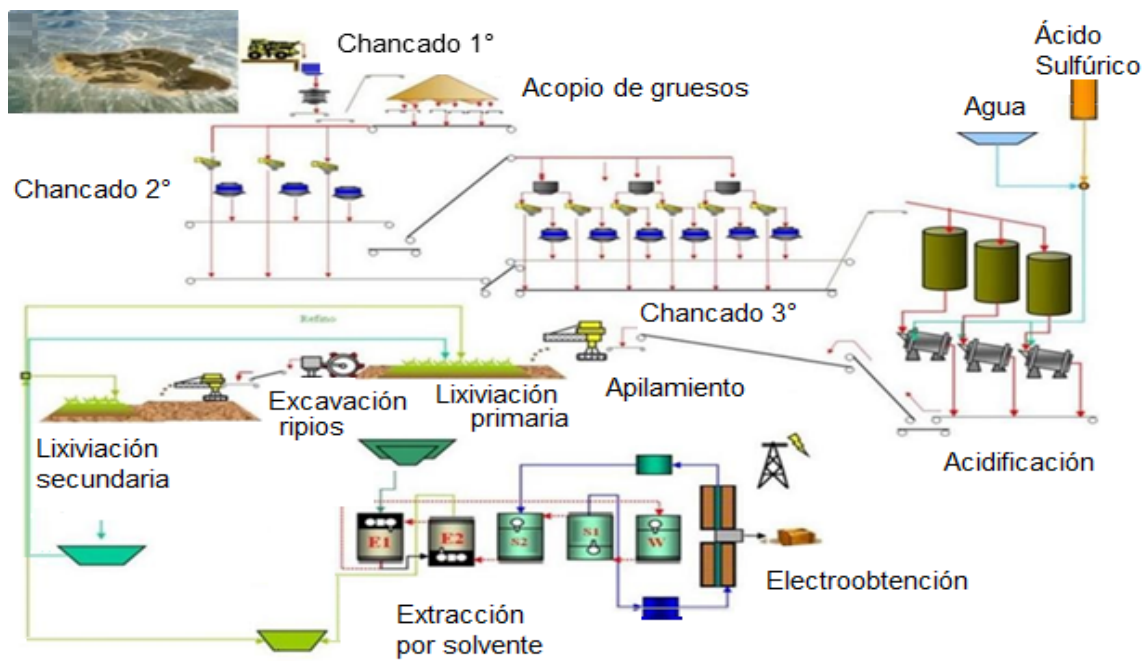


Figura 2. Proceso productivo de Empresa del Rubro Minero.

2.3 Flotas de carguío y transporte

La flota de carguío y transporte cuenta actualmente con 18 camiones de 300 [t], 1 pala hidráulica y 2 eléctricas, además de 2 cargadores frontales. La capacidad y modelo de los equipos se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 2. Equipos de carguío ERM.

Equipo	Modelo	Capacidad [yd ³]	Cantidad
Pala de cable eléctrica	Bucyrus 945HR	73	2
Pala hidráulica	Komatsu PC8000	54	1
Cargadores frontales	L - 1850	31	2

Tabla 3. Equipo de transporte ERM.

Equipo	Modelo	Capacidad [t]	Cantidad
Camión	Komatsu 930E-4 AT	300	18

2.4 Minería a cielo abierto

La explotación a Cielo abierto es uno de los métodos mineros más usados en la actualidad, abarcando un 80% de la producción de cobre generada en Chile. El método consiste en explotar yacimientos masivos que se encuentran a gran profundidad y generalmente de baja ley, removiendo capas superficiales de lastre. Debido a la conformación de estos depósitos, siempre hay concentración de mineral en el fondo, lo que obliga a una profundización en la excavación.

2.4.1 Operaciones unitarias en minería a cielo abierto

Como se mencionó anteriormente, las operaciones unitarias son procesos productivos individuales llevados a cabo en una mina a cielo abierto. Estos se desarrollan de manera secuencial pudiendo variar dependiendo de las necesidades propias de la explotación. El presente trabajo de título sólo se enfocará en las operaciones unitarias de carguío y transporte.

2.5 Definición de velocidad cargado, descargado y media

Para definir la concepto de velocidad media se deben conocer los tiempos y distancias que están involucrados en el ciclo de transporte. La Figura 3 muestra esquemáticamente el concepto de ciclo de transporte.

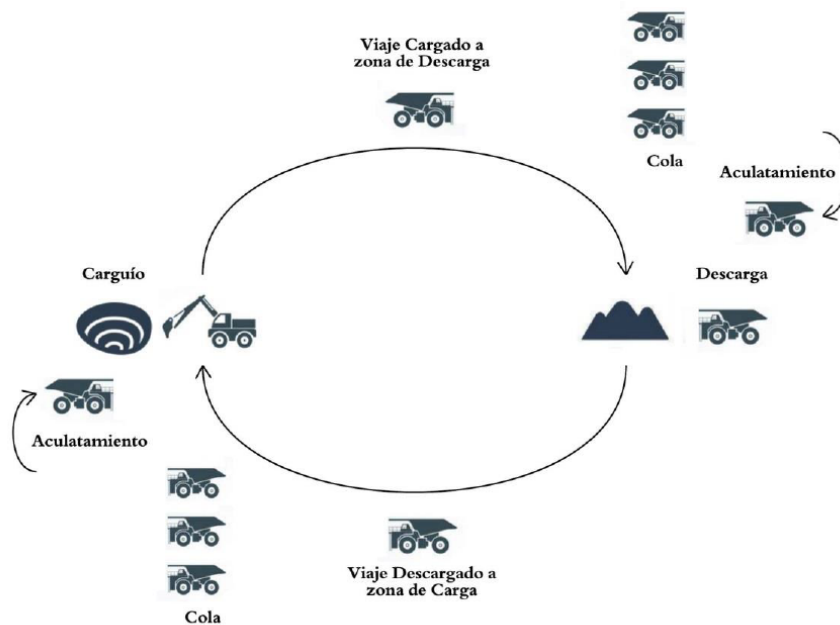


Figura 3. Ciclo de carguío y transporte.

Los tiempos involucrados en este proceso son:

- **Tiempo de acuatamiento:** es el tiempo que le toma al camión posicionarse en la locación de carga o descarga.
- **Tiempo de carguío:** tiempo que se demora la pala en cargar completamente el camión.
- **Tiempo viaje cargado:** es el tiempo que transcurre desde que el camión fue completamente cargado hasta la locación de descarga.
- **Tiempo en cola:** al llegar a un sitio de carga o descarga el camión puede encontrarse con otros camiones que lo anteceden esperando por ser cargados. El tiempo que le toma al camión entre la llegada al sitio de carga o descarga y comenzar efectivamente el proceso de carga o descarga se clasifica como tiempo en cola.
- **Tiempo de descarga:** es el tiempo que demora el camión en vaciar el contenido transportado en el sitio de descarga.
- **Tiempo viaje descargado:** es el tiempo que transcurre desde que el camión descargó el contenido transportado hasta la locación de carga.

Para el cálculo de velocidades solamente se consideran los tiempos de viaje y sus respectivas distancias. El tiempo en cola, carga, descarga y acuatamiento no se utilizan debido a que el camión no se encuentra en movimiento, si no esperando el proceso de carga o descarga. Las ecuaciones de cálculo son las siguientes:

$$Velocidad\ Cargado = \frac{Distancia\ viaje\ cargado}{Tiempo\ viaje\ cargado}$$

Ecuación 1. Fórmula de cálculo Velocidad Cargado.

$$Velocidad\ Descargado = \frac{Distancia\ viaje\ descargado}{Tiempo\ viaje\ descargado}$$

Ecuación 2. Fórmula de cálculo Velocidad Descargado.

$$Velocidad\ Media = \frac{Distancia\ viaje\ cargado + Distancia\ viaje\ descargado}{Tiempo\ viaje\ cargado + Tiempo\ viaje\ descargado}$$

Ecuación 3. Fórmula de cálculo Velocidad Media.

2.6 Modelo de clasificación de horas

La norma ASARCO es un estándar que conceptualiza el tratamiento del tiempo como variable operacional. La Figura 4 muestra en modelo de clasificación usado por Empresa del Rubro Minero.



Figura 4. Clasificación de horas ERM.

- **Tiempo nominal:** tiempo total que corresponde al año calendario, ya que el modelo no acepta la existencia de tiempos no controlables fuera del nominal, es decir, todos los eventos suceden dentro de esta categoría de tiempo.
- **Tiempo disponible:** el equipo se encuentra habilitado para cumplir con su función de diseño.
- **Fuera de servicio o mantención/reparación:** tiempo en que el equipo no está en condiciones de operar.
 - Programado: Tiempo definido para Mantenciones Programadas necesarias para cada unidad productiva.
 - No Programado: Tiempo donde el equipo no se encuentra disponible para la operación debido a fallas propias e inherentes a la unidad.
 - Excluido: Tiempo donde el equipo no se encuentra disponible para la operación debido a fallas no propias del equipo, por tecnologías de terceros y/o accidentes / incidentes.
- **Tiempo operativo:** corresponde al tiempo en que el equipo se encuentra a cargo de su operador, habilitado para cumplir su función de diseño y con una tarea asignada.
- **Reservas:** el equipo se encuentra apto para operar, sin embargo, por distintas razones no se encuentra operando, estas razones pueden ser: falta de operador, falta de capacidad de un equipo complementario, no tiene tarea asignada o no están las instalaciones necesarias para operar y/o fuerza mayor.
- **Tiempo efectivo:** el equipo se encuentra desarrollando las actividades específicas de diseño para los cuales ha sido adquirido por la organización.
- **Pérdidas operacionales:** espacio de tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función operacional productiva debido a ineficiencias presentes e inherentes a los ciclos operativos. Esta categoría está compuesta por:
 - a) Camión espera en equipo de carguío.

- b) Camión espera en descarga (principalmente chancado).
 - c) Pala espera por camión.
 - d) Chancado espera por camión
- **Demoras:** ineficiencias del proceso productivo de las cuales no se conoce o no se tiene certeza de su ocurrencia tanto en el espacio de tiempo como su duración. Ejemplo de estos elementos son: baño, obstrucción de vía, llamada telefónica autorizada, cambio de sitio, limpieza de frente, etc. Para el sistema AHS existen demoras propias de su operación, que se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 4. Razones por tiempo por categoría para la ERM.

EFECTIVO	DEMORAS	RESERVA NO PROGRAMADAS
Producción	Chequeo pre-operacional	Sin operador
Entrenamiento	Relevo	Incidente o accidente
Viaje vacío	Rotación de barras	Botadero no disponible
Acumulamiento carga	Cambio de pozo	Chancador no disponible
Carga	Destape de broca	Falta equipo de carguío
Viaje lleno	Cambio de módulo	Falta de material
Acumulamiento descarga	Corte energía operacional	Stock lleno
Descarga	Traslado de equipo	Fatiga
Demora autónoma*	Abastecimiento de agua	Fuerza Mayor
	Espera de agua	Espera ser soltado*
	Atollo	Reunión
PÉRDIDA OPERACIONAL		
Espera camión	Aceros pegados	
Cola en carga	Espera marcación	
Cola en descarga	Espera de sitio para perforar	
	Sin malla en sistema	
	Espera traslado	
	Limpieza de cancha	
	Espera energía	
	Espera combustible	
	Obstrucción de vías	
	Sobrecarga o mal estibado	
	Otras demoras	
	RESERVAS PROGRAMADAS	
	Cambio de turno	
	Colación	
	Abastecimiento combustible	
	Tronadura	
		FUERA DE SERVICIO
		Mantenimiento preventivo programado
		Reparación programada
		Autónomo programado*
		Desviación Programa programado
		Excluido programado
		Neumáticos programados
		Reparación imprevista correctivo
		Autónomo correctivo*
		Espera mecánico correctivo
		Excluido correctivo*
		Neumáticos correctivo
		Sistema autónomo correctivo
		Traslado equipo a mantenimiento
		Evento operacional programado
		Evento operacional correctivo
		Excluido Operacional

*Códigos exclusivos de sistema AHS

2.7 Camiones autónomos

En la industria minera a cielo abierto el principal medio para transportar material desde la mina hacia el sitio de descarga son los camiones convencionales, los cuales necesitan de personas para operar. ERM desde sus inicios utiliza camiones autónomos, la característica fundamental de estos equipos es que no necesitan de un conductor/a para realizar sus funciones, ya que cuentan con un sistema computacional que permite suplir las labores de un operador/a. La operación autónoma necesita de 3 sistemas interrelacionados para la gestión y administración de las flotas, frontrunner, dispatch y provision, además de cumplir con la función de integrar otras operaciones unitarias no autónomas que se desarrollan en la mina.

2.7.1 Frontrunner

Los camiones autónomos navegan en rutas de cursos gps predefinidos y creados en esta aplicación. El sistema frontrunner define como los camiones van desde un origen a un destino en base a asignaciones generadas por el sistema dispatch mediante el software de:

- La aplicación de usuario.
- Comunicaciones inalámbricas.
- GPS de alta precisión.
- Detección de obstáculos.
- Control de navegación.

La aplicación de usuario es una visualización de la operación de los camiones autónomos en tiempo real, donde se puede controlar directamente la acción de los equipos de transporte y visualizar las dinámicas de los equipos con sistema autónomo (carguío, desarrollo, chancado).

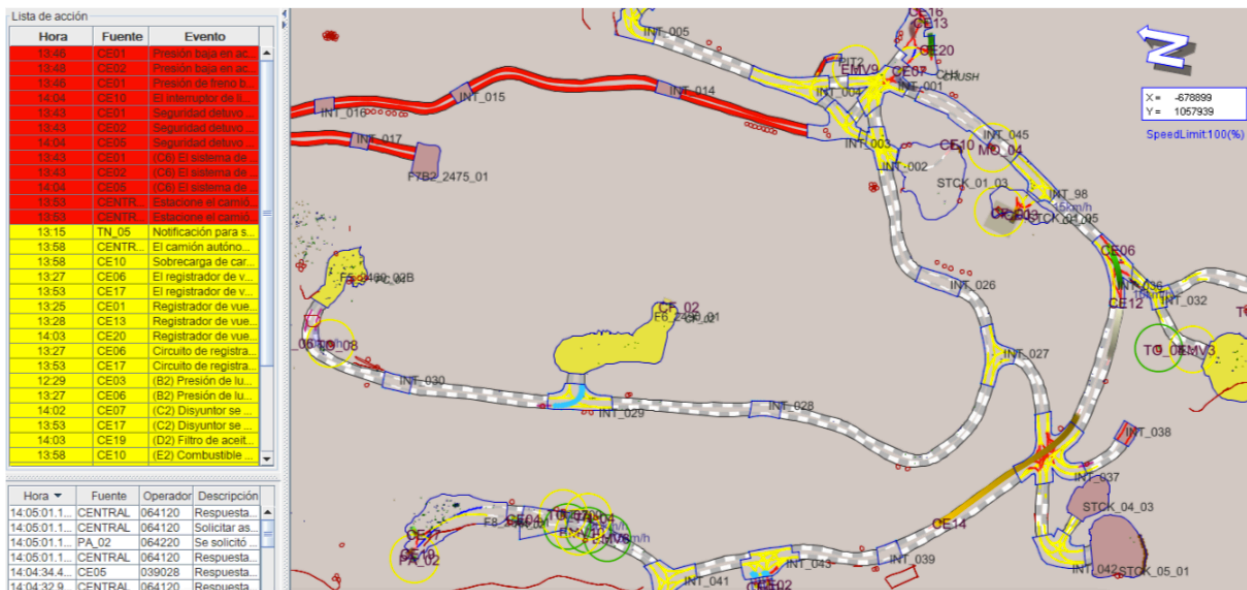


Figura 5. Aplicación de usuario frontrunner.

El sistema frontrunner cuenta con los siguientes componentes básicos que componen el sistema:

- **AHS (Autonomous Haul System):** sistema de transporte autónomo
- **AHT (Autonomous Haul Truck):** camiones de transporte autónomo, los cuales son parte del sistema y se presentan de forma gráfica e interactiva en tiempo real.
- **Área AT (Autonomous):** circuito de operación de los camiones autónomos.
- **Central Controller u Operator Central:** persona a cargo de la supervisión y control de la flota de camiones autónomos a través de la máquina central en el área de central de operaciones.

- **Maquina Central:** es el equipo computacional que sustenta las aplicaciones que permiten operar al sistema frontrunner. El central controller realiza aquí todas las operaciones sobre los camiones.
- **Pit Patroller:** también llamado Operador de Campo, es quien supervisa en terreno la operación del sistema AHS, a bordo de un vehículo equipado o EMV.
- **Locaciones:** son las zonas de trabajo en la mina, por ejemplo, las frentes de carguío, botaderos y stock, descarga en chancado, tiedown, etc.
- **Tiedown:** zona de descanso o detención para camiones autónomos. Se envían ahí cuando es necesario sacarlos del circuito o para abastecer de combustible.
- **EMV (Equipped Manual Vehicle):** vehículo equipado para interactuar en terreno con la operación autónoma de camiones.
- **Spot:** curso de aculatamiento que adopta un camión para lograr la posición de carguío requerida por el operador del equipo de carguío (palas de cable, palas hidráulicas, cargador frontal) o bulldozer en zonas de descarga (botadero).
- **Tip Área:** zona definida por Pit Patroller que consta de varios nodos de descarga previamente validados por el Controlador Central.
- **Nodos de Descarga:** puntos físicos definidos por el sistema para que el camión autónomo descargue el material transportado en botaderos o stock de mineral.

El sistema autónomo cuenta con diferentes capas de seguridad para asegurar el correcto funcionamiento de sistema con la mínima probabilidad de falla y riesgo tanto para los camiones como el personal que interactúa con estos. Las capas de seguridad se explican a continuación:

2.7.1.1 Sistemas de gestión de permisos

Para que no existan colisiones entre camiones en las intersecciones entre caminos, las faenas que operan con equipos de transporte convencionales cuentan con señalética para indicar que camión tiene preferencia de paso. Los dos tipos de señaléticas más frecuentes son:

- **Disco pare:** señal de tránsito que obliga a la detención en un cruce antes de solicitar los permisos para cruzarlo.
- **Ceda el paso:** señal de tránsito que obliga a ceder los permisos frente a otro vehículo que se enfrente a un cruce.

Este tipo de señalética exige de un operador que la visualice y ejecute la instrucción que implica cada una de ellas. Debido a que el sistema autónomo no requiere de personal para operar el camión, el sistema de señalética no puede ser aplicado de la misma manera que se utiliza en un camión convencional.

El sistema de permisos es el homólogo en autónomos a la señalética utilizada por los camiones convencionales. Es un área de avance o permiso que toma el camión para evitar colisiones, reproduciendo la función de la señalética. La Figura 6 muestra dos camiones autónomos interactuando en una intersección, el camión CE20 se encuentra impidiendo el avance del camión CE15 en la intersección cuyo permiso o avance ocupó antes el área del cruce. El área de avance o

permiso es relativa y depende de la velocidad del camión y la pendiente, mientras más rápido vaya el equipo mayor es el área de avance.

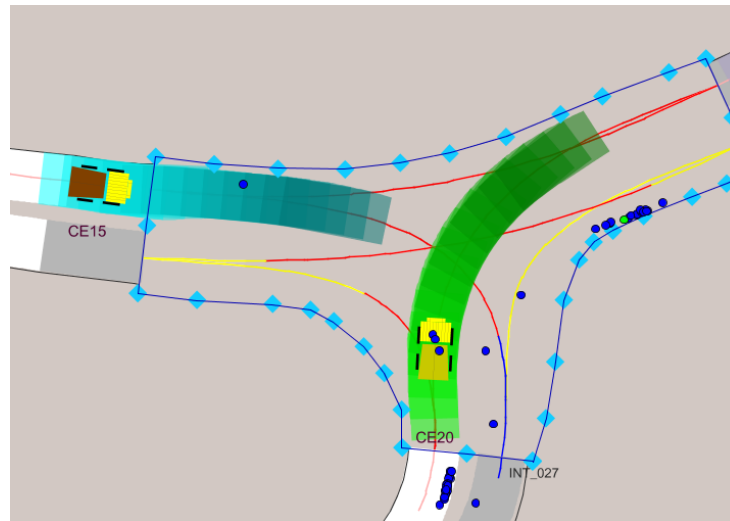


Figura 6. Sistema de permisos.

2.7.1.2 Sistema de interacción manual

Es la capa de seguridad que permite la interacción entre los camiones autónomos y los equipos operados por personas con sistema AHS. Los equipos manuales pueden adoptar diferentes burbujas virtuales de seguridad para entrar al era autónoma e interactuar con los camiones.

- **Burbuja de tránsito:** se identifica con una burbuja verde de radio de 50 metros que detiene completamente los camiones al interactuar con ella.
- **Burbuja de paso:** se identifica con una burbuja amarilla de radio de 50 metros. Si el camión va en la misma ruta este se desplaza a medida que la burbuja también avanza, en caso de ir por pistas contrarias disminuye su velocidad a 30 km/h al interactuar con la burbuja y después continua con velocidad normal.
- **Burbuja de estacionamiento:** tiene un radio de 5 metros y se utiliza para que el camión pueda circular sin afectar la velocidad cuando se encuentra fuera del área de tránsito.
- **Sobre de seguridad:** el radio depende del equipo y es la última barrera de seguridad para detener un camión autónomo.
- **Escolta:** se utiliza para que equipos sin sistema AHS puedan ingresar al área autónoma. Los equipos con sistema generan un radio de protección con la unión de burbujas de tránsito con distancias que pueden abarcar los 100, 150 y 200 metros. En caso de necesitar más radio se pueden dividir las escoltas o colocar otro equipo con sistema AHS detrás.

2.7.1.3 Sistema de detección de colisiones

Está basado en un sistema que detecta el acercamiento crítico de un camión autónomo a un equipo operado manualmente y en donde el sistema de detección de la distancia de acercamiento está determinado por el denominado sobre de seguridad.

2.7.1.4 Sistema de detección de obstáculos

Sistema configurable que permite la detección de obstáculos en el camino. El alcance de detección de objetos es variable según el tamaño del objeto, las condiciones físicas en el que transita el camión, entre otras.

2.7.1.5 Botón de emergencia

Parada que detiene en forma inmediata a todos los equipos autónomos frente a una emergencia. Este dispositivo se encuentra instalado en todos los equipos que operan en el área del sistema autónomo.

2.7.2 Dispatch

El sistema dispatch responde a la estructura de un FMS (Fleet Management System), donde la gestión – administración de la flota carguío, transporte y desarrollo es integrada para optimizar en tiempo real, la productividad del rajo, a través de algoritmos optimización específicos que son alimentados por la información interactiva (usuarios de las distintas aplicaciones) e información pasiva (recopilada a través de sensores en los equipos de campo) (Burgos Mardones, 2019).

2.7.3 Provision

Es un sistema de navegación de alta precisión para equipos de carguío, tractores oruga y perforadoras. El sistema permite importar información al sistema con lo cual se pueden generar controles de alimentación a planta, zonas de acopio, control de líneas de programa en remates de fase o bancos, así como el control de piso o aperturas de banco en los equipos de carguío. Por otro lado, para los equipos de desarrollo permite controlar los pisos con precisión de centímetros respecto los trabajos de servicios en un rajo abierto, como lo son las rampas de diseño, zonas de vaciado y rampas auxiliares (Burgos Mardones, 2019).

2.8 Curvas de travel performance y brake performance

Las curvas de desempeño nos indican la velocidad máxima que puede alcanzar el camión cargado y descargado tanto en subida, bajada y plano, desde el punto de vista de la mecánica del camión y condiciones del camino. Estas curvas de desempeño son confeccionadas para cada modelo de camión y son proporcionadas por el fabricante.

1. En un camino en subida y horizontal el motor debe vencer las fuerzas de roce originadas en los neumáticos
2. En un camino en bajada el camión tiene un cierto freno que ejercer para mantenerse a una velocidad prudente
3. Para el diseño se deben considerar velocidades de seguridad máximas para asegurar el frenado en una distancia de seguridad.
4. Con la velocidad en cada tramo es posible determinar la marcha del equipo, velocidad y con ello el tiempo de viaje total del tramo y ciclo de transporte.

Para usar estas curvas primero se debe definir si se va a evaluar un camión subiendo o bajando. En caso de evaluar la velocidad de camiones subiendo se utiliza la curva de *travel performance*, mientras que para equipos bajando se emplea la curva de *brake performance*. En ambos casos se debe conocer el *Rolling Resistance*, que se define como una medida de la fuerza requerida para superar el efecto de retardo generado entre los neumáticos y el camino (Soofastaei et al., 2015), el cual está expresado en unidades de porcentaje de pendiente. Algunos valores típicos de este factor se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de Rolling Resistance típicos.

Superficie de transporte	Rolling Resistance [%]
Cemento, asfalto, o cemento de suelo sin penetración de neumáticos	2
Grava compacta, cenizas o rocas trituradas	3
Tierra firme compacta o superficie liviana	3,25
Grava, cenizas o rocas trituradas moderadamente compactas	5
Tierra sin mantenimiento	7,5
Arena suelta y grava	10
Material blando, fangoso, con surcos y sin mantenimiento.	10 – 20

Los pasos que se deben seguir para conocer la velocidad del camión a diferentes pendientes son los siguientes:

1. Determinar el peso a evaluar del equipo. Si se quiere determinar la velocidad de un camión descargado solo se debe utilizar el peso nominal, en caso contrario, es decir, si se está evaluando la situación cargado, se debe sumar la carga que es capaz de transportar el camión.
2. Calcular el *total resistance*. Se determina como la suma de la pendiente y la resistencia a la rodadura (*Rolling Resistance*) en el caso de estar evaluando un camión en subida. Para el caso descargado se resta la pendiente con la resistencia a la rodadura.
3. Finalmente, se interseca el rimpull obtenido con la *curva de travel performance* o *brake*

performance, obteniendo la velocidad máxima que puede alcanzar el camión en las condiciones evaluadas.

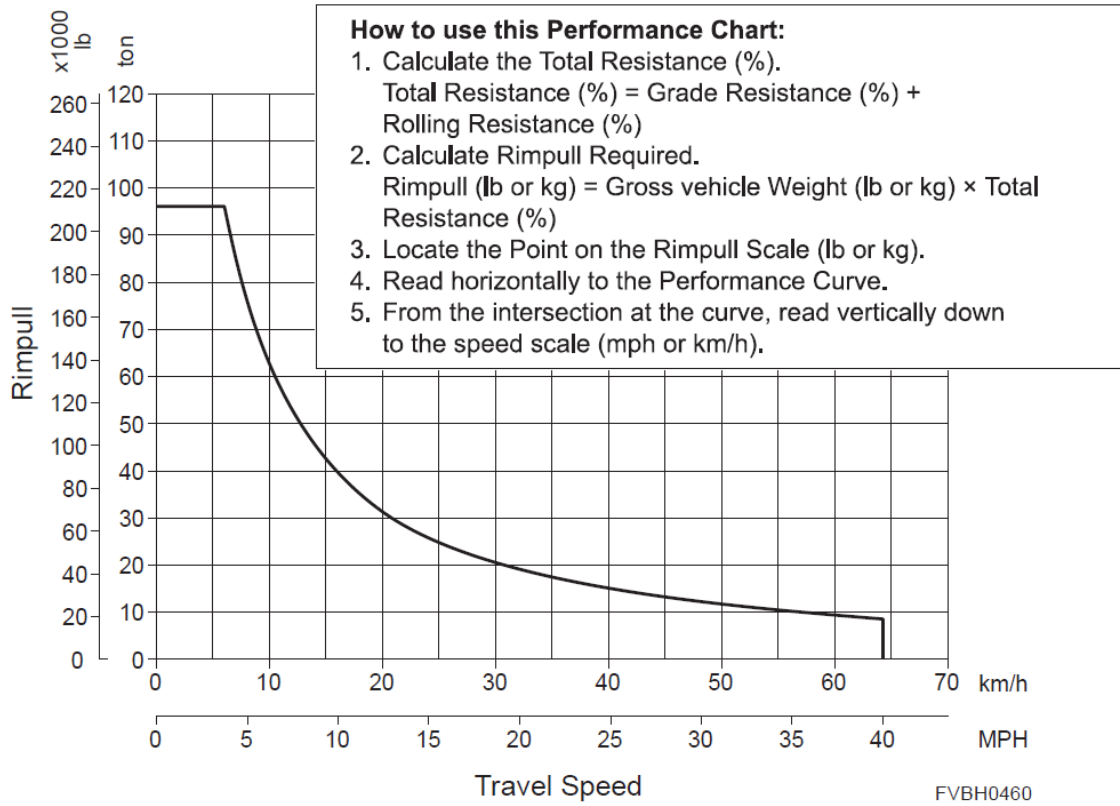


Figura 7. Curva de travel performance para el camión Komatsu 930E-4 AT.

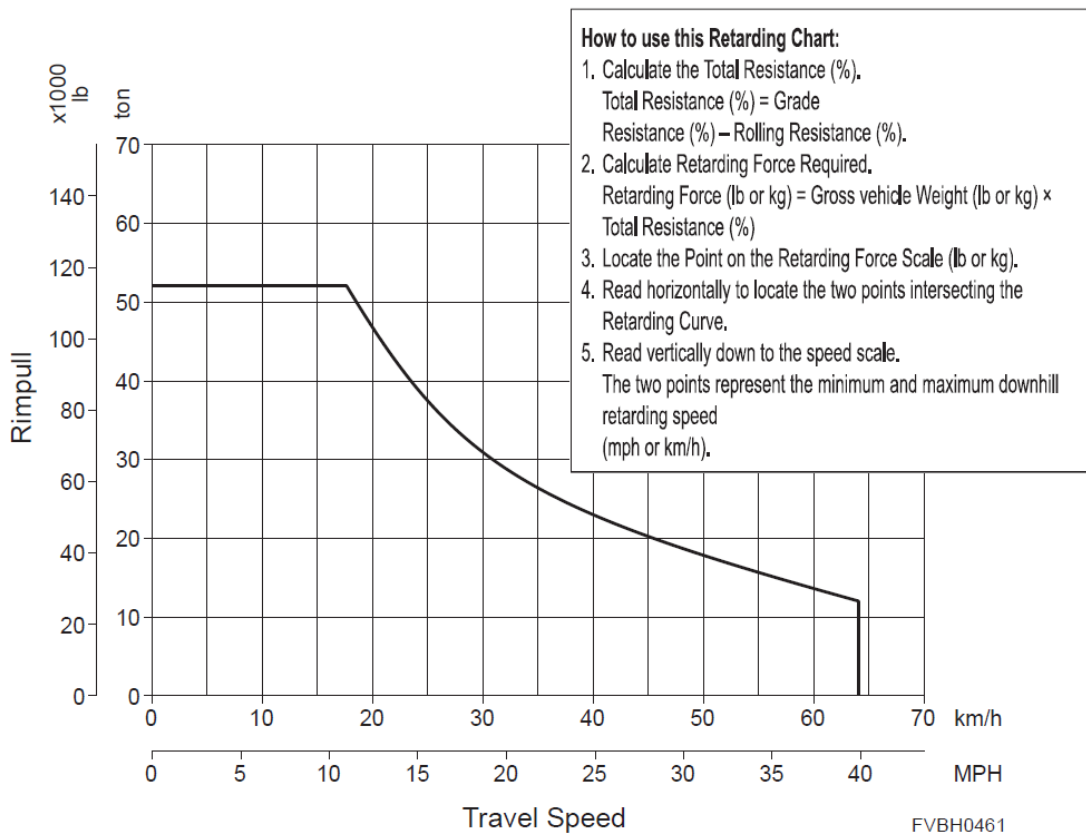


Figura 8. Curva de brake performance para el camión Komatsu 930E-4 AT.

2.9 Distribuciones de probabilidad

Es un modelo teórico que describe la forma en que varían los resultados de un experimento aleatorio, es decir, nos da todas las probabilidades de todos los posibles resultados que podrían obtenerse cuando se realiza un experimento aleatorio. Se clasifican como discretas o continuas. En la distribución de probabilidad discreta está permitido tomar solo un número limitado de valores, en cambio en la continua, la variable que se está considerando puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo dado.

Las variables analizadas en el presente trabajo son continuas. Las distribuciones usadas en el análisis de datos son las siguientes:

2.9.1 Distribución Normal

Definida por el promedio ($E(x) = \mu$) y la desviación estándar ($V(x) = \sigma^2$).

Ecuación 4. Distribución Normal.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

2.9.2 Distribución Gamma

Definida por su parámetro de forma (α) y su parámetro de escala (β).

Ecuación 5. Distribución Gamma.

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

2.9.3 Distribución Weibull

Definida por el parámetro de forma (γ) y su parámetro de escala (β)

Ecuación 6. Distribución Weibull.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\gamma}{\theta} x^{\gamma-1} e^{-x^\gamma/\theta}, & a \leq x \leq b \\ 0, & \sim \end{cases}$$

2.10 Simulación de procesos

Una simulación es la imitación de la operación de un proceso del mundo real o de un sistema en el tiempo. Ya sea hecho a mano o en un computador, la simulación implica la generación de una historia artificial de un sistema y la observación del mismo para sacar conclusiones relativas a las características de funcionamiento del sistema real (Banks et al., 2009). Law (2009) propone la siguiente secuencia de trabajo para la realización de simulaciones:

1. Análisis del problema y recolección de información, donde se identifican los parámetros de entrada, mediciones, relaciones entre las variables.
2. Recolección de datos, para especificar los parámetros del modelo y las distribuciones de probabilidad de entrada al modelo. Los datos son necesarios para la posterior validación del modelo, donde los datos de salida del modelo se comparan con los datos predichos.
3. Construcción del modelo y su implementación como programa computacional.
4. Verificación del modelo, donde se asegura que el modelo se encuentre bien construido.
5. Validación del modelo, examinando el ajuste entre el modelo y mediciones del sistema real a ser modelado. Un buen ajuste implica que una cantidad razonable de datos predichos coincide con los datos medidos del sistema real, de lo contrario, el modelo propuesto requerirá modificaciones con el fin de minimizar esas diferencias.

6. Diseño de experimentos, con el fin de estimar el comportamiento de modelo mediante la selección de un número de escenarios sobre los cuales ejecutar las simulaciones.
7. Análisis de resultados.

La metodología de trabajo del presente trabajo de título se basará en los pasos anteriores para su desarrollo. El paso uno de análisis del problema se mostró en el capítulo de INTRODUCCIÓN, por lo tanto, solo se desarrollaran los pasos restantes.

2.10.1 Software Orchestra Ti mining

TI Mining es una empresa que ofrece variados softwares para la minería, entre ellos está Orchestra, una plataforma de análisis y simulación de eventos discretos para el proceso de carguío y transporte para minería a cielo abierto. Trabaja con datos reales de la mina y permite analizar y simular situaciones pasadas o futuras de la mina.

2.10.1.1 Módulo de análisis

Permite analizar datos reales de la mina obtenidos a través de algún software de despacho de camiones como dispatch. Para utilizar este módulo solo se requiere descargar la base de datos a través de la plataforma del mismo software conectada al programa de despacho o importarla directamente a Orchestra.

Al finalizar la importación el programa entrega las siguientes opciones para el análisis de los datos:

2.10.1.1.1 Filtros

Permite filtrar los datos para un mejor análisis dependiendo de los requerimientos específicos del usuario. Los filtros más importantes son:

- **Equipos:** se pueden seleccionar los equipos que se quieren analizar para obtener un análisis más detallado por camión o pala.
- **Velocidad:** se pueden seleccionar intervalos y cotas máximas y mínimas de visualización de velocidad.
- **Pendiente:** al igual que el filtro de velocidad permite seleccionar intervalos y cotas máximas y mínimas de visualización de pendiente.
- **Estados:** los estados son indefinido, viajando, descargando, aculatando y cargando.
- **Estado de carga:** los estados de carga son descargando, cargando e indefinido.
- **Tipos de ciclo:** los tipos de ciclo se refieren al sentido de viaje del camión, es decir si va desde la carga a la descarga o si se dirige desde cargar a descargar.
- **Pala:** se puede filtrar por el tipo de pala o cargador frontal.
- **Punto de carga:** los puntos de carga son todas las frentes en donde el camión cargo material ya sea este estéril o lastre.
- **Punto de descarga:** los puntos de descarga son todas las frentes en donde el camión descarga material ya sea este estéril o lastre.

- **Modelo de camión:** si existen más modelos de camión se puede filtrar por tipo.
- **Material:** los camiones cargan distintos tipos de materiales como grava, óxidos y sulfuros, por lo tanto, este filtro también está disponible.

2.10.1.1.2 Tiempos

Los tiempos de carga, descarga y acuatamiento se pueden visualizar como histogramas de tiempo por pala y sitio de descarga. De estos datos se pueden calcular distribuciones para utilizarlas posteriormente en el módulo de simulación.

2.10.1.1.3 Velocidad

Las velocidades se pueden obtener por pendiente y diferenciarlas entre el estado del camión cargado o descargado, además de poder obtener la velocidad promedio del sistema y poder diferenciarla por turno o por modelo de camión.

2.10.1.1.4 Producción

Los reportes de producción entregan el movimiento total por por pala.

2.10.1.2 Módulo de simulación

Permite construir modelos de simulación para sistemas de carguío y transporte. Las utilidades que presta el programa para la creación de escenarios son:

- **Topografía:** triangular un archivo .dxf para utilizarlo como topografía o subir una creada con anterioridad.
- **Punto de carga:** locaciones en donde se ubica un equipo de carguío como pala o cargador frontal. En estos puntos el camión solo está disponible la opción de acuatamiento doble.
- **Puntos de descarga:** sectores en donde los camiones van a depositar el material que fue cargado por los equipos de carguío. Según el material corresponderá a botadero o stock.
- **Estacionamientos:** lugares en donde se encuentran detenidos los equipos de transporte.
- **Caminos:** son los tramos que unen las diferentes locaciones de carga, descarga y estacionamientos, estos pueden ser de doble vía, vía única de un sentido o doble.
- **Flotas:** es la cantidad de camiones con las que se cuenta el sistema para transportar material.
- **Señaléticas:** el programa cuenta con disco pare y ceda el paso para ubicar en las intersecciones de caminos según sea necesario.
- **Tiempos:** sirven para ingresar los tiempos de carguío de cada pala o cargador frontal, además de los tiempos de acuatamiento de los camiones y de descarga.
- **Plan minero:** se indica las metas productivas de cada equipo de carguío y el destino de descarga.
- **Disponibilidad:** indica el momento en que una pala o cargador frontal se encontrara fuera de servicio.

- **Perfiles de velocidad:** son las distintas velocidades que puede adoptar un camión. Se le debe indicar al programa una cantidad mínima de 1 perfil de velocidad, la que corresponderá al perfil base del camión, es decir, es la velocidad que por defecto tomará el equipo de transporte si es que no se indica lo contrario.
- **Zonas:** lugares de la ruta en donde se le indicará al camión que adopte una velocidad distinta a la base.

Todo lo anterior es lo que se puede utilizar para construir un modelo de simulación. Los resultados pueden ser analizados con el módulo de análisis o ser exportados a Excel.

2.11 Conclusiones del capítulo

El software Orchestra de TI mining está desarrollado para simular camiones convencionales. En relación a esto una de las limitaciones más importantes que presenta el programa es que no representa los permisos que permiten la interacción entre los camiones autónomos, ya que solo tiene disponible la señalética utilizada por los camiones convencionales. Otra limitación es que el software no tiene la opción de configurar cómo se posicionan las palas, permitiendo solo utilizar la opción en donde las palas tiene habilitado ambos costados para que el camión pueda cargar, sin embargo, en ERM, la posición de los equipos de carguío solo permite cargar el camión por un solo lado.

Capítulo 3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

La metodología de trabajo se basó en la secuencia de trabajo propuesta por Law (2009) presentada en el capítulo anterior y representada con el siguiente esquema.

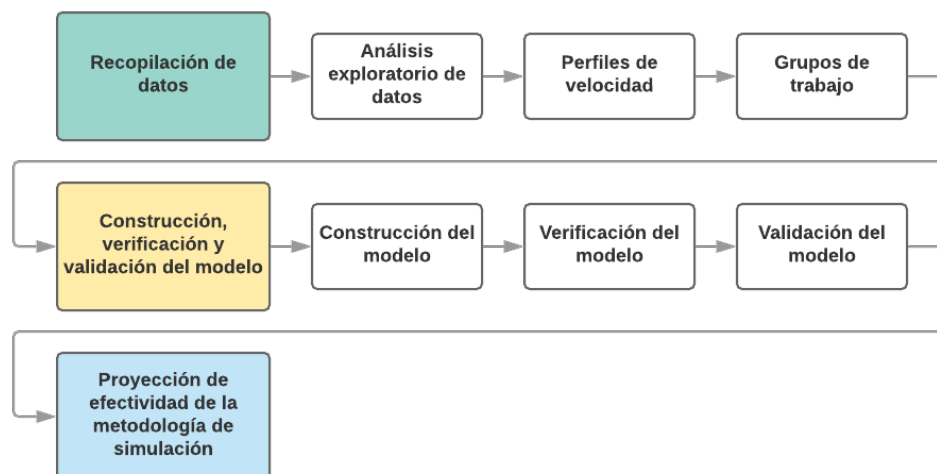


Figura 9. Esquema de la metodología de trabajo.

3.1 Recopilación de datos

Esta etapa tiene como objetivo recolectar todos los datos necesarios para la realización del modelo de simulación. A continuación se muestran los 3 tipos de información recopilada.

3.1.1 Análisis exploratorio de datos

Se realizó un análisis exploratorio para un set de datos reales desde diciembre 2018 a enero – febrero 2019. La información analizada fue la siguiente:

- **Tiempos:** los tiempos de carguío de todas las palas y cargadores frontales, además de los de aculatamiento y descarga de los camiones.
- **Capacidad de carga:** la cantidad de toneladas [t] que transportaban los camiones en cada ciclo de carga-descarga.

Para ambos tipos de información se realizó una limpieza para eliminar datos anómalos. Con los datos de los tiempos ya tratados, se realizaron pruebas de ajuste para determinar qué distribución de probabilidad representa mejor la información. Para la capacidad de carga solo se tomo el valor medio ya que este dato solo puede ser representado como un valor fijo en el programa Orchestra.

3.1.2 Perfiles de velocidad

Son las distintas velocidades que experimenta el camión dependiendo del sector en el que se encuentre. El método de obtención dependió del tipo de velocidad:

- **Base:** es el perfil de velocidad principal del camión. Obtenido en base a las curvas rimpull del camión y ajustado según las velocidades reales de los camiones autónomos.
- **Secundarias:** son velocidades menores a la base que tomará el equipo de transporte solo en determinados sectores del trayecto, para su obtención se probaron distintas combinaciones de velocidad con los modelos de simulación hasta lograr obtener perfiles que se adaptaran a todos los grupos de trabajo. Los sectores en que ocurren estas reducciones de velocidad se identificaron en base a la realidad de la operación de DGM.

3.1.3 Grupos de trabajo

Los grupos de trabajo son los días que se agruparan en un mismo modelo de simulación. Para el desarrollo de la presente memoria se generaron 2 sets de grupos de datos con distintos criterios de agrupación e información necesaria de conocer para construir los modelos.

El primer set fue el generado para la construcción y validación del modelo de simulación, que al igual que el análisis exploratorio de datos, se estudiaron los meses desde diciembre 2018 a enero – febrero 2019, abarcando un total de 90 días. Para disminuir la cantidad de modelos a realizar estos días se agruparon en función de la ubicación de palas. Para formar el primer grupo se tomó el primer día de los 90 y se fue agregando el día siguiente solo si este no implicaba tener más de dos cambios de posición de pala, cuando se evaluaba un día que implicaba el tercer cambio de posición de pala se consideraba como el primer día de un nuevo grupo, de esta manera, sucesivamente, se fueron construyendo los grupos de trabajo.

De los grupos de trabajo generados para la construcción y validación del modelo de simulación se extrajo la siguiente información real reportada por ERM:

- Ubicación de palas y cargadores frontales reales.
- Tonelaje por pala y destino.
- CAEX operativos.
- Horas efectivas de operación.

El segundo set se generó para la etapa de proyección de efectividad del modelo de simulación. El periodo de tiempo utilizado comprende los meses desde marzo a mayo 2019. La agrupación de días fue acorde a cómo se planifican los turnos del mes en ERM, los cuales abarcan 7 días consecutivos, comenzando un miércoles y terminado el martes de la semana siguiente.

De los grupos de trabajo generados para el periodo de proyección de efectividad del modelo de simulación se extrajo la siguiente información reportada en los planes de ERM de los días de los meses mencionados:

- Ubicación de palas y cargadores frontales.
- Tonelaje por pala y destino.
- Disponibilidad física
- UEBD
- Flota nominal

3.2 Construcción, verificación y validación del modelo

3.2.1 Construcción y verificación

La construcción del modelo de simulación fue un proceso iterativo, ya que la misma metodología debía funcionar para todos los grupos de trabajo, debido a que se espera que esta pueda ser usada en la construcción de modelos futuros basados solo en la información entregada por planes mensuales y playbacks pasados de la operación.

Las variables que se editaron en cada modelo de simulación son:

- Topografía
- Zonas de carga y descarga
- Caminos principales
- Caminos de locaciones de carga y descarga
- Interacción autónoma
- Zonas de reducción de velocidad
- Plan minero
- Número de camiones
- Disponibilidad de palas
- Tiempo de simulación

Los modelos construidos deben ser simulados por un periodo de tiempo que puede estar en horas o días. Para definir el tiempo de simulación se fue sumando o restando horas de simulación hasta lograr completar el tonelaje que se transportó en el periodo estudiado. Las horas de simulación obtenidas de cada modelo se relacionaron con las horas efectivas reales del grupo de trabajo del periodo simulado, con el fin de lograr obtener una ecuación que describa el tiempo en que se debe ejecutar la simulación para representar una cierta cantidad de horas efectivas reales para posteriormente utilizarla para estimar el tiempo de simulación con las horas efectivas de planes mensuales

La verificación de los modelos fue realizada por el mismo programa Orchestra, el cual indica en donde se esté generando un error que impida la simulación.

3.2.2 Validación

La validación del modelo se realizó después de que todos los modelos fueron construidos con la metodología de construcción propuesta. Los dos criterios de control para establecer cuándo un modelo estaba correctamente calibrado fueron la velocidad media, velocidad cargado, velocidad vacío y tonelaje total.

3.3 Proyección de efectividad de la metodología de simulación

Basándose en la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta se simularon los planes mensuales de los meses de marzo, abril y mayo 2019 divididos en grupos de trabajo usando el criterio ya mencionado. Los resultados obtenidos de las simulaciones se compararon con la velocidad media, tonelaje total y horas efectivas reales de los grupos de simulación generados. Sobre la base de esto se determinó la efectividad de la aplicación de esta metodología para utilizarla como verificación de cumplimiento de velocidad y movimiento mina que se indica en los planes mensuales de ERM.

Capítulo 4 RECOPIACIÓN DE DATOS

A continuación se presentan los resultados de la recopilación del análisis exploratorio de datos, perfiles de velocidad y grupos de trabajo.

4.1 Análisis exploratorio de datos

4.1.1 Tiempos

Para determinar las distribuciones de probabilidad que mejor representan los tiempos de carguío de cada pala y cargador frontal se realizó un análisis exploratorio de datos reales de estos tiempos del set de datos de diciembre 2018 a enero-febrero 2019. Se estudiaron tres distribuciones de probabilidad para cada uno de estos tiempos: Normal, Gamma y Weibull, debido a que son estas las opciones disponibles en el software Orchestra. Para definir el grado de ajuste de datos a cada una de estas distribuciones se utilizó el índice de Kolmogorov-Smirnov, el que se interpreta según el valor obtenido de este índice, mientras más bajo, significa que la distribución reproduce de mejor manera los datos. El detalle de los gráficos de ajuste junto con el resultado del índice de Kolmogorov-Smirnov se adjunta en ANEXOS. La Tabla 6 indica la media y desviación estándar de los datos analizados, mientras que la Tabla 7 muestra los resultados de la distribución de probabilidad de tiempo de carguío de cada equipo analizado.

Tabla 6. Media y desviación estándar de los tiempos de carguío.

Tiempo carguío	Media [s]	Desviación estándar [s]
CF 01	400,5	80,6
CF 02	399,6	80,8
PA 01	103,1	28,4
PA 02	101,1	31,6
PC 8000	156	31,8

Los tiempos promedio de carga y desviación estándar son de 400 [s] para cargadores frontales con una desviación estándar de 80,7 [s] y 120 [s] para palas con una desviación estándar de 30,6 [s], lo cual implica que el tiempo de carga puede variar entre un 20% para cargadores frontales y un 26% para palas respecto a la media.

Tabla 7. Resumen tiempo carguío.

Tiempo carguío	Distribución	Parámetros
CF 01	Gamma	$\alpha=22,59; \beta=15,65$
CF 02	Gamma	$\alpha=24,88; \beta=16,06$
PA 01	Gamma	$\alpha=13,14; \beta=7,85$
PA 02	Normal	$\mu=101,12; \sigma=31,46$
PC 8000	Gamma	$\alpha=25,01; \beta=6,27$

Los tiempos asociados a los camiones corresponden a descarga en chancado, descarga en botadero – stock y aculatamiento en zona de carga. Los datos de descarga en botadero y stock se consideraron como un solo tipo de tiempo debido a que en el software tanto el stock como el botadero son codificados como el mismo tipo de locación, por lo tanto, al camión se le asigna el mismo tiempo de descarga para ambos casos. Para todos estos tiempos se utilizó el mismo set y tratamiento aplicado a los tiempos de carguío de palas y cargadores frontales.

A continuación, se muestran las tablas de resultados y los gráficos de distribución de probabilidad representativo para los tiempos mencionados, además de la media y desviación estándar de los datos.

Tabla 8. Media y desviación estándar de los tiempos de descarga en chancado, botadero – stock y aculatamiento en punto de carga.

Tiempo	Media [s]	Desviación estándar [s]
Descarga en Chancado	52	5,9
Descarga en Stock-Botadero	81,3	28,8
Aculatamiento en zona de carga	107,9	55,8

La descarga en chancado puede variar en tiempo en un 11%, mientras que la descarga en stock – botadero en un 35%. El aculatamiento en zona de descarga representa la más alta desviación estándar respecto a su media de los tiempos estudiados, pudiendo llegar a variar en un 52%.

Tabla 9. Resumen tiempo de descarga y acuatamiento en zona de carga.

Tiempo descarga	Distribución	Parámetros
Chancado	Weibull	$\lambda= 11,87; \kappa=54,33$
Stock-Botadero	Gamma	$\alpha=9,86; \beta=8,25$
Acuatamiento	Gamma	$\alpha=4,79; \beta=22,49$

4.1.2 Capacidad de carga

La capacidad de carga de cada camión no es homogénea. Debido a que el software no cuenta con la opción de asignar la carga como una distribución de probabilidad se seleccionó el dato promedio más representativo, obtenido del set de datos de diciembre 2018 a enero-febrero 2019, resultando la capacidad de carga de los camiones en 296 [t] con una desviación estándar de 23,2 [t].

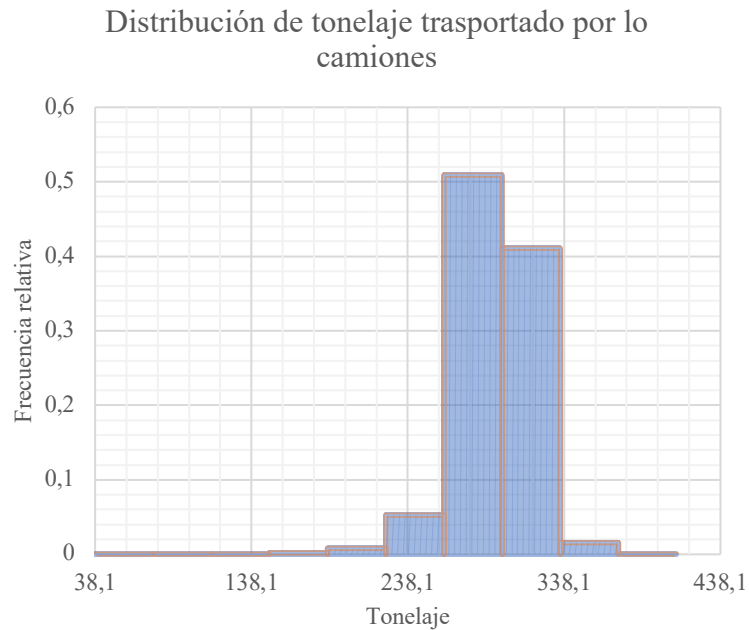


Gráfico 2. Distribución de tonelaje trasportado por los camiones.

4.2 Perfiles de velocidad

4.2.1 Determinación de perfil velocidad base

Para determinar el perfil de velocidad base por pendiente de los equipos de transporte fue necesario utilizar las curvas rimpull del camión 930E-4 AT, utilizado por ERM, la información fue proporcionada por Komatsu, fabricante del equipo.

Estas curvas se emplean ingresado el rimpull del equipo, la Ecuación 7 indica la fórmula y los factores involucrados para el cálculo.

Ecuación 7. Cálculo de rimpull.

$$\text{Rimpull} = (\text{Pendiente} [\%] - \text{Rolling Resistance} [\%]) * \text{Peso Total} [t]$$

Como se quiere conocer el perfil de velocidad por pendiente, se tomaron valores desde 0% hasta 12%, considerado tramos con un paso de 2%. El peso utilizado fue de 210 y 510 [t], correspondientes a un camión descargado y cargado respectivamente. De los 3 factores que componen la ecuación de rimpull, la pendiente y el peso son conocidos, sin embargo, el factor *Rolling Resistance* es desconocido. Para determinar este factor se desarrolló una iteración comprendida en los siguientes pasos:

1. Perfil de velocidad inicial

El perfil de velocidad inicial se determinó utilizando un *Rolling Resistance* de 0%. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 10. Perfil de velocidad subiendo con Rolling Resistance de 0%.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado	Velocidad vacío
2%	50,0	50,0
4%	44,7	50,0
6%	28,3	49,8
8%	19,7	42,5
10%	14,7	33,7
12%	11,0	26,8

Tabla 11. Perfil de velocidad bajando con Rolling Resistance de 0%.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado	Velocidad vacío
-2%	49,7	50,0
-4%	43,0	50,0
-6%	35,0	49,5
-8%	27,7	46,1
-10%	20,6	32,6
-12%	16,5	38,6

2. Selección de ruta y medición de velocidad

Para encontrar el factor *Rolling Resistance* correcto se seleccionó una ruta de transporte dentro del layout de la mina que cumpliera los siguientes criterios:

- La ruta seleccionada debe contener la mayor cantidad de pendientes posibles para cubrir la mayor cantidad del espectro de pendientes.
- La vía seleccionada debe ser recta para no incluir curvas ya que en estas ocurren disminuciones de velocidad.
- Los camiones seleccionados a los que se les medirá la velocidad para determinar la velocidad en ruta no deben presentar interacción autónoma, manual o cualquier detención en ruta que influya en su velocidad.

Las condiciones anteriores buscan asegurar que la velocidad medida solo está influenciada por la pendiente, peso y el *Rolling Resistance*.

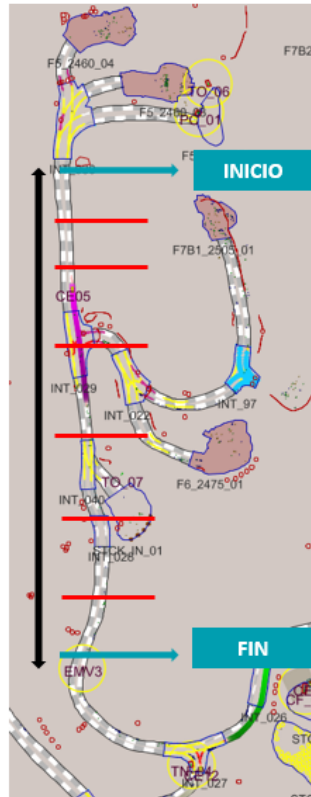


Figura 10. Ruta seleccionada.

La Figura 10 muestra el inicio y el fin de la ruta escogida para medir la velocidad. Los datos fueron extraídos de playbacks obtenidos desde frontrunner. Los playbacks son reproducciones de la operación de los camiones autónomos realizadas en el pasado, con esto se pudo seleccionar camiones que recorrieron la ruta seleccionada y cumplieran con los criterios de selección mencionados.

Los playbacks estudiados fueron intervalos de 15 minutos diarios de los meses desde diciembre 2018 hasta enero-febrero 2019, de estos surgieron 15 datos para camión cargado subiendo y 20 para camión descargado bajando. El Gráfico 3 muestra las velocidades medidas para estos dos trayectos.

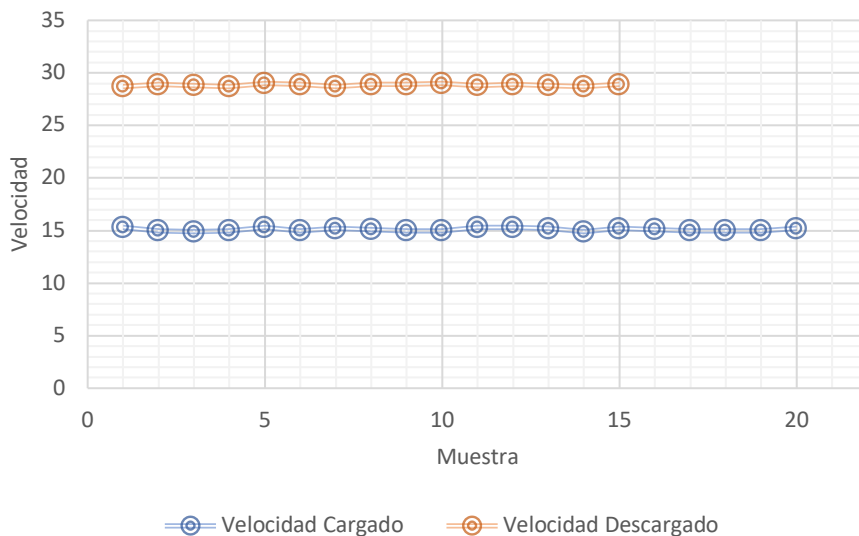


Gráfico 3. Velocidad de las muestras seleccionadas de playbacks.

Para la velocidad cargado se midió una velocidad promedio de 15,1 km/h con una desviación estándar de 0,11 km/h. Mientras que para la velocidad descargado se obtuvo una velocidad de 28,8 km/h con una desviación estándar de 0,14 km/h.

3. Comparación de velocidades

De acuerdo con las pendientes que contiene el trayecto seleccionado la velocidad del camión cargado según el perfil de velocidad obtenido usando un *Rolling Resistance* 0% es de 29 km/h, mientras que la velocidad descargado de 39 km/h. Estas velocidades difieren de las reales, que son 15,1 km/h cargado y 28,8 km/h descargado, por lo tanto, un *Rolling Resistance* de 0% no representa las condiciones reales de ERM. Para encontrar este factor se realizó una iteración hasta lograr conseguir el valor que logre obtener las velocidades reales alcanzadas por los equipos en la mina.

4. Iteración

Para realizar la iteración se segmentó la ruta seleccionada en tramos, que corresponden a los puntos en donde la pendiente cambia de valor. Posterior a esto, se midió el largo de estos segmentos, para conocer cuánto pesa cada uno de ellos en la velocidad total. A cada una de estas porciones de camino le corresponde una velocidad que queda determinada por la ecuación de rimpull y los gráficos representados por la Figura 7 y Figura 8, dependiendo si el camión va subiendo o bajando.

Tabla 12. Datos usados en la iteración para obtener el factor Rolling Resistance.

Pendiente	Largo [m]	Ponderación	Velocidad Cargado [km/h]	Velocidad Descargado [km/h]	Ponderado Cargado [km/h]	Ponderado Descargado [km/h]
2,3%	138	11,34%	44,7	38,6	5,1	4,4
2,4%	511	42,13%	44,7	38,6	18,8	16,3
8,2%	112	9,21%	14,7	42,6	1,4	3,9
10,1%	158	13,00%	11,0	38,6	1,4	5,0
5,3%	83	6,85%	11,0	38,6	0,8	2,6
11,1%	81	6,68%	11,0	38,6	0,7	2,6
10,4%	131	10,79%	11,0	38,6	1,2	4,2

La velocidad obtenida en cada tramo es multiplicada por la ponderación, obtenida mediante el porcentaje que representa el segmento respecto al trayecto total. El *Rolling Resistance* se fue variando, obteniendo diferentes valores ponderados de velocidad, hasta lograr obtener de la suma el valor real de la velocidad medida. El *Rolling Resistance* que logró cumplir con la velocidad final igual a la real es de 3,6%.

Finalmente, las ecuaciones que representan el rimpull en función de la pendiente y tonelaje para ERM son las siguientes:

Ecuación 8. Ecuación de rimpull para equipo bajando cargado.

$$\text{Rimpull (Equipo cargado)} = (\text{Pendiente [\%]} - 3,6 [\%]) * \text{Peso [t]}$$

Ecuación 9. Ecuación de rimpull para equipo subiendo vacío.

$$\text{Rimpull (Equipo descargado)} = (\text{Pendiente [\%]} - 3,6 [\%]) * \text{Peso [t]} * 0,73$$

El factor 0,73 de la ecuación rimpull para el equipo subiendo vacío corresponde a un factor de ajuste extra agregado para que el mismo factor de *Rolling Resistance* se adapte para ambos casos.

Los perfiles de velocidad representativos para el camion Komatsu 930E-4 AT bajo las condiciones de operación de ERM son:

Tabla 13. Perfil de velocidad por pendiente-subiendo Komatsu 930E-4 AT.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado	Velocidad vacío
2%	33,3	43,6
4%	26,5	40,9
6%	16,4	36,6
8%	12,7	30,5
10%	9,9	24,4
12%	8,0	20,3

Tabla 14. Perfil de velocidad por pendiente-bajando Komatsu 930E-4 AT.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado	Velocidad vacío
-2%	33,3	43,6
-4%	26,5	40,9
-6%	26,0	36,9
-8%	20,6	34,3
-10%	16,0	31,7
-12%	12,3	27,5

4.2.2 Perfiles de velocidad secundarios

Los perfiles de velocidad son distintas velocidades que va adoptando el camión dependiendo del segmento de camino que recorra. Para el caso de ERM se encontraron 8 perfiles de velocidad:

- **Base:** este perfil es definido por las curvas rimpull. Los valores y método de cálculo fueron presentados anteriormente. Es la máxima velocidad que puede alcanzar el camión en las diferentes pendientes y combinaciones del camión cargado, descargado, subiendo o bajando. El equipo de transporte por defecto adoptara esta velocidad, para indicar lo contrario, se deben agregar zonas de reducción de velocidad con un perfil de velocidad secundario asociado. La Tabla 13 y Tabla 14 muestran los valores de velocidad base.

Para la operación de ERM se encontraron 7 perfiles de velocidad secundarios. Estos perfiles se obtuvieron mediante distintas pruebas de simulación hasta obtener velocidades que se ajustaran a los 3 meses seleccionados para la validación.

Los perfiles de velocidad secundarios junto con los valores de velocidad y significado de uso se muestran a continuación:

1. **Salida pala o cargador frontal:** es la velocidad que toma el camión al terminar de ser cargado por una pala o cargador frontal.
2. **Aumento salida:** es la velocidad que toma el camión entre “Salida pala o cargador frontal” y alcanzar la velocidad base.
3. **Entrada pala:** es la velocidad que toma el camión al entrar a la locación de carga.
4. **Aumento entrada:** es la disminución de velocidad del camión desde la velocidad base a la “Entrada pala”.
5. **Curva:** es la velocidad que adquiere el camión al pasar por una curva.
6. **Entrada salida botadero:** esta velocidad se utiliza cuando un camión sale o entra a un botadero.
7. **Chancador:** esta velocidad se utiliza cuando un camión está en la intersección que permite entrar a la zona de chancado.

Velocidad del camión cargado para los perfiles de velocidad secundarios

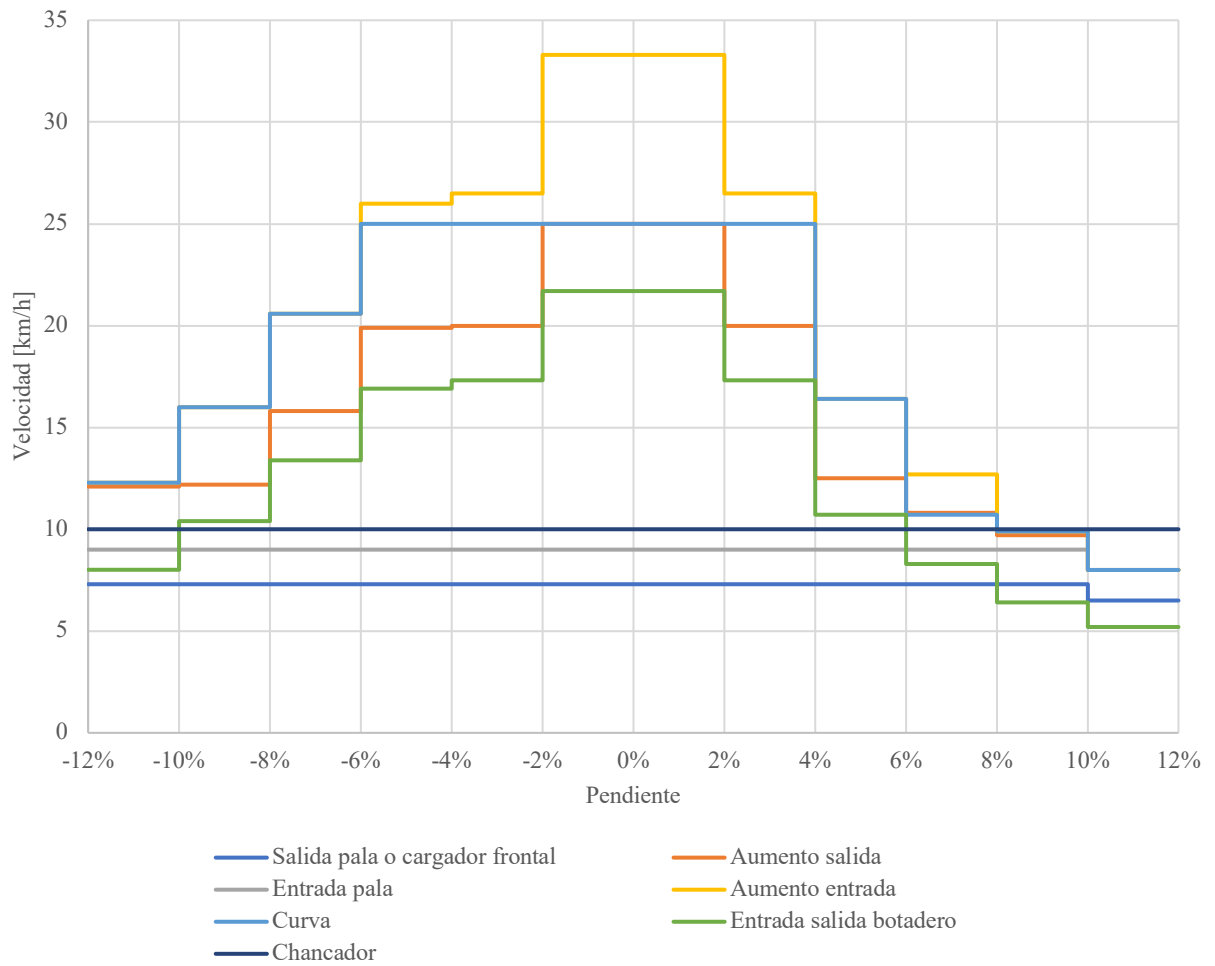


Gráfico 4. Velocidad del camión cargado para los perfiles de velocidad secundarios

Velocidad del camión descargado para los perfiles de velocidad secundarios

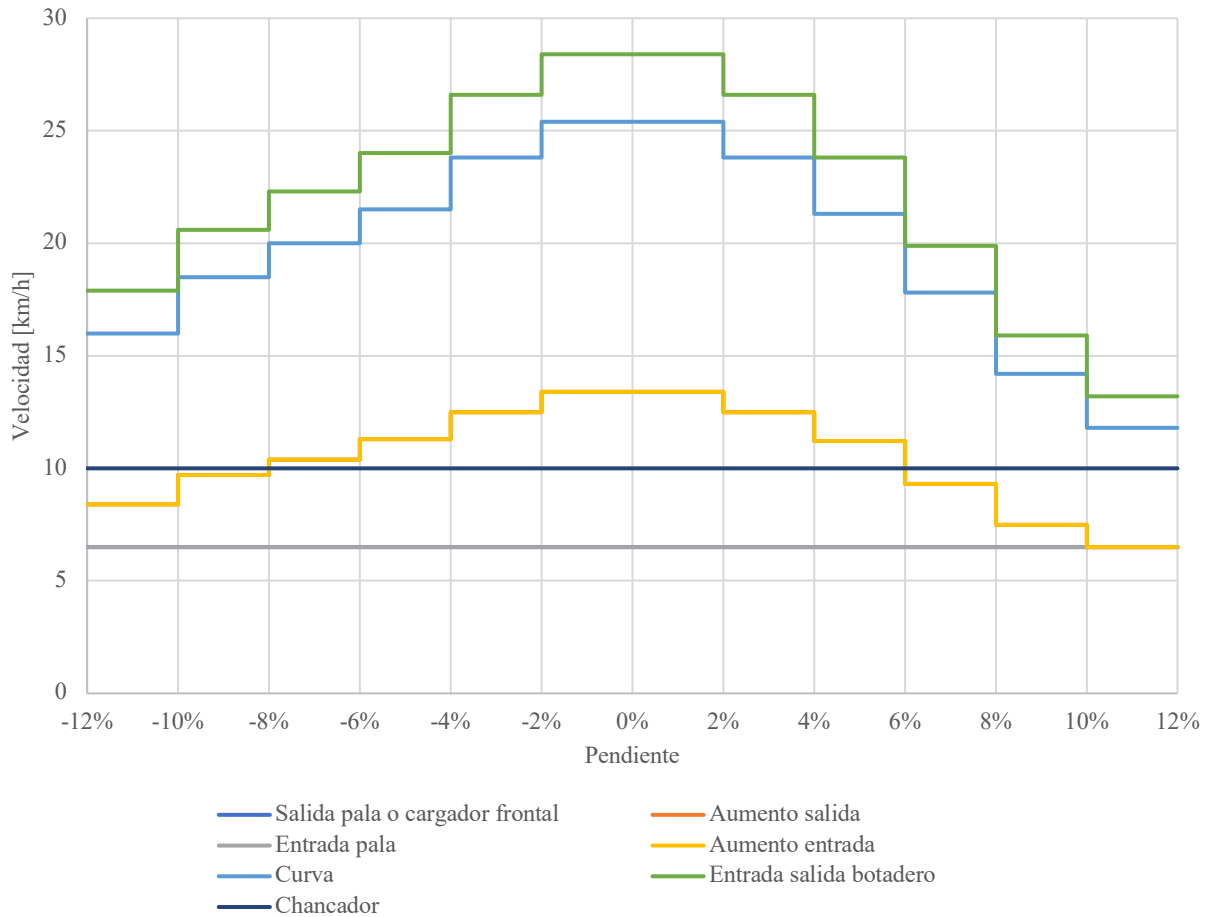


Gráfico 5. Velocidad del camión descargado para los perfiles de velocidad secundarios.

4.3 Grupos de trabajo

De acuerdo con el criterio de agrupación mencionado para el primer set en el capítulo anterior, el cual se utilizara para la construcción, validación y verificación de la metodología de simulación propuesta, resultó en 16 grupos de simulación asociados a un periodo, mostrados en la Tabla 15. Por cada uno de estos grupos se generó un modelo de simulación.

Tabla 15. Grupos de trabajo para “Construcción, verificación y validación del modelo”.

Grupo	Inicio	Fin
1	01/12/18	04/12/18
2	05/12/18	08/12/18
3	09/12/18	11/12/18
4	12/12/18	14/12/18
5	15/12/18	17/12/18
6	18/12/18	24/12/18
7	25/12/18	31/12/18
8	01/01/19	02/01/19
9	03/01/19	14/01/19
10	15/01/19	21/01/19
11	22/01/19	24/01/19
12	25/01/19	31/01/19
13	01/02/19	06/02/19
14	07/02/19	21/02/19
15	22/02/19	25/02/19
16	26/02/19	28/02/19

Al agrupar los días fue necesario emplear el valor total o una ponderación por tonelaje de cada uno de los datos. El tonelaje total por pala según ubicación - destino y las horas efectivas se sumaron en cada grupo para utilizar el total, mientras que para los CAEX operativos se utilizó el valor promedio, ponderado por el tonelaje total transportado en los días de operación considerados. Los valores utilizados para realizar cada periodo de simulación son mostrados en la Tabla 44 en ANEXOS.

El segundo set de grupos, generados para comprobar la proyección de efectividad de la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta, resultó en 13 grupos. La Tabla 16 muestra el rango de días del que está compuesto cada grupo de trabajo.

Tabla 16. Grupos de trabajo para “Proyección de efectividad del modelo de simulación”.

Grupo	Inicio	Fin
1	01/03/19	06/03/19
2	07/03/19	13/03/19
3	14/03/19	20/03/19
4	21/03/19	27/03/19
5	28/03/19	03/04/19
6	04/04/19	10/04/19
7	11/04/19	17/04/19
8	18/04/19	24/04/19
9	25/04/19	01/05/19
10	02/05/19	08/05/19
11	09/05/19	15/05/19
12	16/05/19	22/05/19
13	23/05/19	29/05/19

En la Tabla 46 de ANEXOS se puede revisar la información recopilada y necesaria para generar los modelos para cada grupo de trabajo.

4.4 Conclusiones del capítulo

Los tiempos de carga, descarga y aculatamiento se representan en los planes mensuales como números fijos, sin embargo, del análisis de datos se desprende que estos tiempos tienen una gran desviación estándar en relación a su media, siendo solo la descarga en chancado en el que se obtuvo una menor desviación de estándar. Lo anterior indica que usar distribuciones de probabilidad para cada uno de estos tiempos en vez de tiempos fijos, los cuales son utilizados por planificación de ERM, logra representar de manera más realista el comportamiento estos tiempos y sus variaciones.

El perfil de velocidad base del camión autónomo de ERM se encontró a través de una combinación de aplicación de curvas rimpull, las cuales son proporcionadas por el proveedor, y datos reales de la velocidad media de los equipos, con el fin de encontrar el *Rolling Resistance* de la superficie del camino, que a pesar de haber sido empleado en simulaciones realizadas por Komatsu, este se había estimado como un valor estándar de 2%, sin realizar una corroboración de si este valor representa las condiciones de operación de ERM. Del presente estudio, mediante una iteración simple, se concluyó que este factor es 3,6%, mayor en un 1,6% del utilizado por Komatsu.

Capítulo 5 CONSTRUCCIÓN, VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La Figura 11 representa la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta para la operación de carguío y transporte de la ERM.

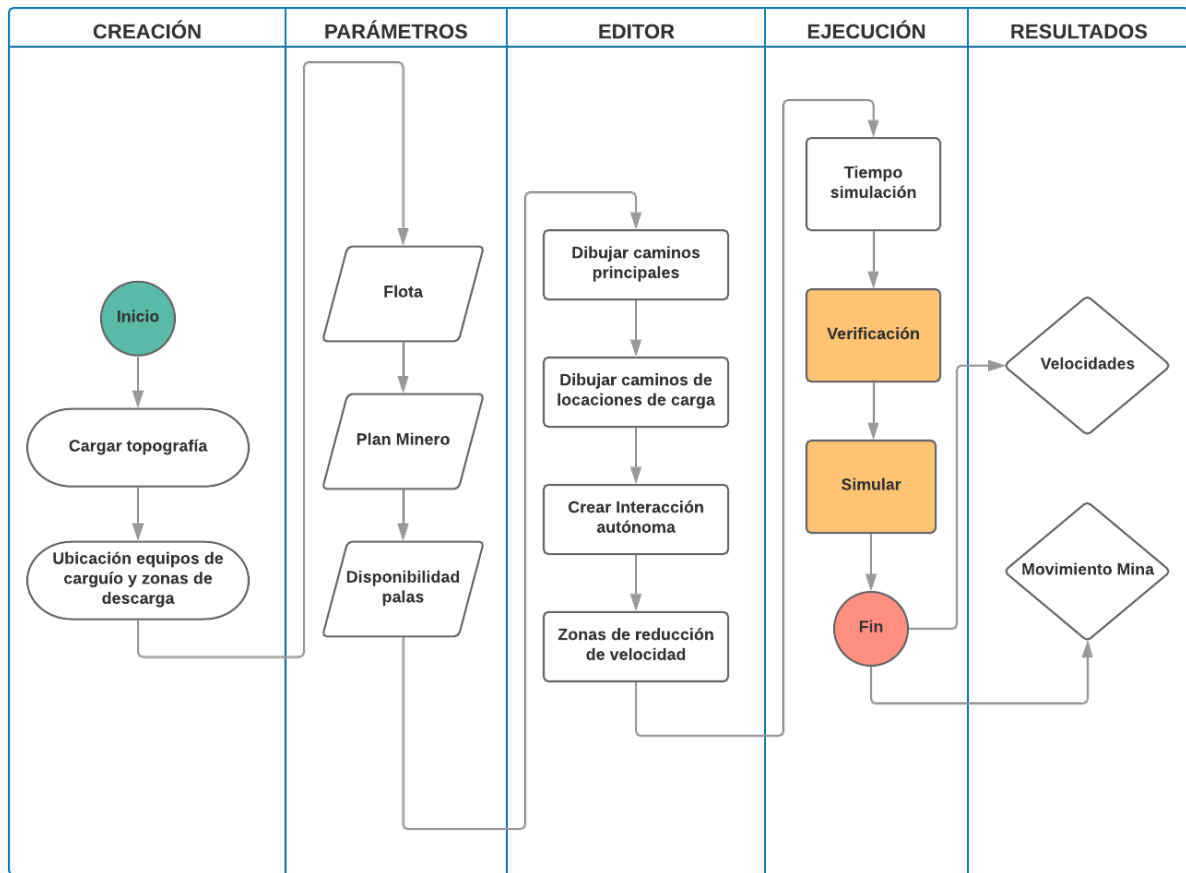


Figura 11. Esquema de la metodología para construcción de modelo de simulación.

El detalle de cada una de las etapas se explica en las siguientes secciones.

5.1 Construcción y verificación

5.1.1 Creación de nuevo proyecto

Para comenzar a simular se debe cargar la topografía e ingresar la ubicación de los equipos de carguío. Estos dos pasos son necesarios para el comienzo de la construcción del modelo de simulación, ya que son la base de los parámetros que se deben configurar en el programa.

5.1.1.1 Cargar topografía

La topografía es la base de la realización del modelo, en ella se dibujan los caminos y locaciones que son parte del modelo de simulación. Se recomienda utilizar la topografía más cercana al periodo que se esté simulando. En caso de tener que construir modelos de situaciones futuras la topografía debe ser modificada con algún software de edición de archivos .dxf como AutoCAD, de manera de lograr la mayor representatividad. La Figura 12 muestra cómo se visualiza una topografía cargada al software Orchestra.

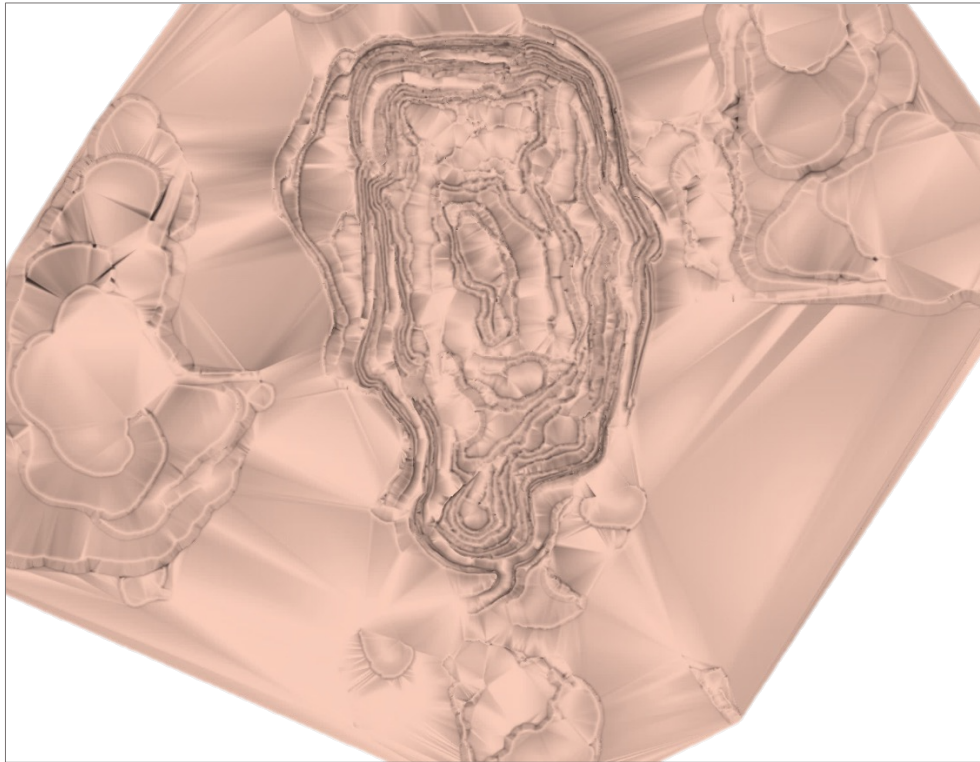


Figura 12. Topografía cargada a Orchestra.

5.1.1.2 Ubicación de equipos de carguío y zonas de descarga

Dependiendo de la variación de posición de los equipos de carguío dentro de un grupo de trabajo, es la cantidad de locaciones de carguío que se deben incorporar. En el caso de que en un grupo una pala o cargador frontal varíe de ubicación, se deben ingresar al programa tantas veces el mismo equipo como posiciones tenga. La codificación de nombre de cada equipo de carguío se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Codificación de los equipos de carguío.

Equipo de carguío	Código
Pala 1	PA_01_X
Pala 2	PA_02_X
PC 8000	PC_01_X
Cargador Frontal 1	CF_01_X
Cargador Frontal 2	CF_02_X

El sufijo X varía dependiendo de las veces que el equipo cambie de posición, por ejemplo, si la pala 1 se mantiene en el mismo lugar en el periodo de tiempo representado por un grupo de trabajo, se debe ingresar al programa un solo equipo llamado PA_01_01, en cambio, si esta cambia de posición 3 veces, se deben agregar 3 palas 1 con los nombre de PA_01_01, PA_01_02 y PA_01_03

La Figura 13 muestra locaciones de descarga y equipos de carguío agregados a un modelo de simulación.

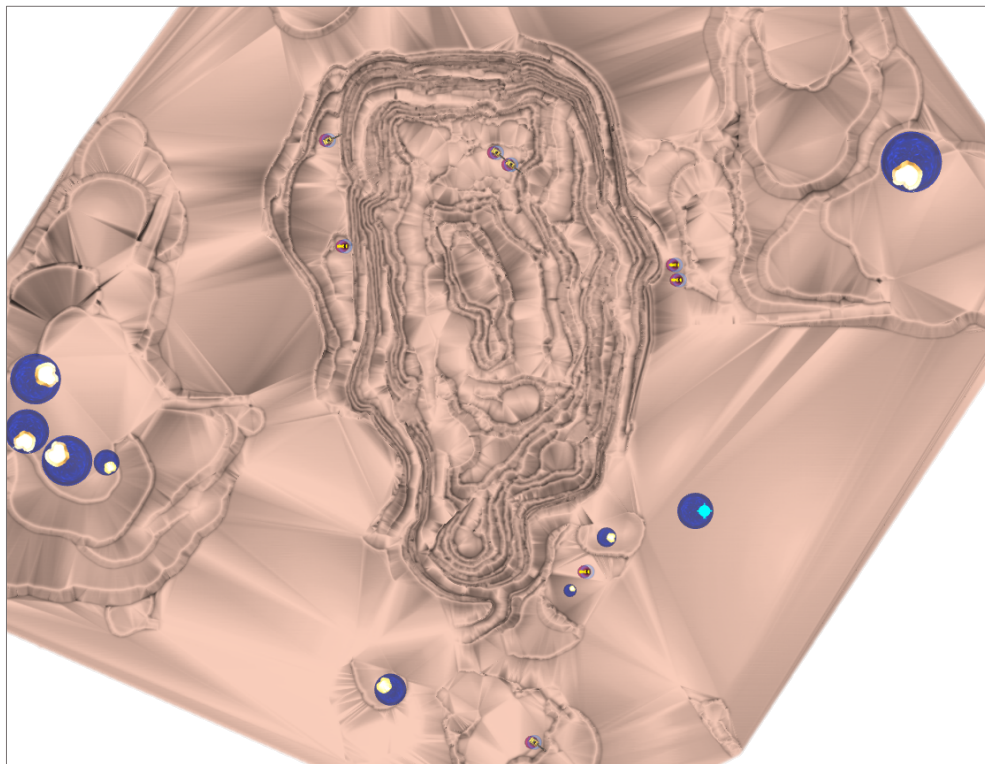


Figura 13. Ubicación de equipos de carguío y locaciones de descarga.

5.1.2 Parámetros

Los parámetros son valores fijos que no presentan variación dentro de un modelo de simulación, pero sí pueden variar de un modelo a otro. Los perfiles de velocidad se mantienen constantes en todo modelo de simulación, mientras que la flota, plan minero, zonas y disponibilidad de palas varían. Su valor se extrae o determina en base al grupo de días del plan minero que se desee simular o características de las locaciones de carga y descarga.

5.1.2.1 Flota

La cantidad de camiones utilizados para la simulación son los que se encuentran operativos. Para obtener la cantidad se debe ocupar la siguiente fórmula:

Ecuación 10. Número de camiones.

$$\text{Número de camiones} = 18 * \frac{\sum_i^n (\text{Disponibilidad Física } [\%]_i * \text{Tonelaje Total}_i)}{\sum_i^n \text{Tonelaje Total}_i}$$

Siendo i el primer día del grupo que se va a simular y n el último día del grupo que se va a simular. El valor de disponibilidad física se debe extraer desde el plan minero.

5.1.2.2 Plan minero

El plan minero trae mucha información relacionada con los equipos y el material que se va a transportar. Para construir el plan en el modelo de simulación se utilizó la siguiente información desde los planes:

- Tonelaje total extraído por equipo de carguío
- Punto de descarga de cada tonelaje extraído por los equipos de carguío

A modo de ejemplo, la Tabla 18 representa el un plan minero para la PC_01 en un cierto periodo de tiempo. Cabe notar que este equipo en el tramo de tiempo seleccionado para el ejemplo se ubicó en 2 partes distintas, razón por la cual existen dos PC_01.

Tabla 18. Plan minero para PC_01.

Pala	Material	Punto de descarga	Meta [t]	Total, por pala [t]
PC_01	EST_1	BTDR_OE_01	1.238	101.720
		BTDR_OE_05	616	
	MIN_1	CHANCADOR	89.387	
		STCK_01_03	4.889	
		STCK_01_05	5.268	
		STCK_05_01	322	
PC_01_02	MIN_1	CHANCADOR	1.953	42.473
		STCK_01_03	11.779	
		STCK_01_05	10.590	
		STCK_05_01	18.151	

5.1.2.3 Disponibilidad de pala

Cuando una pala en un mismo periodo de simulación se ubica en dos sectores es necesario asignar que tiempo es el que estará funcionando en cada uno de estos lugares. Para esto se considera el tonelaje total que mueve en cada locación en el periodo total de evaluación y se realiza una proporción en una base a 24 horas de operación para asignar el tiempo que estará operativa (en el software se nombra como disponibilidad). La siguiente tabla muestra el tonelaje que mueve la PC_01 en cada una de las ubicaciones.

Tabla 19. Periodo de disponibilidad de PC_01 en ambas locaciones.

Equipo	Tonelaje	Horas	Inicio	Término
PC_01_01	101.720	16:55:50	0:00:00	16:55:50
PC_01_02	42.473	7:04:10	16:55:50	0:00:00

Como se puede ver, el periodo que una pala estará operativa en una ubicación es proporcional al tonelaje que se extrae de esa locación. Cabe destacar que no se consideran tiempos de traslado de pala o cargador frontal.

5.1.3 Editor

La etapa de edición es en donde el usuario que está construyendo el modelo incluye diferentes características, estas se realizan dentro del programa en el panel de edición.

5.1.3.1 Dibujar caminos principales

Los caminos principales son los que conectan las caminos de locaciones de carga con las de descarga, además de generar interconexiones entre diferentes rutas. Estos caminos no incluyen los dibujados para entrar a las zonas de carguío y son bidireccionales.

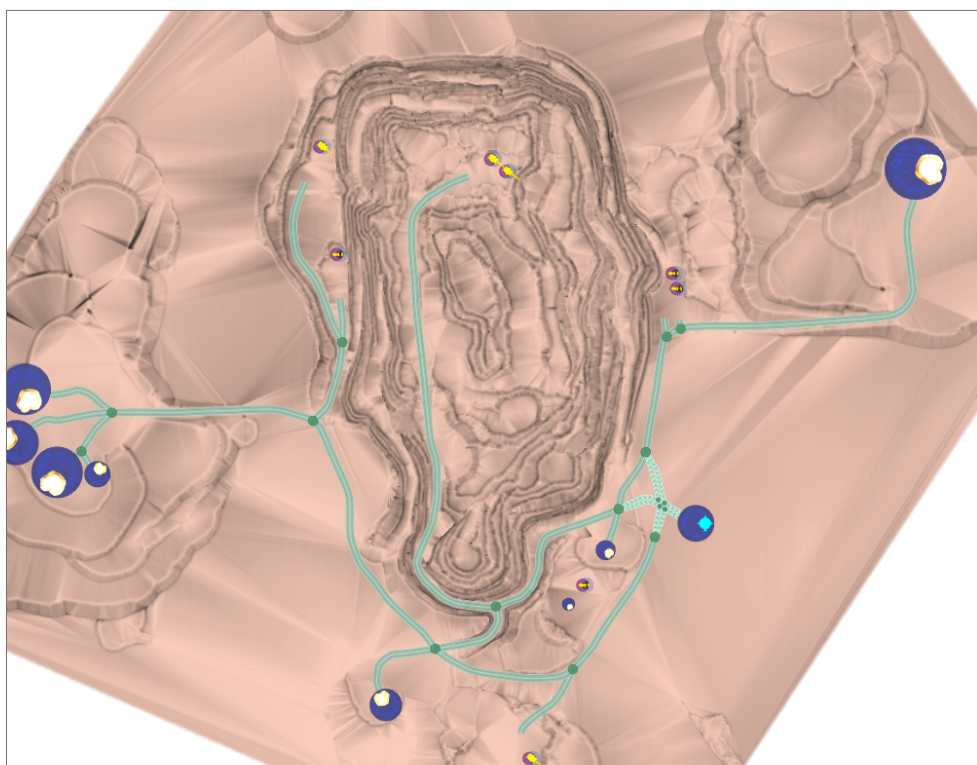


Figura 14. Caminos principales.

Para el área de caminos que conecta el sector de chancado se dibujan caminos de un sentido para permitir agregar de manera correcta las señaléticas, sin embargo, son caminos principales.

5.1.3.2 Dibujar caminos de locaciones de carga

Los caminos de locaciones de carga se dibujan entre el camino principal y la pala o cargador frontal. La extensión de estos es igual al de la locación de descarga indicada en frontrunner. Como lo que se espera de esta metodología es que se simulen planes mineros futuros, se recomienda que el

tamaño de estos caminos esté basado en locaciones pasadas que sirvan como referencia para conocer el tamaño. La Figura 15 muestra un ejemplo de tamaño de locación obtenida desde frontrunner (flecha roja).

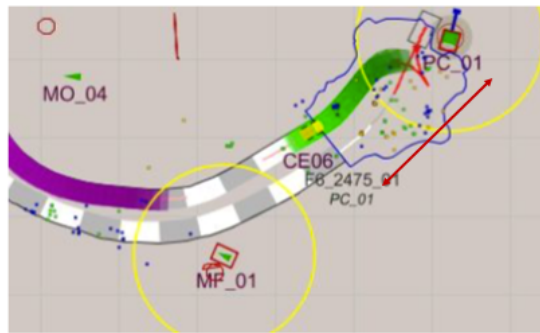


Figura 15. Ejemplo de locación de descarga obtenida desde frontrunner.

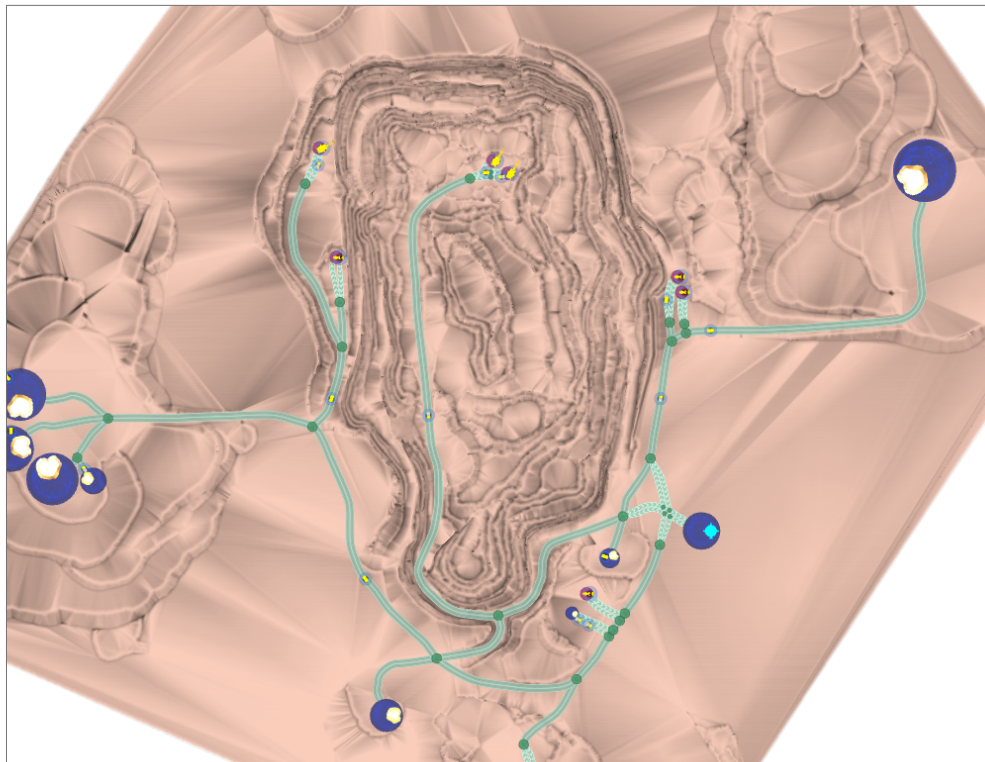


Figura 16. Caminos de locaciones de carga.

La Figura 16 muestra todos los caminos de locaciones de carga del ejemplo utilizado, compuestos por:

- Un camino de locación de carga de entrada, unidireccional, que une el camino principal con la locación de carga.
- Un camino de locación de carga de salida, unidireccional, que une la locación de carga con el camino principal.

5.1.3.3 Crear interacción autónoma

La interacción autónoma se debe generar en todas las intersecciones de caminos principales y de locaciones de carga. Como regla general si un camión está saliendo de una locación de descarga debe encontrarse con un disco pare, que tendrá una zona de visibilidad de 70 metros. En el caso de ser un camino de salida o entrada a botadero o stock o una intersección de caminos principales se debe poner un ceda el paso con una zona de visibilidad de 130 metros. Estas dimensiones fueron obtenidas mediante distintas pruebas de simulación con el programa hasta obtener zonas de visibilidad que se adaptaran a todos los casos simulados en el periodo de construcción de metodología de simulación.

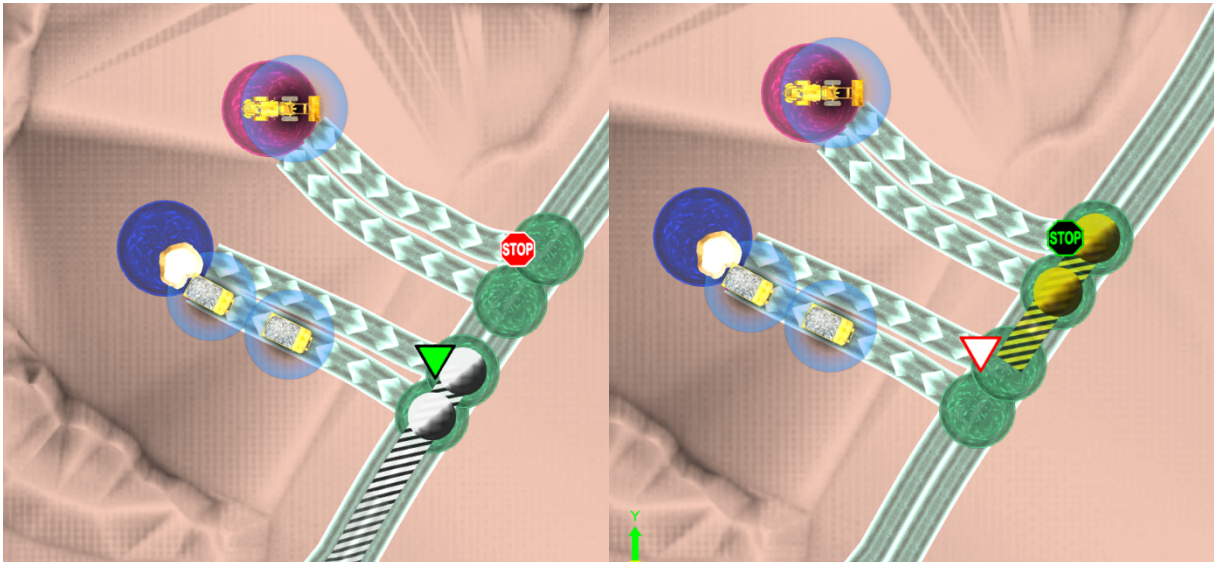


Figura 17. Disco pare y ceda el paso.

5.1.3.4 Zonas de reducción de velocidad

El camión por defecto en cualquier ruta adquiere el perfil de velocidad base, sin embargo, existen diferentes sectores dentro del recorrido de los camiones en donde se comportan con un perfil de velocidad distinto. Para indicar al camión en qué sector debe cambiar de velocidad se asignan “Zonas de reducción de velocidad” dentro de la ruta, cada una de estas están asociadas a uno de los perfil de velocidad secundarios encontrados en el capítulo anterior, tal como se indica en la Tabla 20.

Tabla 20. Zonas de reducción de velocidad y perfil de velocidad asociado.

Zona	Perfil de velocidad
Base	Base
Curva	Curva
Chancador	Chancador
Entrada salida botadero	Entrada salida botadero
Aumento entrada	Aumento entrada
Aumento salida	Aumento
Entrada pala	Entrada pala
Salida pala o cargador frontal	Salida pala

La mayoría de las zonas que se deben agregar al modelo de simulación están relacionadas con la entrada a alguna zona de carguío, a excepción de las zonas “Entrada salida botadero”, “Chancador” y “Curva”.

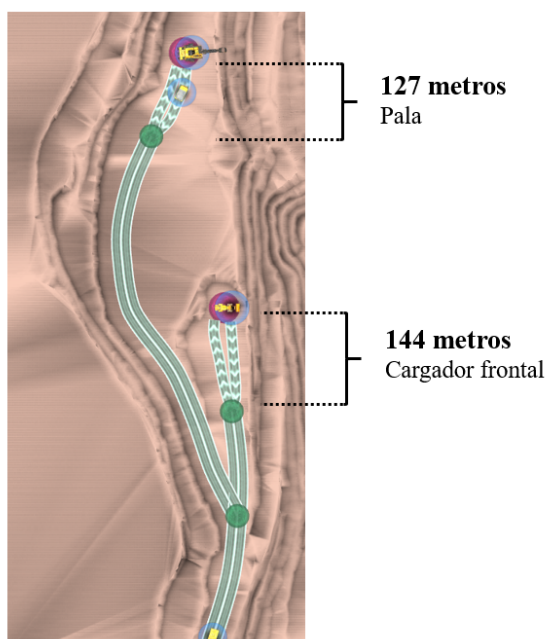


Figura 18. Locaciones de carguío para ejemplo de zonas.

La Figura 18 representa dos locaciones de carga, una correspondiente a una pala, con una extensión de camino de 127 [m] y otra a un cargador frontal, con un largo de camino de 144 [m]. Estos son los dos tipos de equipos de carguío que se pueden encontrar en ERM, los cuales presentan algunas diferencias en la extensión de estas zonas tal como se explicará a continuación.

I. Zona “Salida pala o cargador frontal”

Esta zona representa la velocidad que adquiere el camión en la simulación al salir de la locación donde se ubica el equipo de carguío. La extensión es el 39% del largo del camino de salida de la locación de descarga en el caso de palas y el 45% para cargadores frontales. La Figura 19 muestra la extensión de estas zonas en color celeste para el ejemplo.

- Zona "Salida pala o cargador frontal", *pala* = $39\% * 127 [m] = 49 [m]$
- Zona "Salida pala o cargador frontal", *cargador frontal* = $45\% * 144[m] = 64 [m]$

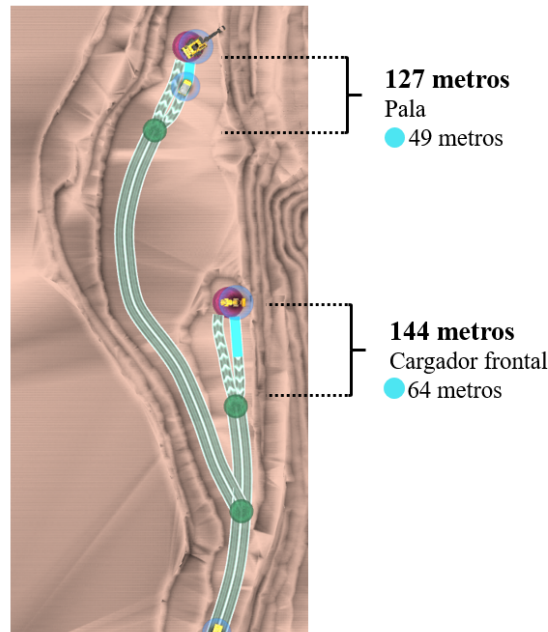


Figura 19. Zona de “Salida pala o cargador frontal” para ejemplo de zonas.

II. Aumento salida

Representa la transición entre la velocidad de la zona “Salida pala o cargador frontal” y la velocidad base del camión. La extensión es igual al largo del camino de salida de la pala o cargador frontal. La Figura 20 muestra la extensión de estas zonas en color verde para el ejemplo.

- Zona "Aumento salida", *pala* = $127 [m]$
- Zona "Aumento saidal", *cargador frontal* = $144 [m]$

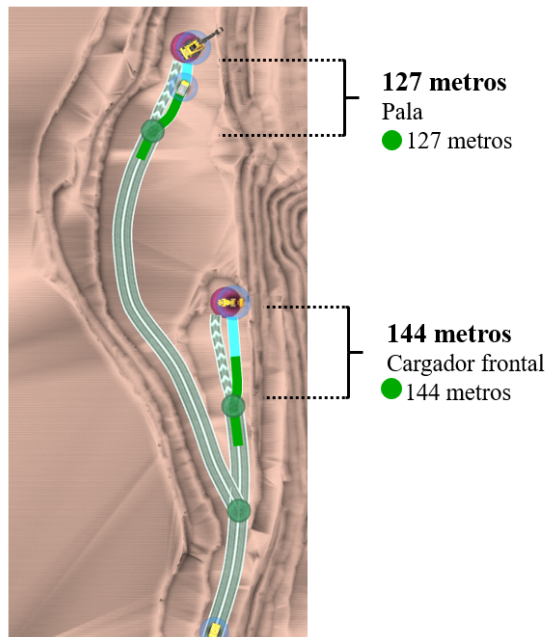


Figura 20. Zona de "Aumento salida" para ejemplo de zonas.

III. Entrada pala o cargador frontal

Representa la disminución de velocidad del equipo de transporte al entrar a la locación de carguío. La extensión es igual al largo del camino de entrada de la pala o cargador frontal. La Figura 21 muestra la extensión de esta zona de color rosado para el ejemplo.

- Zona "Entrada pala o cargador frontal", *pala* = 127 [m]
- Zona "Entrada pala o cargador frontal", *cargador frontal* = 144[m]

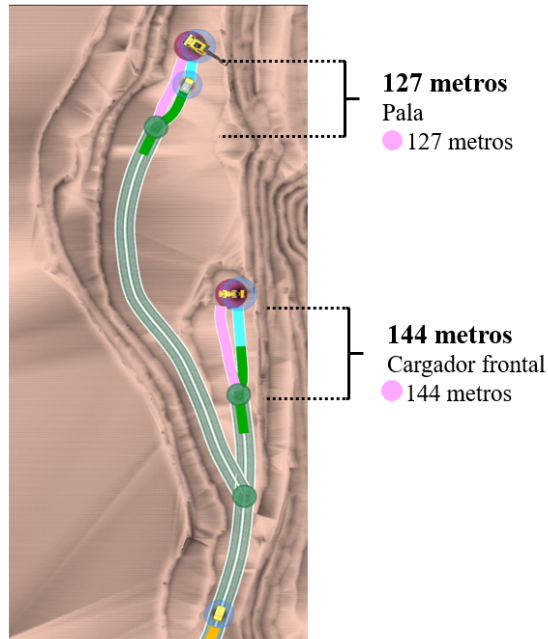


Figura 21. Zona de “Entrada pala” para ejemplo de zonas.

IV. Aumento entrada

Representa, al igual que la zona “Aumento salida”, la transición entre la velocidad base y la zona “Entrada pala o cargador frontal”. La extensión de zona es igual al 70% del largo del camino de entrada de pala o cargador frontal, sin embargo, parte de este 70% ya está representado por la zona “Aumento salida”, por lo tanto, al resultado del 70% de la extensión de esta zona hay que restarle el coincidente con la zona de “Aumento salida”. La Figura 22 muestra en color café la extensión final de esta zona.

- Zona "Aumento entrada", *pala* = $70 [\%] * 127 [m] - 49 [m] = 39,9 [m]$
- Zona "Aumento entrada", *cargador frontal* = $70 [\%] * 144[m] - 64 [m] = 36,4 [m]$

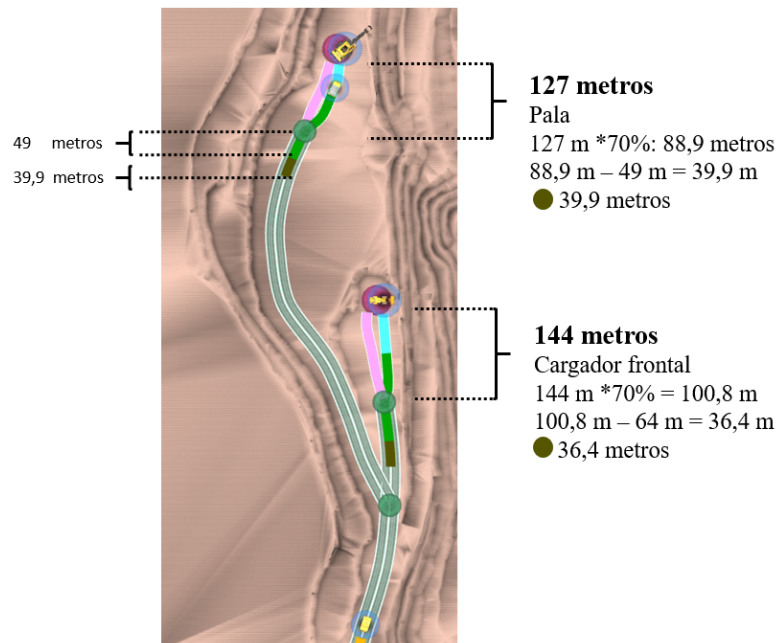


Figura 22. Zona de “Aumento entrada” para ejemplo de zonas.

Finalmente, con los pasos anteriores se construyen las disminuciones de velocidad que se generan en los caminos de entrada a las locaciones de carga.

V. Curva

Esta zona se debe agregar en todos los sectores de la ruta en donde se detecte una curva. Agregar esta zona requiere del criterio del usuario. La Figura 23 muestra ejemplos en donde se debe agregar esta zona, que se puede utilizar como guía para verificar visualmente si una curva dibujada en un nuevo modelo de simulación tiene un radio de curvatura similar a las expuestas en la imagen.

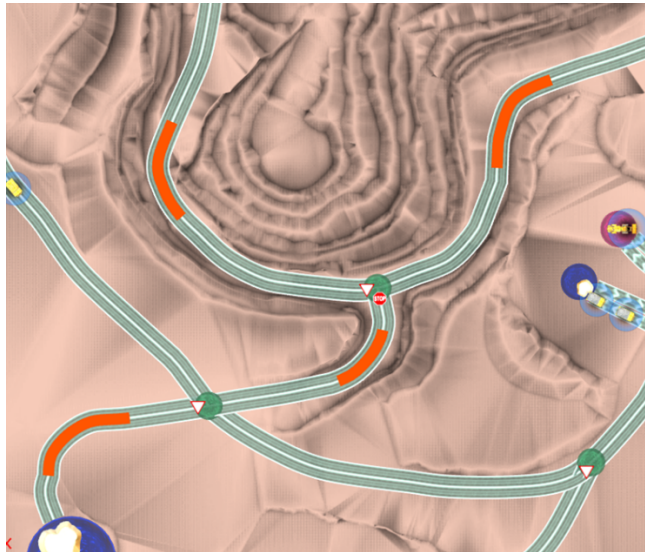


Figura 23. Ejemplo zonas "Curva".

VI. Entrada salida botadero-stock

Zona creada para las entradas y salidas de botaderos y stocks. Las dimensiones de estas zonas son variables. Como regla general se extienden hasta que se llegar a un intersección, pero no pueden sobrepasar los 200 [m]. La Figura 24 muestra un ejemplo de aplicación de esta zona.

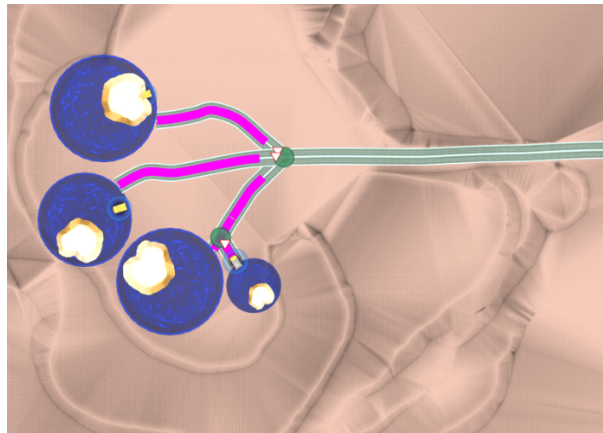


Figura 24. Ejemplo zonas "Entrada salida botadero"Chancador

VII. Chancador

El sector de intersección de caminos que conducen a la entrada del chancador primario siempre presenta la misma disposición de la zona "chancador", desde cada intersección esta

zona se extiende 30 metros. La Figura 25 muestra como debe ir siempre configurada la zona de camino de chancado.

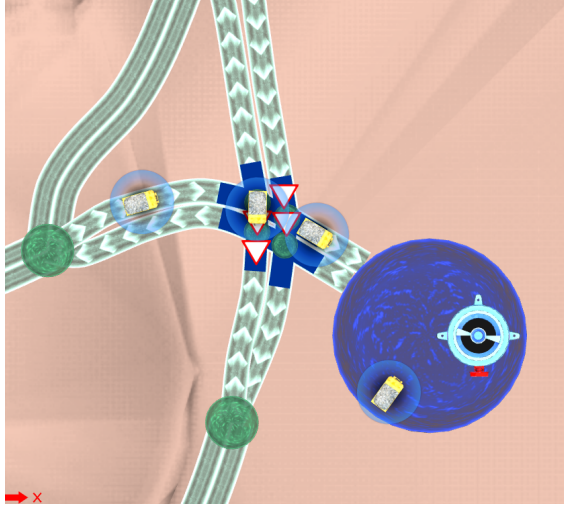


Figura 25. Zona Chancador.

La Figura 26 muestra un ejemplo de modelo de simulación con todas las zonas de reducción de velocidad incluidas.

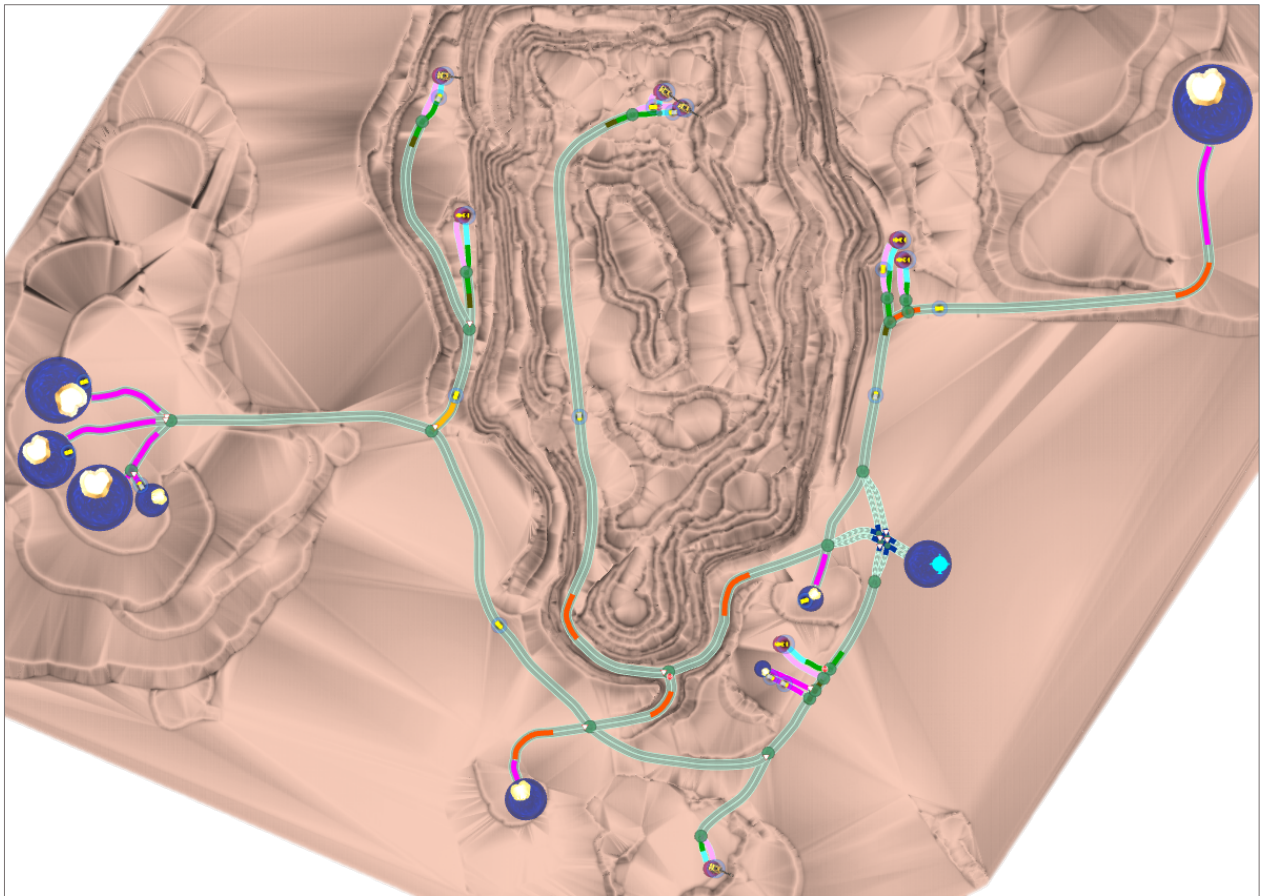


Figura 26. Ejemplo de modelo de simulación con todas las zonas de reducción de velocidad incluidas.

5.1.4 Ejecución

Para poder ejecutar la simulación es necesario ingresar la cantidad de horas que se va a correr el modelo, además, se debe verificar que todo esté bien construido para que el programa pueda realizar la simulación.

5.1.4.1 Tiempo de simulación

Las simulaciones se realizan en periodos de tiempo. Para conocer cuántas horas se debe ejecutar un modelo es necesario extraer de los grupos de días que se simularán la siguiente información desde el plan mensual:

- **UEBD_G [%]**: este parámetro está definido diariamente, por lo tanto, se debe hacer un promedio para determinar el valor que representa el grupo de días que se está simulando.

Ecuación 11. UEBD general.

$$UEBD_g[\%] = \frac{\sum_i^n (UEBD_i [\%] * Tonelaje Total_i [t])}{\sum_i^n Tonelaje Total_i [t]}$$

Siendo i el primer día del grupo que se va a simular y n el último día del grupo que se va a simular.

- **Horas disponibles_T [%]:** las horas disponibles totales del grupo de días escogido se calcula con la siguiente fórmula:

Ecuación 12. Horas disponibles totales.

$$Horas disponibles_T [h] = \sum_i^n Disponibilidad F\u00edsica_i [\%] * Flota nominal_i * 24 [h]$$

Siendo i el primer día del grupo que se va a simular y n el último día del grupo que se va a simular.

La ecuación para calcular las horas efectivas de un grupo de simulación se muestra a continuación:

$$Horas efectivas (Hef) = UEBD_G [\%] * Horas disponibles_T [h]$$

Para determinar la relación entre horas efectivas y tiempo de simulación, se relacionó el tiempo de simulación necesario para cumplir con el tonelaje real transportado por los camiones en los grupos de la Tabla 15, junto con las horas efectivas reales que fueron necesarias para cumplirlo, además, los grupos se subdividieron de acuerdo con si estos contaban con a lo más una pala en superficie o más de una, de esto resultan dos ecuaciones que relacionan el tiempo de simulación necesario para representar una cantidad de horas efectivas.

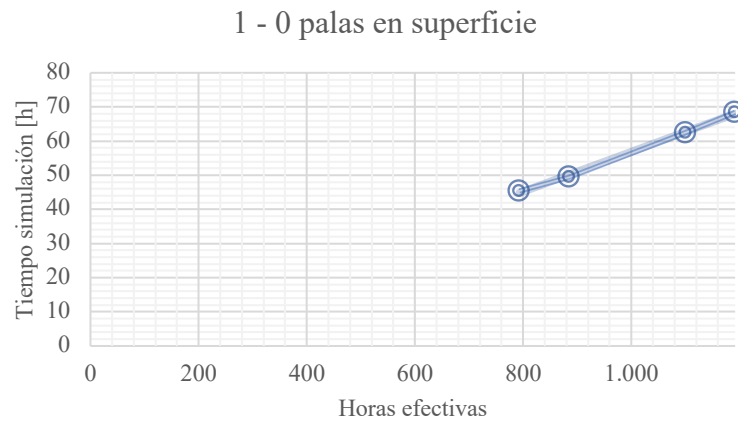


Gráfico 6. Tiempo de simulación en función de las horas efectivas para el caso de 0-1 palas en superficie.

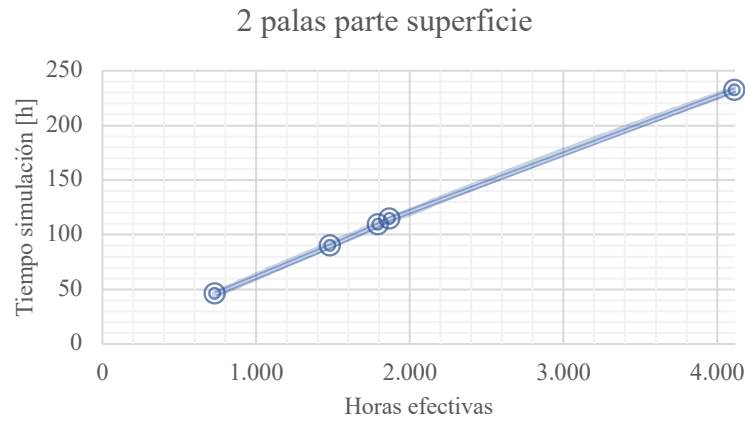


Gráfico 7. Tiempo de simulación en función de las horas efectivas para el caso de 2 palas en superficie.

La Tabla 21 presenta las dos ecuaciones para determinar el tiempo de simulación en función de las horas efectivas de un grupo de simulación.

Tabla 21. Ecuaciones para determinar el tiempo de simulación.

Palas en superficie	Tiempo simulación [h]
1 - 0	$0,0583 * Heff$
2	$-2 * 10^{-6} * Heff^2 + 0,065 * Heff - 1,522$

5.1.4.2 Verificación

Para comprobar que el modelo de simulación esté bien construido el programa Orchestra verifica que todos los componentes para ejecutar el modelo estén bien ingresados. Cualquier anomalía que impida el correcto funcionamiento del sistema es reportada al usuario, indicando en donde ocurre el problema. En el caso que se estén reportando resultados anómalos posterior a la ejecución de la simulación, se puede recurrir al visualizador de simulación, el cual muestra en forma de animación como ocurrieron todos los procesos que ejecutó el programa, de esta manera se pueden detectar anomalías en el proceso.

5.1.4.3 Simulación

La simulación es el paso final para poder ejecutar el modelo, solo se requiere ingresar el tiempo de simulación calculado anteriormente y haber verificado que el modelo esté bien construido. Al terminar esta etapa el programa entregará los resultados obtenidos de la ejecución del modelo de simulación construido.

5.2 Validación del modelo

El error (Ecuación 13) de la velocidad y tonelaje total obtenido de la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta, respecto a la real de los grupos de la Tabla 15, se muestra en los siguientes gráficos:

Ecuación 13. Error

$$Error [\%] = \frac{Velocidad/Tonelaje\ real - Velocidad/Tonelaje\ simulado}{Velocidad/Tonelaje\ real}$$

Error de estimación velocidad media, cargado y descargado de los modelos de simulación..

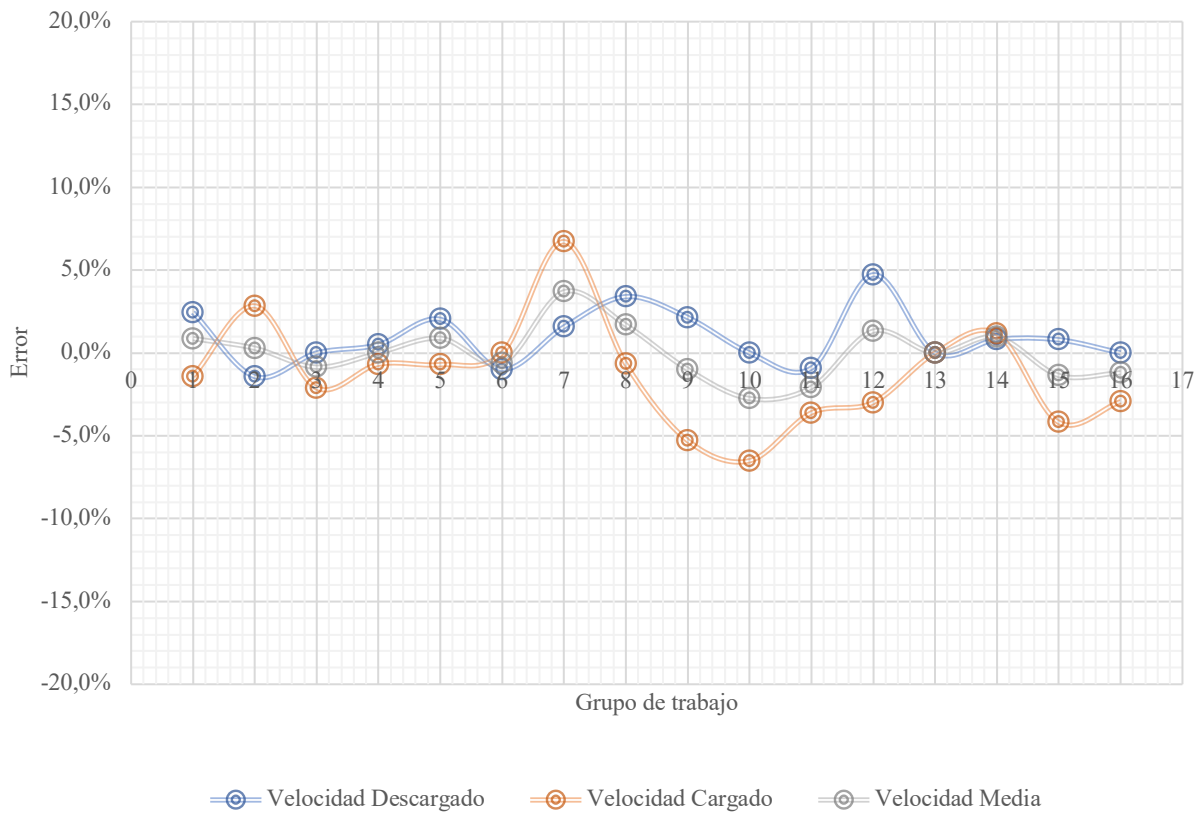


Gráfico 8. Error de estimación velocidad media, cargado y descargado de los modelos de simulación..

El error de estimación respecto a la velocidad real varía entre un 4% y un -3% para velocidad media, entre un 6,7% y un -6,5% para velocidad cargado y entre un 4,7% y un -1,4% para velocidad descargado. El porcentaje positivo representa una subestimación de velocidad mientras que el negativo una sobreestimación de velocidad.

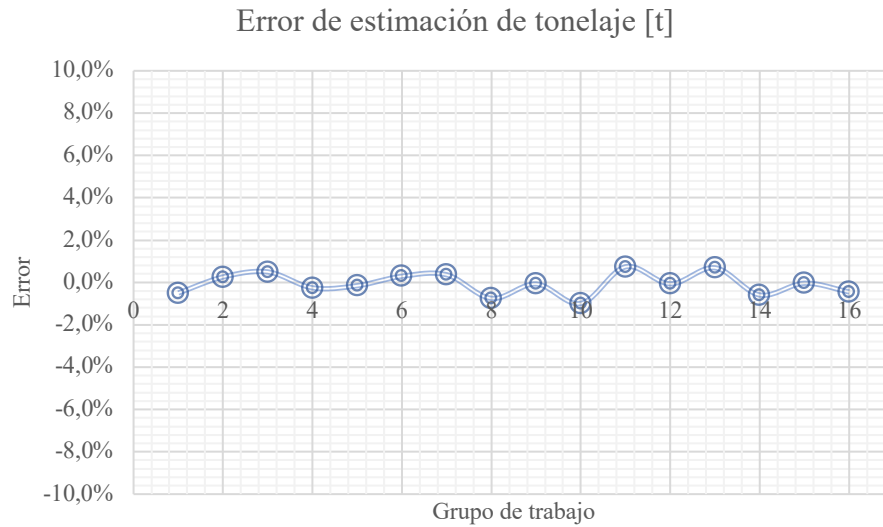


Gráfico 9. Error de estimación de tonelaje [t] total de los modelos de simulación.

Para el caso de tonelaje [t] total transportado en cada grupo de trabajo el error obtenido es bajo, siendo un -0,8 % el error más alto obtenido.

5.3 Conclusiones del capítulo

Al comparar los modelos de simulación realizados para los grupos de trabajo entre los meses de diciembre 2018 y enero-febrero 2019 con los valores reales de velocidad se determinó que el error de estimación máximo para velocidad media fue de un 6,5%. De esto se desprende que el modelo mejora notoriamente la brecha inicial de 26% de error de estimación de planes mensuales, siendo una mejor herramienta para predecir la velocidad de la flota. El bajo error de la predicción del tonelaje total transportado [t] era esperable, debido a que esta fue la variable de control para determinar cuándo un modelo estaba correctamente calibrado. Con los resultados obtenidos y el bajo error de estimación concluyen que la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta es válida.

Capítulo 6 PROYECCIÓN DE EFECTIVIDAD

Una de las principales finalidades de la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta es que sobre la base de lo entregado en los planes mensuales se pueda predecir la velocidad que alcanzarán los equipos de transporte en base a la planificación propuesta. Para determinar la efectividad de la metodología se tomaron los planes mensuales de los meses de marzo a mayo 2019, agrupando los días en los grupos de trabajo presentados en la Tabla 16. Debido a que el resultado de interés para ERM es la velocidad media, solo esta se tomará como referencia comparativa para determinar la efectividad de la metodología propuesta. La comparación de velocidades obtenidas de cada periodo de simulación se muestran a continuación:

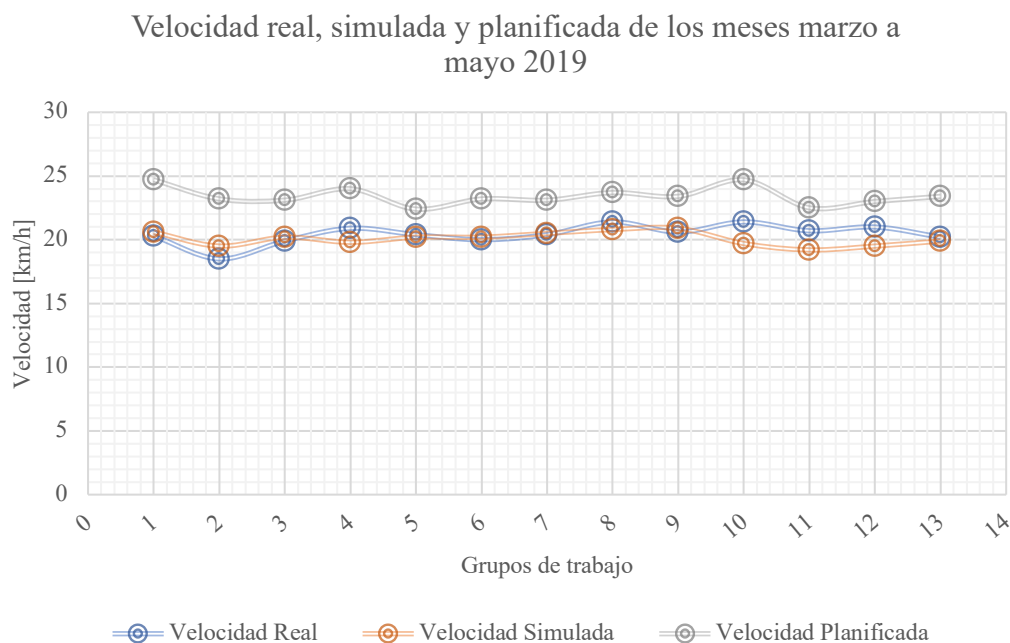


Gráfico 10. Velocidad real, simulada y planificada de los meses marzo a mayo 2019.

El Gráfico 10 muestra la velocidad real, simulada y planificada de los meses de los grupos de trabajo, como se puede apreciar, la metodología de simulación pronostica la velocidad media de los camiones con un error máximo del 2%, en comparación con el 16% de error de la velocidad planificada en los planes mensuales. Cabe destacar que si se compara la ubicación de los equipos de carguío planificada respecto a la real está casi no varía en palas, pero si en cargadores frontales, La Tabla 46 de ANEXOS muestra esta variación.

Horas efectivas reales v/s simuladas y movimiento mina real y simulado de los meses marzo a mayo 2019

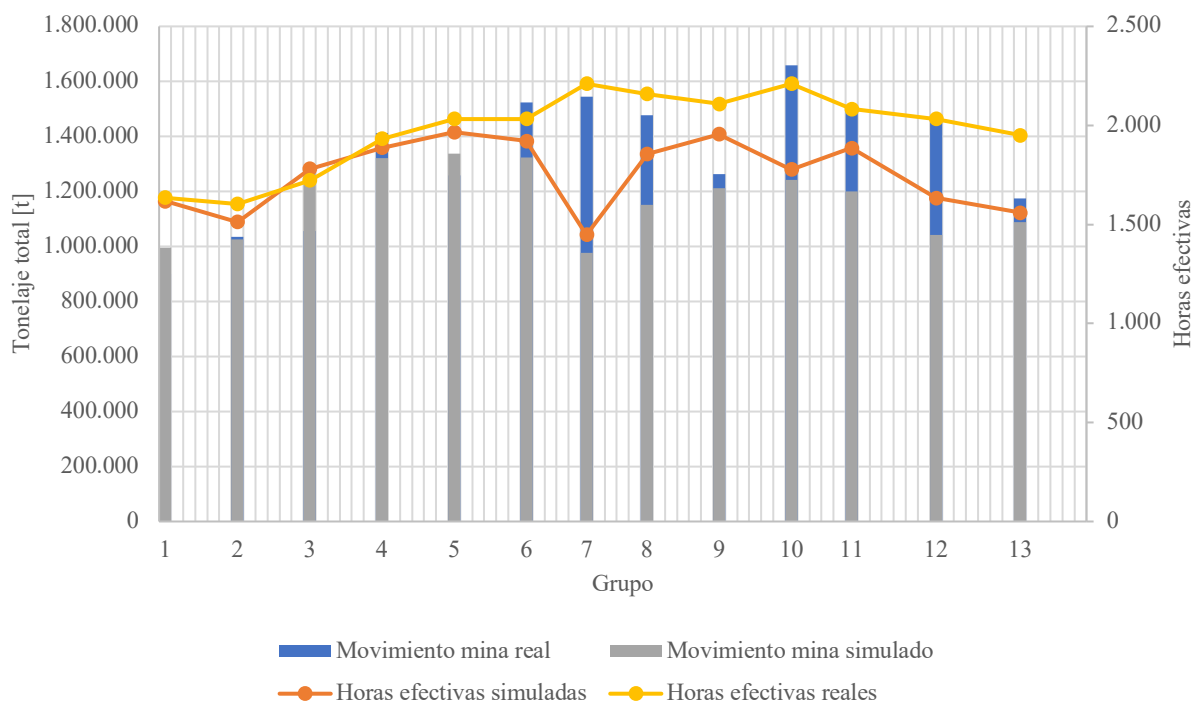


Gráfico 11. Horas efectivas reales v/s simuladas y movimiento mina real y simulado de los meses marzo a mayo 2019.

El tiempo de simulación para cada grupo de trabajo se obtuvo mediante la aplicación de las fórmulas de la Tabla 21, que relacionan la cantidad de horas efectivas con el tiempo de simulación. Del Gráfico 11 se puede observar que el tonelaje total solo fue correctamente estimado en algunos grupos de trabajo. Si comparamos las horas efectivas reales de cada grupo y las planificadas, las cuales repercuten directamente en aumentar o disminuir el tonelaje total transportado en los modelos de simulación, debido a que los camiones tienen más tiempo para realizar una mayor cantidad de ciclos, existe cierta relación entre los grupos en que el programa no logró predecir bien el tonelaje y cuando existió error en pronosticar las horas efectivas de operación en el plan, lo cual repercute en el tonelaje total simulado. Esta explicación es válida para los grupos 7, 8, 10, 11 y 12, quedando fuera los grupos 9 y 13, que a pesar de que las horas efectivas reales y planificadas presentaban diferencias considerables, el programa estimó con un bajo error respecto al real el tonelaje total transportado. El error de estimación de tonelaje varía entre un 1% y un 37%, siendo el promedio un 10%.

6.1 Conclusiones del capítulo

Verificar la efectividad del modelo tiene relación con determinar si la metodología se comporta y predice de manera correcta la velocidad media de la flota basándose en la información extraída desde los planes mensuales. Los meses usados para este fin fueron desde marzo a mayo 2019, resultando que la metodología estima con un error máximo de 2% la velocidad media, siendo una mejor herramienta para predecir la velocidad media de la flota. Respecto a la predicción de tonelaje, el programa acierta en 7 grupos de los 13 simulados, no demostrándose completamente la efectividad de esta metodología en la estimación de tonelaje total, ya que el error de predicción de tonelaje varía entre un 1% y un 37%, no considerándose rangos aceptables si se compara con el error logrado para la predicción de velocidad.

Capítulo 7 CONCLUSIONES

Los tiempos de carga, descarga y aculatamiento se representan en los planes mensuales como números fijos, sin embargo, del análisis de datos se desprende que estos tiempos tienen una gran desviación estándar en relación a su media, siendo solo la descarga en chancado en el que se obtuvo una menor desviación de estándar. Lo anterior indica que usar distribuciones de probabilidad para cada uno de estos tiempos en vez de tiempos fijos, los cuales son utilizados por planificación de ERM, logra representar de manera más realista el comportamiento estos tiempos y sus variaciones.

El perfil de velocidad base del camión autónomo de ERM se encontró a través de una combinación de aplicación de curvas rimpull, las cuales son proporcionadas por el proveedor, y datos reales de la velocidad media de los equipos, con el fin de encontrar el *Rolling Resistance* de la superficie del camino, que a pesar de haber sido empleado en simulaciones realizadas por Komatsu, este se había estimado como un valor estándar de 2%, sin realizar una corroboración de si este valor representa las condiciones de operación de ERM. Del presente estudio, mediante una iteración simple, se concluyó que este factor es 3,6%, mayor en un 1,6% del utilizado por Komatsu.

Al comparar los modelos de simulación realizados para los grupos de trabajo entre los meses de diciembre 2018 y enero-febrero 2019 con los valores reales de velocidad se determinó que el error de estimación máximo para velocidad media fue de un 6,5%. De esto se desprende que el modelo mejora notoriamente la brecha inicial de 26% de error de estimación de planes mensuales, siendo una mejor herramienta para predecir la velocidad de la flota. El bajo error de la predicción del tonelaje total transportado [t] era esperable, debido a que esta fue la variable de control para determinar cuándo un modelo estaba correctamente calibrado. Con los resultados obtenidos y el bajo error de estimación concluyen que la metodología de construcción de modelo de simulación propuesta es válida.

Verificar la efectividad del modelo tiene relación con determinar si la metodología se comporta y predice de manera correcta la velocidad media de la flota basándose en la información extraída desde los planes mensuales. Los meses usados para este fin fueron desde marzo a mayo 2019, resultando que la metodología estima con un error máximo de 2% la velocidad media, siendo una mejor herramienta para predecir la velocidad media de la flota. Respecto a la predicción de tonelaje, el programa acierta en 7 grupos de los 13 simulados, no demostrándose completamente la efectividad de esta metodología en la estimación de tonelaje total, ya que el error de predicción de tonelaje varía entre un 1% y un 37%, no considerándose rangos aceptables si se compara con el error logrado para la predicción de velocidad.

Respecto al objetivo principal de este estudio, correspondiente a generar una metodología de construcción de modelo de simulación mediante el software Orchestra de TI Mining, replicable en el tiempo para utilizarlo como método de validación de movimiento mina y velocidad de planes mensuales, se logró generar esta metodología que depende solo de datos extraídos desde el plan y playbacks pasados. La verificación demostró que la estimación de velocidades es aceptable y mejor que la pronosticada por planificación, sin embargo, para tonelaje total no se lograron obtener los

mismos resultados, por lo tanto, para la metodología de simulación propuesta se logró comprobar su efectividad solo la predicción de velocidad.

Capítulo 8 RECOMENDACIONES

En relación al software Orchestra de TI mining, se sugiere adaptar el programa para lograr simular la interacción entre los equipos autónomos, ya que las simulaciones se tuvieron que construir utilizando características propias de los camiones convencionales. Incluir el sistema de permisos permitiría que la simulación sea más realista. También se recomienda incluir la opción de carga por un lado en palas, para lograr reproducir realmente la operación de ERM.

En los planes mensuales los tiempos de carguío de palas y cargadores frontales, aculatamiento y descarga de camiones son utilizados como una constante, que no presentan variabilidad, sin embargo, al estudiar los datos de los meses de diciembre 2018 y enero-febrero 2019 se evidencia que estos tiempos se comportan según una distribución de probabilidad. Las distribuciones encontradas representan con alta confiabilidad de cómo se comportan en la realidad, como así lo indica el índice de Kolmogorov-Smirnov. Incluir estos tiempos en los planes mensuales serviría para darle mayor variabilidad al sistema, además de retroalimentar lo estimado con la realidad, nutriendo aún más la confiabilidad de lo proyectado.

El *Rolling Resistance* no es un factor que se utilice en la estimación de velocidades de ERM. Komatsu reportó que este factor es de un 2%, sin embargo, no fue calculado específicamente para ERM, ya que este es un valor estándar que se utiliza para calcular la velocidad en minas. Como se mencionó en el capítulo anterior, este factor en base al resultado de la iteración es de un 3,6%. Las implicancias de esta diferencia son que las que velocidades del camión subiendo se sobre estiman y las del bajando se subestiman, además, el *Rolling Resistance* al tener relación con la calidad de los caminos, estaría suponiendo una mejor calidad de la que en realidad posee ERM. Incluir este factor como un indicador de ERM podría servir para trazar la calidad de los caminos en el tiempo, además de conocer cómo repercutirá esto en la velocidad.

La estimación de horas efectivas se puede mejorar utilizando esta metodología para predecir las velocidades que lograrán los camiones en un determinado periodo de simulación de un plan mensual. Combinar la planificación tradicional realizada en Excel con la simulación, permitiría mejorar la precisión de los datos estimados en los planes mensuales.

Se recomienda utilizar la metodología propuesta para complementar la planificación convencional realizada por ERM, usando esta herramienta para estimar velocidades. También se propone estudiar otra forma de aplicación de esta metodología, usándola para obtener las horas efectivas necesarias para cumplir el tonelaje objetivo del plan en estudio, y no ingresando este parámetro como un input, de esta manera, el plan convencional puede utilizar las horas efectivas como dato en los planes. Lo anterior queda sujeto a que se logre calibrar de manera más precisa la relación entre horas efectivas, tonelaje total transportado y tiempo de simulación, ya que como se indicó anteriormente, este factor no logró los resultados de precisión esperados.

Capítulo 9 BIBLIOGRAFÍA

- Vargas Vergara, M. A. (2011). *Modelo de planificación minera de corto plazo incorporando restricciones operacionales y de mezcla*. Santiago: Universidad de Chile.
- Cieslak, C. (2007). *Detecting Fractures in Classifier Performance*. University of Notredame.
- Covarrubias Mondaca, G. E. (2012). *Construcción y validación de una metodología de seguimiento para modelos de regresión logística*. Santiago: Universidad de Chile.
- Komatsu America Corp. (2007). *Performance curves 930E-4*. Estados Unidos.
- IM2. (2016). *Ánalysis sitema transporte autónomo (AHS) en división gabriela mistra (DGM), levantamiento modelo operacional autónomo*. Santiago: CODELCO.
- Rojas Conejo, M. (2009). *Descripción cuantitativa de los procesos de extracción reducción de mineral en la minería de cobre a cielo abierto*. Santiago: Universidad de Chile.
- Burgos Mardones, A. (2019). *Administración y operación del sistema autónomo*. Calama: CODELCO.
- Hays, R. (1990). *Surface Mining*. Colorado: Society for mining, metalurgy, and exploration, Inc.
- Soofastaei, A., Adair, L., Aminossadati, S., Kizil, M., & Knights, P. (2015). *Rolling resistance plays a critical role in fuel consumption of mining haul trucks*. Australia: Mining3, The University of Queensland Australia.
- CODELCO. (2017). *ASARCO distrito norte*. Santiago.
- Castro, R. (2010). *Manejo de minerales y ventilación - Camiones*. Santiago: Universidad de Chile.
- Tolvett, C. (2010). *Estudio de metodologías para el seguimiento de modelos de credit scoring utilizando regresión logística*. Santiago: Universidad de Chile.
- Banks, J., Carson, J., Barry, N., & David, N. (2009). *Discrete event sysem simulation fifth edition*. Pearson.
- Law, A. (2009). *How to Build Valid and Credible Simulation Models. Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference M.D. Rosseti, R.R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin, and R.G. Ingalls, eds.*

Capítulo 10 ANEXOS

Tabla 22. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo CF_01.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,0644	2
Gamma	0,0379	1
Weibull	0,0822	3

Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo CF_01

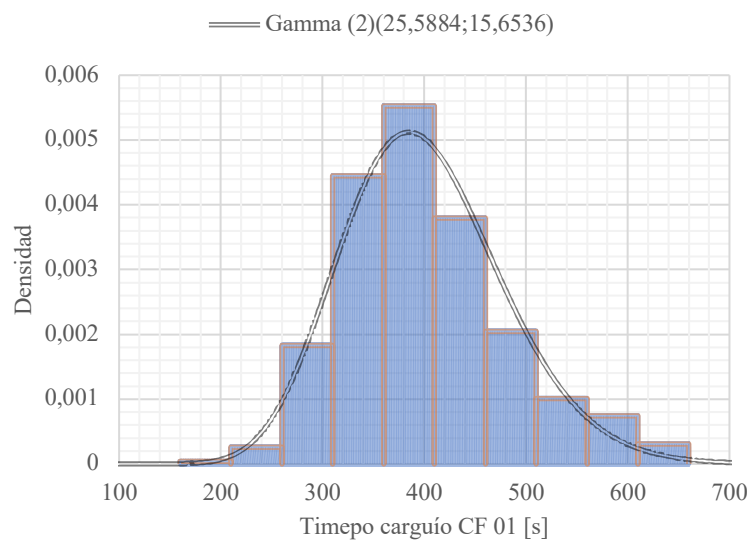


Gráfico 12. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo CF_01

Tabla 23. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo CF_02.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,0570	2
Gamma	0,0305	1
Weibull	0,0770	3

Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo CF_02

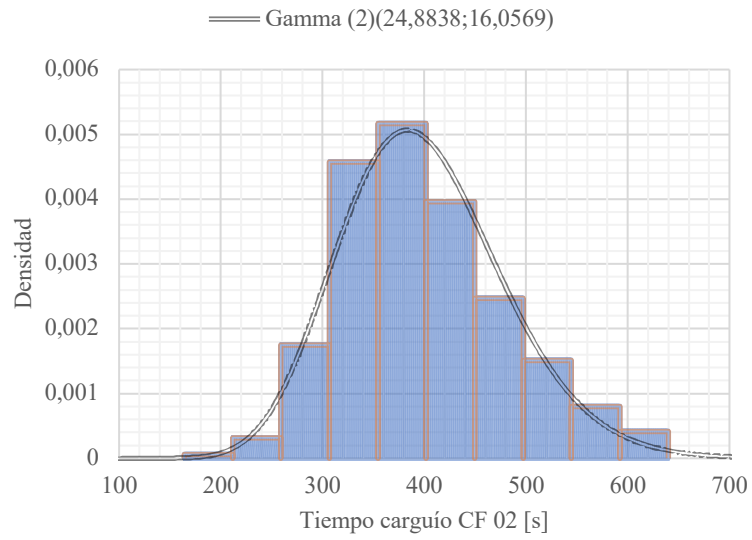


Gráfico 13. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo CF_02.

Tabla 24. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo PA_01.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,0698	2
Gamma	0,0387	1
Weibull	0,0816	3

Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo PA_01

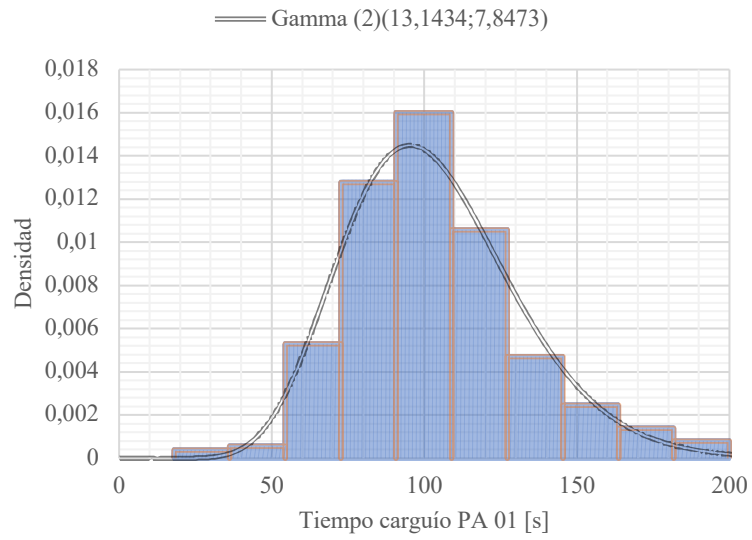


Gráfico 14. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo PA_01.

Tabla 25. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo PA_02.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,0752	1
Gamma	0,0790	2
Weibull	0,0968	3

Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Normal para equipo PA_02

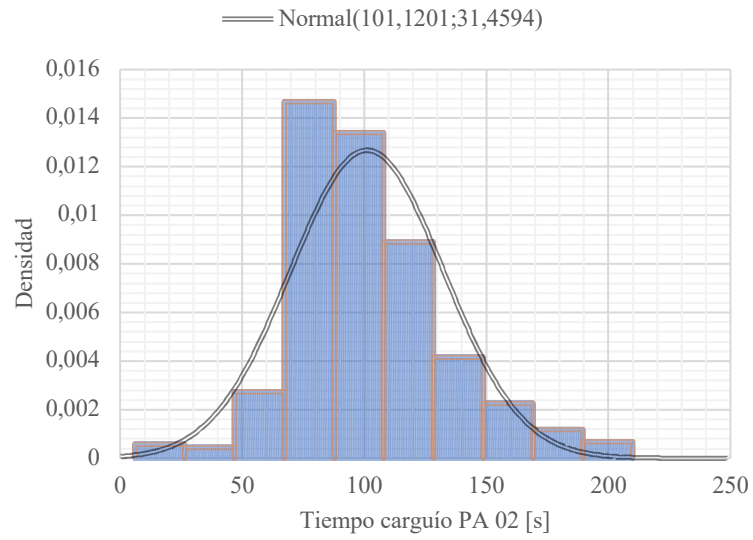


Gráfico 15. Función de distribución de probabilidad Normal para equipo PA_02.

Tabla 26. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de probabilidad de tiempo de carguío para el equipo PC_8000.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,0788	2
Gamma	0,0550	1
Weibull	0,0872	3

Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo PC_8000

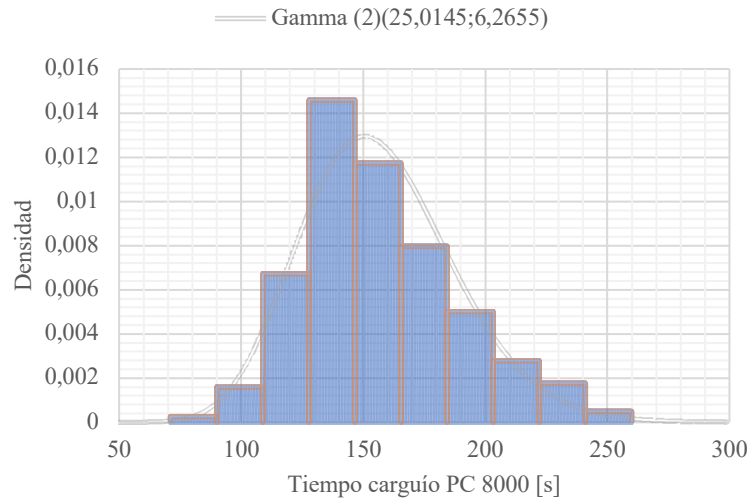


Gráfico 16. Función de distribución de probabilidad de tiempo de carguío Gamma para equipo PC_8000.

Tabla 27. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de tiempo de descarga en chancado.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,2002	2
Gamma	0,2410	3
Weibull	0,1906	1

Función de distribución de probabilidad para tiempo de descarga en chancado.

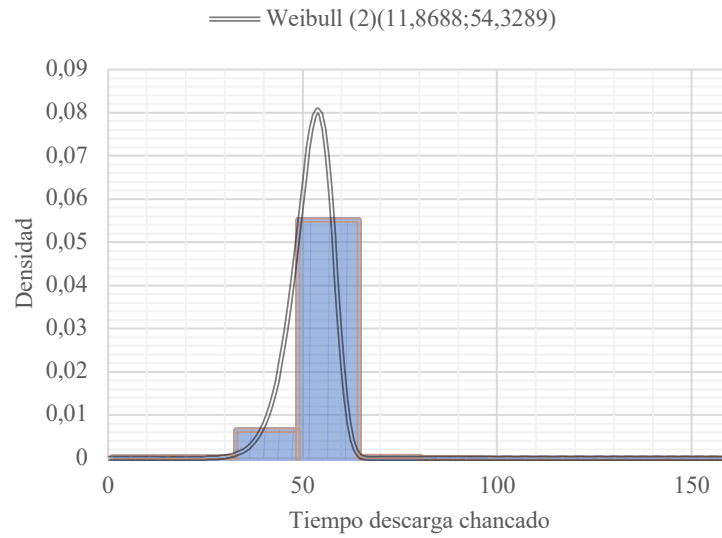


Gráfico 17. Función de distribución de probabilidad para tiempo de descarga en chancado.

Tabla 28. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de tiempo de descarga stock-botadero.

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,2815	3
Gamma	0,2340	1
Weibull	0,2749	2

Función de distribución de probabilidad para descarga en stock-botadero

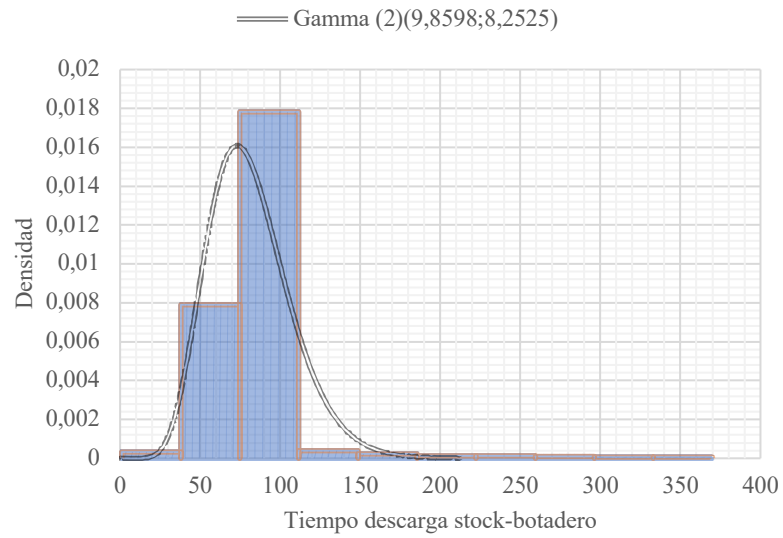


Gráfico 18. Función de distribución de probabilidad para descarga en stock-botadero.

Tabla 29. Índice de Kolmogorov-Smirnov para distintas distribuciones de tiempo de acuatamiento en punto de carga..

Distribución	Kolmogorov-Smirnov	Ranking
Normal	0,1760	3
Gamma	0,1211	1
Weibull	0,1655	2

Función de distribución de probabilidad para tiempo de acuatamiento en punto de carga

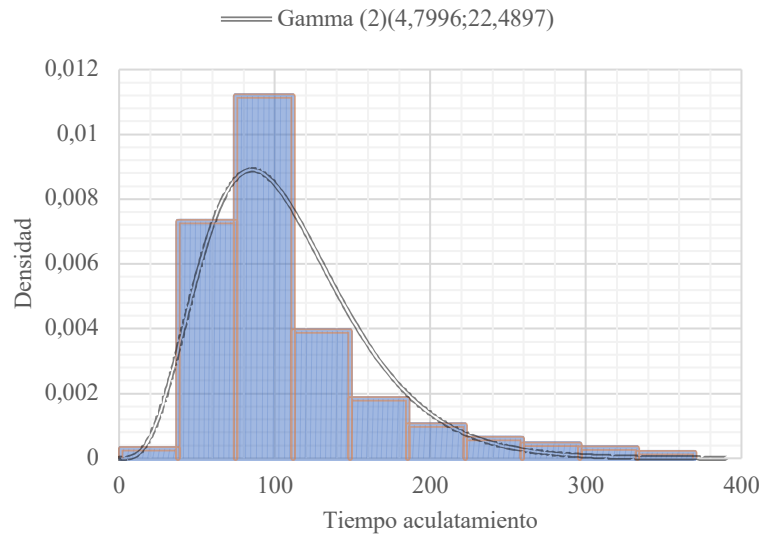


Gráfico 19. Función de distribución de probabilidad para tiempo de acuatamiento en punto de carga.

Tabla 30. Perfil de velocidad subiendo “Salida pala o cargador frontal”.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	7,3	6,5
4%	7,3	6,5
6%	7,3	6,5
8%	7,3	6,5
10%	7,3	6,5
12%	6,5	6,5

Tabla 31. Perfil de velocidad bajando “Salida pala o cargador frontal”.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	7,3	6,5
-4%	7,3	6,5
-6%	7,3	6,5
-8%	7,3	6,5
-10%	7,3	6,5
-12%	7,3	6,5

Tabla 32. Perfil de velocidad subiendo “Aumento salida”.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	25	13,4
4%	20	12,5
6%	12,5	11,2
8%	10,8	9,3
10%	9,7	7,5
12%	8	6,5

Tabla 33. Perfil de velocidad bajando “Aumento salida”.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	25	13,4
-4%	20	12,5
-6%	19,9	11,3
-8%	15,8	10,4
-10%	12,2	9,7
-12%	12,1	8,4

Tabla 34. Perfil de velocidad subiendo “Entrada pala”.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	9	6,5
4%	9	6,5
6%	9	6,5
8%	9	6,5
10%	9	6,5
12%	8	6,5

Tabla 35. Perfil de velocidad bajando “Entrada pala”.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	9	6,5
-4%	9	6,5
-6%	9	6,5
-8%	9	6,5
-10%	9	6,5
-12%	9	6,5

Tabla 36. Perfil de velocidad subiendo “Aumento entrada”.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	33,3	13,4
4%	26,5	12,5
6%	16,4	11,2
8%	12,7	9,3
10%	9,9	7,5
12%	8	6,5

Tabla 37. Perfil de velocidad subiendo “Entrada salida botadero”.

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	21,7	28,4
4%	17,3	26,6
6%	10,7	23,8
8%	8,3	19,9
10%	6,4	15,9
12%	5,2	13,2

Tabla 38. Perfil de velocidad bajando “Entrada salida botadero”.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	21,7	28,4
-4%	17,3	26,6
-6%	16,9	24
-8%	13,4	22,3
-10%	10,4	20,6
-12%	8	17,9

Tabla 39. Perfil de velocidad bajando “Aumento entrada”.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	33,3	13,4
-4%	26,5	12,5
-6%	26	11,3
-8%	20,6	10,4
-10%	16	9,7
-12%	12,3	8,4

Tabla 40. Perfil de velocidad subiendo "Curva".

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	25	25,4
4%	25	23,8
6%	16,4	21,3
8%	10,7	17,8
10%	9,9	14,2
12%	8	11,8

Tabla 41. Perfil de velocidad bajando "Curva".

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	25	25,4
-4%	25	23,8
-6%	25	21,5
-8%	20,6	20
-10%	16	18,5
-12%	12,3	16

Tabla 42. Perfil de velocidad subiendo "Chancado".

Subiendo		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
2%	10	10
4%	10	10
6%	10	10
8%	10	10
10%	10	10
12%	10	10

Tabla 43. Perfil de velocidad bajando “Entrada salida Chancado”.

Bajando		
Pendiente	Velocidad cargado [km/h]	Velocidad vacío [km/h]
-2%	10	10
-4%	10	10
-6%	10	10
-8%	10	10
-10%	10	10
-12%	10	10

Tabla 44. Datos reales grupos de simulación utilizados para la metodología de simulación propuesta.

Grupo	Velocidad Descargado [km/h]	Velocidad Cargado [km/h]	Velocidad Media [km/h]	CAEX	HEFF [h]	Tonelaje [t]
1	20,4	14,2	17,3	15,1	1.192	663.998
2	21,0	14,1	17,6	15,1	1.101	599.212
3	20,7	14,2	17,5	14,6	793	426.674
4	20,0	14,8	17,4	15,3	874	452.287
5	19,7	14,1	16,9	14,7	886	519.690
6	20,2	12,7	16,5	14,4	1.945	1.069.265
7	19,1	13,4	16,3	15,1	1.884	1.032.898
8	20,6	15,0	17,8	14,9	522	336.176
9	23,3	17,0	20,2	14,9	3.426	2.112.852
10	23,0	16,9	20,0	14,3	1.870	1.248.492
11	21,8	16,6	19,2	14,2	745	422.478
12	21,2	16,7	19,0	14,4	1.799	1.175.760
13	21,8	17,5	19,7	14,5	1.486	1.046.893
14	24,5	17,2	20,9	14,6	4.116	3.007.131
15	25,1	19,1	22,1	14,7	1.148	890.383
16	24,7	17,0	20,9	13,9	737	487.676

Tabla 45. Datos obtenidos de los modelos de simulación para la metodología de simulación propuesta..

Grupo	Velocidad Descargado [km/h]	Velocidad Cargado [km/h]	Velocidad Media [km/h]	CAEX	Tiempo Simulación [h]	HEFF [h]	Tonelaje [t]
1	20,9	14,0	17,5	15	70	1.030	667.301
2	20,7	14,5	17,6	15	65	935	597.652
3	20,7	13,9	17,3	15	46	677	424.541
4	20,1	14,7	17,4	15	48	705	453.441
5	20,1	14,0	17,1	15	51	719	520.489
6	20,0	12,7	16,4	14	122	1.686	1.066.121
7	19,5	14,4	17,0	15	107	1.566	1.029.129
8	21,3	14,8	18,1	15	30	437	338.708
9	23,8	16,1	20,0	15	170	2.469	2.114.324
10	23,1	15,8	19,5	14	118	1.622	1.260.907
11	21,7	16,0	18,9	14	42,5	568	419.339
12	22,1	16,2	19,2	14	111,5	1.533	1.176.519
13	21,7	17,5	19,6	14	91	1.243	1.039.650
14	24,6	17,5	21,1	15	239	3.487	3.024.963
15	25,4	18,3	21,9	15	65	944	890.698
16	24,7	16,5	20,6	14	47	636	489.855

Tabla 46. Resultados y comparación para la verificación del modelo de simulación.

Fecha		Real								Simulado								Planificado				
Inicio	Fin	Equipo	Ubicación	Tonelaje	Horas efectivas	Tonelaje	CAEX	Velocidad Media	Equipo	Ubicación	Tonelaje	Horas efectivas	Tonelaje	CAEX	Velocidad Media	Equipo	Ubicación	Tonelaje	Velocidad Media	Tonelaje		
01-03-2019	06-03-2019	PA_01	STCK_04	237.640	1.635	900.127	15	20,3	PA_01	STCK_04	317.608	1.617	996.336	15	20,6	PA_01	STCK_04	298.676	24,7	1.195.189		
		PA_02	F8_2595	414.832					PA_02	F8_2595	398.120					PA_02	F8_2595	405.959				
		PC_01	F5_2460	247.655					PC_01	F5_2460	147.408					PC_01	F5_2460	141.264				
		CF_01	-	-					CF_01	-	-					CF_01	-	10.580				
		CF_02	-	-					CF_02	-	-					CF_02	-	158.710				
07-03-2019	13-03-2019	PA_01	STCK_04	238.588	1.603	1.035.913	14	18,5	PA_01	STCK_04	286.824	1.512	1.024.456	15	19,5	PA_01	STCK_04	201.653	23,2	945.968		
		PA_02	F8_2595	286.216					PA_02	F8_2595	378.288					PA_02	F8_2595	289.843				
		PC_01	F5_2460	108.380					PC_01	F5_2460	112.184					PC_01	F5_2460	134.311				
		CF_01	-	178.075					CF_01	-	23.088					CF_01	-	158.709				
		CF_02	-	73.560					CF_02	-	45.584					CF_02	-	26.452				
14-03-2019	20-03-2019	PA_01	STCK_04	41.131	1.723	1.055.554	13,68	19,9	PA_01	STCK_04	317.904	1.780	1.279.904	15	20,2	PA_01	STCK_04	266.508	23,1	1.226.868		
		PA_02	F8_2595	405.862					PA_02	F8_2595	470.344					PA_02	F8_2595	457.365				
		PC_01	F5_2460	264.092					PC_01	F5_2460	232.656					PC_01	F5_2460	90.000				
		CF_01	-	94.154					CF_01	-	82.584					CF_01	-	227.834				
		CF_02	-	94.227					CF_02	-	176.416					CF_02	-	185.161				
21-03-2019	27-03-2019	PA_01	F8_2595	270.263	1.932	1.412.163	13,86	20,9	PA_01	F8_2595	185.592	1.887	1.321.640	15	19,8	PA_01	F8_2595	201.077	24	1.460.497		
		STCK_04	33.394	STCK_04					193.584	STCK_04	204.233											
		PA_02	F8_2595	588.479					PA_02	F8_2595	453.176					PA_02	F8_2595	530.722				
		PC_01	F5_2460	334.816					PC_01	F5_2460	264.032					PC_01	F5_2460	288.245				
		CF_01	-	133.442					CF_01	-	66.008					CF_01	-	51.059				
28-03-2019	03-04-2019	PA_01	F8_2595	391.666	2.033	1.258.107	14,58	20,4	PA_01	F8_2595	385.096	1.966	1.337.032	15	20,2	PA_01	F8_2595	432.030	22,4	1.556.671		
		PA_02	F8_2595	312.238					PA_02	F8_2595	249.528					PA_02	F8_2595	298.006				
		PA_02	F8_2580	159.761					PA_02	F8_2580	175.824					PA_02	F8_2580	197.614				
		PC_01	F5_2460	65.198					PC_01	F5_2460	302.512					PC_01	F5_2460	380.677				
		CF_01	-	180.077					CF_01	-	102.120					CF_01	-	110.455				
04-04-2019	10-04-2019	PA_01	F8_2595	607.246	2.033	1.524.304	14,58	20	PA_01	F8_2595	477.448	1.922	1.323.712	15	20,2	PA_01	F8_2595	598.261	23,2	1.564.629		
		PA_02	F8_2580	365.129					PA_02	F8_2580	417.360					PA_02	F8_2580	467.954				
		PC_01	F5_2460	229.196					PC_01	F5_2460	289.488					PC_01	F5_2460	356.598				
		CF_01	-	165.776					CF_01	-	104.784					CF_01	-	113.816				
		CF_02	-	156.957					CF_02	-	34.632					CF_02	-	28.000				
11-04-2019	17-04-2019	PA_01	F8_2595	447.815	2.210	1.545.378	15,3	20,4	PA_01	F8_2595	304.880	1.447	976.800	15	20,5	PA_01	F8_2595	682.653	23,1	1.283.351		
		PA_02	F8_2580	553.072					PA_02	F8_2580	325.304					PA_02	F8_2580	320.386				
		PC_01	F5_2460	348.422					PC_01	F5_2460	202.464					PC_01	F5_2460	194.214				
		CF_01	-	98.762					CF_01	-	66.304					CF_01	-	62.092				
		CF_02	-	97.307					CF_02	-	77.848					CF_02	-	24.006				

18-04-2019	24-04-2019	PA_01	F8_2595	513.516	2.158	1.476.274	14,94	21,4	PA_01	F8_2595	343.656	1.855	1.150.552	14	20,8	PA_01	F8_2595	428.598	23,7	1.478.025
		PA_02	F8_2580	365.061					PA_02	F8_2580	402.560					PA_02	F8_2580	557.235		
		PC_01	F5_2460	181.814					PC_01	F5_2460	254.560					PC_01	F5_2460	336.592		
			F6_2490	180.284												CF_01	-	50.095		
		CF_01	-	41.012					CF_01	-	57.720					CF_02	-	105.505		
	CF_02	-	194.587	CF_02	-	92.056														
25-04-2019	01-05-2019	PA_01	F8_2595	92.743	2.108	1.262.314	15,12	20,6	PA_01	F8_2580	392.496	1.955	1.212.416	15	20,9	PA_01	F8_2580	521.099	23,4	1.558.908
		PA_02	F8_2580	545.810					PA_02	F8_2580	430.680					PA_02	F8_2580	566.965		
		PC_01	F5_2460	145.150					PC_01	F7B_2490	240.352					PC_01	F7B_2490	293.573		
			F6_2490	263.261												CF_01	-	36.766		
		CF_01	-	116.017					CF_01	-	40.848					CF_02	-	140.505		
	CF_02	-	99.333	CF_02	-	108.040														
02-05-2019	08-05-2019	PA_01	F8_2580	656.248	2.210	1.657.841	15,3	21,4	PA_01	F8_2580	421.504	1.777	1.241.720	16	19,7	PA_01	F8_2580	456.679	24,7	1.351.433
		PA_02	F8_2580	621.189					PA_02	F8_2580	465.904					PA_02	F8_2580	550.000		
		PC_01	F5_2460	229.909					PC_01	F5_2460	250.712					PC_01	F5_2460	267.853		
		CF_01	-	113.780					CF_01	-	47.952					CF_01	-	35.037		
		CF_02	-	36.715					CF_02	-	55.648					CF_02	-	41.864		
09-05-2019	15-05-2019	PA_01	F8_2580	527.919	2.083	1.509.613	14,94	20,7	PA_01	F8_2580	374.440	1.886	1.200.280	15	19,2	PA_01	F8_2580	455.000	22,5	1.540.561
		PA_02	F8_2565	405.290					PA_02	F8_2565	261.368					PA_02	F8_2565	209.976		
			F8_2580	29.242						F8_2580	154.216						F8_2580	336.679		
		PC_01	F5_2460	53.771					PC_01	F5_2460	140.008					PC_01	F5_2460	185.073		
			F6_2475	299.909						F7B_2475	131.424						F7B_2475	178.833		
CF_01	-	63.641	CF_02	-	138.824	CF_02	-	175.000												
	CF_02	-	129.841																	
16-05-2019	22-05-2019	PA_01	F8_2565	621.160	2.032	1.451.270	15,12	21	PA_01	F8_2580	404.632	1.634	1.041.328	15	19,5	PA_01	F8_2580	515.000	23	1.226.716
			F8_2580	11.203					PA_02	F8_2565	308.136					PA_02	F8_2565	340.000		
		PA_02	F8_2565	19.534					PC_01	F7B_2475	218.744					PC_01	F7B_2475	246.716		
			F8_2580	308.456												CF_02	-	125.000		
		PC_01	F6_2475	337.827					CF_02	-	109.816									
	F8_2595	36.064																		
	CF_02	-	117.026																	
23-05-2019	29-05-2019	PA_01	F8_2565	607.958	1.950	1.175.229	15,48	20,2	PA_01	F8_2595	201.872	1.559	1.087.504	16	19,9	PA_01	F8_2595	125.000	23,4	1.349.600
		PA_02	F8_2580	191.368					PA_02	F8_2580	141.192					PA_02	F8_2580	193.000		
			F8_2565	81.750					PA_02	F8_2565	384.800					PA_02	F8_2565	539.900		
		PC_01	F8_2580	4.703					PC_01	F7B_2475	258.704					PC_01	F7B_2475	366.700		
			F8_2595	97.557												CF_02	-	125.000		
CF_02	-	191.893	CF_02	-	100.936															

Tabla 47. Velocidades reportadas por Komatsu para el camión 930E-4 AT con un rolling resistance de 2%.

Pendiente [%]	Estado	Velocidad [km/h]
10	Cargado	10,11
-10	Cargado	23,08
8	Cargado	12,15
-8	Cargado	30,77
6	Cargado	16,09
-6	Cargado	45,94
0	Cargado	38,24
0	Vacío	50,07
-6	Vacío	64,33
6	Vacío	37,85
8	Vacío	64,33
-8	Vacío	30,86
10	Vacío	54,75
-10	Vacío	25,35