



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

# ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE POTENCIALES RIESGOS EN LA LOGÍSTICA DE RECURSOS PARA UNA OPERACIÓN MINERA SUBTERRÁNEA DE GRAN ESCALA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

FERNANDO ANDRÉS TAPIA CAMPO

PROFESOR GUÍA  
ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
NELSON MORALES VARELA  
JUAN MONTES ABALLAY

SANTIAGO DE CHILE  
2017

## RESUMEN

En las operaciones mineras los desafíos logísticos son únicos y bastante complejos. Errores en su conceptualización o una mala ingeniería pueden conducir a una baja sustentabilidad y confiabilidad futura de la mina. Es fundamental que, en las etapas previas asociadas a los estudios de ingeniería del proyecto, se definan y caractericen correctamente cuáles son los potenciales riesgos. El presente estudio buscó medir el impacto de los procesos logísticos en una faena minera subterránea de gran escala. No es posible exigir productividad a una operación minera, si esta posee un diseño de logística deficiente que no esté acorde a las condiciones que enfrenta la faena. De este modo, a lo largo del trabajo se analizaron diversas variables que buscaban estimar y cuantificar los efectos que éstas tendrían en la productividad y producción de la mina.

En primera instancia se determinó que las principales variables que afectan el sistema logístico de la faena corresponden a la cantidad de vehículos que circulan por las rutas, los tiempos de espera en los paraderos interiores, las velocidades máximas permitidas, los tiempos de atención en el control de acceso, las distancias recorridas y las ubicaciones de los elementos principales. El enfoque principal del estudio estuvo asociado al comportamiento de los buses de transporte de personal y su impacto en la productividad de la operación.

El escenario que comprende el proyecto original estima una productividad de sus trabajadores de un 60 [%], es decir, 14,4 [h efectivas/día]. A partir de este escenario se comenzó a estudiar el impacto de las variables antes mencionadas. Así, un efecto directo relacionado al alza en la cantidad de buses requeridos para el transporte de personal (hacia el interior de la mina a través del túnel de acceso principal), fue originar un aumento en los tiempos de espera al momento del ingreso. Este factor provocó una disminución en las horas efectivas de trabajo, alcanzando una productividad de un 56 [%]. Por otro lado, al momento de analizar el efecto de los tiempos de atención en el control de acceso, se incorporaron diversas metodologías para controlar el ingreso de personal (comprende un intervalo de tiempos que puede ir desde 0 a 5 [min]). Para el mejor escenario, se consigue un aumento en las horas efectivas de trabajo a 15.8 [h efectivas/día], mientras que para un tiempo de atención de 5 [min] se produce un descenso en la productividad, alcanzando un 55 [%]. Del mismo modo, al considerar una reducción en la velocidad máxima permitida en las rutas se produce un descenso en las horas efectivas, alcanzando una productividad del 52 [%].

Finalmente, se analizó el modelo logístico de suministros de la compañía. Se estudiaron diversos aspectos que involucraron un diagnóstico inicial de la faena, evidenciar los desafíos y oportunidades identificadas, riesgos en el abastecimiento de insumos y sus proveedores, la gestión de contratos, la formación de alianzas estratégicas, entre otras.

De acuerdo a los resultados conseguidos, se concluye que es relevante gestionar correctamente las esperas en los paraderos interiores que afectan en gran medida los tiempos de viajes de los buses. Del mismo modo, otro aspecto está vinculado a la tecnología utilizada para el control de ingreso de personas, dado que condiciona los tiempos de espera que se originarán previo al ingreso del túnel de acceso. Cabe mencionar que, para lograr una correcta validación de los resultados, se hace necesaria una comparación con datos reales, lo cual aún no puede ser realizado puesto que la faena no ha comenzado su operación. No obstante, el trabajo desarrollado constituye una herramienta importante para potenciar y mejorar cualquier sistema logístico en este tipo de industria y así alcanzar un mejor control de las actividades, asegurando su sustentabilidad y confiabilidad futura.

# ABSTRACT

In mining operations logistical challenges are unique and quite complex. Errors in their conceptualization or poor engineering can lead to a low sustainability and future reliability of the operation. It is essential that, in the previous stages associated with the engineering studies of the project, the risks are defined and correctly characterized. The present study sought to measure the impact of logistic processes on a large-scale underground mining operation. It is not possible to demand productivity to a mining operation, if it has a poor logistics design that is not in line with the conditions facing the work. Thus, throughout the study several variables were analyzed that sought to estimate and quantify the effects they would have on the productivity and production of the operation.

In the first instance, it was determined that the main variables that affect the logistic system of the mine correspond to the number of vehicles that circulate the routes, the waiting times in the interior stops, the maximum allowed speeds, the time of attention in the access control, the distances covered and the locations of the main elements. The main focus of the study was associated to the behavior of the personnel transport buses and their impact on the productivity of the operation.

The scenario that includes the original project estimates a productivity of its workers at 60 [%], that is to say, 14.4 effective hours per day. From this scenario, the impact of the variables mentioned above was studied. Thus, a direct effect related to the increase in the number of buses required for transporting personnel (to the interior of the mine through the main access tunnel), resulted in an increase in waiting times at the time of entry. This factor led to a decrease in the effective hours of work, reaching a productivity of 56 [%]. On the other hand, when analyzing the effect of attention times on access control, different methodologies were incorporated to control the entry of personnel (it includes a time interval that can range from 0 to 5 [min]). For the best scenario, an increase in effective hours of work is achieved at 15.8 [effective hours/day], while for a time of attention of 5 [min] there is a decrease in productivity, reaching 55 [%]. Likewise, when considering a reduction in the maximum speed allowed on the routes, there is a decrease in the effective hours, reaching a productivity of 52 [%].

Finally, the logistics supply model of the company was analyzed. Several aspects were studied that involved an initial diagnosis of the operation, highlighting the challenges and opportunities identified, risks in the supply of inputs and their suppliers, contract management, formation of strategic alliances, among others.

According to the results obtained, it is concluded that it is relevant to correctly manage the waiting in the interior stops that significantly affect the travel times of the buses. Similarly, another relevant aspect is linked to the technology used for the control the entry of personnel, which strongly conditions the waiting times that arose prior to the entrance of the main access tunnel. It should be mentioned that one of the limitations of the study is that the model could not be validated with real data since the mine has not begun to operate. However, the work done is an important tool to enhance and improve any logistics system in this type of industry and thus achieve better control of operations, ensuring their sustainability and future reliability.

## AGRADECIMIENTOS

Es difícil olvidar los muchos y variados momentos vividos a lo largo de estos 6 años de universidad. Ha sido un camino de enormes desafíos y de muchas satisfacciones. Sin duda, muchos son los partícipes de este logro y varios son los que constantemente estuvieron empujando para conseguir el objetivo.

Es por esto que quiero agradecer a muchas personas, en especial a mis padres y mi hermana por haberme guiado a lo que soy y a alcanzar el lugar donde estoy. Por supuesto, dar las gracias a toda mi familia por todo el apoyo brindado en momentos de grandes dificultades y por su preocupación constante.

Claramente, mis compañeros y amigos de universidad son parte importante de esto. Primero, con mis amigos que conocí cuando entré a la universidad y con los cuales entablamos una gran buena amistad. Traslaviña, Alan, Esteban, Eva, Tito, Maxi, Javier, Ricardo y Nico. Como no mencionar a mis colegas mineros, un grupo formado por grandes personas: Marcos, Raúl, Leandro, Eduardo, Sergio, Manuel, Bruno, Pedro, Héctor, Fernanda y Matías. Por supuesto, dar las gracias a mis compañeros y amigos de departamento, Arturo y Cristian por su constante apoyo.

Agradecer a los profesores que formaron parte de este proyecto y por la confianza depositada. Es necesario reconocer al equipo de trabajo del Laboratorio Delphos por el excelente ambiente y su muy buena disposición a ayudar a resolver los problemas y las dudas presentadas.

En general, gracias a las personas que han sido claves en mi vida profesional y personal. Un gran abrazo a todos ellos.

# TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	10
2.	OBJETIVOS Y ALCANCES.....	11
3.	ANTECEDENTES GENERALES DE LA FAENA.....	13
4.	ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	25
4.1.	Logística de una Operación Minera Subterránea.....	25
4.2.	Centros de Distribución y Abastecimiento.....	26
4.3.	Tráfico en los Principales Túneles de Accesos de una Operación.....	27
4.4.	Simulación de Eventos Discretos Aplicados a la Minería.....	28
4.5.	Simulación de Tráfico aplicado a la Minería.....	30
4.6.	Software de Simulación DSim Subterráneo.....	31
4.7.	Variables Aleatorias y Distribuciones de Probabilidad.....	34
4.8.	Teorías de Colas o Líneas de Espera.....	35
4.9.	Indicadores de Desempeño Logístico y Control de Gestión.....	37
4.10.	Normativa General de Tráfico Túnel de Acceso.....	39
5.	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	41
5.1.	Logística de Transporte de Personal.....	41
5.2.	Logística Abastecimiento de Suministros e Insumos.....	43
6.	VARIABLES INFLUYENTES DEL SISTEMA.....	46
7.	MODELO DE SIMULACIÓN.....	53
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	64
8.1.	Logística de Personal.....	64
8.1.1.	Tiempo de Esperas Promedio Control de Acceso.....	65
8.1.2.	Capacidad de Flujo Túnel de Acceso Principal.....	68
8.1.3.	Capacidad de Ingreso de Personal.....	70
8.1.4.	Utilización del Túnel de Acceso.....	71
8.1.5.	Tiempos de Viaje - Control de Acceso Manual Ingreso Mina (CM).....	72
8.1.6.	Tiempos de Viaje - Control de Acceso Automatizado Ingreso Mina (CA).....	76
8.1.7.	Variación de Producción.....	77
8.2.	Suministro e Insumos.....	82
8.2.1.	Diagnóstico Inicial de la Operación.....	82
8.2.2.	Factor Multiplicativo de Viajes.....	85
8.2.3.	Desafíos de la Logística en la Industria.....	86
8.2.4.	Abastecimientos y Desarrollo de Proveedores.....	88

8.2.5.	Administración y Gestión de Contratos.....	90
8.2.6.	Oportunidades de Mejora en la Logística de Suministros.....	92
8.3.	Limitantes y Oportunidades de Mejora.....	94
9.	CONCLUSIONES.....	96
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	98
11.	ANEXOS.....	100

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 5.1. Factor de utilización del túnel de acceso. ....	35
Ecuación 5.2. Probabilidad que existan “n” vehículos en el sistema. ....	35
Ecuación 5.3. Número medio de vehículos en el sistema. ....	35
Ecuación 5.4. Tiempo medio de espera de los vehículos en el sistema. ....	36

## Índice de Figuras

Figura 3.1. Layout general de la faena. ....	14
Figura 3.2. Ciclo proyectado abastecimiento suministros interior mina. ....	15
Figura 3.3. Ciclo proyectado transporte de personas interior mina. ....	15
Figura 3.4. Consumo hormigón - Plan minero 140,000 [tpd]. ....	16
Figura 3.5. Consumo shotcrete - Plan minero 140,000 [tpd]. ....	17
Figura 3.6. Consumo acero - Plan minero 140,000 [tpd]. ....	18
Figura 3.7. Consumo de emulsión - Plan minero 140,000 [tpd]. ....	19
Figura 3.8. Consumo de Anfo, dinamita - Plan minero 140,000 [tpd]. ....	19
Figura 3.9. Consumo de accesorios de tronadura - Plan minero 140,000 [tpd]. ....	20
Figura 3.10. Representación esquemática buses de traslado de personal. ....	21
Figura 4.1. Interfaz de visualización DSim Subterráneo. ....	33
Figura 5.1. Metodología de trabajo establecida para el estudio. ....	42
Figura 5.2. Metodología de trabajo para estudio de suministros. ....	43
Figura 6.1. Layout general mina caso de estudio. ....	46
Figura 6.2. Ubicaciones de los paraderos considerados para transporte de personal. ....	47
Figura 6.3. Capacidad de flujo del túnel de acceso principal. ....	48
Figura 6.4. Cantidad de equipos presentes en el sistema. ....	49
Figura 6.5. velocidad de transporte de los buses a lo largo del túnel de acceso. ....	50
Figura 6.6. Elementos que originan tiempos de espera a lo largo del recorrido. ....	51
Figura 6.7. interacción de variables en un único sistema integrado. ....	52
Figura 7.1. Etapas para la construcción del modelo de simulación. ....	54
Figura 7.2. Modelo conceptual simulación de transporte de personas. ....	56
Figura 7.3. Trayecto considerado para la validación. ....	60
Figura 7.4. Gráfico de distancias a los paraderos del barrio cívico norte. ....	60
Figura 7.5. Gráfico de tiempos de viaje interior mina (escenario 1). ....	62
Figura 7.6. Gráfico de tiempos de viaje interior mina (escenario 2). ....	63
Figura 8.1. Ubicación control de acceso para ingreso de personal al interior mina. ....	64
Figura 8.2. Gráfico tiempo esperas promedio (sensibilidad tiempo atención control). ....	65
Figura 8.3. Gráfico magnitud tiempo atención en el control de acceso. ....	66
Figura 8.4. Gráfico tiempo esperas promedio (sensibilidad número de equipos). ....	67
Figura 8.5. Gráfico tiempo esperas promedio (capacidad de pasajeros). ....	68



Figura 8.6. Gráfico capacidad de flujo túnel de acceso principal.....	68
Figura 8.7. Gráfico capacidad de flujo túnel de acceso (diferentes tiempos de control).....	69
Figura 8.8. Gráfico capacidad de ingreso de personal (diferentes tiempos de control). ....	70
Figura 8.9. Gráfico utilización del túnel de acceso. ....	71
Figura 8.10. Gráfico utilización del túnel de acceso (flota de buses).....	72
Figura 8.11. Gráfico tiempos de llegada a paraderos interior mina (CM).....	73
Figura 8.12. Gráfico componentes del tiempo de ciclo promedio (CM).....	74
Figura 8.13. Tiempo de viaje a paraderos interiores (sensibilidad velocidades) - CM. ....	75
Figura 8.14. Gráfico tiempos de llegada a paraderos interior mina (CA). ....	76
Figura 8.15. Gráfico componentes del tiempo de ciclo promedio (CA). ....	77
Figura 8.16. Gráfico desglose estimación de tiempo en turno de 8 h.....	78
Figura 8.17. Gráfico efectos en la productividad según tiempo atención control acceso. ....	78
Figura 8.18. Gráfico efectos en la producción según cantidad de vehículos (CM).....	79
Figura 8.19. Gráfico efectos en la producción según velocidad máxima (CM). ....	80
Figura 8.20. Gráfico efectos de las horas efectivas de trabajo en la productividad. ....	81
Figura 8.21. Gráfico efectos de la productividad en la producción.....	81
Figura 8.22. Diagrama ilustrativo para la logística de suministros. ....	83
Figura 8.23. Interfaz de visualización simulación transporte de cargas peligrosas.....	84
Figura 8.24. Diagrama esquemático de flujo para transporte de explosivo. ....	87
Figura 8.25. Diagrama esquemático de flujo para transporte de hormigón. ....	89
Figura 8.26. Gráfico eficiencia del tamaño del camión y la productividad mensual ....	94
Figura 11.1. Esquema general infraestructura interior mina. ....	100
Figura 11.2. Esquema nivel de producción, transporte y ventilación.....	100

## Índice de Tablas

Tabla 3.1. Dotación por Turno para el año 2028.....	21
Tabla 3.2. Requerimientos de traslado de vehículos menores.....	22
Tabla 3.3. Vehículos requeridos para el transporte de RISES. ....	23
Tabla 4.1. Resumen comparativo sobre el potencial de ambas herramientas. ....	32
Tabla 4.2. Variables aleatorias generadas en la simulación. ....	33
Tabla 4.3. Variables aleatorias generadas en la simulación. ....	34
Tabla 6.1. Tiempos de esperas ingreso túnel de acceso. ....	52
Tabla 7.1. Variables aleatorias generadas en la simulación. ....	57
Tabla 7.2. Distancia trayecto terminal superficie - paradero interior. ....	61
Tabla 8.1. Componentes del tiempo de ciclo equipos de transporte. ....	64
Tabla 8.2. Requerimientos de traslados diarios para personal e insumos. ....	82
Tabla 11.1. Componentes principales script de simulación. ....	101

# 1. INTRODUCCIÓN

Los desafíos en la logística para grandes operaciones mineras son únicos y bastante complejos. Errores en su conceptualización o una mala ingeniería pueden conducir a una baja sustentabilidad y confiabilidad futura de la mina. No es posible exigir productividad a una faena minera, si esta posee un diseño de logística deficiente que no esté acorde a las condiciones que enfrenta la faena. En particular, es fundamental que, en las etapas previas asociadas a los estudios de ingeniería del proyecto, se definan y caractericen correctamente cuáles son los riesgos presentes, cuáles son los elementos críticos del proceso y, además, ser capaces de determinar los aspectos más relevantes que configurarán la logística de la faena.

Es necesario que exista una buena gestión de los accesos de la mina, junto con una regulación estricta de los flujos para los recursos que se necesitarán en las actividades que se estén desarrollando. De este modo, una buena gestión en la logística debe ser capaz de asegurar que todos los trabajos que se estén realizando sean atendidos correctamente, no comprometiendo interrupciones en la producción producto de tiempos de espera provocados por la falta de insumo o ausencia del personal adecuado. Como consecuencia de la construcción de operaciones de gran escala, se hace necesario analizar los procesos logísticos actuales.

El presente estudio tiene como principal objetivo realizar un diagnóstico a la situación actual de los procesos logísticos asociados a un sistema de explotación por hundimiento de una mina subterránea de cobre. Para ello, se busca cuantificar los riesgos en la logística y el abastecimiento de una faena minera subterránea a gran escala. De este modo, y dado el rol clave que las vías de acceso tienen para la minería subterránea, es que un primer análisis está asociado al uso de las rutas de acceso principales hacia el interior mina. En este sentido, se debe asegurar que la capacidad de flujo de estas vías pueda responder a la demanda de las diferentes actividades que harán uso de este “recurso”.

El abastecimiento de los insumos y suministros requeridos para las actividades comprenden otro de los aspectos que son considerandos en este análisis. En particular, se busca determinar cuáles serán los principales problemas que se generarán en los centros de distribución o bodegas interior mina. Lo anterior hace alusión a las interferencias operacionales, colas y tiempos de espera generados por los diferentes componentes del sistema.

Con ello, se pretende conocer y medir el impacto de los procesos logísticos en un sistema minero de tecnología convencional. Además, este estudio tiene por objetivo identificar las mejoras al modelo logístico actual, considerando todos los procesos anteriores. Para esto, el estudio debe entregar las herramientas y conceptos para modelar la logística de la faena.

Este proyecto surge por los bajos esfuerzos que se han tenido en sistematizar estudios de logística para proyectos de gran envergadura. En este caso en particular, se hace referencia a la posible sobreutilización de los túneles de acceso hacia el interior mina, ocurrencia de tiempos de espera elevados y colas generadas por los diferentes elementos del sistema. Se busca responder las siguientes interrogantes: ¿Existe gestión en las vías de acceso y rutas?, ¿Existe regulación en la asignación de flujos del recurso?, ¿Serán atendidas correctamente las actividades? y/o ¿Se conocen los suministros críticos y el riesgo asociado a éstos?.

El desarrollo de este trabajo apunta a evaluar la logística de faenas mineras que se encuentran en etapas tempranas de ejecución de proyectos y/o proyectos que están aún en etapas de ingeniería. Lo anterior dado que, problemas de conceptualización o una ingeniería deficiente pueden conducir a una baja sustentabilidad, competitividad, productividad y la confiabilidad futura de la mina. No obstante, las discusiones que abarcará este trabajo pueden resultar como guía para antiguas faenas que ya se encuentran en operación.

Los desafíos tecnológicos del proyecto corresponden a la customización de la herramienta (Software) a las condiciones específicas y particulares de la faena. Es decir, se debe construir un modelo de simulación que represente el sistema de logística de la faena. Los aspectos mencionados previamente hacen referencias al software de simulación DSim, desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos, perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

## **2. OBJETIVOS Y ALCANCES.**

### **2.1. Objetivo General.**

- Cuantificar y evaluar los riesgos en la logística de la faena.

### **2.2. Objetivos Específicos.**

- Reconocer los factores claves que definen el proceso de logística.
- Diseñar e implementar computacionalmente que represente el sistema de logística de la operación.
- Construir indicadores que permitan realizar un diagnóstico y analizar la logística.
- Determinar los principales problemas y vulnerabilidades del modelo logístico.
- Estimar el impacto de variables (que componen el sistema logístico) sobre la productividad de los trabajadores.
- Detectar los suministros críticos de las actividades.
- Diseñar los mejores escenarios que se adecuen de mejor manera a las condiciones de la faena (desde el punto de vista logístico).

Para esto, se necesita información asociada a la ubicación los centros de distribución (bodegas principales de superficie y subterráneas), características y capacidad de flujo de los accesos principales, suministros e insumos requeridos desde el interior de la mina y la cantidad de personal que se deberá transportar diariamente para cumplir con las labores de producción. Con tal información se obtendrán indicadores de utilización de las vías de acceso e indicadores sobre las interferencias operacionales producidas. Esto permitirá definir estrategias de viajes, junto con generar sugerencias y recomendaciones que permitirán conseguir un transporte y abastecimiento eficiente, seguro y confiable, otorgando un respaldo sólido a la operación futura de la mina.

### **2.3. Alcances.**

El presente trabajo toma como antecedentes la información generada durante la ingeniería básica del proyecto para la faena en estudio, en donde se define el diseño y ubicaciones de las principales instalaciones, junto con los parámetros de transporte de personal, transporte de vehículos menores, insumos principales, requerimientos de ventilación y traslado de vehículos de emergencia. Además, se involucran las necesidades de logística y tráfico de todas las actividades de la mina durante su vida útil, a partir de la producción en régimen. Luego, se mencionan a continuación las operaciones mineras que deben ser atendidas, tanto para sus actividades de producción como de mantenimiento:

- El régimen de producción considerado para realizar el estudio es el plan de 140,000 [tpd].
- Las actividades de logística se analizarán desde la bodega principal en superficie y centro de distribución interior mina hasta los distintos sectores demandantes.
- Los procesos productivos considerados son: hundimiento, etapa de producción y el manejo de minerales, procesos de apoyo y servicio.
- Los procesos de apoyo y servicio que son incorporados al estudio corresponden a: seguridad industrial, control de incendios y emergencias, servicios básicos a las personas (alimentación, atención médica, otros), transporte de personal y materiales, control de acceso y tráfico y comunicaciones e informática
- Se excluyen la logística asociada al suministro de aguas, evacuación de aguas servidas y residuales, suministro de aire comprimido, suministro de combustible, suministro eléctrico y ventilación, dado que poseen redes independientes.
- La herramienta de simulación será utilizada exclusivamente para el análisis de la logística asociada al transporte de personal. Para los tópicos relacionados al abastecimiento de insumo y suministros se realizará principalmente un estudio conceptual.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES DE LA FAENA

En la presente sección se muestran los flujos de entrada, internos y de salida de la mina, así como los niveles de stock para los distintos objetos logísticos. Además, se realiza un levantamiento de las técnicas logísticas de operación empleadas.

Esta etapa comprende la definición del diseño de la red logística, conceptualizando la estructura de red logística para materiales y transporte de personal. Ello considera conocer para cada segmento o agrupación de materiales su camino o ruta establecida.

Uno de los insumos fundamentales corresponde al combustible (petróleo o diésel). No obstante, este ítem queda fuera del estudio a desarrollar, ya que se considera una infraestructura destinada al almacenamiento en superficie con una conducción hacia estanques de almacenamiento al interior de la mina mediante el uso de cañerías.

#### 3.1. Estructura Red de Logística

El proceso productivo del proyecto estudiado requiere para su funcionamiento contar con unidades de apoyo en superficie, las cuales deben constituir un conjunto de instalaciones que permitan asegurar un servicio óptimo para las actividades de la mina subterránea.

La infraestructura de superficie proyectada y destinada a dar apoyo a las operaciones de la mina subterránea es la siguiente:

- **Barrio Industrial de Superficie:** Control de acceso, centro integrado de operación y gestión, casa de cambio, oficinas, comedores, sala multiuso, unidad de servicios externalizados, unidad de rescate mina, policlínico, bodegas generales, bodegas de almacenamiento, muestrera geológica, talleres de preparación y producción mina, surtidor de combustibles, área de estacionamientos, patio de materiales y sector de estación meteorológica.
- **Polvorín**
- **Centro de Stock de Áridos**

La mayor parte de la infraestructura de superficie es desarrollada durante la ejecución de las obras tempranas, siendo parte del presente estudio lo que respecta a:

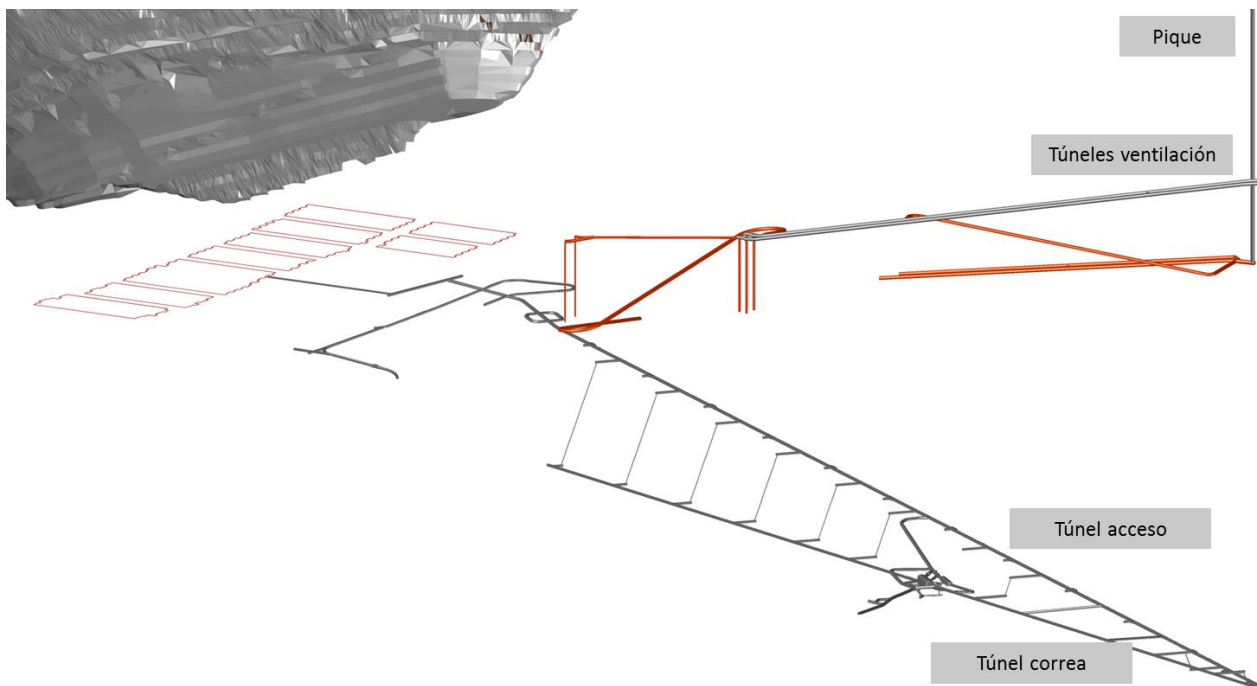
- Control de Acceso
- Casa de Cambio
- Bodegas de Operaciones

Uno de los elementos a tomar en consideración corresponde a la ubicación de la casa de cambio (si está situada en la superficie o en el interior mina), dado que esto condicionará de manera importante la magnitud de las esperas de los buses de transporte de personal en los paraderos interiores.

En lo que respecta a las instalaciones subterráneas, se incorporan al estudio sectores de mayor demanda o de movimientos de personal y materiales, como los son los barrios industriales norte y sur. En aquellos sectores se estudian áreas asociadas a los centros de almacenamientos y paraderos de buses.

A continuación, se presenta un esquema general de parte del layout de la mina. De acuerdo a los objetivos y alcances del proyecto, basta analizar ciertas instalaciones e infraestructura interior mina (esto se traduce en el análisis de las vías de acceso que presentan una mayor demanda).

De acuerdo da la Figura 3.1, se puede observar que para el ingreso de personal y los materiales de distinta naturaleza existe una única vía de acceso. El túnel de acceso principal tiene una longitud de 7.5 [km] aproximadamente. Además, se debe destacar que este corresponde a un túnel bidireccional que permitirá el ingreso tanto de personal como de insumos para la faena. Es por este motivo, que el correcto dimensionamiento de esta vía es de vital importancia para el adecuado funcionamiento de la mina.



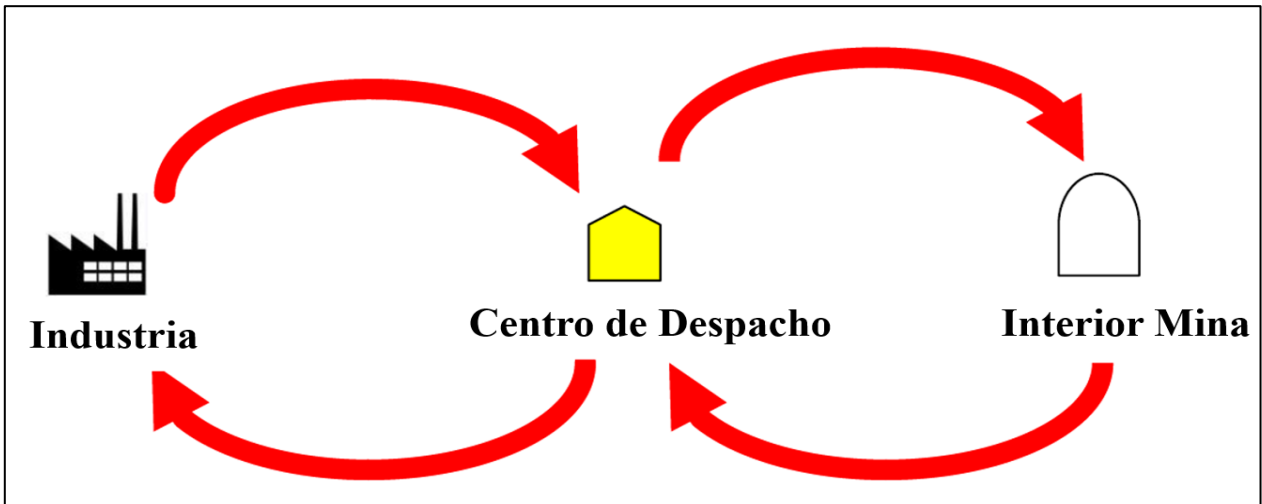
**Figura 3.1. Layout general de la faena.**

Por otro lado, se muestra una descripción de los principales materiales e insumos requeridos a partir de la etapa de régimen de la faena que son transportados mediante equipos móviles (solo aquellos que serán incorporados en el presente estudio), y que, por tanto, hacen uso de las vías de acceso que serán analizadas posteriormente. Además, se incluye en el estudio el transporte de personal diario que se requerirá para este periodo.

La estimación de la demanda total que tendrá el sistema de suministro para cada uno de los insumos (por concepto de obras de infraestructura permanente, preparación minera y producción), se realiza mediante la utilización de los factores tecnológicos, que relacionan la cantidad de desarrollos y obras mineras a realizar en función de las áreas a incorporar, y factores de consumo, los cuales permiten realizar una asociación entre el consumo del insumo particular y la cantidad de fortificación por cada metro de labor minera a desarrollar. Una vez definida la demanda para los

diferentes insumos y los equipos de transporte que se utilizarán para cada uno de estos, será posible realizar entonces una estimación de la cantidad de viajes diarios que realizarán los equipos de transporte por las diferentes rutas y vías de acceso.

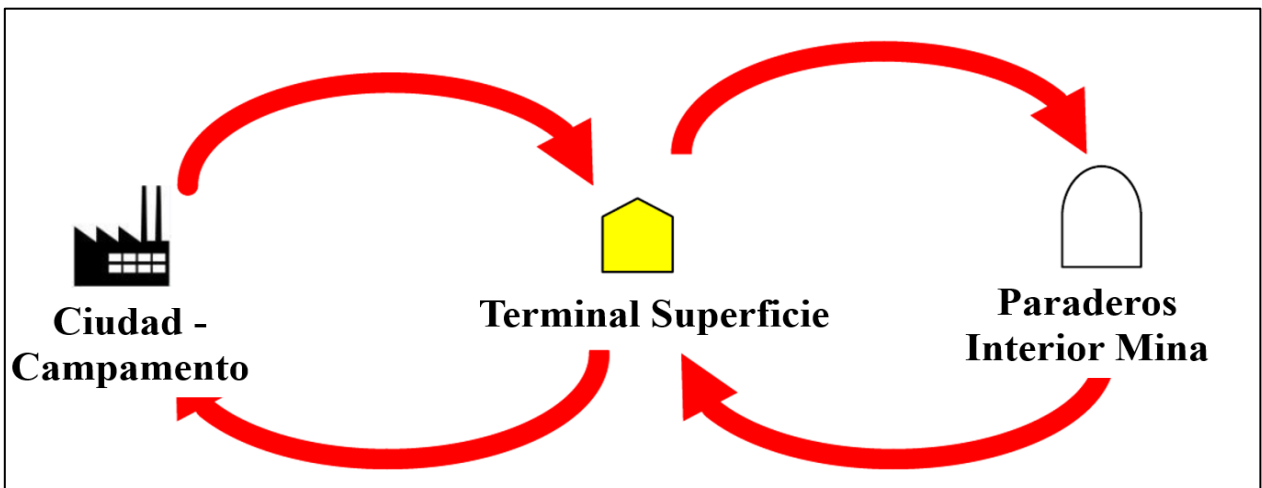
A continuación, se muestra el ciclo proyectado que se tiene para el suministro de insumos de la faena. No obstante, como fue establecido en los alcances del proyecto, para el presente estudio solo se considerará el ciclo **Centro de Despacho Superficie – Centros de Almacenamientos Interior Mina**. El detalle de los requerimientos de insumos para conseguir la producción establecida para la mina se muestra en el siguiente capítulo.



**Figura 3.2. Ciclo proyectado abastecimiento suministros interior mina.**

La mina posee 2 almacenes interiores. Ellos abastecen a los diferentes usuarios de producción, desarrollos y mantenimiento, existiendo materiales con stock propio divisional. Estos almacenes mantienen en stock los materiales de uso más repetitivo en la Mina. La fuente de abastecimiento de las bodegas es principalmente de centros de distribución de superficie.

De manera análoga al esquema anterior, se ilustra en la Figura 3.3 el ciclo proyectado para el transporte de personal. Del mismo modo, para este caso se tiene que el ciclo estudiado considera el circuito **Terminal o Paradero de Superficie – Paraderos Interior Mina**.



**Figura 3.3. Ciclo proyectado transporte de personas interior mina.**



En las siguientes secciones se detallarán las consideraciones y supuestos definidos para las diferentes locaciones que son incorporados al análisis.

### 3.2. Requerimientos de Suministros e Insumos

Dentro del alcance definido para el sistema de suministro de hormigón y shotcrete, se considera el suministro de materias primas por parte de las empresas proveedoras, su transporte hasta la planta subterránea de fabricación de hormigón y shotcrete, los silos de almacenamiento de áridos, la planta de hormigón y shotcrete propiamente tal y la distribución de ambos productos a los distintos frentes de consumo al interior de la mina.

La estimación de la demanda total que tendrá el sistema de suministro de hormigón/shotcrete asociado al proyecto por concepto de obras de infraestructura permanente, preparación minera y producción, se realiza mediante la utilización de los factores tecnológicos (que relacionan la cantidad de desarrollos y obras mineras a realizar en función de las áreas a incorporar) y factores de consumo (los cuales relacionan el consumo de hormigón/shotcrete y la cantidad de fortificación por cada metro de labor minera a desarrollar).

El perfil de consumo estimado de hormigón, desglosado según áreas de consumo se presenta en la Figura 3.4. Por su parte, el perfil de consumo estimado de shotcrete, se presenta en la Figura 3.5.

Para efectos de diseño se han considerado las demandas máximas diaria de hormigón y shotcrete, las cuales se han evaluado en 85 [m<sup>3</sup>/día] y 183 [m<sup>3</sup>/día], respectivamente.

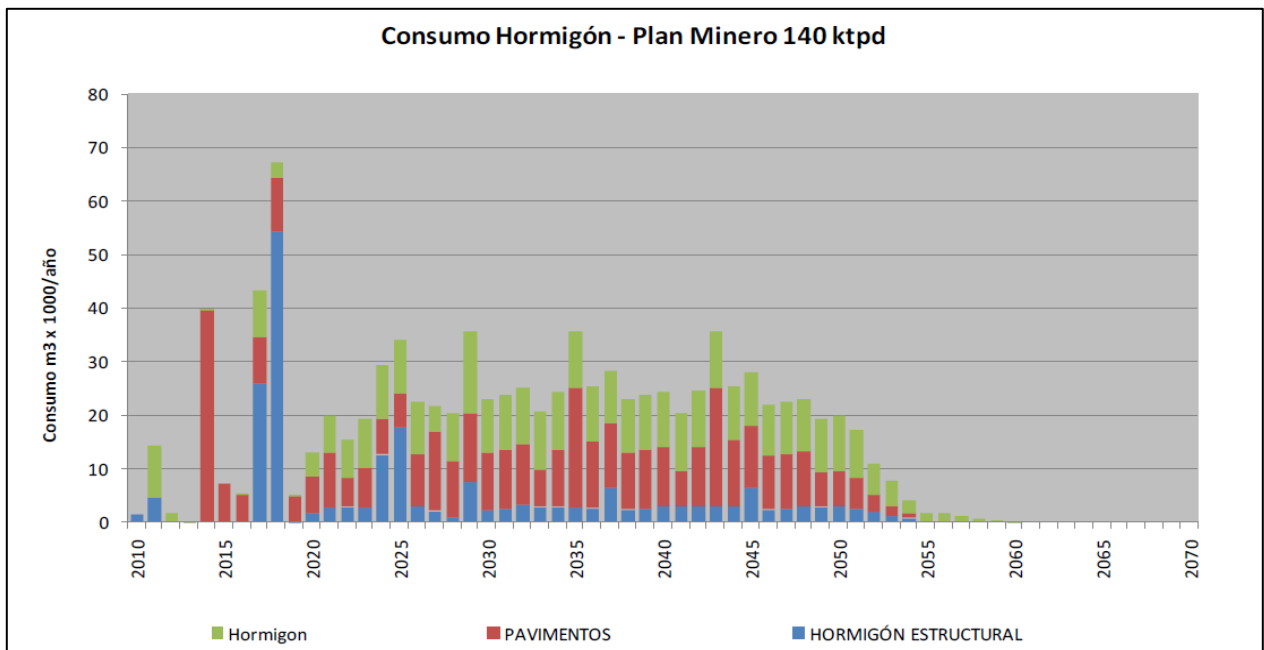
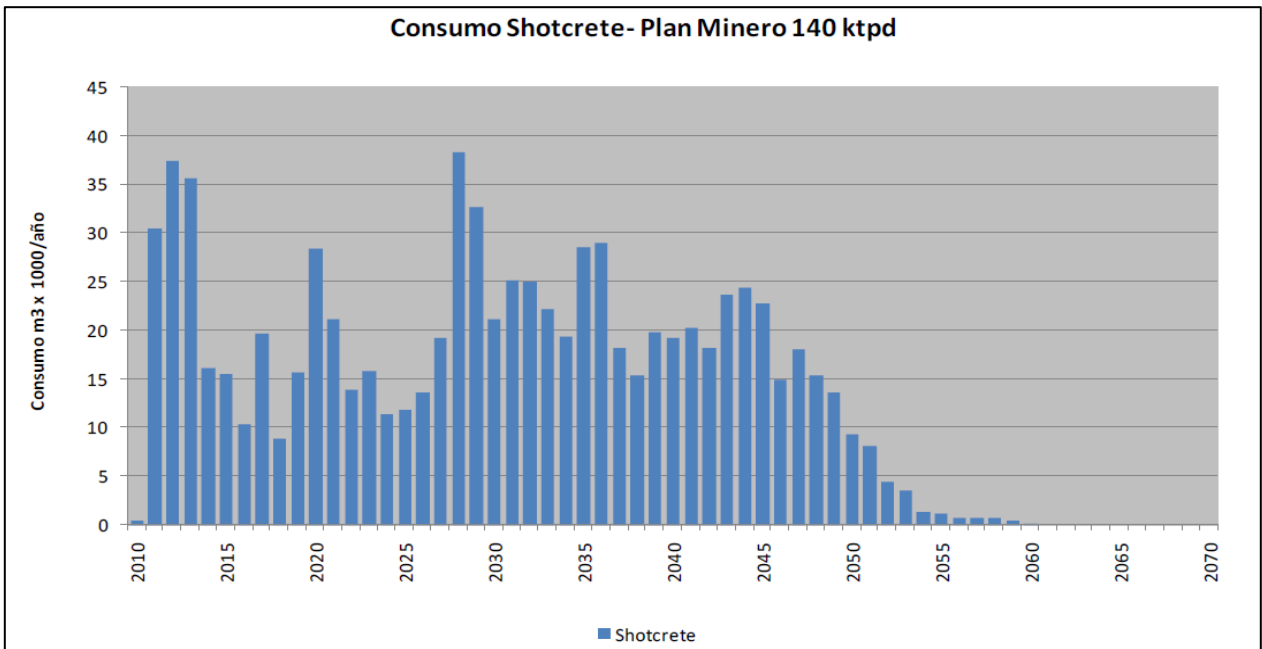


Figura 3.4. Consumo hormigón - Plan minero 140,000 [tpd].



**Figura 3.5. Consumo shotcrete - Plan minero 140,000 [tpd].**

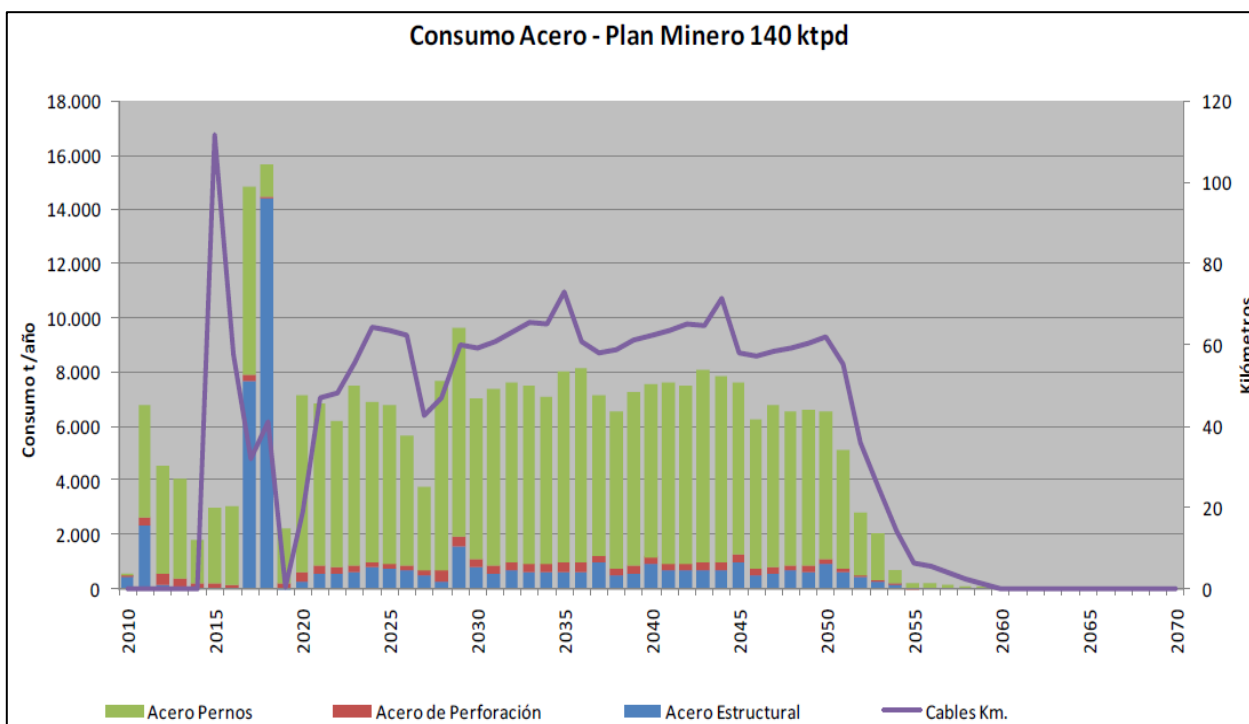
El sistema de producción estará compuesto por dos alas idénticas en cada una de las cuales se materializará una planta de producción, una para hormigón y la otra para shotcrete, aun cuando ante la detención necesaria de una de ellas, la otra puede considerar la suplencia. Se han definido plantas con capacidades de 30 [m<sup>3</sup>/hora]. cada una.

### 3.3. Requerimiento de Aceros

Dentro del alcance definido para el sistema de suministro de aceros de perforación, acero de refuerzo del hormigón armado, pernos de fortificación y cables de acero considera el abastecimiento por parte de las empresas proveedoras, el transporte de los aceros a la bodega de superficie, traslado de los aceros desde dicha bodega hasta las bodegas subterráneas por nivel de explotación minera y la posterior distribución de dichos elementos a los distintos frentes de consumo al interior de la mina.

La estimación de la demanda total que tendrá el sistema de suministro de aceros de perforación y acero de refuerzo del hormigón armado asociado al proyecto por concepto obras de infraestructura permanente, preparación minera y producción se realizó mediante la utilización de los factores tecnológicos – que relacionan la cantidad de desarrollos y obras mineras a realizar en función de las áreas a incorporar – y factores de consumo, para el caso de los aceros de perforación, los cuales relacionan el consumo de acero y la cantidad de fortificación por cada metro de labor minera a desarrollar.

Los perfiles de los consumos de aceros de perforación proyectados para las áreas de consumo de infraestructura y preparación (que incluye los asociados a producción) aparece indicado en la Figura 3.6.



**Figura 3.6. Consumo acero - Plan minero 140,000 [tpd].**

El abastecimiento de aceros se inicia con el suministro realizado por parte de las empresas proveedoras a la bodega central ubicada en superficie, continúa con el traslado de dichos materiales desde la bodega central hasta las bodegas satélites al interior de la mina por nivel de explotación minera y la posterior distribución de dichos elementos a los distintos frentes de consumo al interior de la mina.

### 3.4. Requerimientos de Explosivos y Accesorios de Tronadura

El alcance definido para el sistema de suministro de explosivos y accesorios de tronadura, considera el suministro por parte de las empresas proveedoras al polvorín central ubicado en superficie, en un sector aledaño al barrio industrial de superficie de acuerdo a las distancias mínimas establecidas.

El transporte hacia el interior de la mina se hará en vehículos acondicionados para el transporte de explosivos en un horario especial en el que el tránsito por la rampa de acceso principal será de uso exclusivo.

El traslado del explosivo desde el polvorín centralizado en superficie hasta los polvorines subterráneos se realizará mediante camiones de 25 t de capacidad nominal, con una frecuencia de dos a tres días y durante el cambio de turno del personal. No obstante, el acceso a la rampa principal queda sujeto a las preferencias de tráfico vehicular (ver Capítulo 4.10). Para este tipo de transporte, se requiere la exclusividad del túnel de acceso, o sea, tráfico unidireccional. Así, se debe establecer norma de transporte y realizar una programación anticipada de fecha y hora del transporte.

Cada uno de los polvorines subterráneos presentará una capacidad de almacenamiento de 25 toneladas equivalentes a Dinamita 60 [%], lo cual permitirá almacenar un stock de explosivos suficiente para 7 días de operación.

Los materiales requeridos para la infraestructura asociada al sistema de explosivos y accesorios de tronadura aparecen en los informes consolidados del proyecto por lo que no se indicarán en el presente documento.

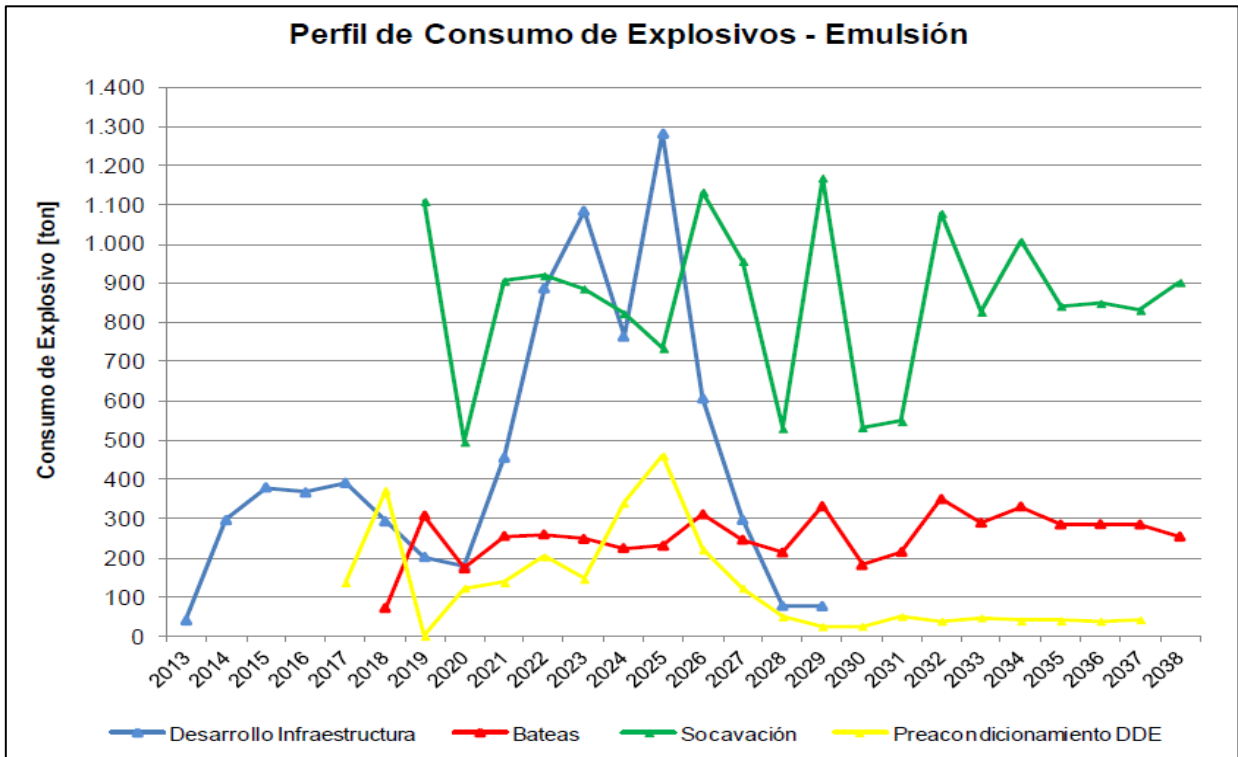


Figura 3.7. Consumo de emulsión - Plan minero 140,000 [tpd].

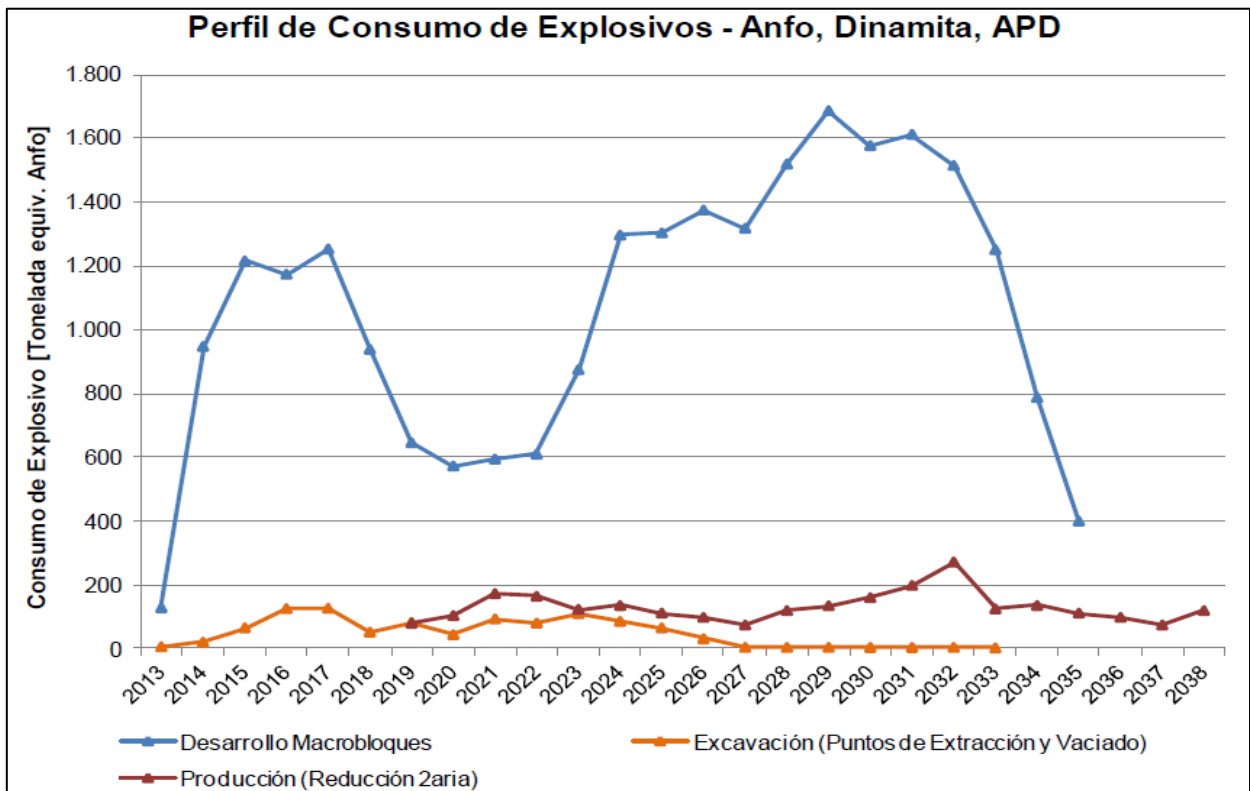
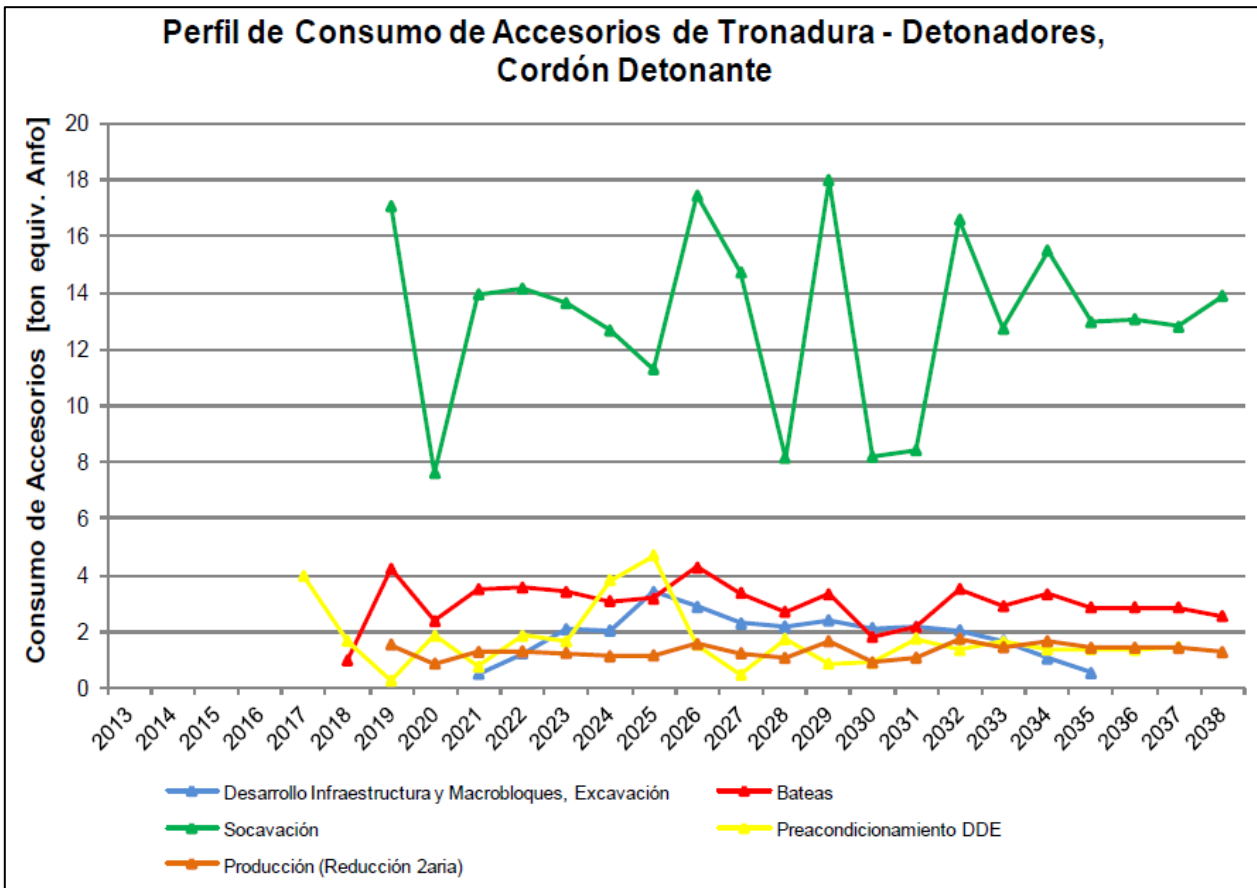


Figura 3.8. Consumo de Anfo, dinamita - Plan minero 140,000 [tpd].



**Figura 3.9. Consumo de accesorios de tronadura - Plan minero 140,000 [tpd].**

El sistema de abastecimiento se inicia con el transporte de explosivos por parte de las empresas proveedoras hasta el polvorín centralizado ubicado en superficie, luego continúa con el traslado desde este punto hasta los dos polvorines subterráneos a través del túnel de acceso. Los polvorines subterráneos se materializarán en las cercanías de los Barrios Industriales Norte y Sur. El circuito finaliza con el transporte de explosivos desde estos polvorines hasta los distintos frentes de consumo al interior de la mina

### 3.5. Requerimientos de Personal

Dentro de las instalaciones de la faena, debe proveerse de medios de transporte seguros, adecuados y confortables al personal para su traslado desde y hacia los lugares de trabajo. Para esto se usarán buses que tendrán características diferentes dependiendo del lugar donde operen, superficie o interior mina.

Los buses que se utilizarán en superficie deberán tener similares características a los buses interurbanos utilizados en el país. Los buses y minibuses que serán utilizados en el interior de la mina deberán ser adecuados para un uso extremo, tanto en sus acomodaciones interiores como en sus características mecánicas.

A continuación, se presenta estimaciones realizadas al traslado de personas, propias y terceras, tanto para ingresar a los lugares de trabajo, como también para el regreso a sus hogares o campamento. Es claro notar que el movimiento de personal, es el principal generador de viajes de

ingreso a la mina. Como referencia, en la Tabla 3.1 se presenta la dotación por turno para la normal operación de la mina, para un año en Régimen (2028).

**Tabla 3.1. Dotación por Turno para el año 2028.**

Ítem	Unidad	2028
Personal Propio, Turno 7x7, Bus Interior Mina	Dot/turno	382
Personal Propio, Turno 5x2, Bus Interior Mina	Dot/turno	123
Personal Propio, Turno 5x2, Camioneta 4x4 Superficie	Dot/turno	26
Personal Propio, Turno 5x2, Camioneta 4x4 Interior Mina	Dot/turno	3
Personal Propio, Turno 7x7, Camioneta 4x4 Superficie	Dot/turno	0
Personal Propio, Turno 7x7, Camioneta 4x4 Mina	Dot/turno	0
Total Dotación Propia	Dot/turno	544
Total Dotación Terceros	Dot/turno	296
Total	Dot/turno	840

La cantidad de personal que estará trabajando en cada turno es variable. Los buses de traslado para superficie y mina tienen una capacidad de 40 personas, aproximadamente; los minibuses tienen una capacidad de 16 personas, aproximadamente. A su vez, la frecuencia de viajes será regida en función de los turnos. Luego, se muestra en la siguiente Figura una representación esquemática de los buses de ingreso de personas, junto con las dimensiones del túnel de ingreso principal.



**Figura 3.10. Representación esquemática buses de traslado de personal.**

La estimación de personal requerido para la faena es de 2,500 personas, aproximadamente. Se operará con 2 turnos de 12 [h] cada uno, donde requerirán una cantidad de 1,500 y 1,000 personas, respectivamente. Se considera que alrededor del 90% del personal de turno es transportado mediante buses.

Según el ciclo estudiado para el transporte de personal (ver Figura 3.3), un factor que escapa al presente estudio tiene que ver con el factor multiplicativo de viajes. Este factor se define como el cociente entre la cantidad de viajes asociados al personal necesario para su traslado desde el área de superficie de la mina hasta el interior de la misma, y la cantidad de viajes requeridos para trasladar el personal desde el campamento o ciudad hasta el área exterior mina (superficie).

Este factor entrega una medida rápida de la eficiencia en la logística de entrada, y específicamente en este caso, de la logística de personal. Si este factor multiplicativo es mayor a 1, es indicativo de que existen oportunidad de mejora en el proceso. Por otro lado, si el factor es menor a 1, indicativo de que existe un remanejo de “material” durante el proceso.

En relación a los vehículos menores, principalmente tipo camioneta, son conducidos por personal supervisor y capataces de turno, la cual será de dotación propia como contratistas, requeridos para dirigir las diversas tareas operativas que se llevan a cabo en las distintas áreas de la mina.

Las demandas de viajes para vehículos menores para el plan de 140,000 [tpd] aparece indicada en la siguiente tabla.

**Tabla 3.2. Requerimientos de traslado de vehículos menores.**

<b>Área de Servicio</b>	<b>Viajes/Turno</b>	<b>Viajes/Día</b>
Supervisión Codelco	8	24
Contratistas desarrollo	8	24
Contratista construcción	8	24
Contratista perforación y tronadura	4	12
Servicios generales	4	12
Contratista preparación minera	2	6
Mantenedores transporte principal	1	3
Mantenedores transporte intermedio	1	3
Mantenedores LHD - Martillos móviles	1	3
Mantenedores equipos estacionarios	1	3
Mantenedores eléctricos	3	9
Geología	2	6
Geomecánica	1	3
Topografía	4	12
Superintendencia minas	3	9
<b>Total</b>	<b>51</b>	<b>153</b>

### 3.6. Criterio de Diseño y Requerimientos de Logística y Tráfico

El lugar de inicio del turno es en la llegada a casa de cambio ubicada en Barrio Industrial Superficie. Los trabajadores disponen de 20 minutos para el cambio de ropa, retiro de lámpara y luego subirse al bus que los transportará a interior mina.

El andén de llegada interior mina ubicada en Barrio Industrial Interior Mina es el lugar de destino donde se deben bajar los trabajadores y dirigirse al lugar donde reciben su charla de seguridad obligatoria de 10 minutos. Una vez concluida la charla, reciben las instrucciones de trabajo del turno.

Por otro lado, en todas las actividades de producción de una mina se requieren elementos que son fundamentales para mantener el nivel de producción, desarrollo y servicio. Estos materiales básicos se definen como insumos principales y deben mantenerse siempre en stock suficiente para garantizar la continuidad de las actividades de producción y apoyo.

El proyecto contempla construir plantas de shotcrete y hormigón en el interior de la mina, por lo que sólo se requerirá el ingreso de las materias primas como arena, grava, arcilla y cemento, principalmente. El agua es suministrada por cañerías. De igual modo, el suministro de combustible será por circuito de cañerías.

En relación a los RISES, estos serán almacenados en las cercanías de los talleres y su evacuación de la mina se hará tres veces a la semana. Los RISES generados por las operaciones de preparación y construcción serán apilados en la estocada más cercana, y serán retirados 3 veces por semana. Los desechos de alimentación serán retirados diariamente y no serán evacuados en los mismos camiones que ingresa el alimento.

A continuación, en la Tabla 3.3 se presentan los vehículos requeridos para el transporte de RISES en la operación.

**Tabla 3.3. Vehículos requeridos para el transporte de RISES.**

<b>Tipo de RISES</b>	<b>Tipo de Camión</b>	<b>Largo [m]</b>	<b>Capacidad Requerida [ton]</b>
Desechos de construcción	Camión carrocería plana	12	20
Desechos de talleres	Camión carrocería plana	12	20
Desechos alimenticios	Camión $\frac{3}{4}$ furgón	6	5
Desechos de oficinas	Camión carrocería plana	8	10
Residuos sólidos de aguas servidas	Camión aljibe	12	20

Para el traslado de alimentación, su requerimiento está dado según la cantidad de personal en el interior de la mina por turno. Cabe destacar que los camiones que trasladan la alimentación al interior de la mina, son distintos de aquellos que evacúan a los RISES de alimentación. Estos camiones ingresan directamente por el portal de acceso sin pasar por la casa de cambio, análogo a lo que sucede con el transporte de insumos.



### **3.7.Reglamento de Tránsito Interior Mina**

En este capítulo se indican las principales consideraciones, estrategias y normativas en lo que respecta a la circulación de equipos móviles. Esto involucra tanto a los buses destinados al transporte de personal, como a equipos livianos y de carga para el transporte de materiales e insumos hacia el interior mina.

En primera instancia, es necesario indicar que se cuenta con estrategias de exclusividad de tráfico durante el periodo de cambio de turno, es decir, en esas instancias el tráfico en el túnel de acceso es unidireccional y es de uso exclusivo de los Buses que realizan esta actividad (salvo que se produzca un accidente y sea necesario autorizar el tráfico de vehículo de emergencia para trasladar personal accidentado). De este modo, con el objeto de evitar los vehículos menores interfieran en la circulación de los buses del sistema de turnos, se restringe el ingreso de los vehículos menores al túnel desde el Barrio Industrial en superficie, permitiendo que estos vehículos solo circulen por el túnel media hora después de que el último bus haya ingresado al túnel.

El horario de operación normal del túnel de acceso corresponde al período de tiempo que estará disponible para todo tráfico vehicular, a excepción de los cambios de turno, mantenimientos preventivos y para programar el transporte de cargas especiales.

La frecuencia de entrada de buses es cada 15 segundos y se debe mantener una distancia mínima de 50 metros con respecto al Bus que lo antecede. La autorización de entrada de los Buses al Túnel la da el encargado de la Sala de Control Tráfico. De acuerdo a lo establecido en normas generales, las velocidades de entrada de los buses de transporte de personal no pueden superar los 50 [km/h], que es el máximo permitido. Del mismo modo, y de acuerdo a lo establecido en normas generales del proyecto, la velocidad de salida de los Buses no puede superar los 50 [km/h] que es el máximo permitido.

La Velocidad Máxima Permitida para cargas normales es de 50 [km/h] y en el caso de cargas especiales o peligrosas esta se reduce a 25 [km/h].

El Tipo de Cargas para efecto de transporte por el Túnel de Acceso se definen en tres tipos:

- Normal (materiales e insumos hasta 20 ton)
- Especial (por peso o volumen)
- Peligrosa (explosivos o inflamable)

## 4. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.

En esta sección se muestra el fundamento teórico que sustenta el presente estudio. Para ello, se realiza una descripción detallada en relación a ciertos modelos y teorías que serán utilizadas para el análisis del túnel de acceso y los centros de distribución al interior mina. Además, se describen algunos indicadores de control, junto con mencionar los fundamentos y las características del software de simulación que será empleado para el desarrollo del estudio.

### 4.1. Logística de una Operación Minera Subterránea.

Previo al desarrollo del trabajo, es necesario determinar los componentes principales que conformen en su totalidad el proceso de logística de una mina. Para ello, se recurre a una primera definición proporcionada por la ingeniería logística en donde se definen 8 elementos principales que constituyen el sistema para toda actividad industrial. Estos son: apoyo de suministro; equipos de apoyo; datos técnicos; formación y apoyo de formación; apoyo de recursos informáticos; instalaciones; embalaje, manipulación y transporte; y la interface de diseño [1]. Luego, llevando este concepto a los elementos que conforman una operación minera de tipo subterránea, se determinan los siguientes componentes en el proceso.

- **Insumos y Personal:** En todas las actividades de producción de una mina se requieren materiales y elementos que son fundamentales para mantener el nivel de producción, desarrollo y servicio de las operaciones. Estos materiales básicos se definen como insumos principales y deben mantenerse siempre en stock suficiente para asegurar la continuidad las operaciones de producción y apoyo. Luego, para definir los requerimientos de tráfico, es necesario además determinar la dotación de personal y los turnos en el cual se va a operar la faena. Ello definirá la cantidad de equipos requeridos para el transporte de insumos y para las personas que deben ser llevadas hacia el interior de la mina.
- **Equipos de Transporte:** En relación al transporte de personal, debe proveerse de medios de transporte seguros, adecuados y confortables al personal, en su traslado desde y hacia sus lugares de trabajo. Para esto generalmente se utilizan buses, dependiendo del lugar donde opere. Del mismo modo, al igual que los buses, para el transporte de insumos y materiales, se exigen características técnicas mínimas que deben contar los camiones utilizados para el transporte.
- **Instalaciones principales:** Dependiendo de las características del proyecto, se tendrán una serie de bodegas en diferentes sectores de la mina que permitan asegurar la continuidad de la operación. Generalmente, para las faenas de gran escala se cuenta con bodegas descentralizadas al interior mina y patios en superficie donde las empresas proveedoras llevarán a cabo el transporte de los materiales, insumos, repuestos y componentes desde sus propias instalaciones hasta los diferentes centros de almacenamiento que dispone la faena.
- **Manipulación y Transporte:** Según el tipo de material, se tendrá un procedimiento particular para ser manipulado y cargado al medio de transporte. Del mismo modo, esto condicionará la forma en que será transportado este suministro. Existen ciertos insumos que son transportados mediante equipos móviles, mientras que otros son conducidos mediante tuberías que conectan la superficie con el interior de la mina bajo superficie. Este aspecto es importante de mencionar, pues define principalmente los alcances que tendrá este estudio en relación a los suministros

que será analizados, considerando el tipo de transporte que se utiliza. Para este trabajo, se analizarán aquellos insumos que son transportados mediante equipos móviles. Lo anterior hace referencia principalmente al uso de camiones y camionetas.

- **Diseño de rutas:** El diseño de las rutas y vías de acceso disponibles en la faena debe considerar todos los medios de transporte y el resto de equipos móviles que se tendrán durante la vida útil de la mina. Para ello, es fundamental conocer las dimensiones de los equipos y la cantidad con las que contará durante la operación. Siempre debe suceder que la capacidad de flujo de estas vías pueda responder a la demanda de las diferentes actividades que harán uso de este “recurso”. Para ello, es fundamental que exista una buena gestión de los accesos de la mina, junto con una regulación estricta de los flujos para los recursos que se necesitarán en las actividades que se estén desarrollando.
- **Apoyo de recursos informáticos:** Como elementos de ayuda en el proceso de logística, generalmente se recurre a herramientas computacionales que constituyen un apoyo en varias actividades que se necesiten desarrollar. Particularmente, es posible realizar simulaciones de tráfico, controles de inventarios, asignación de flujos, etc.

Como ya fue mencionado en el último punto, un elemento principal de la investigación de operaciones y la logística es el modelamiento matemático incorporada en herramientas computacionales. Aunque la solución del modelo matemático establece una base para tomar una decisión, se deben tener en cuenta factores intangibles o no cuantificables, por ejemplo, el comportamiento humano, para poder llegar a una decisión final. Para el caso de un problema de una toma de decisiones, se requiere identificar tres componentes: ¿Cuáles son las alternativas de decisión?, ¿Bajo qué restricciones se toma la decisión? y ¿Cuál es el criterio objetivo para tomar la decisión? [2].

## 4.2. Centros de Distribución y Abastecimiento

La sustentabilidad del negocio no sólo involucra las etapas de producción, sino que además es necesario asegurar la calidad de la cadena de proveedores de la compañía, transformándose esto en el núcleo de la estrategia para muchas empresas [3]. Lo anterior hace referencia a la calidad, los plazos y los costos que los insumos y/o servicios prestados tienen asociados. No obstante, asegurar la calidad de la cadena de proveedores en relación a los factores mencionados, representa un continuo desafío para la gerencia de abastecimiento y compras.

Según las características del proyecto, idealmente se requiere un bodegaje descentralizado en el interior mina, con la capacidad suficiente de materiales y repuestos de manera que permita asegurar la continuidad de la operación. Como procedimiento general, los equipos, repuestos y materiales llegan a una bodega general de superficie, desde donde se abastece las bodegas del interior mina según el programa determinado.

No obstante, según requerimientos particulares de los usuarios o del personal de las bodegas del interior mina, ya sea por el tipo de repuesto o por emergencia, algunos materiales o repuestos requieren que sean directamente descargados en la bodega general subterránea [4].

De manera regular, las empresas proveedoras de insumos llevan a cabo el transporte de materiales, insumos, repuestos y componentes desde sus propias instalaciones hasta los diferentes centros de

almacenamientos y bodegas. En dichos lugares los materiales e insumos son recepcionados y, dependiendo de cuál sea el programa de despacho o requerimientos particular de cada uno de los ítems al interior de la mina, éstos son almacenados de inmediato en dichas bodegas y/o patio anexo de superficie, o bien, distribuidos inmediatamente a las bodegas subterráneas asociadas al nivel de producción. No obstante, existen otros tipos de materiales que según su manipulación no permite que sean almacenados en las bodegas antes mencionadas. Los materiales asociados a la preparación de hormigón y shotcrete, tales como arena, grava, gravilla y cemento, no son elementos a mantener en las bodegas (bodegas de superficie o subterráneas).

Las bodegas subterráneas están destinadas fundamentalmente a abastecer los requerimientos de materiales y repuestos de consumo habitual, en cantidades suficientes para asegurar procesos sin contratiempos, con el suministro oportuno de repuestos, materiales y elementos, tanto para el mantenimiento de los equipos e instalaciones, como para los vehículos usados por operaciones, al interior mina. Para ello, se deben localizar los elementos que más consumen materiales (combustible, áridos, cementos, etc.) en las proximidades del túnel, para poder llegar hasta ahí con camiones grandes. Ello con el fin de permitir el acceso efectivo de camiones de mayor tamaño.

Por otro lado, debe suceder que el almacenamiento o acopio principal de materiales y repuestos esté en la bodega de superficie y que el inventario de la bodega general subterránea sea conocido por la bodega de superficie, al estar conectados en línea con un sistema de control de inventario. Para este efecto, se instala usualmente un sistema de comunicación entre ambas bodegas tal que permita implementar el sistema de control y la tecnología de control de inventario, tanto de ingreso como de despacho de los materiales y repuestos.

Los camiones que normalmente transportan materiales, elementos y repuestos para el reaprovisionamiento de la mina en su totalidad, pertenecen a proveedores externos y tienen como destino final la bodega general y patios de bodega, en donde son recepcionados y descargados en esas áreas mediante los equipos de levante y manejo de materiales con que cuentan la bodega y el patio.

### **4.3. Tráfico en los Principales Túneles de Accesos de una Operación.**

El diseño de las vías de acceso de una operación minera condiciona principalmente los riesgos presentes y los rendimientos que se obtendrán para los equipos de transporte que harán uso de estas vías. Para ello, se debe definir con bastante claridad, por ejemplo, el configurar un diseño que considere un túnel bidireccional o uno que comprende dos túneles paralelos unidireccionales. Además, se deben diseñar los túneles de tal manera que sean compatibles con los tamaños y radios de giro de los camiones de mayor tamaño. Una mala configuración de estos, implicará mayores tiempos de flujo en el túnel de acceso, lo que afecta a varios vehículos a la vez. Las consecuencias más próximas implican atrasos en las entregas, mayores costos de obras por baja productividad por la indisponibilidad de los insumos.

La demanda por el recurso “acceso y circulación” proviene de diversas actividades. Estas vías son utilizadas para transporte de personal, transporte de vehículos menores, insumos principales, generación y retiro de RISES, requerimientos de alimentación y traslado de vehículos de emergencia. No obstante, para la mayoría de las faenas, el movimiento de personal es el principal generador de viajes de ingreso a la mina. Por consiguiente, el flujo de camiones asociado al

transporte de materiales e insumos es de un orden de magnitud mucho menor que la del traslado de personal [10].

Además, se suman otros parámetros adicionales que configuran el sistema de transporte, tales como restricciones horarias, distancias en infraestructura de superficie, distancias del túnel, distancias a los diferentes destinos, mantenimiento, velocidad de circulación y distancias de seguridad y ventilación.

Con un correcto diseño de las rutas se desea que en condiciones normales no se produzcan esperas significativas de los equipos que desean hacer de su uso. Esto tiene consecuencias positivas directas tales como menores tiempos de ciclo, menores costos por la eficiencia de los activos de transporte, ausencia de atochamientos en las vías, eventualmente, una mayor capacidad de transporte de mineral hacia el exterior y menores tiempos de desplazamiento. Para ello, se requiere hacer gestión sobre la generación de los viajes, especialmente de los viajes de los vehículos pequeños y de aquellos que tienen una velocidad de circulación menor. Además, de disponer de una mina con técnicas de explotación y construcción que ayuden a bajar la necesidad de personal.

#### **4.4. Simulación de Eventos Discretos Aplicados a la Minería**

La simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos. Es decir, la simulación es la imitación de un proceso o sistema de vida real en el tiempo que implica la generación y observación de una historia artificial para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se está representando [5].

Entre las diferentes formas de simulación que es posible emplear corresponde a la simulación de eventos discretos (esta basa su desarrollo a partir del uso de ecuaciones matemáticas y estadísticas). El proceso consiste en poder relacionar los diferentes eventos por medio de distribuciones de probabilidad y condiciones lógicas [6].

La simulación por eventos discretos es una herramienta que se aplica en el campo de la ingeniería de minas para la evaluación del desempeño de sistemas mineros complejos, tanto en minas a cielo abierto como subterráneas. Estos sistemas no se limitan meramente a la evaluación de la producción en sistemas manejo de materiales, sino que también integran la coexistencia de los desarrollos, preparación y producción de sistemas mineros.

En el caso de sistemas mineros de manejo de materiales, esta técnica permite la evaluación explícita de las pérdidas operacionales de equipos, tales como esperas por equipo de carguío por parte de camiones mineros, espera por camiones por parte de equipos de carga e interferencias en ruta entre camiones, tanto en ruta como en intersecciones.

A continuación, se enumeran ventajas y desventajas de este tipo de simulación que permiten definir si es apta para resolver un problema determinado [7].

**Ventajas:**

- Es una buena herramienta para conocer el impacto de los cambios en los procesos, sin la necesidad de llevarlos a cabo en la realidad, lo cual puede ser riesgoso y/o costoso.
- Mejora el conocimiento del proceso actual ya que permite ver cómo se comporta el sistema bajo distintos escenarios.
- Puede utilizarse como una herramienta complementaria para la toma de decisiones.
- En problemas de gran complejidad, la simulación permite generar una buena solución cuando se quiere relacionar distintas variables y conocer su impacto en una variable final.
- En la actualidad, los softwares de simulación tienden a ser más sencillos, lo que facilita su aplicación.
- Contar con una interfaz gráfica permite ver cómo se comportará un proceso una vez que se haya cambiado o mejorado.

**Desventajas:**

- La simulación puede ser costosa cuando se quiere implementar en problemas relativamente sencillos de resolver.
- Para generar un buen estudio de simulación se requiere de una inversión alta de tiempo de trabajo.
- Es necesario dominar el uso del software y manejar conocimientos de estadística para el análisis de resultados.

Por otro lado, existen algunos elementos claves que se deben tener en cuenta para garantizar el éxito de un modelo de simulación. A continuación, se mencionan algunos factores que influyen directamente en los resultados obtenidos:

- Cantidad de réplicas o corridas.
- Tamaño de la corrida.
- Variable de respuesta.
- Relaciones entre variables.
- Distribución de las variables aleatorias.
- Calidad de la información.

La calidad de la información está relacionada a la validez de los datos de entrada que serán ingresados al modelo. Asegurar un base de datos correcta es uno de los aspectos más importantes en la implementación de cualquier simulación.

De este modo, uno de los grandes desafíos que se tendrá para la simulación de la logística de la faena es sortear las dificultades que se tienen para obtener la información en la cantidad y la calidad requerida. Lo anterior es fundamental para garantizar la calidad y éxito de los resultados conseguidos.

Estos modelos se han desarrollado en una variedad de maneras incluyendo la recopilación y estudios a lo largo del tiempo. Esto incluye una recopilación de datos para tiempos de carga de las palas, tiempos de viaje de los camiones, tiempos de descarga en botaderos, etc. [8]. Otros proyectos realizados apuntan a analizar los tonelajes que las palas pueden extraer de los puntos de carguío, velocidad de movimiento de las palas, velocidad de transporte de los camiones durante las diferentes jornadas (velocidades durante el día y velocidades durante noche), tiempos entre fallas y tiempos promedios de reparación [9].

#### **4.5. Simulación de Tráfico aplicado a la Minería**

Los problemas de congestión, seguridad y eficiencia que existen en los sistemas de transporte de algunos países causan enormes pérdidas económicas, daño al medio ambiente y numerosos accidentes de tráfico. Efectos similares pueden aquejar a una operación minera producto de una deficiente gestión del tráfico.

Estos sistemas avanzados de gestión ayudan a los ingenieros a mejorar el manejo de las redes de tráfico. Hay muchos trabajos acerca de esta materia, la mayor parte de ellos se centran en la simulación del tráfico. Estas iniciativas buscan aplicar la tecnología y herramientas computacionales para entregar soluciones efectivas al transporte.

Un factor relevante es considerar la relación entre la exactitud del modelo y la complejidad computacional del modelo dado. Hay muchos modelos que permiten representar los sistemas de tráfico: algunos modelos matemáticos que lo modelan como un problema dinámico de teorías de juego, mientras que otros, por ejemplo, lo hacen a través de análisis de redes. No obstante, en toda teoría de tráfico existen diferentes medidas que sirven para estimar la utilización de las calles o vías de acceso [11].

A continuación, se presentan los siguientes indicadores que son relevantes de tener en consideración para la circulación de equipos en la industria minera.

- **Flujo:** Corresponde a la cantidad de equipos de transporte por unidad de tiempo. Para el presente estudio, se consideran los equipos móviles requeridos para el transporte de insumos y personal desde y hacia los diferentes lugares demandantes. Es decir, se incorporan entonces los buses, camiones y camionetas.
- **Velocidad:** Físicamente, esta se define como la distancia recorrida por unidad de tiempo. La velocidad con que circulan los vehículos es un indicador importante sobre la congestión existente en las diferentes vías de acceso. Particularmente, para el caso de faenas mineras se

tiene adicionalmente restricciones sobre los límites máximos velocidades bastante inferiores a los que se establecen en las autopistas de uso público, condicionando aún más.

- **Tiempo:** Hace referencia al tiempo de viaje que se toma atravesar un determinado segmento de alguna vía de acceso o ruta de la faena. Esta medida es obtenida dividiendo el largo de calle entre la velocidad media en atravesar la calle.
- **Ocupación:** El porcentaje de tiempo en que una ruta o acceso es ocupado por los equipos de transporte que circulan por la faena.
- **Densidad:** Es una medida de la cantidad de vehículos por unidad de distancia, en un lapso de tiempo.
- **Frecuencia de llegadas:** Indica el tiempo de llegada entre vehículos para ser uso de la ruta o una calle. Para este tipo de indicador se utilizan ciertas distribuciones de probabilidad que representan el comportamiento según la actividad que se esté estudiando.

Estos indicadores permitirán realizar un diagnóstico sobre el túnel de acceso en la operación. Para ello, se utilizará una herramienta de simulación desarrollada por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos de la Universidad de Chile (DSim) con la que se representará el proceso de logística total de la faena. Tal como en otros estudios realizados para los sistemas mineros, el objetivo es incorporar el programa de producción al modelo de simulación con el fin de determinar la probabilidad de cumplimiento y distribución del programa [12].

Además, se han elaborado otras metodologías alternativas de análisis de planes productivos y de operación mina, que han intentado incorporar y vincular las principales partes de una faena minera, como mantenimiento, operación y planificación, a través de un indicador como lo es la confiabilidad [13]. Este concepto, para un equipo o infraestructura, puede interpretarse como la probabilidad de que este desempeñe satisfactoriamente las funciones para las que fue diseñado, durante el período de tiempo especificado y bajo las condiciones de operación dadas. Se puede señalar que es una medida que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento y ayuda en el momento de seleccionar un equipo entre varias alternativas [14].

#### **4.6. Software de Simulación DSim Subterráneo**

DSim es un simulador de eventos discretos para sistemas de transporte de material para minería a cielo abierto como minería subterránea. Es una herramienta para la evaluación del desempeño de sistemas mineros complejos, es decir, integra la coexistencia de múltiples equipos, interferencias, evolución del layout en el tiempo, etc. [15].

DSim evalúa en forma integral el comportamiento de un sistema minero de transporte de materiales. En particular, cuantifica: movimiento de material, ley de alimentación a planta, costos, beneficio, avances físicos de la mina, indicadores temporales de la flota de equipos, tiempos de ciclo y rendimientos.

Dentro de las aplicaciones de su uso en la industria se destaca el Proyecto Gabriela Mistral y Ministro Hales (comparación entre diferentes tecnologías de camiones); Proyecto Chuquicamata Subterráneo (combinación de sistema de manejo de materiales); Proyecto Andina Nodo 3500



(evaluación de producción bajo condiciones complejas) y Proyecto Escondida – BHP Billiton donde se evalúa el rendimiento de equipos de carga a lo largo de un turno [15].

Dentro de las ventajas de utilizar este software de simulación se destacan las siguientes características:

- **Potencia:** DSim es un simulador adaptado a minería que permite simular condiciones dinámicas de los caminos y el sistema de transportes.
- **Facilidad de Uso:** Fue desarrollado en conjunto con profesionales del área minera, de forma que tanto los inputs requeridos y los reportes de resultados generados están orientados a las necesidades de la esta industria.
- **Adaptable y en permanente desarrollo:** El software se puede adaptar a las necesidades de los usuarios y despliegue de información de lo que se busca evaluar.

Es esta última característica la que permite adaptar el software de simulación al estudio de logística enfocado al transporte de personal e insumos. No obstante, debido a que la operación minera en estudio se encuentra aún etapas tempranas de ejecución, no se tienen datos e información sobre tiempos de viaje, esperas u otros elementos con los cuales se puedan comparar los resultados obtenidos de la simulación. Es por ello, que se recurre a realizar una comparación de los resultados con una simulación realizada mediante una planilla Excel.

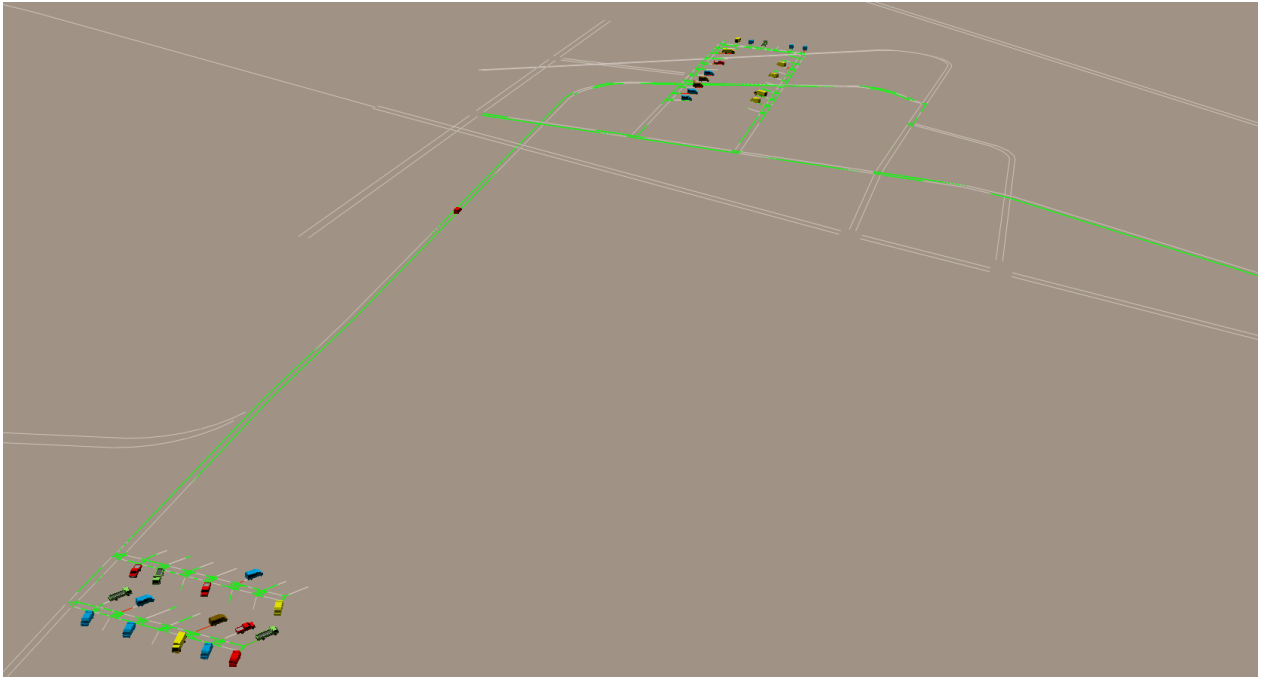
La pregunta que surge naturalmente es por qué no usar Excel como instrumento de simulación principal, o por qué no usar otro software comercial para la obtención de resultados. En la siguiente tabla se muestra un resumen comparativo sobre el potencial que tienen ambas herramientas para ciertos aspectos importantes que son considerados en la simulación.

**Tabla 4.1. Resumen comparativo sobre el potencial de ambas herramientas.**

Ítem	Excel	DSim
Visualización	No	Sí
Aplicación	Diversos usos	Minería Subterránea
Interferencias Operacionales	No es posible analizar	Sí es posible analizar
Magnitud del Modelo	Limitado a poca cantidad de elementos en el sistema	Gran cantidad de elementos en el sistema
Variabilidad e Incertidumbre	Limitado a evaluar pocos escenarios	Facilidad para evaluar diversos escenarios
Tiempo de Construcción	Elevado	Elevado
Tiempo de Implementación	Elevado (según la complejidad del modelo)	Rapidez para analizar cambio de parámetros (una vez construido el modelo)
Tiempo de obtención de resultados	Alto, condicionado por realización de diversas réplicas	Dependiente del tiempo de simulación y del tamaño del modelo

El principal desafío del software de simulación DSim radica en la construcción del modelo que represente la logística de la faena. Una vez construido, la obtención de resultados es bastante simple, permitiendo modificar de manera sencilla diversos parámetros condicionantes de los tiempos de viaje que hacen posible evaluar una serie de escenarios distintos.

A continuación, se muestra la interfaz de visualización del DSim para la simulación de transporte de insumos y personal en el interior de la faena.



**Figura 4.1. Interfaz de visualización DSim Subterráneo.**

En la figura anterior se ilustra el momento en que los buses se encuentran en los paraderos interiores al instante que se produce el descenso de personas del turno entrante y la subida de personas del turno saliente. En relación a los colores observados, el software de simulación tiene el potencial de representar visualmente el factor de ocupación del bus o factor de carga de los equipos de transporte de insumos mediante el uso de diferente gama de colores que se muestran a continuación.

**Tabla 4.2. Variables aleatorias generadas en la simulación.**

Color	Factor de Ocupación (%)
Blue	75 - 100
Yellow	50 - 75
Brown	25 - 50
Red	0 - 25

De este modo, una de las grandes ventajas que posee DSim con respecto a otros softwares comerciales de simulación, es la flexibilidad que este posee para la adaptación e incorporación de diversos factores que hacen más representativo el modelo de simulación a la realidad de la operación.

## 4.7. Variables Aleatorias y Distribuciones de Probabilidad

Se denomina variable aleatoria, a una variable  $X$  que puede tomar un conjunto de valores  $\{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}\}$ , con probabilidades  $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_{n-1}\}$ . Por ejemplo, en la experiencia de lanzar monedas, los posibles resultados son  $\{\text{cara, cruz}\}$ , y sus probabilidades son  $\{1/2, 1/2\}$ . Para simular un proceso físico, o hallar la solución de un problema matemático es necesario usar gran cantidad de números aleatorios. Se puede tener variables aleatorias discretas, continuas e independientes. Una variable aleatoria discreta puede tomar valores numéricos específicos y pueden tomar un número finito de muchos valores y se les llama variables aleatorias finitas. Por otro lado, las variables aleatorias continuas son aquellas que se encuentran dentro de un intervalo comprendido entre dos valores cualquiera (esta puede asumir un infinito número de valores y estos se pueden medir).

La generación de variables aleatorias o estocásticas significa la obtención de variables que siguen una distribución de probabilidad determinada. La generación de estadísticas simuladas, o sea de los valores de las variables aleatorias, tienen una naturaleza enteramente numérica y debe soportarse por números aleatorios, generados por algún método. La distribución de probabilidad de una variable aleatoria discreta es una tabla, gráfica, fórmula o cualquier otro medio que se usa para especificar todos los valores posibles de la variable, junto con sus respectivas probabilidades.

Por lo tanto, cada distribución de probabilidad tiene asociada medidas (parámetros) similares a las medidas descriptivas que se han señalado para los datos muestrales (estadísticas). Así, la distribución de probabilidad de una población posee una medida que es equivalente al concepto de media muestral y se denomina valor esperado, además, el equivalente de la varianza también existe y la llamamos varianza poblacional.

Al incluir estas variables aleatorias a la simulación, es posible evaluar la incertidumbre presente en la magnitud de los tiempos de viaje que demorarán los equipos, los tiempos de espera en los diferentes sectores y la cantidad de vehículos que circularán en cierta cantidad de tiempo por una vía. La simulación transfiere la incertidumbre, se debe saber antes de cuantificarla. Además, multiplica escenarios y permite sensibilizar los posibles resultados que se pueden conseguir.

Por ejemplo, en la planificación estratégica existen ciertos elementos que son interesantes de simular tales como los son las variables regionalizadas y variables temporales. Por otra parte, es posible afirmar que siempre existe un cierto grado de incerteza en optimización de Pit, traslado a reservas recuperables originado por el modelo geológico, las leyes y la relación estéril/mineral. Para este trabajo, es de especial interés evaluar la incertidumbre sobre los tiempos de viaje, velocidades, tiempos de atención, etc. Luego, las variables aleatorias estudiadas para este trabajo se detallan en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Variables aleatorias generadas en la simulación.**

Variable Aleatoria	Distribución de Probabilidad	Parámetro	Unidad	Valor
Atención control acceso	Exponencial	Media	[Min]	0 a 5
Ingreso de Buses al Túnel	Poisson	Media	[Segundo]	15
Velocidad Máxima	Normal	Media; Varianza	[km/h]	40 a 50
Asignación destinos	Uniforme	[Min, Máx.]	-	1 a 54
Pasajeros transportados	Normal	Media, Varianza	[Unidad]	16 y 40

## 4.8. Teorías de Colas o Líneas de Espera.

Para el análisis del túnel de ingreso de la operación, se requiere utilizar un modelo que permita simular el tráfico de vehículos en el túnel de acceso. Como ha sido mencionado previamente, la demanda por el recurso “acceso y circulación por la ruta” proviene de diversas actividades necesarias para el desarrollo de las labores, tales como personal, hormigón, combustible, entre otros. De este modo, para modelar el tráfico en redes de los recursos se empleará la teoría de colas o líneas de espera. Este modelo de colas ha sido utilizado en varios estudios realizados en la División el Teniente en el área de logística. Con esta teoría se busca estimar la demanda por hora, medida en la cantidad de vehículos enfrentados en unos de las rutas de acceso a la faena.

Existen varios tipos modelos según el tipo de colas, sin embargo, para este estudio se utilizará un modelo simple de teorías de filas M/M/1. Kendall implementó aquella notación, la cual permite identificar las características de una línea de espera por medio de una serie de iniciales [16]. Luego, para este sistema M/M/1 se tienen las siguientes características.

- M/-/-: Se tiene un sistema de llegada que se producen según el proceso de Poisson de razón  $\lambda$ , donde los tiempos entre llegadas estarán distribuidos exponencialmente  $\text{Exp}(\lambda)$ .  $\lambda$  es el número medio de llegadas por unidad de tiempo en unidades [vehículos/hora].
- -/M/-: Los tiempos entre servicios son distribuidos de manera exponencial,  $\text{Exp}(\mu)$ . Para este caso,  $\mu$  corresponde a la capacidad de flujo que posee el túnel de acceso en unidades [vehículos/hora].
- -/-/1: Indica que se tiene un único canal o servidor en el sistema (equivalente al túnel de acceso).

Para este sistema, se define la intensidad de tráfico, también conocida como factor de utilización ( $\rho$ ), y es expresada de la siguiente manera.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

**Ecuación 4.1. Factor de utilización del túnel de acceso.**

La descripción de las variables  $\lambda$  y  $\mu$  que considera la Ecuación 4.1 ya han sido mencionadas previamente. Otros resultados relevantes para el estudio son proporcionados por las siguientes ecuaciones. Cabe mencionar que la palabra sistema hace referencia a la etapa previa al ingreso al túnel de acceso.

$$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$$

**Ecuación 4.2. Probabilidad que existan “n” vehículos en el sistema.**

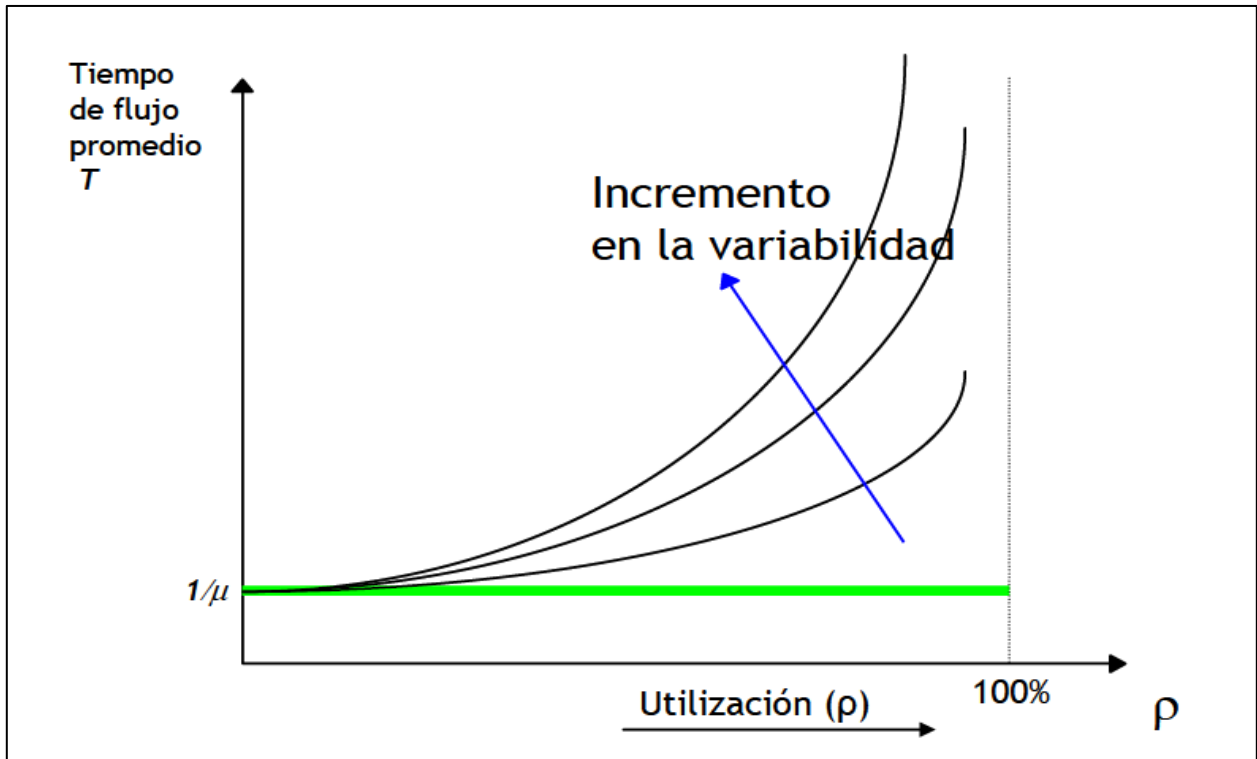
$$N_s = \left(\frac{\lambda}{\mu - \lambda}\right)$$

**Ecuación 4.3. Número medio de vehículos en el sistema.**

$$E_s = \left( \frac{1}{\mu - \lambda} \right)$$

**Ecuación 4.4. Tiempo medio de espera de los vehículos en el sistema.**

Con el objetivo de ilustrar la variabilidad en la utilización del túnel de acceso producto de un cambio en los factores  $\lambda$  y  $\mu$ , se muestra el siguiente gráfico.



**Gráfico 4.1. Variabilidad del factor de utilización túnel de acceso ante las variables  $\lambda$  y  $\mu$ .**

Claramente, con este modelo se puede visualizar que en la medida que la utilización, es decir, la razón entre la demanda ( $\lambda$ ) y la capacidad ( $\mu$ ) aumenta. Lo mismo ocurre con el tiempo total en el sistema (espera antes de ingresar al túnel), pero el aumento en este último caso pasa a ser exponencial. Por ello, al acercarse la demanda a la oferta, se producen efectos cada vez más importantes en las esperas en el sistema.

Otro efecto importante se da con la variabilidad que pueden experimentar la capacidad y demanda del sistema. Variabilidad en la capacidad se puede dar con tiempos de circulación en el túnel cambiantes, como los que ocurren efectivamente en la realidad. Mayores tiempos de circulación puntuales disminuyen momentáneamente la capacidad del túnel, lo que hace aumentar los tiempos de espera. También pueden cambiar los patrones de la demanda por problemas en los caminos de acceso al sector. Ello genera mayor variabilidad por el lado de la demanda, lo que también hace aumentar las esperas frente al túnel [17].

## 4.9. Indicadores de Desempeño Logístico y Control de Gestión

Para analizar el rendimiento de un determinado proceso, evaluar logros, señalar falencias, o más aún, para realizar evaluaciones comparativas entre diversas organizaciones, es que se recurre a indicadores de desempeño como una herramienta de gestión. Para ello, estos indicadores deben ser cuantificables, consistentes y comparables, además, deben ser significativos y enfocados a la acción, de tal manera que se puedan mejorar los resultados mediante cambios en los procedimientos de trabajo.

Ciertos estudios señalan que las implicancias de la medición en el mejoramiento de los procesos, están relacionadas con la posibilidad de adelantarse a la ocurrencia de las dificultades, identificar con mayor exactitud las oportunidades de mejoramiento con el fin de conocer oportunamente las áreas problemáticas y entender los bajos rendimientos [18].

Además, se menciona una serie de objetivos que están orientados a conseguir los indicadores logísticos. Establecer objetivos es una tarea crucial para el éxito de los sistemas de gestión que se administran, puesto que los objetivos dan luces del desempeño del sistema, pistas de puntos de mejora e información para controlar, planificar intervenciones y asegurar la mejora continua [19].

- Identificar y tomar acciones sobre los problemas operativos.
- Medir el grado de competitividad de la compañía frente a sus competidores nacionales e internacionales.
- Satisfacer las expectativas del cliente mediante la reducción del tiempo de entrega y optimización del servicio prestado.
- Mejorar el uso de recursos y activos asignados, para aumentar la productividad y efectividad de las diferentes actividades hacia el cliente final.
- Reducir gastos y aumentar la eficiencia operativa.
- Compararse con el sector en el ámbito nacional y mundial (Benchmarking).

Para establecer este tipo de indicadores de desempeño, es vital tener claro que es lo correcto y cómo hacerlo correctamente. Para el caso de la logística, sólo se deben desarrollar indicadores para aquellas actividades o procesos relevantes que condicionen de manera relevante los resultados (buenos o malos).

Además, estos deben satisfacer aspectos tales como:

- Abarcar tiempo, calidad y costo.
- Simples de entender y medir.
- Coherentes con el resto de las áreas de la empresa.

- Construidos en conjunto con niveles jerárquicos inferiores.
- Aceptados por la mayoría de la organización.
- Transparente para todos.

Existen 4 tipos de indicadores logísticos: indicadores de posicionamiento, indicadores de flexibilidad, indicadores de integración e indicadores de medición. Estos últimos hacen referencia a la capacidad de medir el desempeño logístico y son los que se utilizarán a lo largo del desarrollo del trabajo.

Para una correcta medición del desempeño logístico de la operación se recurre a una serie de indicadores logísticos cuyas mediciones están orientadas hacia la **satisfacción del cliente, utilización de activos, costos operacionales, calidad, tiempo de ciclo y productividad.**

La satisfacción del cliente corresponde a mediciones sobre los atributos de servicios valorados por la compañía tales como oportunidad, completitud y exactitud. Sus mediciones están orientadas a cumplimiento de fechas de entrega, exactitud del pedido, completitud del pedido, información y comunicación confiable.

Por su parte la utilización de activos implica mediciones que indican valores en niveles numéricos de los activos en la cadena, tales como instalaciones, vehículos, equipos y capital de trabajo. Sus mediciones están orientadas a rotación de inventario, capital de trabajo, niveles de inventario promedio y exactitud del inventario.

En relación a los costos operacionales, se tiene mediciones que cubren los egresos por costos operacionales de la cadena como mano de obra, mantenimiento, transporte, servicios de información y arriendos. Sus mediciones están orientadas a costos de adquisición de productos, costos de logística de entrada y logística de salida, costos de calidad, costos operacionales de las instalaciones y costos de procesamiento de pedidos.

Los indicadores de calidad muestran la conformidad o inconformidad de las operaciones con los estándares acordados para el funcionamiento integral de la cadena. Sus mediciones están orientadas a cumplimiento de proyecciones, niveles de inventario fuera de lo planificado, cumplimiento de los programas, errores en los pedidos/entregas, pérdidas y devoluciones.

Para los tiempos de ciclo, se hacen mediciones para la duración de las actividades o el periodo de eventos importantes. Sus mediciones apuntan a tiempo que toma la actividad, tiempo que toma la revisión de inventarios, tiempo para el procesamiento del pedido, tiempo para la configuración del pedido, tiempo para el despacho del pedido y tiempo de ciclo para el proceso productivo.

Finalmente, indicadores de productividad intentan medir pedidos procesados por unidad de tiempo, mediciones de costo operacional por unidad de activo y/o costo total de la cadena por unidad de venta.

Particularmente, para el presente estudio se incorporarán indicadores asociados al tiempo y la productividad de ciertas actividades y procesos. Queda fuera del alcance otro tipo de indicadores de desempeño como los son aquellos relacionados a la calidad del producto u otros asociados a

compra y entrega de éstos. Estas mediciones de desempeño serán aplicadas tanto a los centros de almacenamiento como a los equipos de transporte de insumos y personal.

A continuación, se enumeran los indicadores principales que son evaluados en el proyecto, los cuales son útiles para realizar un diagnóstico de la operación.

- **Capacidad de Flujo:** Refleja la cantidad de equipos que pueden circular por una calle durante un periodo de tiempo determinado. Se mide en [vehículos/hora].
- **Capacidad de Transporte:** Corresponde a la capacidad de ingreso/salida de personal en una cierta cantidad de tiempo. Sus unidades de medida son [personas/hora].
- **Utilización de Vías:** Se refiere a la relación que se tiene entre la cantidad de vehículos que están circulando por una ruta y la capacidad de flujo máxima que es posible circular por ella. Se expresa en [%].
- **Tiempos de Viaje:** Corresponde al tiempo empleado únicamente en el recorrido de las rutas, es decir, considera sólo el tiempo cuando el equipo se encuentra en movimiento. Su unidad de medida es en [min].
- **Tiempos de Espera:** Considera todos aquellos tiempos en los cuales el equipo nunca se encuentra en movimiento. Es decir, se compone de los tiempos de detenciones. Se mide en [min].
- **Tiempo de Liberación de Rutas:** hace alusión al tiempo al tiempo transcurrido antes que de un equipo deje de circular por una determinada ruta (sale de la calle e ingresa a otra). Se mide en [min].
- **Velocidad Promedio de Viaje:** Corresponde a la velocidad media con la que circularán todos los equipos según la velocidad máxima permitida. Se expresa en [km/h].

#### **4.10. Normativa General de Tráfico Túnel de Acceso**

Dentro de los componentes exclusivos del Túnel de Acceso se pueden mencionar los siguientes: Portal y Túnel de Acceso, Sistema de Ventilación y Monitoreo Ambiental, Sistema Eléctrico y Alumbrado, Sistema de Señalización, Sistema de Detección de Velocidad, Sistema Detección y Control de Incendios, Sistema de Megafonía, Sistema de Intercomunicadores de Emergencia, Sistema de Circuito Cerrado de TV, Sistema de Monitoreo Geotécnico y Sistema de Control Tráfico.

El tránsito peatonal en el túnel de acceso no está permitido, salvo en algunas situaciones de emergencia o evacuación por incendios en este mismo túnel o el túnel de transporte principal. El personal en trabajo de mantenimiento o reparación del túnel, con el tránsito suspendido en una pista, puede transitar sólo el sector establecido para el mantenimiento.



Por otro lado, se considera que la velocidad máxima permitida en el tráfico vehicular en el túnel de acceso principal es de 50 [km/h], de acuerdo al informe de velocidad vial emitido. Una velocidad máxima mayor que ésta no es aconsejable por la pendiente de -8,7 [%]. En el caso de cargas especiales o peligrosas (explosivos o sustancias inflamables) esta se reduce a 25 [km/h]. La velocidad máxima de 50 km/h está refrendada en el Informe de la Universidad de Concepción (Ver referencia [10]) y la reducción a 25 km/h para las cargas especiales o peligrosas es una medida de seguridad adicional. A su vez, todos los vehículos deben contar con un sistema de detecciones de proximidad. Para el caso de los buses, la frecuencia de entrada de buses es cada 15 segundos y se debe mantener una distancia mínima de 50 metros con respecto al Bus que lo antecede. La autorización de entrada de los Buses al Túnel la da el encargado de la Sala de Control de Tráfico. (SCT).

Otras de las normativas hacen referencia a la exclusividad de tráfico. Durante el periodo de Cambio de Turno, el tráfico en el Túnel de Acceso es unidireccional y es de uso exclusivo de los Buses que realizan esta actividad, salvo que se produzca un accidente y sea necesario autorizar el Tráfico de Vehículo de Emergencia para trasladar personal accidentado.

Las preferencias de tráfico vehicular se establecen en forma jerárquica, según se indica a continuación:

- Ambulancias.
- Vehículos con equipos de rescate.
- Buses con personal en cambio de turno.
- Vehículos transporte de explosivos y/o peligrosas.
- Vehículos livianos.
- Vehículos de carga o equipos.
- Equipos mineros con escolta.

## **5. METODOLOGÍA DE TRABAJO**

A continuación, se muestra la metodología de trabajo propuesta que se seguirá para conseguir los resultados deseados según los objetivos que fueron definidos. Para ello, se definen 2 capítulos correspondientes a la logística de personal y la logística asociada al abastecimientos de los suministros.

### **5.1. Logística de Transporte de Personal**

La metodología de trabajo es estructurada en 3 grandes secciones que buscan facilitar el desarrollo del estudio. El objetivo inicial es lograr un entendimiento de la problemática, para así acercarse a una solución desde una perspectiva que sea acorde a los intereses y condiciones actuales de la compañía. Además, se busca enfocar el desarrollo del estudio hacia una metodología que haga posible obtener los resultados deseados dentro de los plazos estimados.

#### **5.1.1. Identificar las Variables Influyentes del Sistema**

Inicialmente, es fundamental realizar una revisión previa del estado del arte sobre los procesos de logística aplicada a las operaciones mineras y otro tipo de actividades a nivel industrial. El objetivo es establecer el fundamento teórico que permita sustentar el estudio a realizar.

Posteriormente, se desarrolla una recopilación de antecedentes sobre requerimientos de insumos y personal necesarios que se tendrán a partir de la producción en régimen de la operación (segmentación de los materiales según tipo de manipulación y cuantificación de los flujos), a partir de ciertos informes técnicos emitidos a la fecha por la compañía.

En relación a la recopilación de antecedentes, ésta se realizará sobre la condición estimada en la operación que se tendrá a partir de la producción en régimen de la mina. Lo anterior hace referencia al plan estimado de 140,000 [tpd] que se alcanzará para el máximo ritmo de producción establecido para el proyecto. Así, se busca incorporar el programa de producción al modelo de simulación con el fin de determinar los requerimientos de servicios e insumos asociados a la producción.

Además, se debe definir la red de logística y diseño de las estrategias de logística. Ello considera determinar el número de instalaciones, su localización, funciones, capacidad de almacenamiento, etc. Es decir, es necesario poseer la información completa de los destinos al interior mina de los camiones y los vehículos livianos, además de los destinos finales de los colaboradores de obras y proyectos.

#### **5.1.2. Interacción de las Variables**

De manera paralela, es posible comenzar con la construcción y desarrollo de un modelo de simulación que reproduzca el funcionamiento del sistema de transporte de los insumos e ingreso de personal para la faena en cuestión. Sin embargo, previamente se debe realizar un estudio sobre los principios de funcionamiento del software de simulación a emplear.

Esta etapa culmina con la realización de las simulaciones para diferentes escenarios que serán evaluados.

### 5.1.3. Obtención y Análisis de Resultados

Finalmente, se tiene el diagnóstico de la situación y recomendaciones a la operación. De manera general, se trata de seguir una metodología que permita establecer un diagnóstico global del proceso de logística de la faena a partir de un análisis de los procesos críticos, junto con identificar los elementos principales que lo definen.

Se busca desarrollar una estrategia para una correcta implementación de cada proceso desarrollado en la operación. Para ello, se seguirá la metodología empleada en otros estudios similares, donde en un comienzo se realiza una representación gráfica del proceso de logística, haciendo posible así identificar los procesos e insumos claves, su variabilidad e incertidumbre asociada [20].

Finalmente, en la Figura 5.1 se describe la metodología de trabajo a seguir durante del desarrollo del presente estudio. La etapa final del proyecto involucra realizar un diagnóstico inicial de la faena para posteriormente realizar sugerencias y recomendaciones a la operación.

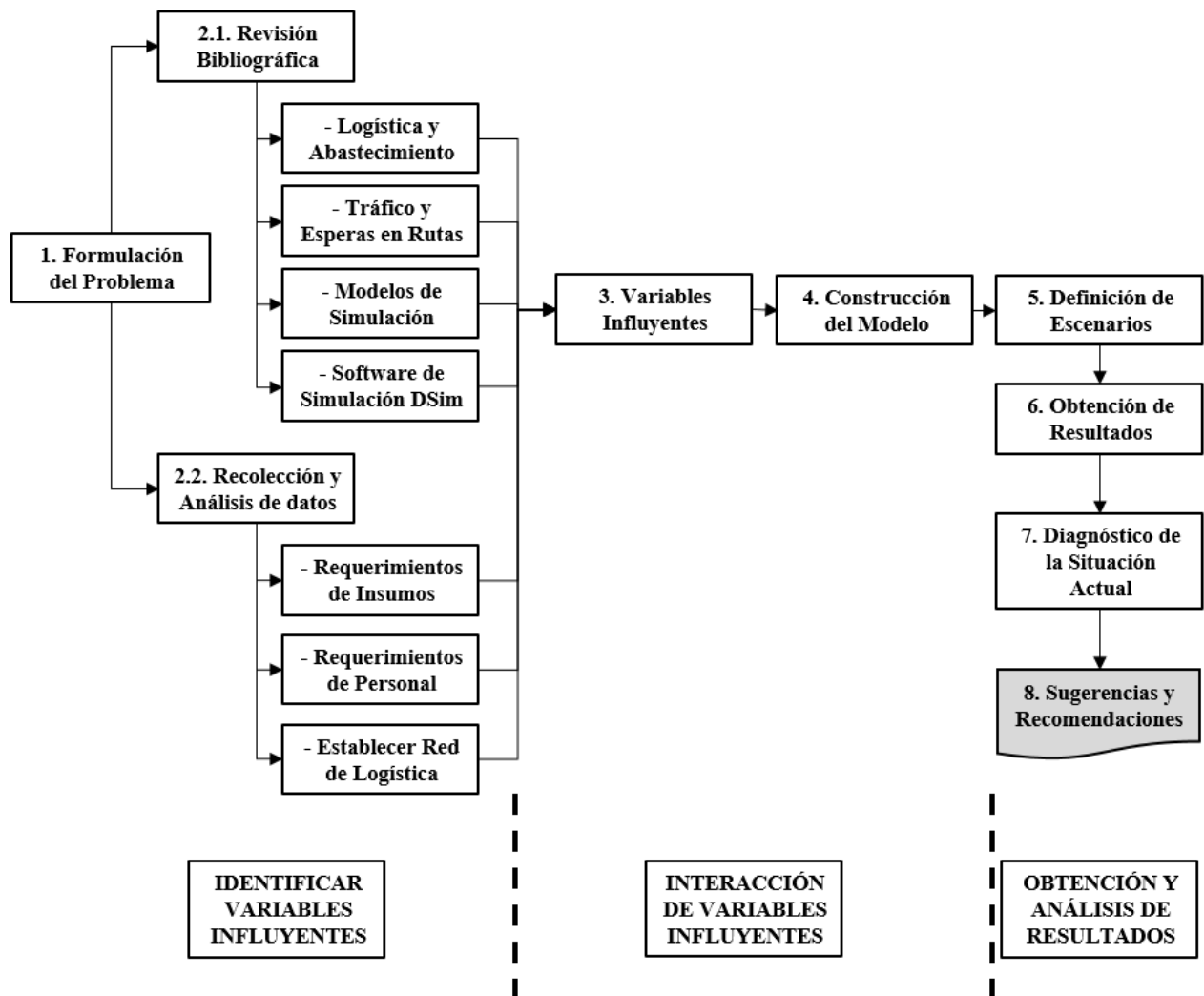


Figura 5.1. Metodología de trabajo establecida para el estudio.

## 5.2. Logística Abastecimiento de Suministros e Insumos

Para un primer estudio que permita ilustrar los desafíos y costos asociados a la logística de insumos, se elabora la siguiente metodología separada en 3 etapas principales.

A continuación, se presenta a título indicativo, la interrelación de cada una de las fases del estudio y su relación con las demás especialidades. Es importante indicar que este trabajo solamente incorpora las fases 1 y 2 antes indicadas, es decir, no se tienen estudios económicos involucrados.

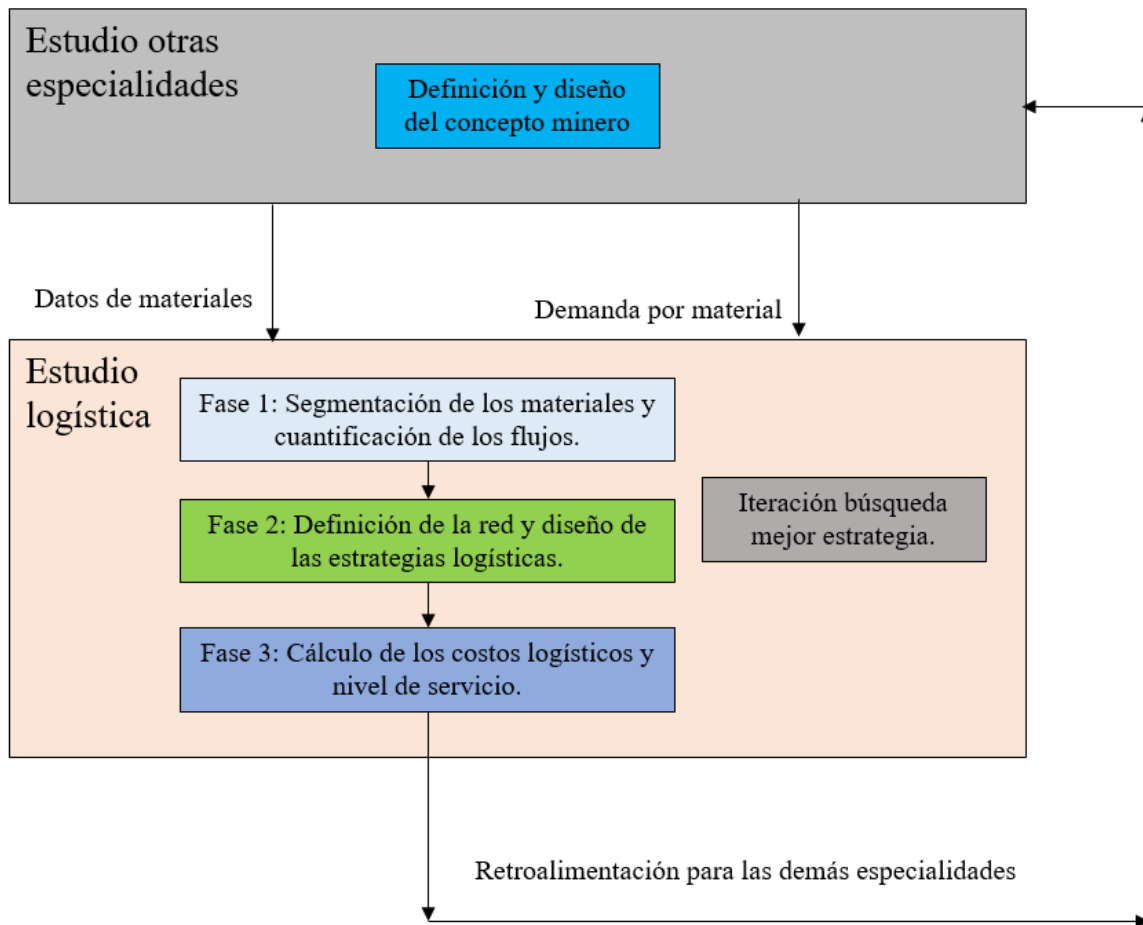


Figura 5.2. Metodología de trabajo para estudio de suministros.

### 1. Segmentación de materiales y cuantificación de los flujos.

Esta primera etapa se comienza con la definición inicial de los inputs para la segmentación y agrupación de materiales requeridos por la mina. La agrupación de materiales debe seguir un criterio en base a medios de transporte similar, formas de almacenaje, normativa de tráfico que los rige, etc. Para se propone las siguientes agrupaciones:

- Materiales de consumo general (repuestos, implementos de seguridad, etc.).
- Materiales de obra (pernos, mallas, marcos, etc.).

- Hormigón.
- Componentes.
- Asociados a alimentación de personal.
- Residuos.

Posteriormente, se debe realizar la recopilación de los datos básicos de los flujos principales. A igual que la metodología utilizada para la logística de personal se debe realizar un análisis de la demanda requerida.

- La demanda (en toneladas o m<sup>3</sup>) debe ser cuantificada por unidad de tiempo para cada una de las agrupaciones que han sido mencionadas.
- Es necesario definir los patrones de estacionalidad, es decir, dentro de un mes, dentro de una semana o dentro de un día).
- Debe realizarse una extrapolación de los datos. Debe existir una evaluación de los flujos año a año dentro del periodo de evaluación de la mina.
- Generación de los diagramas de flujo de materiales en base a la demanda estimada y diseño inicial de la mina.

## **2. Definición de la red y diseño de las estrategias logísticas.**

Esta segunda fase comprende el diseño de la red de logística obteniendo el diseño de una estructura de red logística para la logística de materiales y segmentos de materiales antes definidos. En definitiva, corresponde para esta fase definir:

- Obtener la localización y el número de instalaciones logísticas (bodegas o centros de distribución) para estimar correctamente el flujo de materiales de cada segmento de materiales definidos en la fase anterior.
- Estimación de flujo y stock asociado a cada una de las instalaciones logísticas. Ello incluye definición del tamaño y capacidades de atención de demanda.
- Finalmente, contar con información sobre el sistema de transporte de materiales. Es decir, es necesario conocer con claridad las características técnicas y capacidad que tienen los sistemas de transporte que forman parte del modelo.

## **3. Análisis de la información.**

La última etapa comprende la discusión de la información asociada a los costos y tiempos. Lo anterior permitirá estimar, por ejemplo, ¿cómo los tiempos muertos pueden afectar a la productividad de la operación?.

- Tiempos muertos durante el traslado de personal.
- Tiempos muertos por falta de abastecimiento en obras de desarrollo.
- Tiempos muertos por esperas en los accesos.

A su vez, se debe realizar una estimación de los costos logísticos que genera la red y los flujos de materiales. Es importante tener claridad sobre los costos de transporte, costos de operación de las instalaciones, costos de los sistemas informáticos y de comunicación, y los costos generales de administración. Para el caso de los costos de transporte, su valor evidenciará la gestión que se tiene sobre el traslado de los diferentes insumos requeridos, como por ejemplo, lo puede ser el nivel de remanejo.

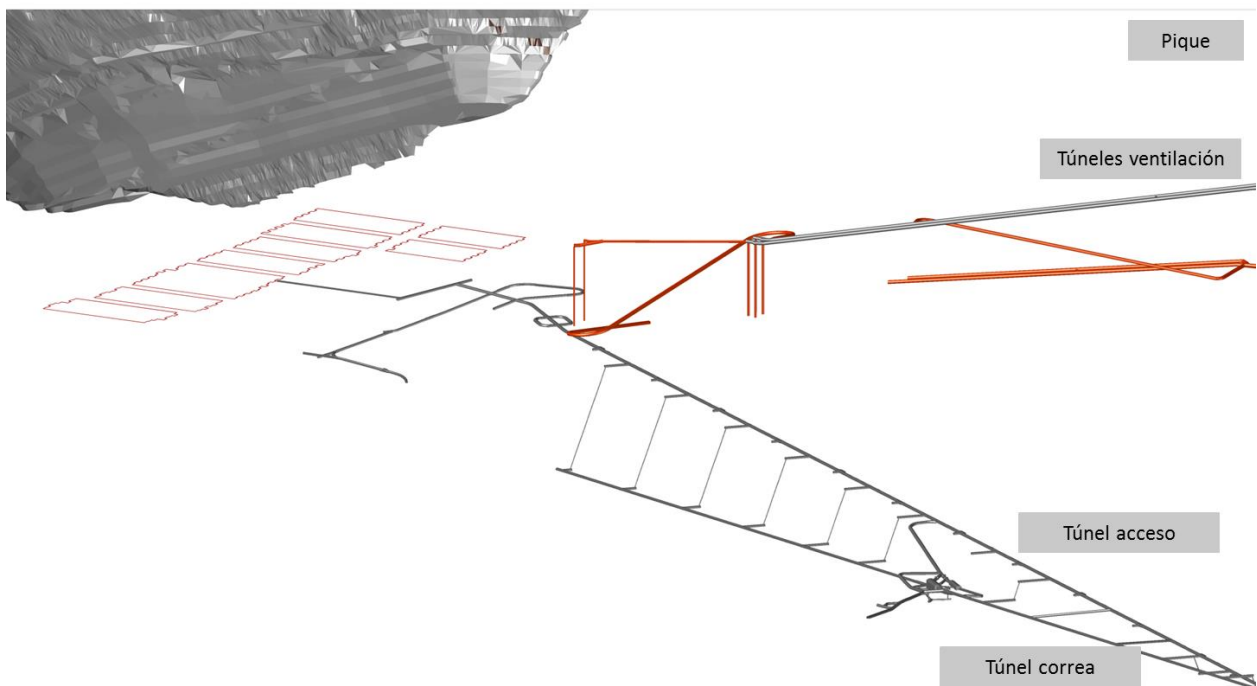
Finalmente, con todo se entrega una retroalimentación (con recomendaciones y sugerencias) en cuanto a las especificaciones de dimensiones, capacidades de los accesos y principales túneles de circulación, como así también la localización y tamaño de las instalaciones logísticas, para que estos antecedentes sean considerados en los diseños posteriores.

## 6. VARIABLES INFLUYENTES DEL SISTEMA

Luego de la revisión bibliográfica y la recopilación de antecedentes realizada para la faena en estudio, es que se obtiene que los tiempos de viaje de los diversos equipos estarán condicionados principalmente por las siguientes variables:

- Locaciones o Ubicaciones de los Componentes Principales del Sistema.
- Distancias Recorridas.
- Capacidad de Flujo de las Vías.
- Cantidad de Equipos en el Sistema.
- Velocidad de Circulación de los Equipos.
- Tiempos de Espera.

A continuación, se esquematizará y ejemplificará la importancia de estas variables con el transporte de personal. No obstante, la estructura desarrollada es homóloga para el caso de transporte de insumos hacia el interior mina. Además, se enunciarán algunas consideraciones y simplificaciones realizadas para el posterior desarrollo de la simulación. Así, se muestra a continuación un layout general de la mina que se está estudiando.



**Figura 6.1. Layout general mina caso de estudio.**

## 6.1. Locaciones de los Componentes Principales del Sistema

La infraestructura de superficie que está siendo parte del presente estudio corresponde a: Control de Acceso, Casa de Cambio y Bodegas de Operaciones. Uno de los elementos a tomar en consideración corresponde a la ubicación de la casa de cambio, es decir, si ésta está situada en la superficie o en el interior mina), dado que esto condicionará de manera importante la magnitud de las esperas de los buses de transporte de personal en los paraderos interiores.

En lo que respecta a las instalaciones subterráneas, se consideran sectores de mayor demanda o de movimientos de personal y materiales como los son los barrios industriales norte y sur. En aquellos sectores, se estudian áreas asociadas a los centros de almacenamientos y paraderos de buses.

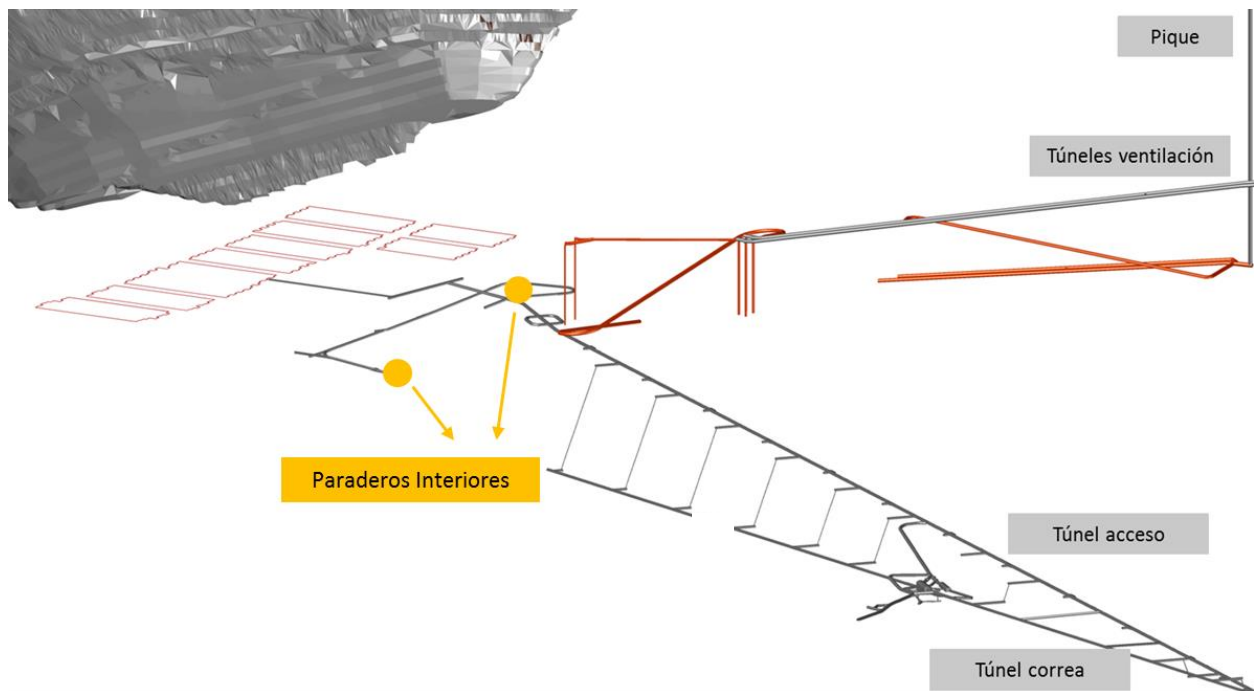


Figura 6.2. Ubicaciones de los paraderos considerados para transporte de personal.

## 6.2. Distancias Recorridas

La distancia que deben recorrer los equipos está directamente asociada al tiempo que estos demorarán en llegar al lugar de destino. Es muy claro que al aumentar la distancia y mantener la velocidad constante, el tiempo de recorrido aumentará.

Además, existe un efecto indirecto sobre los tiempos de viaje asociado a las colas que se van formando en las vías de acceso por la presencia de equipos que viajan a diferentes velocidades. De este modo, las camionetas o buses que circulen a una menor velocidad condicionarán las velocidades de los equipos que vayan tras de ellos determinando así el tiempo final del recorrido. Luego, para calles más largas se tiene una mayor posibilidad de la formación de estas colas.

En la siguiente figura se aprecia la longitud del túnel de acceso principal hacia el interior de la mina de 7.5 [km]. Siendo esta la vía con la mayor distancia que deben atravesar los equipos para llegar



su destino. En promedio, el ciclo completo que deben seguir los buses de transporte de personal contempla un viaje de 16.4 [km].

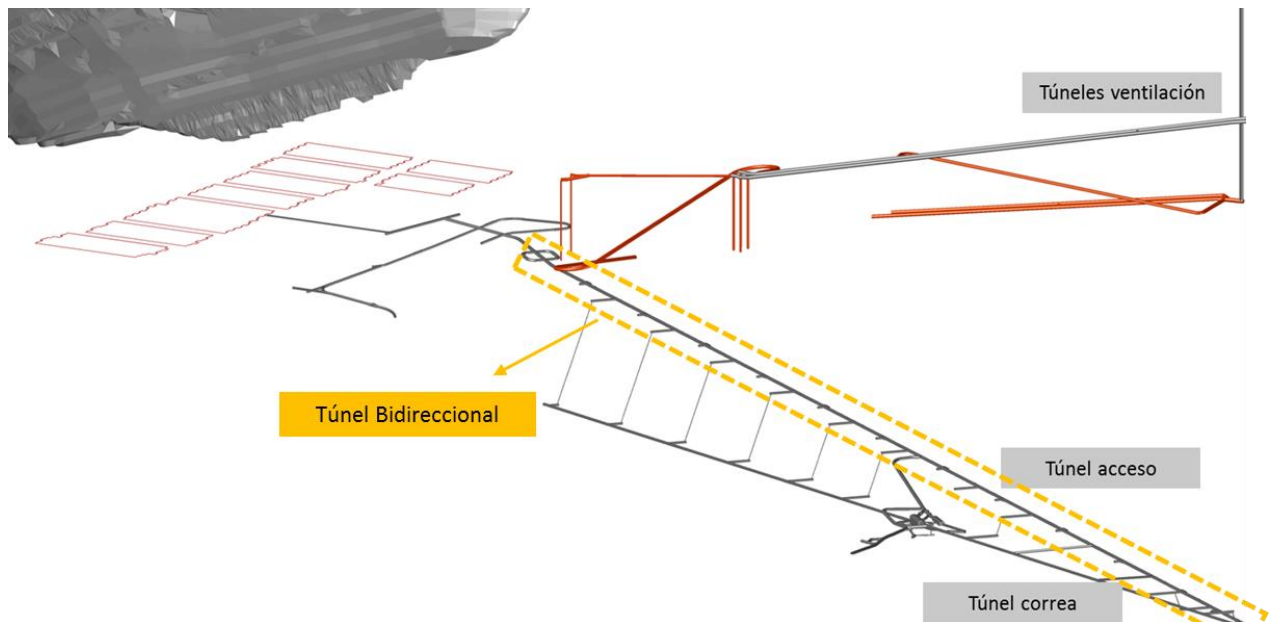
Lo anterior considera el siguiente recorrido:

1. Paradero Superficie
2. Control de Acceso
3. Paradero Interior Mina
4. Paradero Superficie (comienza el ciclo nuevamente).

### 6.3. Capacidad de Flujo de las Vías

La capacidad de flujo de una calle determina la cantidad de [vehículos/hora] que podrán circular simultáneamente por la vía. Este parámetro está ligado a muchos factores como lo es la velocidad promedio con la que circularán los vehículos, la cantidad de vías disponibles, el tipo de acceso y que tan expeditos sean estos.

Otro de los factores a considerar tiene relación a la distancia permitida entre los vehículos. Para una mayor distancia entre los equipos, se tendrá una menor capacidad de flujo para la vía. Cabe mencionar que, para la faena en estudio, se tiene un único túnel de acceso principal bidireccional. Este túnel de acceso conecta la infraestructura interior mina y las instalaciones de superficie.



**Figura 6.3. Capacidad de flujo del túnel de acceso principal.**

La capacidad de flujo de cualquier calle está relacionada en gran medida con el porcentaje de utilización del sistema (definido previamente en los capítulos anteriores). De este modo, una calle con una mayor utilización -gran circulación de vehículos en una cierta cantidad de tiempo- origina mayores interferencias y tiempos de viaje dada la cantidad de equipos que se encuentran interactuando en el sistema.

## 6.4. Número de Equipos en el Sistema

La cantidad de equipos que requieran ingresar al túnel de acceso principal influenciará directamente en los tiempos de esperas que se ocasionarán en la zona del control de acceso. No olvidar otro aspecto importante que involucra los elevados tiempos de esperas que se originarán en los paraderos interiores de la mina. A su vez, un aumento de la flota inevitablemente provocará mayores interferencias en la operación. Todo lo anterior se traducirá tiempos en los ciclos de viajes de los equipos.

Para el caso de los buses para transporte de personas, la cantidad de equipos requeridos está relacionada directamente con la capacidad de pasajeros que estos posean. Es claro notar que contar con buses de mayor capacidad de personas, provocará contar con una menor flota de equipos.

No obstante, otro elemento importante que condiciona la cantidad de buses proviene de la logística de personal, es decir, idealmente se debe buscar que los buses se trasladen entre los diferentes destinos a su máxima capacidad de transporte. Se debe apuntar a un factor de ocupación del 100 [%].

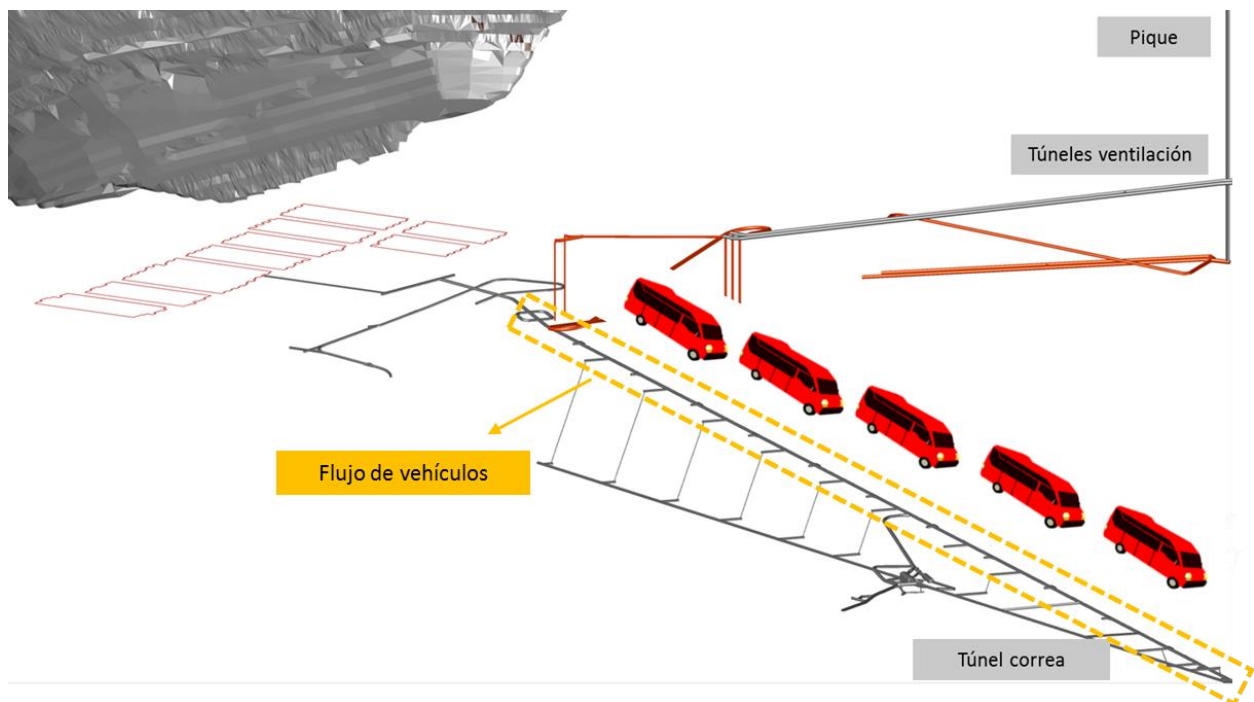


Figura 6.4. Cantidad de equipos presentes en el sistema.

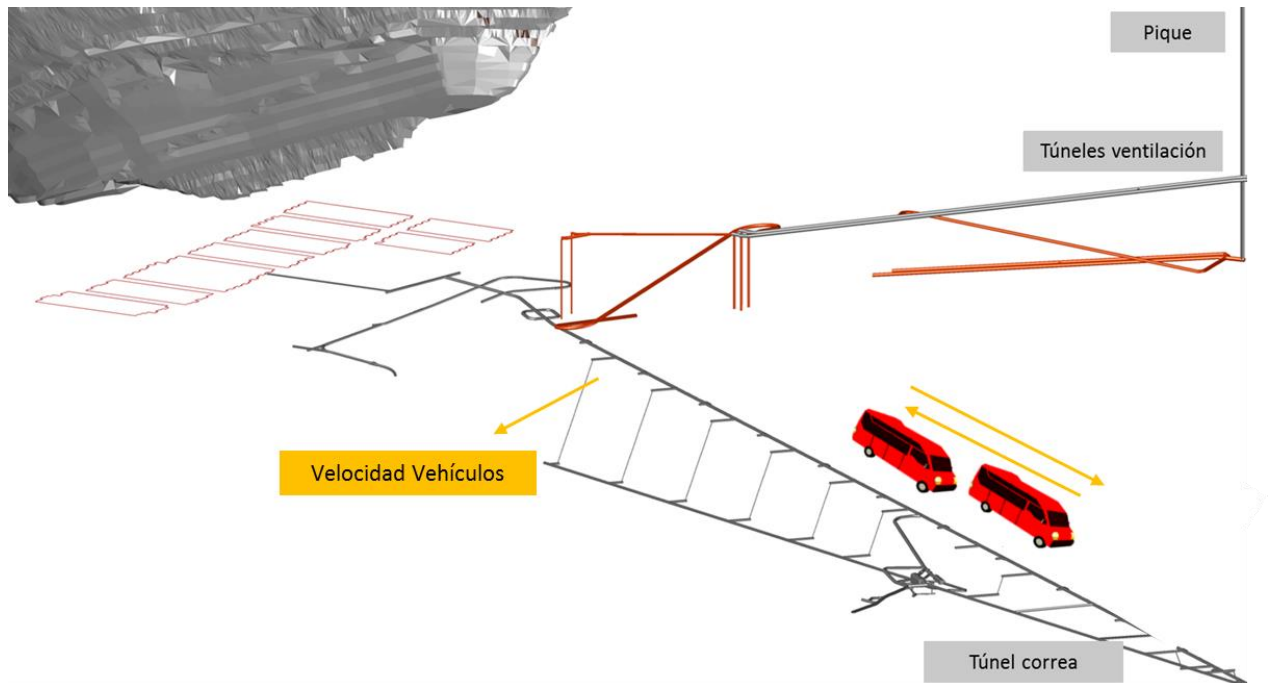
## 6.5. Velocidad de Circulación de los Equipos

Tanto la velocidad de los buses como la distancia que estos deben recorrer, tienen directa repercusión con el tiempo que estos demorarán en llegar al lugar de destino. Es claro que, para un trayecto de una longitud fija, el tiempo de viaje disminuirá si se tiene un aumento en la velocidad del vehículo.

Para la posterior simulación, se realiza un análisis de sensibilidad con las velocidades promedio con las cuales los buses recorrerán las calles de los diferentes sectores de la mina. Se consideran

las siguientes 5 velocidades promedios: 30 [km/hr], 35 [km/hr], 40 [km/hr], 45 [km/hr] y 50 [km/hr].

Cabe señalar que la velocidad con la que circulan los vehículos, provienen de una variable aleatoria representada mediante una distribución normal de probabilidad. De esta manera, se tendrán vehículos que viajarán a diferentes velocidades condicionando los tiempos aquellos que circulen a una menor velocidad, es decir, las camionetas o buses que transiten a una menor velocidad limitarán las velocidades de los equipos que vayan tras de ellos, determinando así el tiempo final del recorrido.



**Figura 6.5. velocidad de transporte de los buses a lo largo del túnel de acceso.**

## 6.6. Tiempos de Espera

Los tiempos de espera que se originan en el ciclo de transporte de personas a lo largo del viaje, pueden provocar aumentos significativos en los tiempos programados inicialmente. Existen 3 elementos o situaciones particulares que provocarán esperas de los equipos.

- Esperas generadas en el control de acceso previo ingreso al control de la mina.
- Esperas en las intersecciones de dos o más calles.
- Esperas producidas en los paraderos interior mina.

La magnitud de las esperas generadas en el control de acceso depende de la demanda por acceder al túnel de acceso y la capacidad de atención o ingreso que se tenga en aquella zona. Ambos factores son representados mediante variables aleatorias. Para la llegada de buses se considera una distribución de probabilidad de Poisson, mientras que para la capacidad de atención de los equipos se establece que la distribución exponencial es que la mejor representa este comportamiento.

En las intersecciones se producen detenciones de buses en circunstancias de cruces de equipos que provienen de diferentes calles. En tales circunstancias uno o más buses deberán detenerse cuando se tiene que otro equipo ya está haciendo uso o circulando por una de las vías que unen diferentes calles en la zona de intersección.

El último factor mencionado hace referencia a la llegada y salida de los buses en los paraderos interiores de la mina. Este tiempo está condicionado principalmente por el tiempo que demora en bajar el personal del turno entrante y el tiempo requerido para la subida de personas a los buses del turno saliente). Dado que no se cuenta con la información detallada sobre los tiempos estimados de espera en estos sectores, es que se realiza un análisis de sensibilidad que permita capturar la variabilidad de los diferentes escenarios. Los tiempos de espera considerados son de 15 [min], 30 [min], 45 [min] y 60 [min].

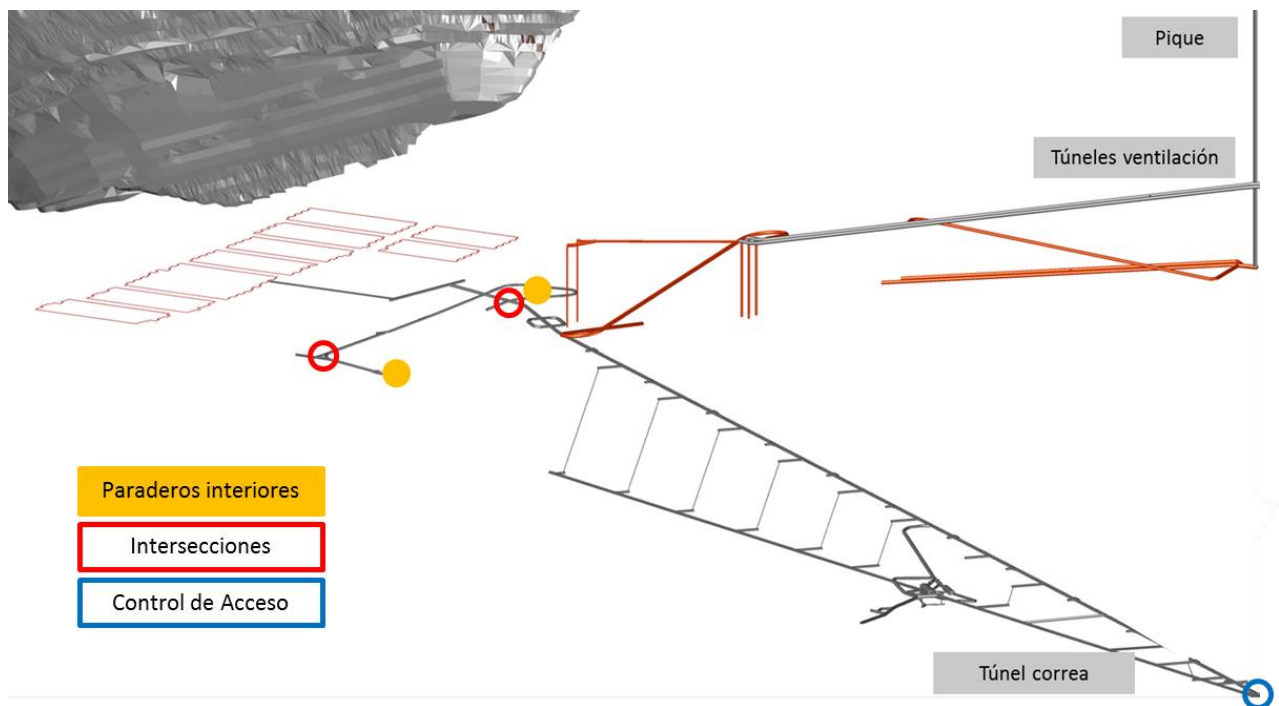


Figura 6.6. Elementos que originan tiempos de espera a lo largo del recorrido.

## 6.7. Interacción de las Variables

Una vez definidas y estudiadas las 5 variables antes indicadas, se busca hacer interactuar todas estas condicionantes en un único sistema integrado mediante una herramienta de simulación a través del software DSim subterráneo.

Al incorporar estas variables, se tendrá una representación más realista que permitirá estimar los tiempos de viaje que realmente demorará el ciclo completo de los buses destinados al transporte de personal. Luego, los tiempos de viaje programados y que son calculados tradicionalmente serán inferiores a los nuevos tiempos estimados por el presente estudio, dado que incorporan en el estudio estas nuevas condicionantes al sistema.



**Figura 6.7. interacción de variables en un único sistema integrado.**

Luego, se muestra a continuación un estudio realizado en unas de las Divisiones de Codelco [17], usando la teoría de Kendall como herramienta para modelar los tiempos de espera de los equipos (ver capítulo 4.8). En la siguiente tabla se muestra la relación que se tiene entre la cantidad de vehículos, la demanda (reflejada en vehículos/hora) y los tiempos de espera ocasionados para los diferentes escenarios evaluados. Evidentemente, gran parte de las variables antes mencionadas están relacionadas entre sí.

**Tabla 6.1. Tiempos de esperas ingreso túnel de acceso.**

<b>Demanda [veh/h]</b>	<b>Esperas Media [min]</b>	<b>Espera al 75% [min]</b>	<b>Esperas al 95% [min]</b>	<b>% de Incremento c/r a la Situación Actual</b>
65	2	2	4	0
70	2	2	5	8%
75	2	3	6	15%
80	3	3	8	23%
85	4	5	11	31%
90	6	8	17	38%
91	7	9	19	40%
95	12	16	35	46%
97	20	27	59	49%
98	30	41	89	51%

Nuevamente es visible el efecto que tiene en las esperas un aumento en la demanda. Hasta un 15 [%] de incremento es soportado por el sistema sin generar esperas adicionales excesivas. A partir de un incremento de demanda de un 30 [%], las esperas empiezan a ser importantes.

## 7. MODELO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se describirá en detalle el conjunto de componentes de datos entrada para la simulación, los supuestos y consideraciones básicas realizadas para el modelo y la estructura general del modelo de simulación.

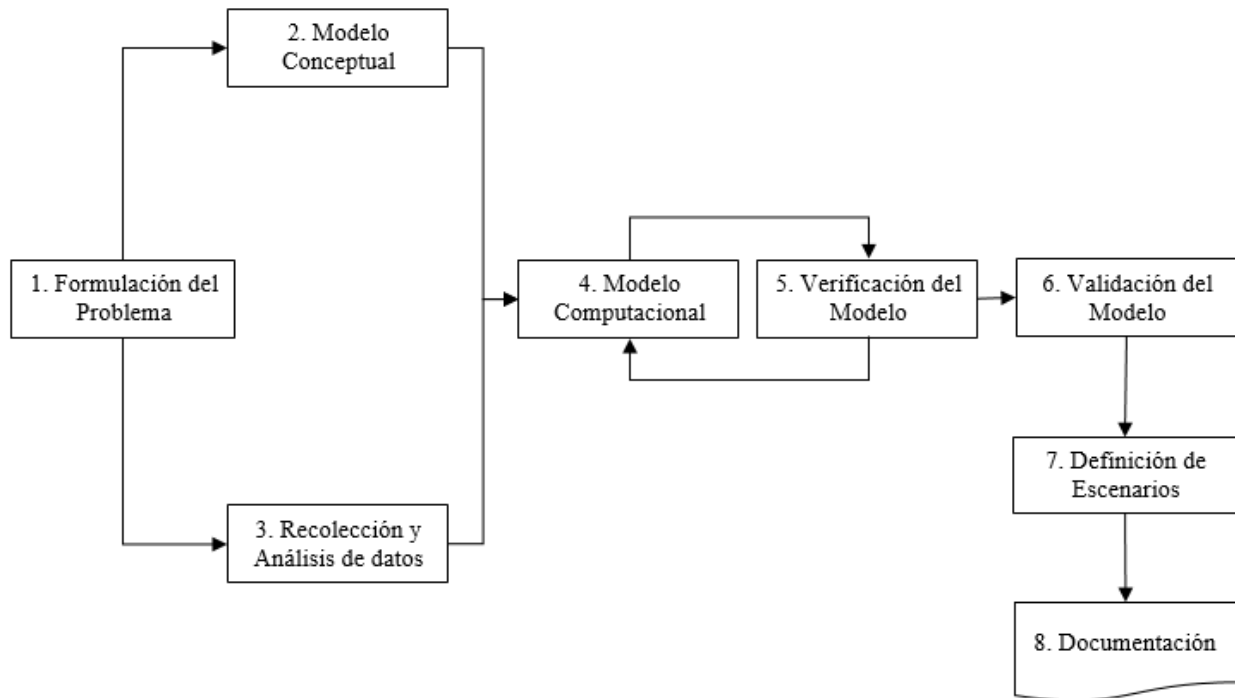
### 7.1. Supuestos y Consideraciones Básicas

A continuación, se describen los supuestos básicos que son realizados en el modelo de simulación para el estudio de la logística y abastecimiento de la faena. La mayor parte de las consideraciones realizadas se basan en informes técnicos previos desarrollados para la faena en estudio.

- Todos los buses utilizados para el transporte de personal son idénticos entre un mismo modelo (se tienen 2 modelos de buses a estudiar: 40 y 16 personas).
- Todos los paraderos interiores son idénticos (se tiene 10 paraderos interiores ubicados en los barrios industriales interiores).
- La asignación de destinos de los buses de transporte de personal se realiza de manera aleatoria entre los 54 posibles paraderos.
- Todos los equipos parten la operación desde el barrio industrial de superficie (inicio de la simulación).
- Una de las estrategias evaluadas para el control de acceso supone el funcionamiento de 3 estaciones paralelo.
- Para la simulación de transporte de personal mediante los buses se considera la normativa definida previamente (que considera la exclusividad de tráfico para los periodos de cambio de turno).
- Todas las rutas incorporadas al estudio son consideradas de tipo bidireccional.
- Se restringe a 50 [km/h] la velocidad máxima permitida para el trayecto de todas las calles que son incorporadas al estudio. Para el caso de cargas especiales se considera una velocidad máxima de 25 [km/h].
- No se incluye en la simulación otros factores adicionales que hagan cambiar el estado funcionamiento “normal” del túnel de acceso, a excepción de lo que respecta el cambio de turno. Es decir, no se incluyen las mantenciones preventivas al túnel de acceso, traslado vehículos de emergencia, etc.
- Se considera que el personal requerido para la operación en régimen de la mina es de 2,500 personas, aproximadamente.
- La frecuencia de entrada de buses es cada 15 [s] y se debe mantener una distancia mínima de 50 [m] con respecto al Bus que lo antecede.

## 7.2. Metodología de Construcción del Modelo de Simulación

La metodología elaborada para la construcción del modelo de simulación se compone de 8 etapas principales [6]. La estrategia definida comienza desde la formulación del problema, hasta la documentación los resultados obtenidos a partir de los diferentes escenarios analizados.



**Figura 7.1. Etapas para la construcción del modelo de simulación.**

Estas etapas deben ser aplicadas a todos los modelos de simulación, en particular para aquellos con simulación de eventos discretos. A continuación, se describen brevemente algunas de estas etapas y sus objetivos [21].

La identificación del problema es necesaria para la construcción del modelo. Además, los alcances del proyecto se definen de manera tal que todos los aspectos claves sean cubiertos y no representen complicaciones adicionales que pudieran desviar del propósito del estudio. En este caso, el objetivo del estudio busca identificar y cuantificar los riesgos en la logística de la faena. Para ello, es necesario estimar los tiempos de viaje, utilización de vías, tiempos de esperas, entre otras.

Los datos reales son usados en el modelo tan pronto como sea posible para chequear el modelo en construcción, dado que la no disponibilidad de datos puede comprometer la validez de los resultados. Al momento en que no se tiene datos disponibles, se recurre a supuestos claramente definidos, junto con análisis de sensibilidad para determinar cuan críticos podrían ser ciertas variables. Uno de los grandes desafíos que involucra la simulación para la logística de una faena, debe sortear la ausencia de este tipo de datos que son fundamentales en garantizar la calidad y éxito de los resultados conseguidos.

Por su parte, la formulación y construcción del modelo es elaborado preferentemente como un grupo de estructuras modulares. Esto ayudará a los mejoramientos y modificaciones posteriores.

La verificación y validación del modelo se realizará mediante 3 técnicas que son mayormente utilizadas.

- La existencia de una interfaz gráfica que permita visualizar el proceso de simulación, representa una herramienta simple para el mejoramiento y la verificación del modelo que está en construcción.
- Los test de validación de los resultados del modelo se realizan con datos realistas conocidos de ciertas faenas o casos disponibles. Para ausencia de ciertos valores requeridos, se realizará una comparación de los resultados obtenidos en relación a otros, conseguidos mediante otra vía o herramienta de simulación.
- Otra herramienta disponible consiste en la creación de casos ‘sintéticos’, los cuales permitirán evaluar el comportamiento del modelo de simulación ante ciertos escenarios extremos creados de manera estratégica.

Solamente después de finalizada esta etapa de verificación y validación, es posible usar el modelo para hacer predicciones confiables en casos donde aún no se tenga resultados reales para una operación.

Finalmente, luego de obtener la confiabilidad a partir de la fase de verificación/validación, el modelo puede ser utilizado para hacer predicciones. Para ello, se genera una serie de escenarios que permitirán analizar la importancia de ciertas variables en estudio. Todos los resultados obtenidos son documentados adecuadamente.

### **7.3. Modelo Conceptual de la Simulación**

Una vez definido el potencial de simulación que posee el software DSim, se procede definir el modelo conceptual que establecerá los criterios de decisión y las acciones que se tomarán a lo largo de la simulación.

Inicialmente, se procede a estudiar lo que respecta al transporte de personas desde el exterior (paraderos de superficie) hacia los paraderos interior mina. Cabe señalar que este estudio de logística de personal solo es posible de realizar sustentándose en una de las estrategias dispuesta por la compañía. Esta estrategia establece que para periodos previos y posterior al cambio de turno se destinan ciertas vías para uso exclusivo de los buses de transporte de personal, es decir, durante este periodo no se tendrán interferencias por parte de los buses con el resto de equipos que se tengan involucrados en la operación en general (exclusividad de tráfico).

El estudio involucra la disponibilidad de dos modelos de buses. No obstante, el modelo presentado en la Figura 7.2 es aplicable a ambos tipos. El ciclo completo de los buses involucra el transporte de personal desde los paraderos de superficie hacia el interior mina o viceversa. Esto implica la toma de decisiones durante ciertos instantes de la simulación que condicionaran finalmente los resultados reflejados en las variables de salida.



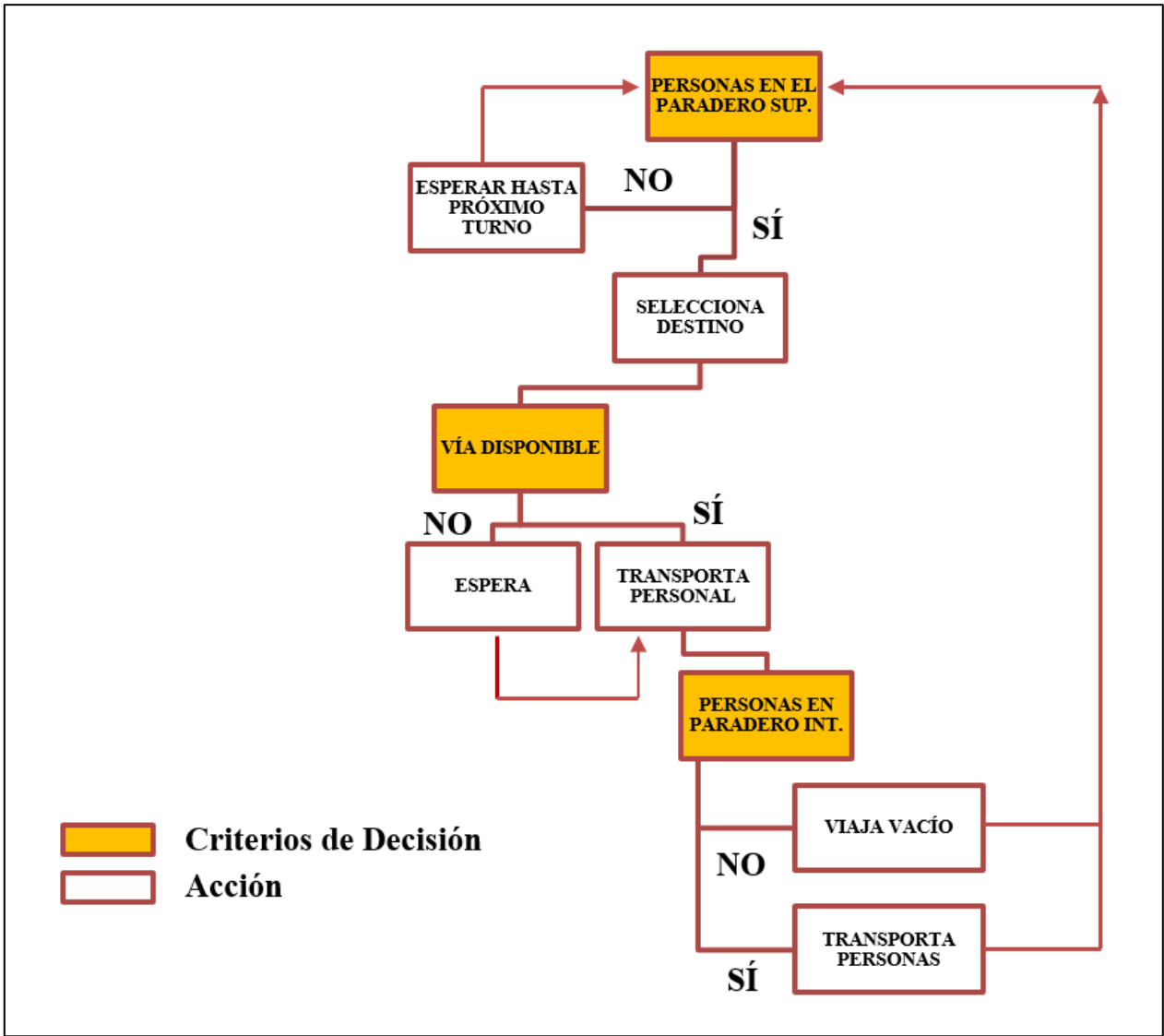


Figura 7.2. Modelo conceptual simulación de transporte de personas.

## 7.4. Variables de Entrada para la Simulación

De manera de conseguir la aleatoriedad en los diferentes escenarios simulados, se incorporan 5 variables aleatorias que son modeladas bajo distribuciones de probabilidad que mejor representan el comportamiento estudiado.

Al incluir estas variables aleatorias a la simulación, es posible evaluar la incertidumbre presente en la magnitud de los tiempos de viaje que demorarán los equipos, los tiempos de espera en los diferentes sectores y la cantidad de vehículos que circularán en cierta cantidad de tiempo por una vía. Las variables aleatorias estudiadas se detallan en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1. Variables aleatorias generadas en la simulación.**

<b>Variable Aleatoria</b>	<b>Distribución de Probabilidad</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Atención control acceso	Exponencial	Media	[min]	0 a 5
Ingreso de Buses al Túnel	Poisson	Media	[s]	15
Velocidad Máxima	Normal	Media; Varianza	[km/h]	40 a 50
Asignación destinos	Uniforme	[Min, Máx.]	-	1 a 54
Pasajeros transportados	Normal	Media, Varianza	[unidad]	16 y 40

Para estudiar la forma de controlar el acceso de personal a la operación, se evalúan 2 estrategias. Una de ellas toma en cuenta un control automatizado de ingreso, es decir, solo se produce una reducción de velocidad (0 [min] de detención). Mientras que la segunda estrategia comprende un control manual para el ingreso de los equipos, es decir, se produce una detención de los vehículos por un tiempo de terminando según el tipo de equipos (1 a 5 [min/vehículo] de detención).

Con el objetivo de analizar la importancia de las velocidades en los tiempos de viaje, se evalúan 2 escenarios adicionales al valor de velocidad máxima establecido según la normativa de la faena (esta consiste en una velocidad máxima permitida de 50 [km/h]):

- Velocidad Máxima Permitida de 30 [km/h].
- Velocidad Máxima Permitida de 35 [km/h].
- Velocidad Máxima Permitida de 40 [km/h].
- Velocidad Máxima Permitida de 45 [km/h].
- Velocidad Máxima Permitida de 50 [km/h].

Para la asignación de destinos de los buses, se realiza de manera aleatoria mediante una distribución de probabilidad uniforme para los 10 posibles destinos que se tienen para el transporte de personas (10 paraderos interiores). Esta designación de los destinos se realiza al comienzo del turno, pudiendo variar el destino entre los diferentes turnos para un mismo bus.

Debido a la ausencia de información de ciertos parámetros relevantes, es que decide realizar un análisis de sensibilidad con el objetivo de apreciar la variabilidad e incertidumbre asociada a dichos procesos. En relación a las esperas que se producirán en los paraderos interior mina, se analizan 4 escenarios diferentes. Este tiempo de espera toma en cuenta el intervalo de tiempo conformado por el tiempo que demoran las personas del turno entrante en bajar de los buses, y el tiempo que demorarán en subirse las personas del turno saliente.

- Espera Promedio en Paradero de 15 [min].
- Espera Promedio en Paradero de 30 [min].
- Espera Promedio en Paradero de 45 [min].
- Espera Promedio en Paradero de 60 [min].

Para estimar la cantidad de buses requeridos para transportar las personas desde y hacia el interior mina, 2 modelos de buses que buscan representar las dimensiones y capacidades de transporte. Para este caso se estudian las siguientes capacidades:

- Capacidad de Pasajeros de 16 Personas.
- Capacidad de Pasajeros de 40 Personas.

Se considera que el personal requerido para la operación en la etapa de régimen de la mina es de 2,500 personas aproximadamente, con una flota total requerida de 40 buses.

Otra variable de ingreso importante para la simulación supone que un bus debe mantener una distancia mínima de 50 [m] con respecto al bus que lo antecede.

## 7.5. Variables de Salida para la Simulación

Las variables de salida que son definidas para el modelo de simulación apuntan a permitir realizar un diagnóstico inicial de la faena. Para ello entonces, se recurre a indicadores logísticos que nos permitan desarrollar estos análisis.

Particularmente, para el presente estudio se incorporarán indicadores asociados al tiempo y la productividad de ciertas actividades y procesos. Estas mediciones de desempeño serán aplicadas tanto a los centros de almacenamiento como a los equipos de transporte de insumos y personal.

A continuación, se enumeran los indicadores principales que son evaluados en el proyecto, los cuales son útiles para realizar un diagnóstico de la operación.

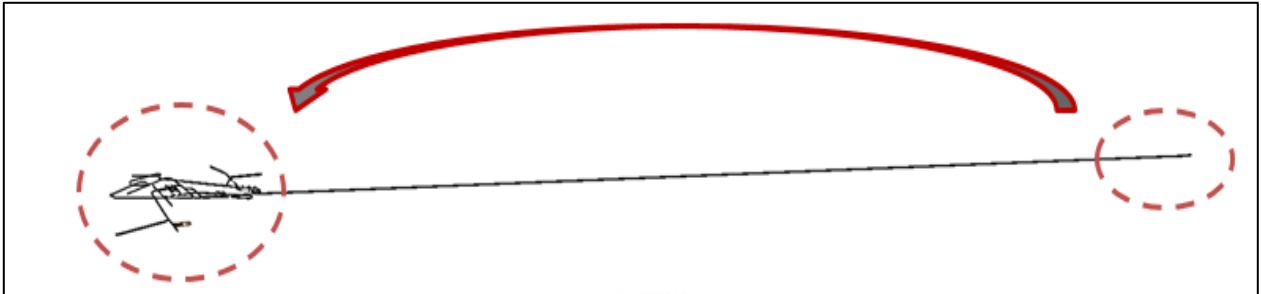
- **Flujo de Vehículos:** Refleja la cantidad de equipos que circulan por una calle durante un periodo de tiempo de terminado. Se mide en [vehículos/hora].
- **Porcentaje de Ocupación de los Buses:** Cantidad promedio de personas que son transportadas por los buses en relación a su capacidad máxima. Expresado en [%].
- **Capacidad de Transporte:** Corresponde a la capacidad de ingreso/salida de personal en una cierta cantidad de tiempo. Sus unidades de medida son [personas/hora].
- **Utilización de Vías:** Se refiere a la relación que se tiene entre la cantidad de vehículos que están circulando por una ruta y la capacidad de flujo máxima que es posible circular por ella. Se expresa en [%].
- **Tiempos de Viaje:** Corresponde al tiempo empleado únicamente en el recorrido de las rutas, es decir, considera sólo el tiempo cuando el equipo se encuentra en movimiento. Su unidad de medida es en [min].
- **Tiempos de Espera:** Considera todos aquellos tiempos en los cuales el equipo nunca se encuentra en movimiento. Es decir, se compone de los tiempos de detenciones. Se mide en [min].
- **Tiempo de Liberación de Rutas:** hace alusión al tiempo al tiempo transcurrido antes que de un equipo deje de circular por una determinada ruta (sale de la calle e ingresa a otra). Se mide en [min].
- **Velocidad Promedio de Viaje:** Corresponde a la velocidad media con la que circularán todos los equipos según la velocidad máxima permitida. Se expresa en [km/h].

## 7.6. Verificación y Validación del Modelo de Simulación.

Previo a la obtención de resultados para diferentes escenarios, es necesario realizar una validación del modelo de simulación construido. Para realizar la validación del modelo se estudiará el trayecto representado en la Figura 7.3. Este recorrido comprende la ruta Terminal de Superficie – Paradero

Interior Mina (se tienen definidos 27 paraderos interiores dispuesto en sectores particulares de la mina).

Es necesario indicar que este trayecto toma en cuenta únicamente la ruta comprendida desde ingreso en superficie hacia los destinos interiores, es decir, no contempla el recorrido paradero interior – terminal de superficie (salida de la mina).



**Figura 7.3. Trayecto considerado para la validación.**

Debido a que la faena en estudio se encuentra aún etapas tempranas de ejecución, no se tienen datos e información sobre tiempos de viaje con los cuales se puedan comparar los resultados obtenidos de la simulación. Es por ello, que se recurre a realizar una comparación con una simulación realizada mediante una planilla Excel. Esta simulación contempla el cálculo de tiempos de viaje a través de dos parámetros básicos que deben ser conocidos previamente: la distancia hacia los destinos y la velocidad con la que circularán los equipos. Para el caso de la velocidad, se considera una velocidad constante a lo largo de todo el recorrido de 50 [km/h]. Con ambos parámetros definidos, es posible obtener los tiempos de viaje para cada uno de los paraderos analizados mediante esta herramienta.

Luego, en la siguiente tabla se observan las distancias para los diferentes destinos que se tienen para el transporte de personal hacia el interior mina. Las distancias presentadas corresponden a los 27 paraderos interiores de barrio cívico norte.



**Figura 7.4. Gráfico de distancias a los paraderos del barrio cívico norte.**

A continuación, se presentan los tiempos de viaje estimados mediante los parámetros antes indicados.

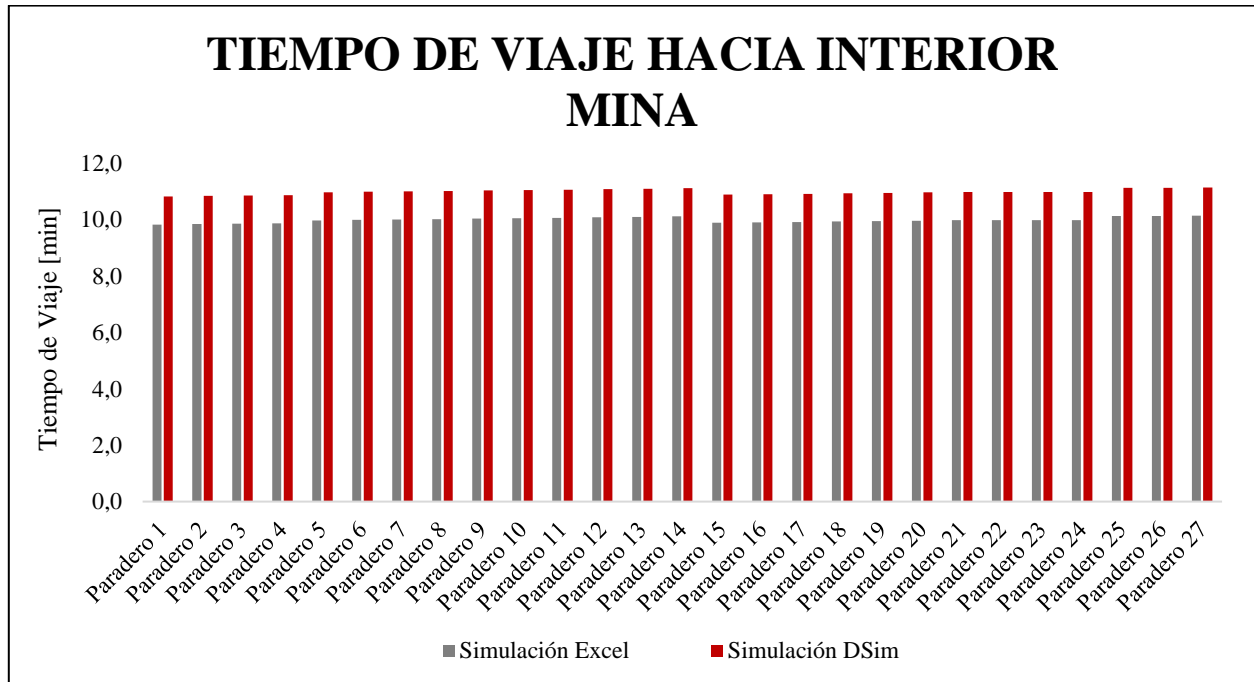
**Tabla 7.2. Distancia trayecto terminal superficie - paradero interior.**

<b>Número Paradero</b>	<b>Distancia Terminal Superficie - Paradero Interior [m]</b>	<b>Tiempo de Viaje [min]</b>
Paradero 1	8.19	9.8
Paradero 2	8.21	9.8
Paradero 3	8.22	9.9
Paradero 4	8.23	9.9
Paradero 5	8.32	10.0
Paradero 6	8.33	10.0
Paradero 7	8.34	10.0
Paradero 8	8.36	10.0
Paradero 9	8.37	10.0
Paradero 10	8.38	10.1
Paradero 11	8.39	10.1
Paradero 12	8.41	10.1
Paradero 13	8.42	10.1
Paradero 14	8.43	10.1
Paradero 15	8.24	9.9
Paradero 16	8.26	9.9
Paradero 17	8.27	9.9
Paradero 18	8.28	9.9
Paradero 19	8.30	10.0
Paradero 20	8.31	10.0
Paradero 21	8.32	10.0
Paradero 22	8.32	10.0
Paradero 23	8.32	10.0
Paradero 24	8.32	10.0
Paradero 25	8.45	10.1
Paradero 26	8.45	10.1
Paradero 27	8.45	10.1

Una vez estimados los tiempos de viaje mediante la planilla Excel (PE), se procede calcular los tiempos a través del software de simulación DSim. Cabe mencionar que, para efecto de realizar la validación, no se incorporan en el modelo de simulación las colas o tiempos de espera generadas por el control de acceso que se encuentra previo al ingreso mina (en el software DSim). El objetivo de ello es poder realizar una comparación que incluya los mismos parámetros comparativos con ambos métodos de simulación. En esta etapa entonces, no se incorpora la variabilidad en las velocidades de los buses. Para este escenario establece una velocidad circulación constante de los buses de 50 [km/hr].

Se debe indicar que la simulación realizada considera un equipo como un elemento aislado del sistema, es decir, no se incorpora la interferencia entre diferentes equipos (escenario 1).

Luego, en la siguiente figura se observan los tiempos de viaje obtenidos a partir de ambas herramientas de simulación. En el gráfico se puede apreciar que se obtienen resultados bastante similares, consiguiendo en promedio diferencias de menos de 1 [min], correspondiente a un error del 9 [%].

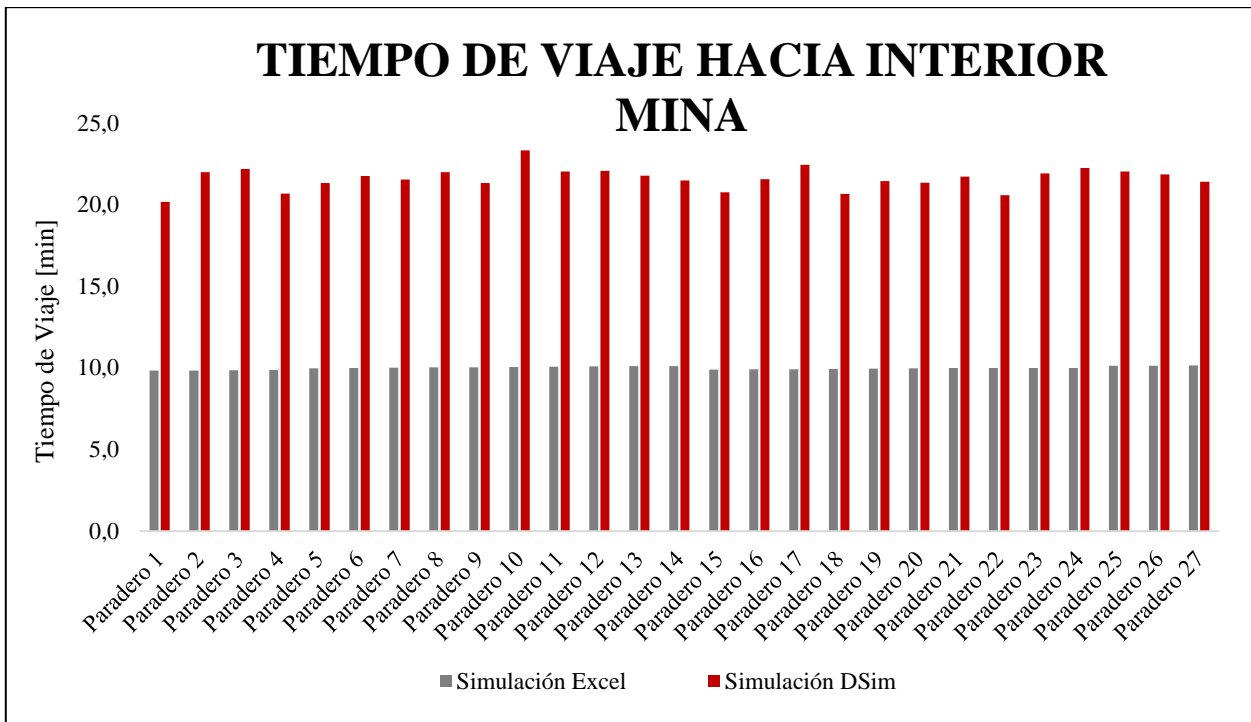


**Figura 7.5. Gráfico de tiempos de viaje interior mina (escenario 1).**

Los tiempos de viaje conseguidos a través de DSIm son en general mayores que aquellos alcanzados por la herramienta Excel. Lo anterior se explica por las colas o tiempos de espera generados en las zonas de intersecciones de calles que no son posibles de incorporar en una simulación por medio de una planilla Excel.

En promedio, se obtiene un tiempo total del recorrido de 10 [min]. Posteriormente, se observará que al incorporar en el modelo de simulación de DSIm el resto de factores no considerados en esta validación, se alcanzarán tiempo de viaje totales de cerca del doble que los presentados previamente.

Como una manera de evidenciar el potencial que posee DSIm para este tipo de estudios, es que se incorporan al modelo las interferencias entre los equipos en el modelo (escenario 2). El agregar este parámetro como parte de la simulación, se traduce en un aumento considerable de los tiempos de viaje antes presentados.



**Figura 7.6. Gráfico de tiempos de viaje interior mina (escenario 2).**

Del gráfico anterior se desprenden 2 resultados principales. Uno de ellos apunta a las limitaciones que posee en Excel en relación a la calidad de los resultados, dado principalmente por no poder incorporar una serie que elementos que hagan más representativos los resultados obtenidos. Otro elemento importante a recalcar hace referencia a la variabilidad que es posible incorporar con el software de simulación DSim, que permitirá evaluar los riesgos presentes para diversos escenarios obtenidos.

El solo hecho de incorporar al modelo de simulación las interferencias operacionales entre los diferentes equipos en circulación, se obtienen diferencias de cerca de 12 [min] entre los resultados obtenidos, correspondiente a un 116 [%] de diferencias en relación a los valores conseguidos por Excel.



## 8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos estructurados en dos capítulos principales. Uno de ellos corresponde a la logística de personal y otro asociado a lo referido a suministros e insumos.

### 8.1. Logística de Personal

Según la tecnología adoptada para el control de ingreso al túnel de acceso principal, se tienen 2 escenarios considerados.

- **Escenario I:** Control de Acceso Manual (1 a 5 [min] de tiempo de atención en el control según el tipo de vehículo controlado).
- **Escenario II:** Control de Acceso Automatizado (0 a 1 [min] de tiempo de atención en el control de ingreso).

En la siguiente figura se esquematiza la ubicación del control de acceso que se ha establecido para el ingreso a la operación.

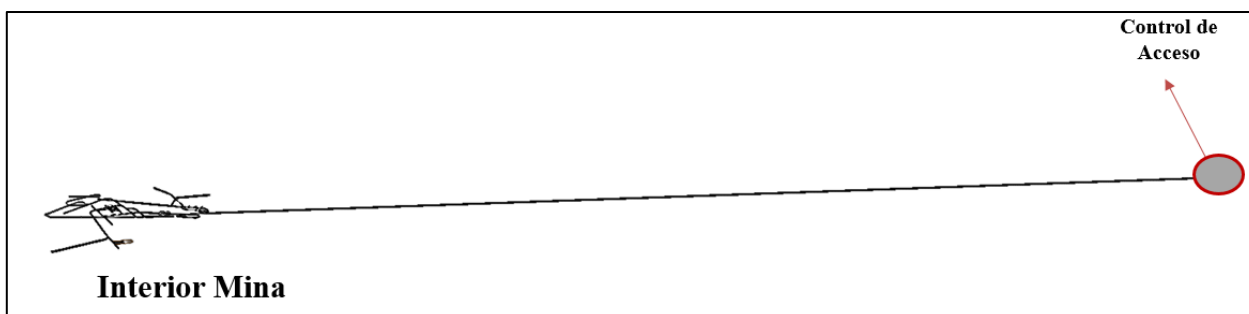


Figura 8.1. Ubicación control de acceso para ingreso de personal al interior mina.

La diferencia principal entre ambos casos estudiados radica en los tiempos de espera que se van a originar en la entrada del túnel de acceso. No obstante, el resto de trayecto recorrido por los buses de transporte son equivalentes. Es decir, el tiempo de ciclo completo que comprende el trayecto de los buses viene dado por las siguientes componentes.

Tabla 8.1. Componentes del tiempo de ciclo equipos de transporte.

ID	Ítem
T1	Tiempo espera control de acceso.
T2	Tiempos de espera intersecciones de calles (ingreso).
T3	Tiempo recorrido viaje hacia interior mina.
T4	Tiempo espera paradero interior mina.
T5	Tiempos de espera intersecciones de calles (salida).
T6	Tiempo de recorrido hacia salida superficie.

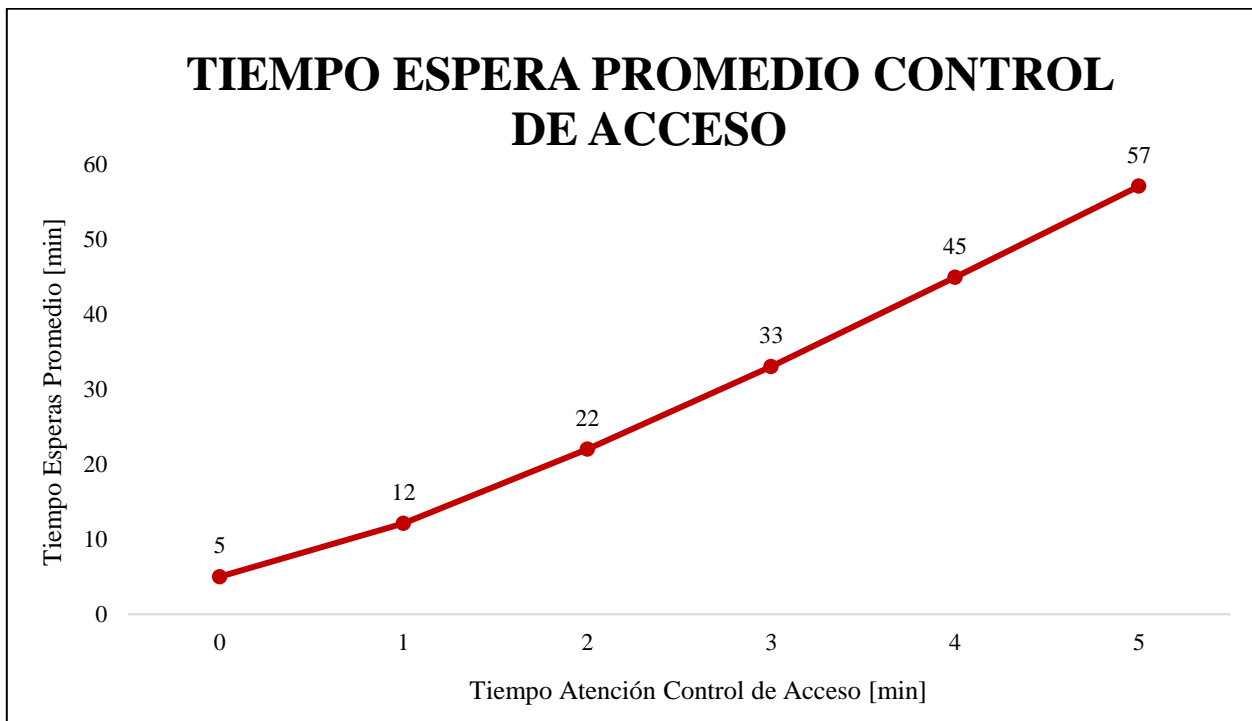
Es claro notar que el incorporar al modelo una mayor cantidad de interferencias y detenciones no programadas de los equipos, se logra una mayor representatividad de los resultados conseguidos en relación a lo que ocurre realmente en la operación. La necesidad de adicionar este tipo de factores al estudio, hace necesario la utilización de un software de simulación que permita incorporar en el modelo este tipo de elementos.

Del desglose de tiempos indicados anteriormente, las detenciones de los equipos en las intersecciones, representan una componente mínima del tiempo total que demora el ciclo completo del recorrido de los buses (T1 y T5). Será interesante de analizar el aporte de tiempo que originan cada uno de los elementos mencionados, permitiendo enfocar de mejor manera las estrategias que apuntan a la reducción de los tiempos de viaje de los equipos.

Para el caso de los tiempos de espera ocasionados en los paraderos interiores, se realiza un análisis de sensibilidad que considera 4 escenarios diferentes: espera de 15 [min], espera de 30 [min], espera de 45 [min] y espera de 60 [min]. En relación a los tiempos de recorrido desde y hacia la superficie, se tendrán de igual modo 4 escenarios distintos, influenciados por los cambios de velocidad evaluados: 35 [km/h], 40 [km/h], 45 [km/h] y 50 [km/h].

### 8.1.1. Tiempo de Esperas Promedio Control de Acceso

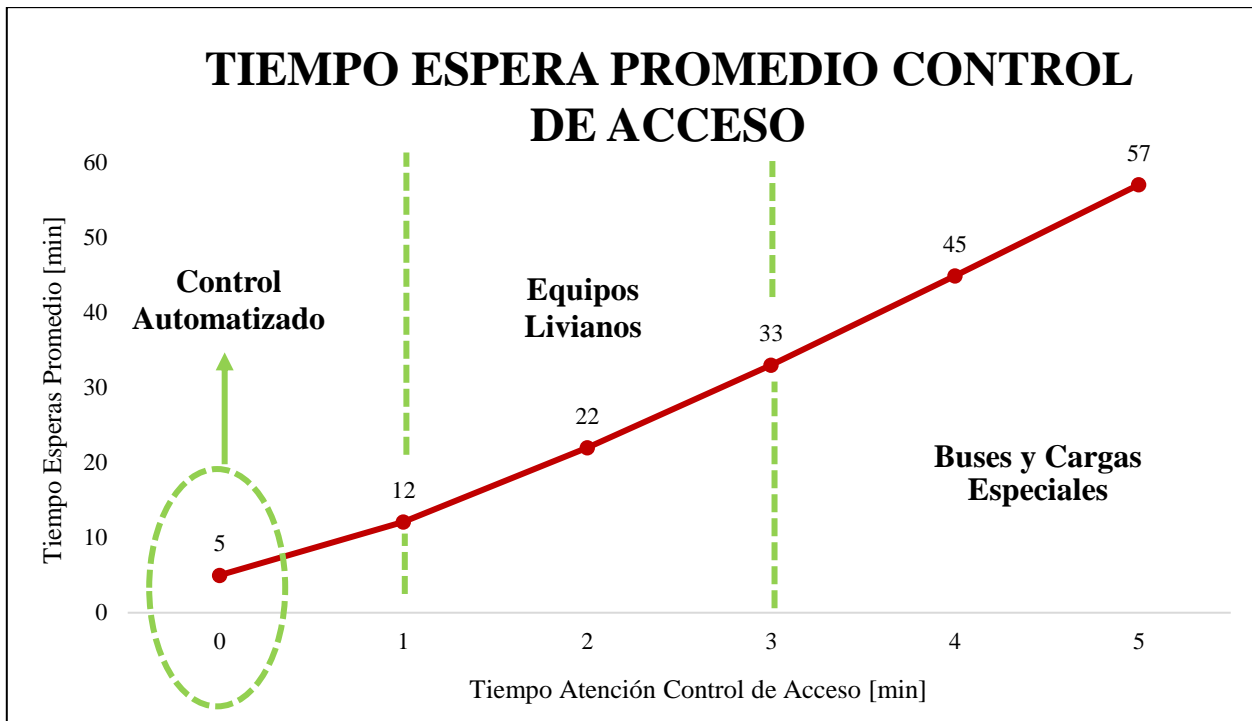
Como una manera de determinar la influencia que tiene el tiempo atención de vehículos del control de ingreso en las esperas promedio de los buses para ingresar al túnel de acceso, es que se realiza un análisis de sensibilidad de 0 a 5 [min]. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.



**Figura 8.2. Gráfico tiempo esperas promedio (sensibilidad tiempo atención control).**

Se puede observar el gran impacto que tienen el tiempo de atención en las esperas promedio. Para un aumento de 1 [min] en este valor, se tiene un alza en los tiempos de espera en promedio de 10 [min], pudiendo alcanzar los 33 [min].

El tiempo que demora la atención de los vehículos en el control de acceso, depende del tipo de vehículos que se esté controlando y la tecnología utilizada para su control. Lo anterior se muestra en la Figura 8.3.



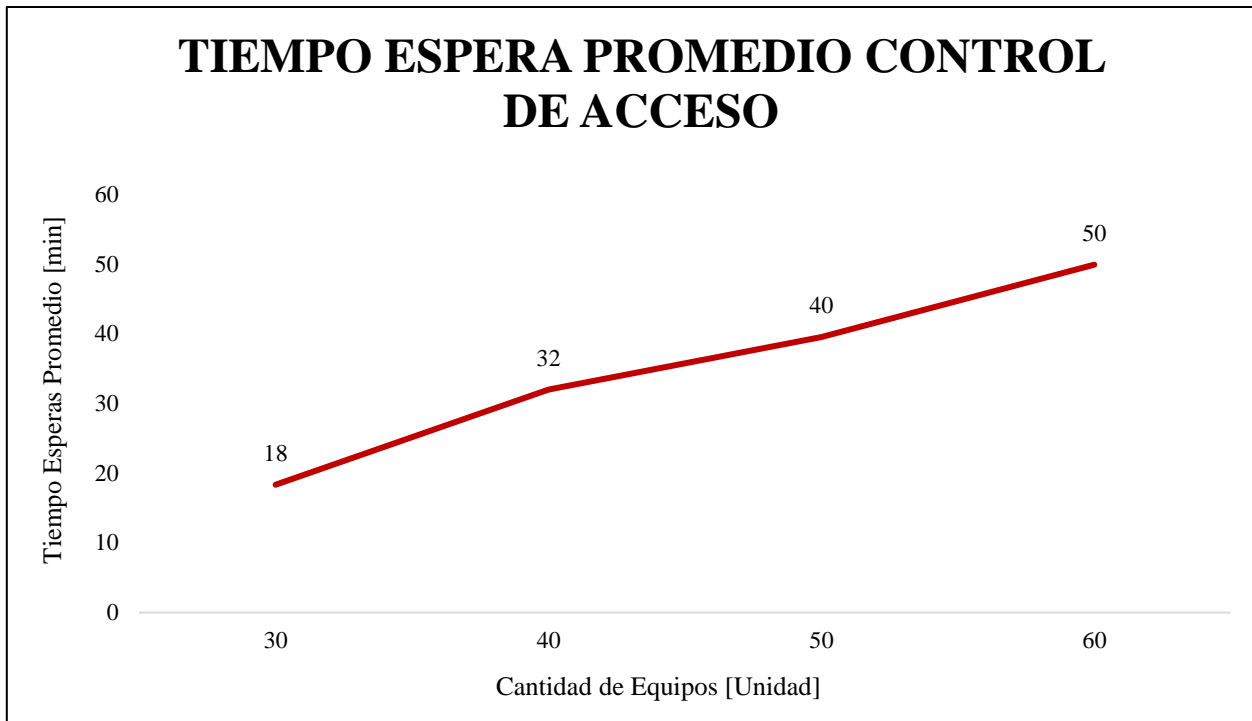
**Figura 8.3. Gráfico magnitud tiempo atención en el control de acceso.**

Por otro lado, para notar el impacto que tiene el aumento o disminución de la cantidad de equipos que circulan por las vías, es que se evalúa la variación en los tiempos de espera promedio según el número de buses que demanden el acceso para el ingreso, es decir, el número de buses que necesitan hacer uso del túnel de acceso principal.

Este trabajo considera como caso base un tiempo de atención para el ingreso de los buses de 3 [min]. El objetivo que lleva este estudio tiene relación a analizar las variaciones en las capacidades de pasajeros de los buses utilizados. Es claro deducir que, para una menor capacidad de transporte de pasajeros, mayor será la cantidad de equipos necesarios para cumplir con los viajes requeridos. El análisis de sensibilidad comprende valores que fluctúan desde buses con capacidad de 25 a 45 personas aproximadamente.

Los resultados obtenidos se observan en la Figura 8.4. En gráfico se muestran diferencias de hasta 32 [min] en los tiempos de espera entre los escenarios más extremos que son analizados. Del mismo modo, en la Figura 8.7 se vincula la cantidad de equipos que son requeridos de acuerdo a la capacidad de pasajeros que pueden ser transportados por los buses.

Si bien la capacidad de transporte de pasajeros de los buses condiciona de manera importante la cantidad de equipos requeridos, existe otro factor asociado al porcentaje de ocupación de su capacidad o “factor de llenado”, es decir, la capacidad que efectivamente está siendo utilizada del bus. Idealmente se debe buscar que los buses se trasladen entre los diferentes destinos a su máxima capacidad de transporte. Se debe apuntar a un factor de ocupación del 100 [%].



**Figura 8.4. Gráfico tiempo esperas promedio (sensibilidad número de equipos).**

A partir del gráfico anterior, se destaca un aumento importante en los tiempos promedios de espera ante un alza en la cantidad de equipos que demandan por acceder al túnel de acceso.

Los diferentes escenarios evaluados (cantidad de equipos) tienen directa relación a la capacidad de los buses con las cuales se realizaría el transporte de personal. Luego, en la Figura 8.5 se muestra la relación entre la flota de equipos requeridos en función de la capacidad de pasajeros considerada para los buses.

Para los escenarios extremos es posible alcanzar una diferencia de cerca de 32 [min] entre los tiempos de espera obtenidos. Esto hace notar la importancia de realizar un estudio acabado sobre el tamaño de la flota a definir para el transporte de las personas. Un aspecto importante que puede condicionar la elección de equipos de gran capacidad tiene relación a las dimensiones de las secciones para ciertas calles de acceso que no permitirían el ingreso de estos.

Recordar que la mayor parte de los resultados presentados a lo largo del informe considera la utilización de 40 buses de capacidad de 40 pasajeros, es decir, el caso original tienen un tiempo de espera promedio de 32 [min].

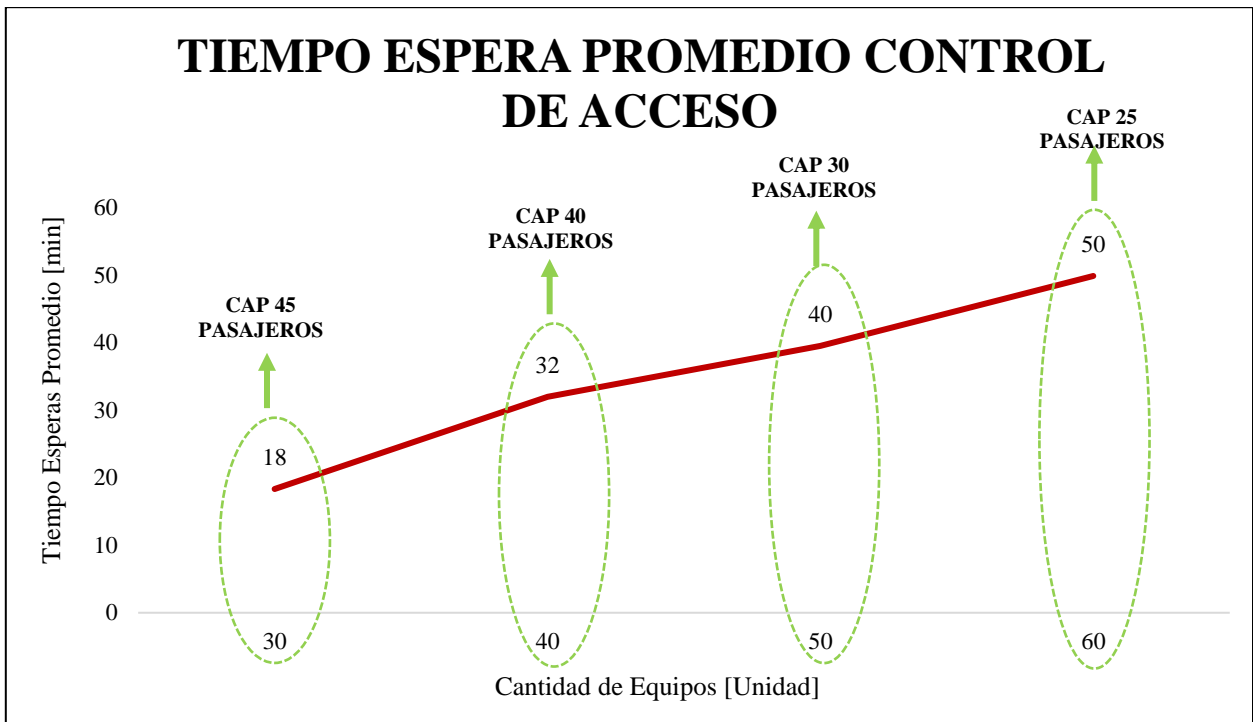


Figura 8.5. Gráfico tiempo esperas promedio (capacidad de pasajeros).

#### 8.1.2. Capacidad de Flujo Túnel de Acceso Principal

Los tiempos de esperas en el control de ingreso determinarán la capacidad de flujo del túnel de acceso principal al interior mina (medido en [vehículos/hora]). Para ello, se consideran las dos estrategias antes mencionadas: control de acceso automatizado (C.A.) y un control de acceso manual (C.M.). Adicionalmente, se estudian 4 velocidades máximas con la cual circulan los equipos a lo largo del túnel.

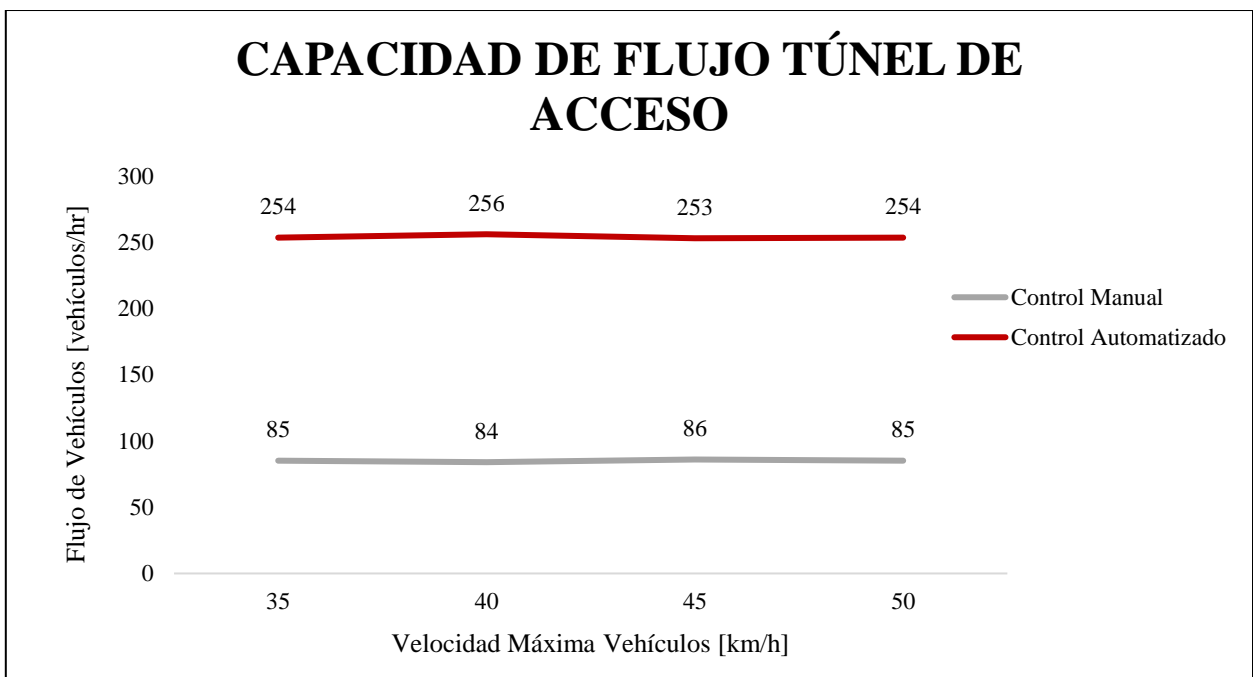
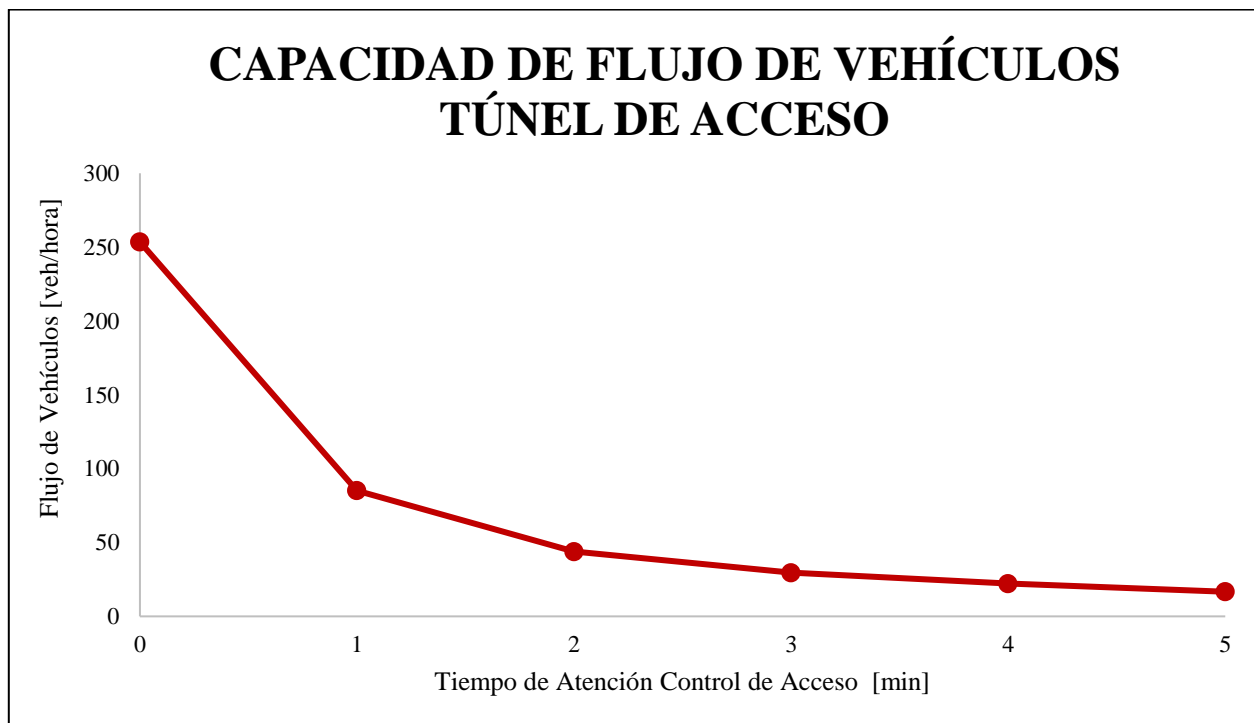


Figura 8.6. Gráfico capacidad de flujo túnel de acceso principal.

Un primer resultado interesante de observar corresponde a las diferencias en la capacidad de flujo que se presentan para las diferentes estrategias de control estudiadas. Es claro ver que para el escenario que considera un control de acceso automatizado, se tiene una capacidad 3 veces mayor que el caso que supone un control de acceso manual. Este resultado influenciará directamente en la cantidad de personas que podrán ingresar hacia el interior mina para un periodo de tiempo determinado.

Otro aspecto a destacar en los resultados obtenidos, está asociado a la independencia que tiene la capacidad de flujo sobre la velocidad promedio con la que recorren los equipos el túnel de acceso. Lo anterior muestra el mismo comportamiento para ambas estrategias de control indicadas. Es decir, se tiene que la principal condicionante de la cantidad de vehículos que pueden circular por túnel de acceso por un periodo de tiempo determinado, lo originan las esperas en el control de acceso que se encuentra previo al ingreso del túnel.

Con el objetivo de determinar el efecto que tiene el tiempo atención de vehículos en el control de acceso en la capacidad de flujo del túnel de acceso, es que se realiza un análisis de sensibilidad de 0 a 5 [min]. Los resultados obtenidos muestran a continuación.



**Figura 8.7. Gráfico capacidad de flujo túnel de acceso (diferentes tiempos de control).**

Es claro notar que alzas mínimas en los tiempos de atención, producen una disminución importante en la capacidad de flujo de ingreso de vehículos al túnel de acceso principal. En el mejor caso, tomando en cuenta un control automatizado (0 [min] de tiempo de atención) se tiene una capacidad de ingreso 250 [vehículos/hora]. Por otra parte, para tiempos superiores a 1 [min] la capacidad de flujo disminuye alcanzando los hasta una mínima cantidad de 20 [vehículos/hora], aproximadamente.

Existe otro elemento importante que influye en la cantidad de buses que pueden ingresar a la faena en una cierta cantidad de tiempo. Esto tiene relación a las distancias de seguridad que se deben

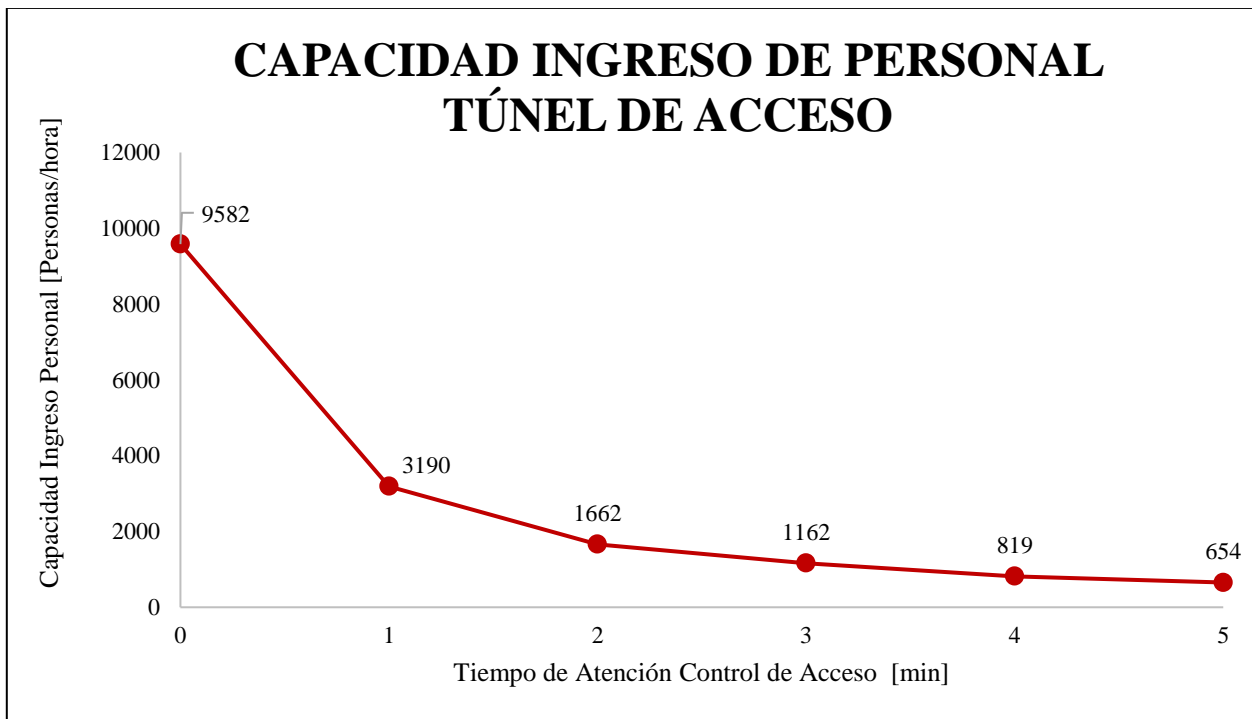
mantener entre equipos y que, son establecidas por la compañía. Lo anterior se puede observar principalmente en el escenario donde se considera un control automatizado. Para aquél caso, no existen restricciones de tiempo que limiten el ingreso de los vehículos, pero si los buses deberán detenerse previo al ingreso del túnel para conseguir la distancia de seguridad de 50 [m] que ha sido definida. En la Figura 8.3 se observa que a pesar de tener 0 [min] en el tiempo de atención para el ingreso de los vehículos, de igual modo se tiene un tiempo de espera promedio de 5 [min].

Por su parte, la capacidad de flujo de vehículos condicionará de manera importante la cantidad o capacidad de ingreso personal al interior de la faena en un determinado periodo. En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos.

### 8.1.3. Capacidad de Ingreso de Personal

La capacidad de ingreso de personal (medido en [personas/hora]) depende de dos elementos. Uno de estos corresponde a la cantidad de personas que son transportadas por los buses (capacidad de pasajeros de estos) y los tiempos de espera que se originarán previo al ingreso del túnel de acceso a la operación.

En la Figura 8.8 se describe la cantidad de personas que pueden ser ingresadas por hora, según la magnitud de los tiempos de atención considerados en el control de acceso. Además, se puede apreciar que la capacidad de ingreso de personal muestra el mismo comportamiento que la capacidad de flujo o ingreso de vehículos para el túnel de acceso (Ver Figura 8.7).



**Figura 8.8. Gráfico capacidad de ingreso de personal (diferentes tiempos de control).**

Este elemento se debe tener en consideración al momento de realizar la estimación de la dotación de personal y la modalidad de los turnos con los cuales van a operar. En el gráfico anterior se aprecia la limitante importante que provoca el tiempo de atención en el control del acceso en relación a la capacidad de ingreso de personal hacia el interior mina.

No se realiza el análisis que permita estudiar el flujo máximo de personas que se pueden transportar hacia superficie desde los paraderos interiores, puesto que esto no representará una condicionante o problemática en la logística de personal. Siempre sucederá que los problemas serán originados al momento de ingreso de los buses al túnel de acceso.

Todo lo anterior está influenciado por los diversos elementos antes mencionados como lo son principalmente la magnitud de los tiempos de atención en el control de acceso y la cantidad de equipos presentes en el sistema.

De acuerdo a al escenario definido, se debe mencionar nuevamente que está considerando un tiempo de atención de 3 [min/bus]. Esto se traduce en una capacidad de ingreso de personas de 1,162 [personas/hora] distribuidos en 40 buses de 40 personas de capacidad de transporte.

#### 8.1.4. Utilización del Túnel de Acceso

Otro aspecto importante a estudiar corresponde al porcentaje de utilización de las vías de acceso principales. Para ello se evalúan las dos estrategias ya indicadas; control manual y control automatizado.

Las dos estrategias analizadas representan enormes diferencias en la utilización del túnel de acceso. De este modo, se observa claramente que para el caso donde se tiene un control manual se tiene una mayor exigencia sobre la capacidad disponible (según su capacidad de flujo que es inferior al escenario que considera control automatizado). En general se alcanza una diferencia de 32 [%], equivalente al paso de 169 [vehículo/hora] adicionales para la mejor alternativa (C.A.).

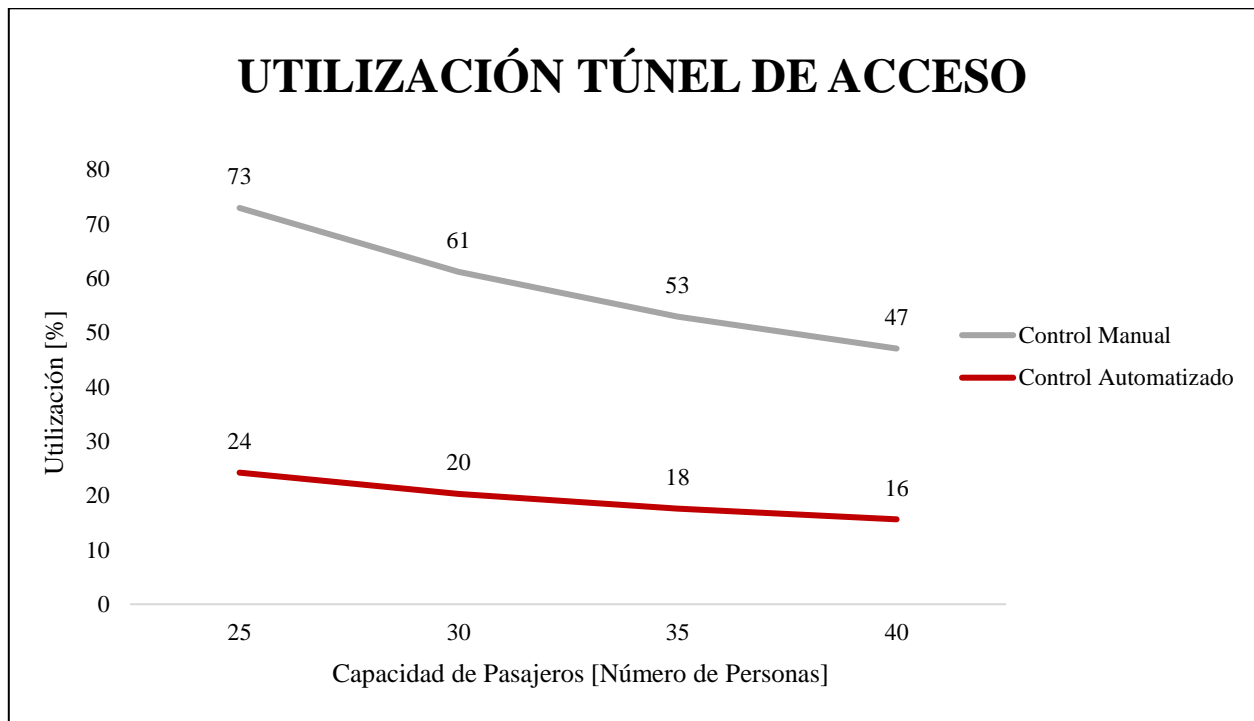
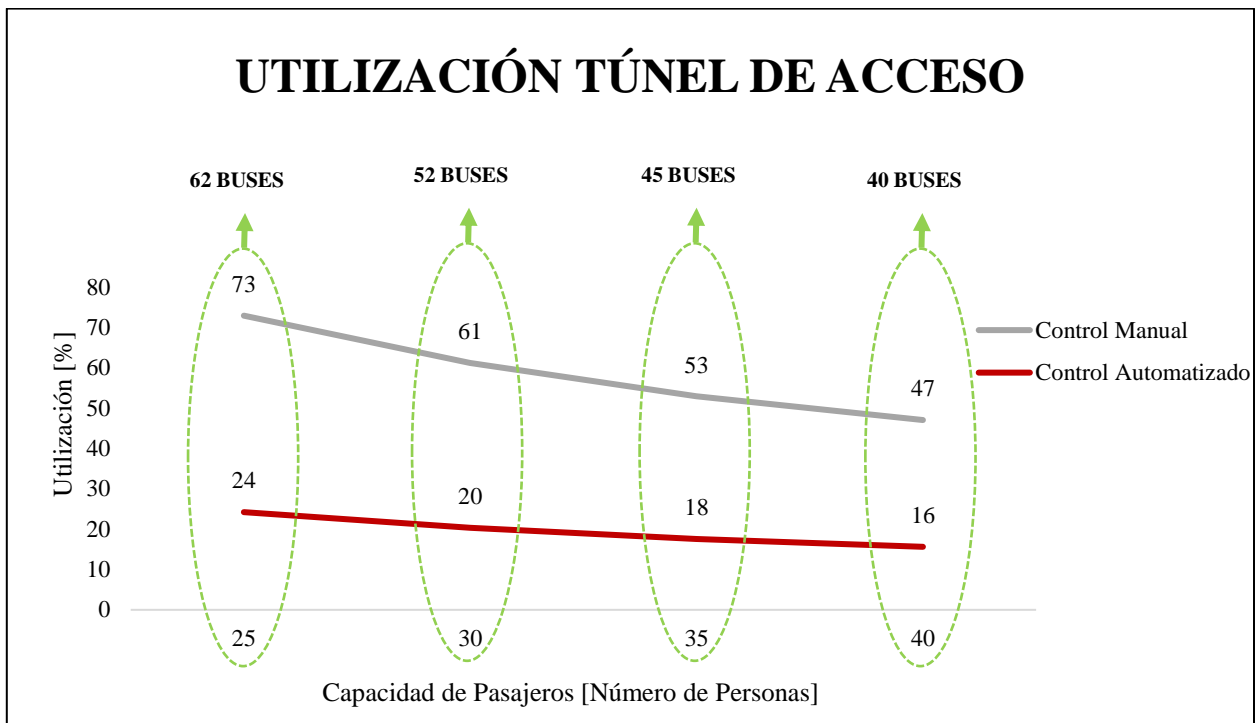


Figura 8.9. Gráfico utilización del túnel de acceso.



Luego, se asocia a continuación la capacidad de pasajeros a la cantidad de la flota de buses requeridos para cumplir con los requerimientos de traslado.



**Figura 8.10. Gráfico utilización del túnel de acceso (flota de buses).**

En resumen, mayores tiempos de espera en el control de acceso genera alzas en los tiempos de ciclo, tiempos de traslado, pérdidas por costos asociado a la menor eficiencia de los activos de transporte y costos fijos vinculados a los sueldos. Esto además origina atochamientos en la entrada del túnel de acceso y reducción en la capacidad de transporte de personas de la operación.

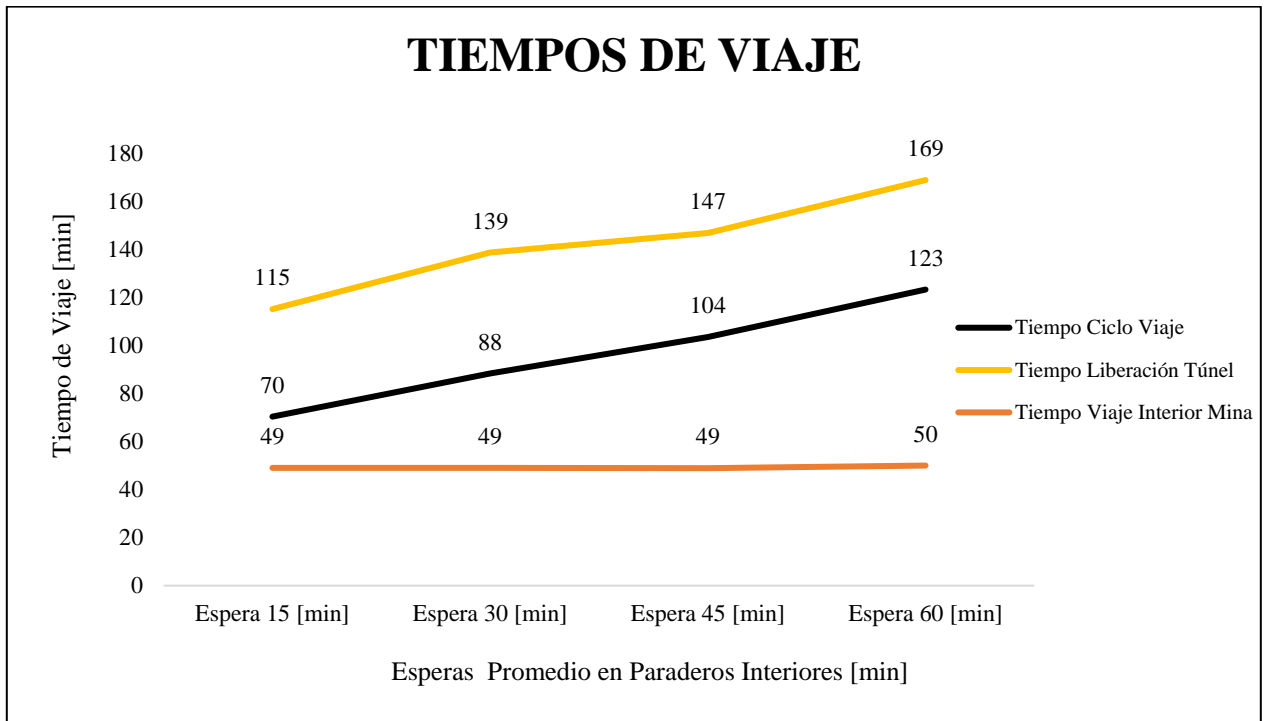
### 8.1.5. Tiempos de Viaje - Control de Acceso Manual Ingreso Mina (CM)

Los tiempos de espera ocasionados por la atención en el control de acceso son representados mediante una distribución exponencial. Para tal escenario se supone un tiempo de atención promedio de 3.0 [min/bus], considerando la presencia de 3 controles en funcionamiento simultáneo.

Inicialmente, en la Figura 8.11 se presentan 3 rectas. El tiempo de viaje de los buses hacia los paraderos interiores (ver Figura 7.3). Este trayecto toma en cuenta únicamente el viaje de ida hacia el interior de la mina, es decir, no contempla el tiempo de espera en el paradero, ni el tiempo de regreso hacia la salida a superficie (T1 a T3). El objetivo es evaluar el tiempo que demorarán los buses en liberar la vía de acceso para el ingreso del túnel principal.

Recordar que con objeto de evitar que los vehículos menores interfieran en la circulación de los buses del sistema de turnos, se restringe el ingreso de los vehículos menores al túnel desde el Barrio Industrial en superficie, permitiendo que estos vehículos solo circulen por el túnel media hora después de que el último bus haya ingresado al túnel, ya sea desde la Infraestructura de Superficie a través del Portal de Acceso o el Interior Mina.

Otra de las rectas toma en consideración el tiempo de ciclo promedio de viaje, es decir, el tiempo promedio que demora el bus en salir del túnel de acceso principal (T1 a T6).



**Figura 8.11. Gráfico tiempos de llegada a paraderos interior mina (CM).**

Finalmente, el último análisis realizado comprende el tiempo de liberación del túnel de acceso principal. Esto es el intervalo de tiempo en que ingresa el primero bus hacia el interior mina y sale el último bus desde el túnel hacia la superficie. Para este caso, se alcanza un tiempo de cerca de 2 [h] en donde permanece ocupado el túnel de acceso principal. Este valor es importante al momento de generar estrategias de viaje y de exclusividad de las vías. La principal interrogante que surge es si se está dispuesto a destinar 120 [min] de exclusividad de las rutas para los buses de transporte de personal.

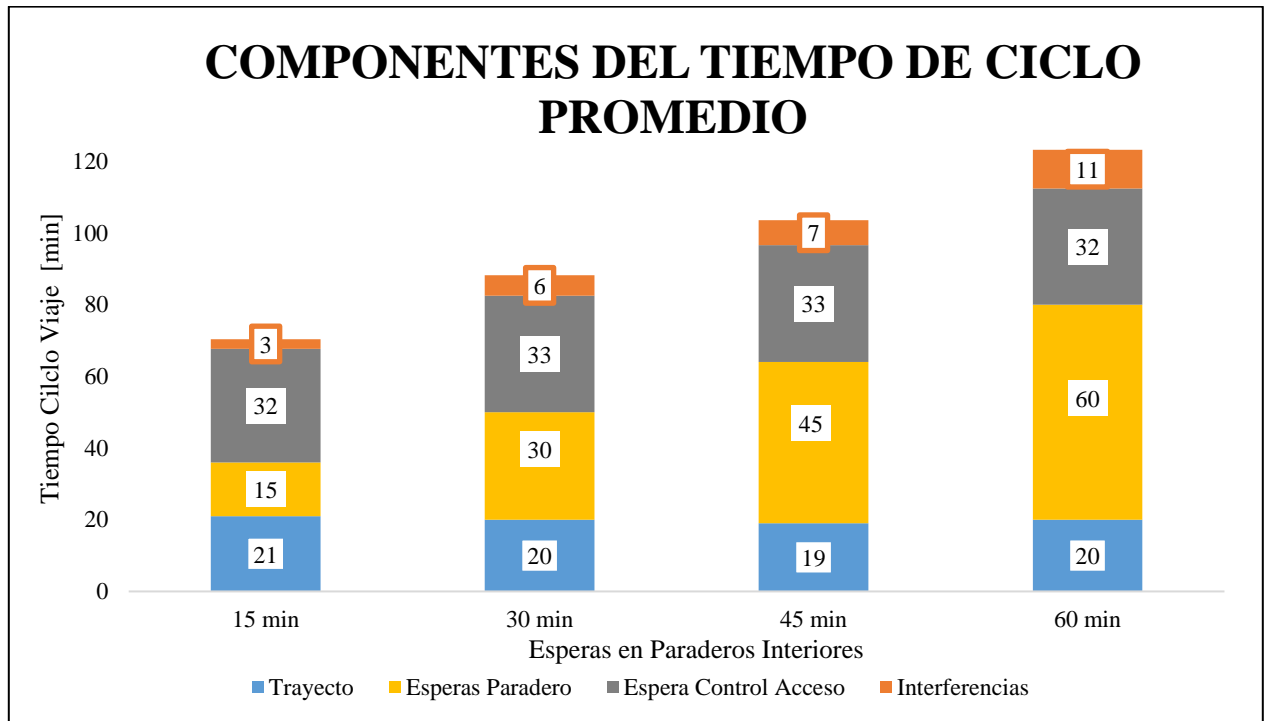
De acuerdo a lo observado en la figura anterior, se tiene que para el escenario más optimista se obtiene que los buses demoran promedio de 49 [min] en llegar a los paraderos interiores.

Los valores obtenidos consideran un total de 40 buses en el sistema, los que permiten transportar las 1,300 personas requeridas para el turno A. Este escenario presentado considera una capacidad de pasajeros de los buses para 40 personas. En capítulos anteriores se discutió de la sensibilidad sobre la capacidad de transporte de pasajeros de los buses, y por consecuencia, sobre la cantidad de equipos que harán uso de las vías de acceso.

En la Figura 8.12 se muestra un detalle de las diferentes componentes que constituyen el tiempo de llegada a los paraderos interiores de la mina. En el gráfico se puede observar que en promedio se tiene un tiempo de espera en los controles de acceso de cerca de 32 [min], representando una componente importante del tiempo total empleado.

Es claro ver que, un aumento en la velocidad de los equipos provocará una reducción en el tiempo de viaje del bus, particularmente por la disminución la componente del trayecto que se tendrá. No

obstante, se debe observar que la componente del trayecto (barra azul) representa una proporción del tiempo menor que constituye el tiempo de ciclo total del bus (ver Figura 8.12).



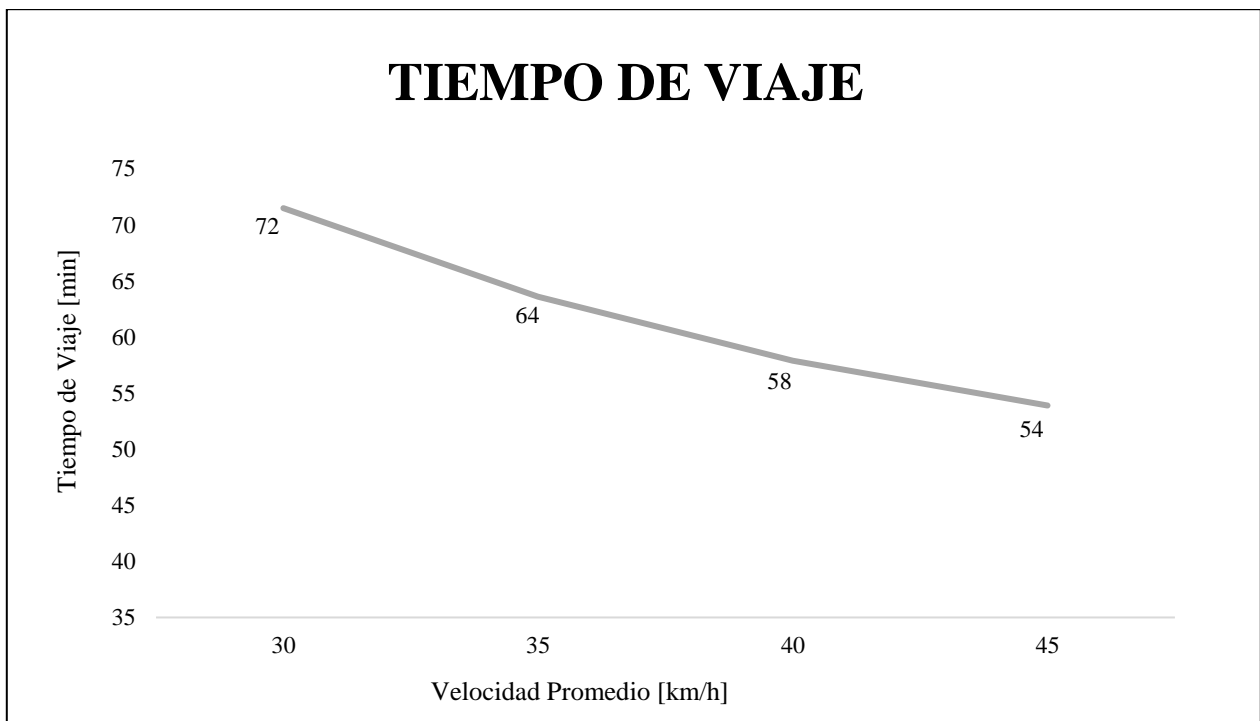
**Figura 8.12. Gráfico componentes del tiempo de ciclo promedio (CM).**

La correcta estrategia a seguir debe apuntar a conseguir reducciones de espera, particularmente ir en la línea de disminuir los tiempos de espera ocasionados en la zona del control de acceso para el ingreso de personal. En uno de los escenarios presentados (espera de 15 [min] en paradero), el tiempo de espera por este factor puede representar un 45.7 [%] del total del tiempo empleado.

Como se mencionó en capítulos anteriores, dada la ausencia de información sobre los tiempos de espera que se tendrá en los paraderos interiores, es que se presentan 4 escenarios que incorporan esperas desde los 15 [min] a los 60 [min]. Además, se evalúan 4 diferentes velocidades con la que circularán los buses.

Una reducción en los tiempos de viaje no solo implica una liberación anticipada de las rutas de acceso, sino que también está influyendo directamente en los costos asociados a la logística de personal e insumos.

Otra variable importante que fue discutida corresponde al efecto de las velocidades máximas que son permitidas en las rutas principales. De este modo, se realizó un análisis de sensibilidad con 4 velocidades adicionales de 30, 35, 40 y 45 [km/hr] aplicados a los tiempos de viaje hacia los paraderos interiores (T1 a T3).



**Figura 8.13. Tiempo de viaje a paraderos interiores (sensibilidad velocidades) - CM.**

En la figura anterior se observa el efecto que tiene el aumento o descenso en este valor. Se debe notar que una variación en este valor constituye un efecto únicamente en lo que es el tiempo del trayecto, es decir, el tiempo en que efectivamente el bus se encuentra en movimiento y no afectando el resto de las componentes (tiempos espera en paraderos, tiempos esperas en control de acceso, etc.).

Si bien se observa una variación importante en los tiempos de viaje hacia los paraderos interiores, los mayores valores de los tiempos de viaje son constituidos o proporcionados por los tiempos de espera que se originan tanto en los paraderos interiores como en el control de acceso. Para una velocidad de 35 [km/hr] se alcanza un alza de un 34 [%] de los tiempos en relación al caso base considerado (velocidad de 50 [km/hr]).

En resumen, se puede afirmar que para este escenario que considera un control de acceso manual, la principal restricción del sistema es originado por el control del ingreso de personal que se tiene previo al ingreso del túnel, condicionando el desempeño de la logística de entrada de personal y materiales, como también los costos asociados a ello.

### 8.1.6. Tiempos de Viaje - Control de Acceso Automatizado Ingreso Mina (CA)

Análogo al caso anterior, se presenta a continuación un análisis para la estrategia que considera un control automatizado para el ingreso mina. De esta manera, se observa en la siguiente figura los diferentes tiempos de viaje según el escenario analizado.

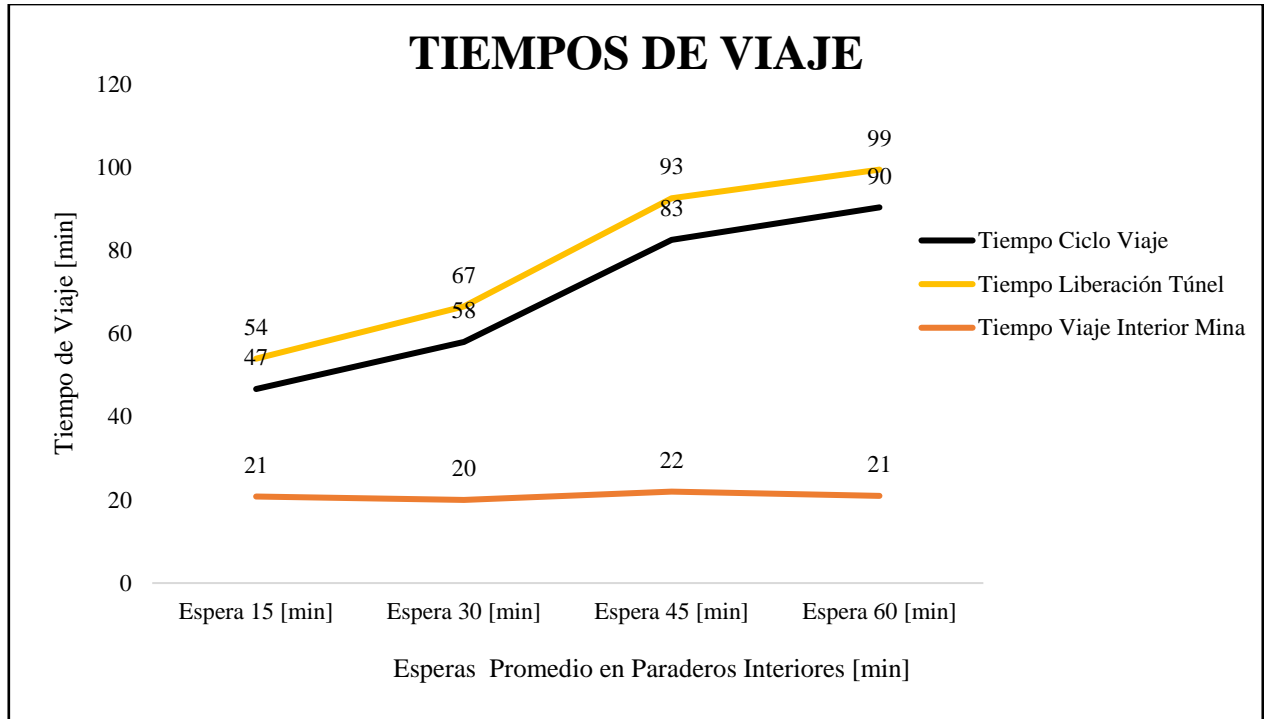
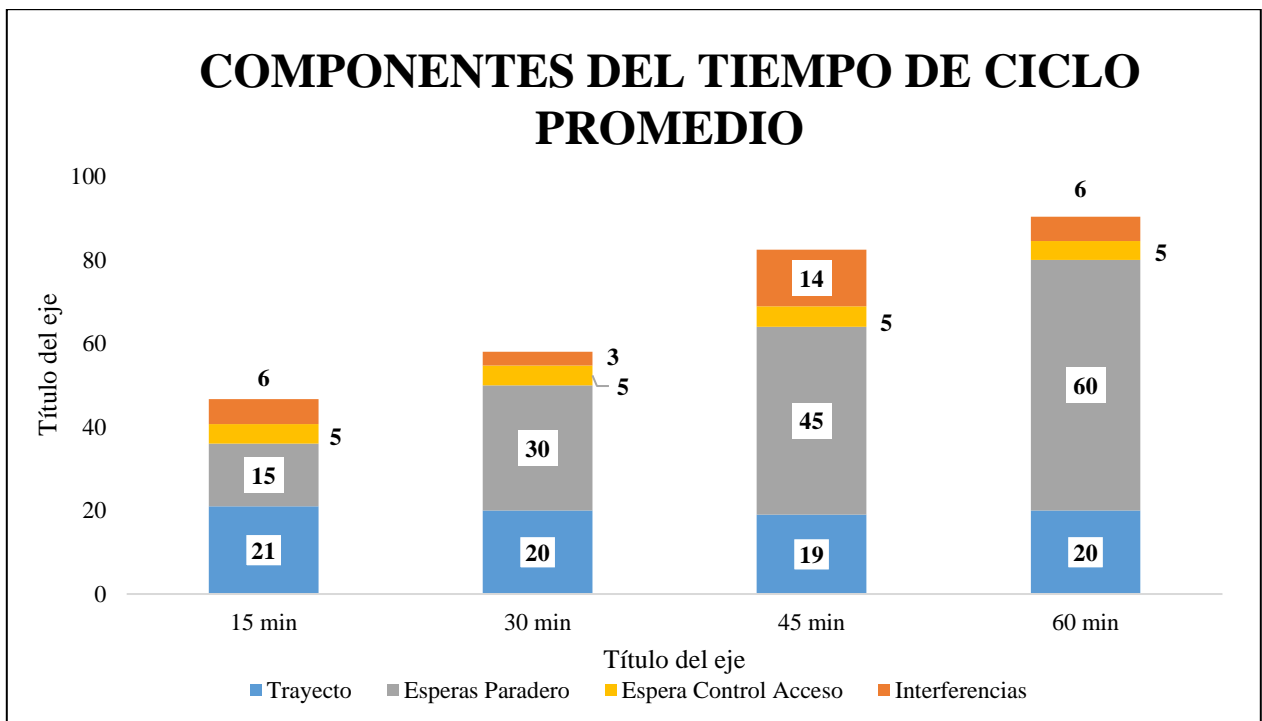


Figura 8.14. Gráfico tiempos de llegada a paraderos interior mina (CA).

Si se compara con la estrategia anterior (CM), se nota un desplazamiento hacia debajo de todas las rectas presentadas, es decir, se observa un descenso en todos los tiempos analizados. Los tiempos de viaje hacia el interior mina (T1 a T3) se reducen en más de un 50 [%], evidenciando la relevancia que tienen los tiempos en espera en los resultados finales. En el caso de los tiempos de ciclo promedio y tiempo de liberación del túnel de acceso, se alcanzan una disminución de sobre un 30 y 50 [%], respectivamente.

Por otra parte, analizando las componentes de tiempos para cada uno de los escenarios analizados se observa que la principal variación se presenta en los tiempos de espera en el control de acceso, pasando de tiempos promedio de espera desde los 32 [min] a tan sólo 5 [min].

Como es de esperar, el resto de los tiempos señalados permanece sin variación, pues se modifica únicamente la estrategia que afecta los tiempos de espera en el control de personal ubicado previo al ingreso mina. Luego, se observa que la reducción de tiempos es considerable, pasando ahora a primer plano la magnitud de los tiempos de espera originados en los paraderos interiores, siendo el caso más crítico el escenario que considera los 60 [min].



**Figura 8.15. Gráfico componentes del tiempo de ciclo promedio (CA).**

#### 8.1.7. Variación de Producción.

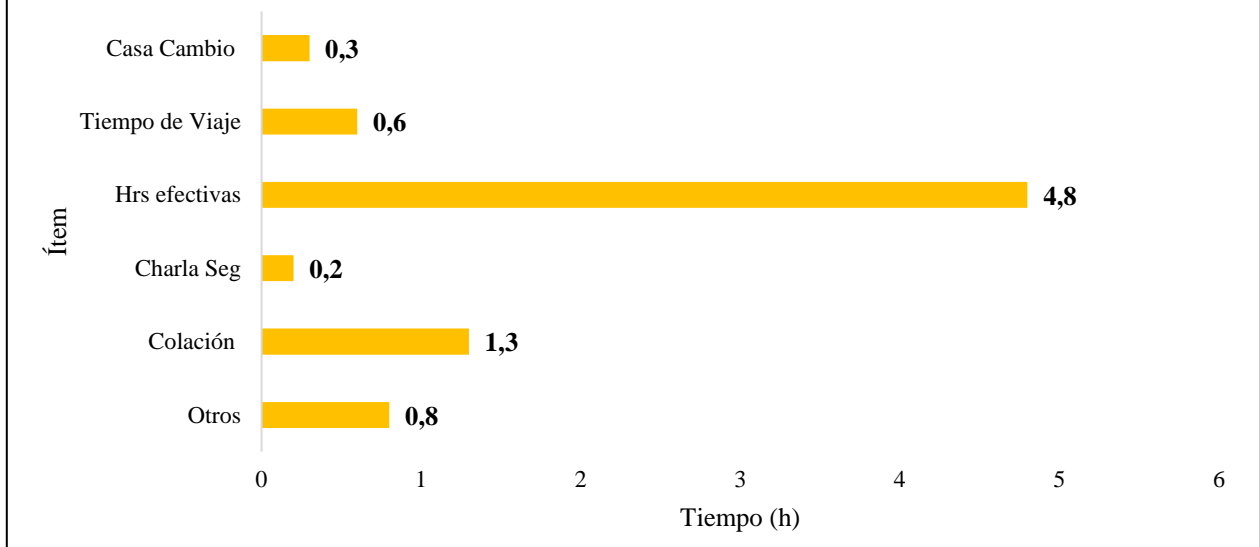
En este capítulo se discutirán los efectos en la producción según todos los escenarios estudiados. Es decir, variaciones en los tiempos de atención en el control de acceso, cantidad de vehículos en el sistema, tiempos de espera promedio en los paraderos interiores, velocidades máximas permitidas, etc.

Para esto, se cuenta entonces con un caso base en los cuales se estiman las horas efectivas de trabajo para un turno de 8 horas. Además, se incorporan estimaciones para tiempos de colación, charla de seguridad, tiempo para el cambio de ropa, entre otras. Luego, se detalla a continuación el desglose de los tiempos establecidos para el caso original con el cual se comparan el resto de los escenarios.

Cabe mencionar que el análisis más importante radica en observar la variación en las horas efectivas de trabajo que se verá modificada por las diversas condiciones que considera cada uno de los casos de estudios a evaluar.

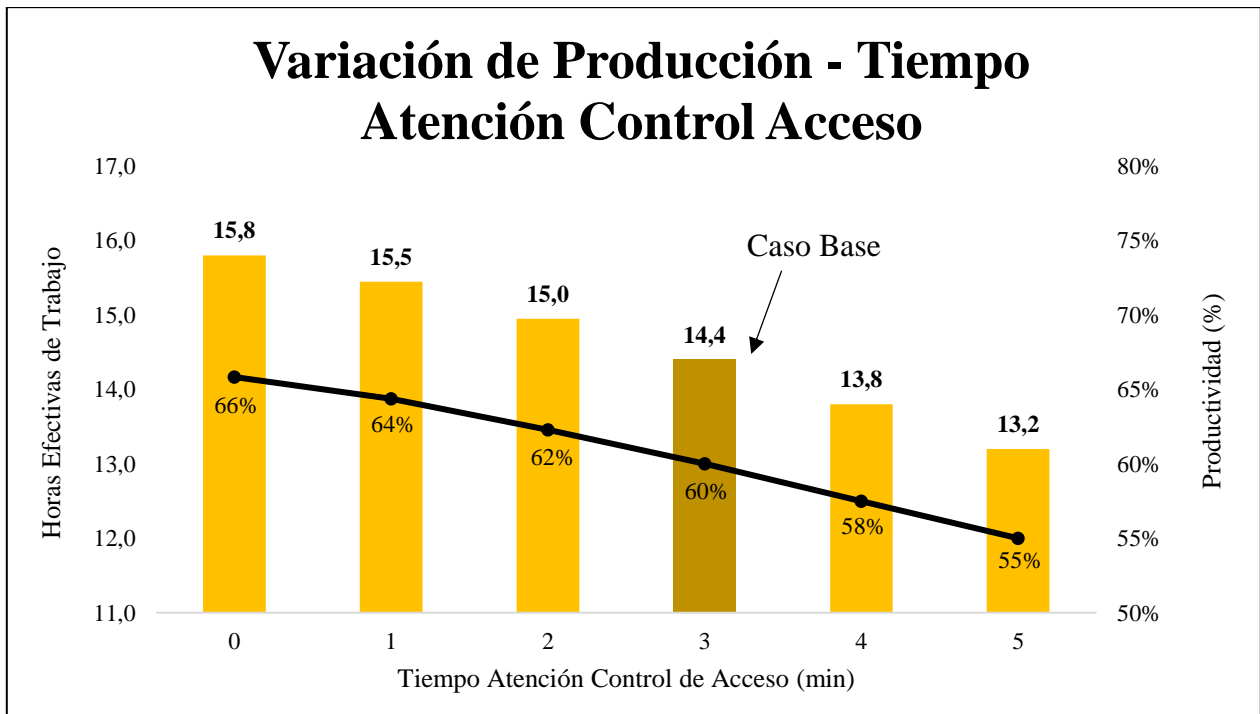
En la categoría "tiempo de viaje" observada en la Figura 8.16 se incluye el tiempo de espera en el control de acceso y el tiempo del trayecto hasta la llegada a los paraderos interiores (desde el barrio cívico de superficie). Es importante notar que el único ítem que presentará variaciones en este desglose de tiempo, será la categoría "tiempos de viaje". El resto de elementos presentados permanecerá fijo, pues son parámetros que no son afectados por los análisis de escenarios antes indicados.

## DESGLOSE ESTIMACIÓN DE TIEMPO EN TURNO DE 8 H



**Figura 8.16. Gráfico desglose estimación de tiempo en turno de 8 h.**

Tomando en cuenta las horas efectivas de trabajo, se presenta los resultados sobre las variaciones en productividad de cada hombre por turno. Para ello, se muestra el valor de la productividad que considera un factor entre las horas efectivas y las horas totales del turno. Por su parte, el concepto de improductividad hace alusión al resto de horas en donde el trabajador no se encuentra aportando a la producción. El primer que se estudiará está ligado al escenario que evalúa el tiempo de atención promedio en el control de acceso (incorpora las diferentes estrategias para el control de ingreso).

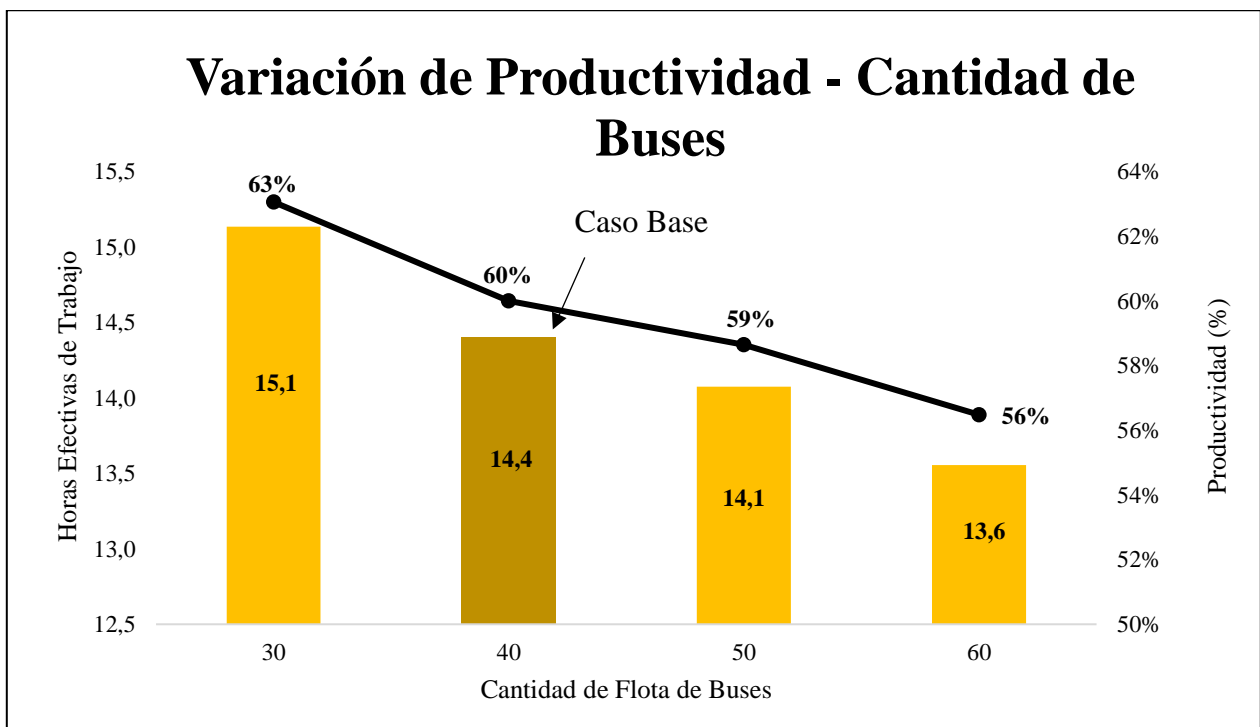


**Figura 8.17. Gráfico efectos en la productividad según tiempo atención control acceso.**

Como se aprecia en el gráfico anterior, si se tiene en consideración los tiempos de espera ocasionados en el control de acceso, se tiene un efecto importante en la productividad alcanzada (pudiendo provocar un descenso en la productividad de hasta un 55 [%]). Como ya ha sido indicado, los mayores tiempos de viaje tienen relación directa con la metodología utilizada para realizar el control de ingreso con las personas, es decir, un ingreso de personas mediante un control automatizado reduce de manera importante las esperas promedio de los buses, obteniendo un alza en la productividad de un 6 [%] en relación al caso base.

Otro aspecto que está relacionado con las esperas en el ingreso del túnel está vinculado a la cantidad de vehículos que requieran hacer uso de la ruta de acceso. Para una mayor cantidad de equipos que necesiten ingresar al interior mina, mayor serán las esperas promedio que se tendrán en el sector del control. A su vez, la cantidad de buses requeridos depende de cierto modo por la capacidad de pasajeros que estos posean (a menor capacidad de pasajeros, mayor será la flota requerida). No obstante, se tienen limitantes de tamaño según las características de ciertas rutas secundarias que no permiten el acceso de buses de mayor tamaño. Otro elemento principal que resulta en la estimación de flota, está asociado al porcentaje de utilización de los buses o el “factor de ocupación” de estos mismos.

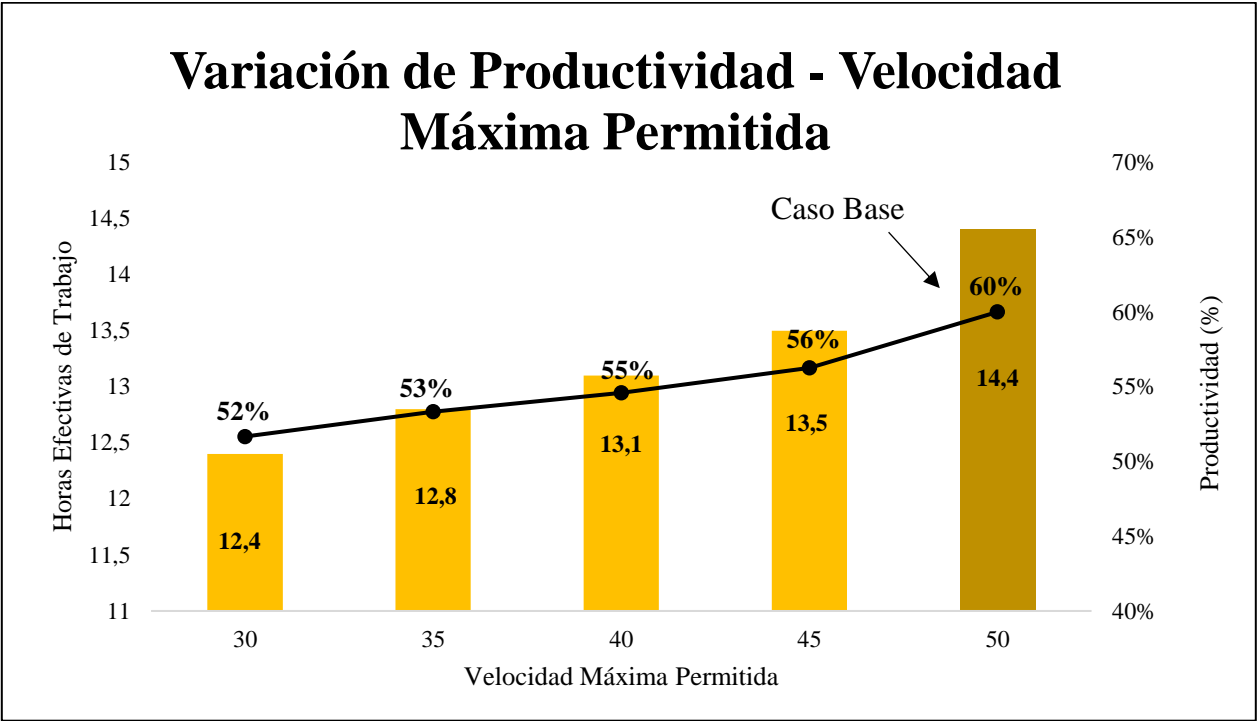
Los valores evidenciados en el siguiente gráfico toman en cuenta un tiempo de atención de 3 [min] en el control de acceso. Sin embargo, los tiempos de espera promedio aumentan a medida que se tiene una mayor cantidad de vehículos, esto se traduce en un descenso en la cantidad de horas efectivas de trabajo, y por consiguiente, se tiene una disminución en la productividad alcanzando hasta un 56 [%] aproximadamente.



**Figura 8.18. Gráfico efectos en la producción según cantidad de vehículos (CM).**



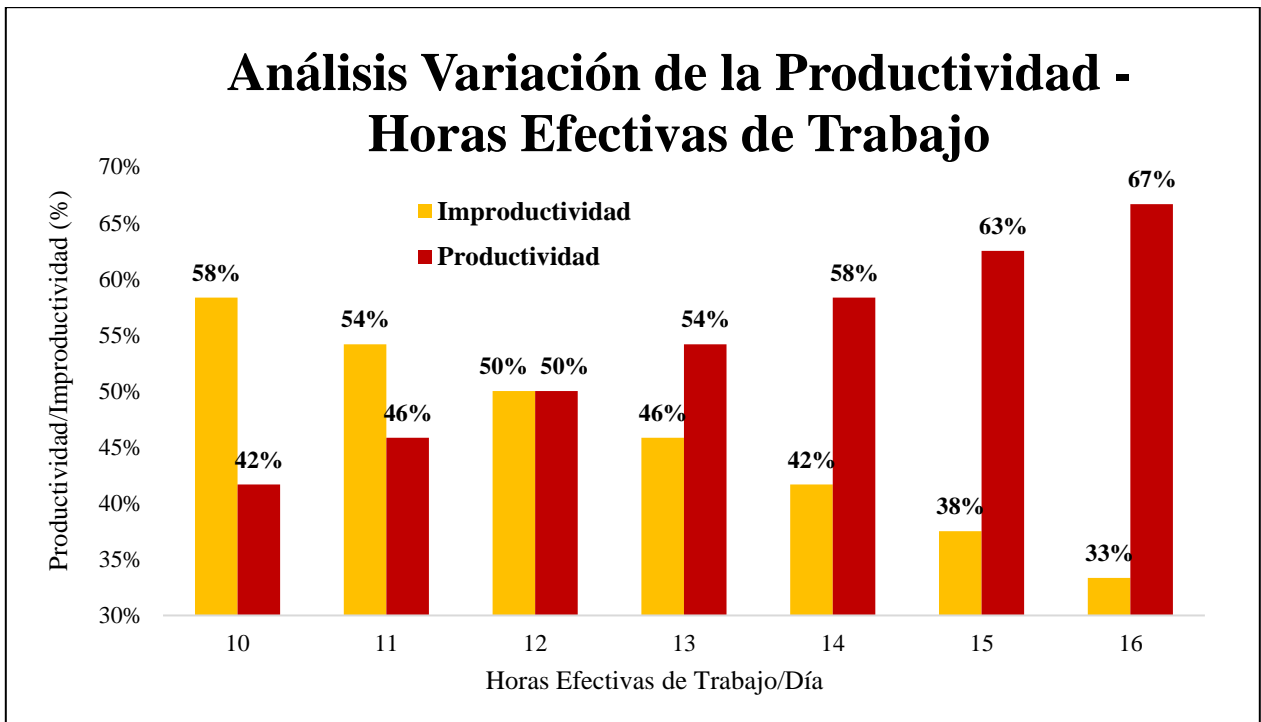
Por su parte, el último análisis realizado involucra estimar el efecto que la velocidad máxima permitida por las rutas tiene sobre la producción de la operación (el caso base considera una velocidad máxima de 50 [km/hr]). De este modo, si se reduce la velocidad de los equipos a menos de 50 [km/hr], se tendrá entonces mayores tiempos de viaje que se traducirán en un descenso de las horas efectivas de trabajo, es decir, menor será la productividad alcanzada. Para este caso, se alcanza una productividad de solo un 52 [%].



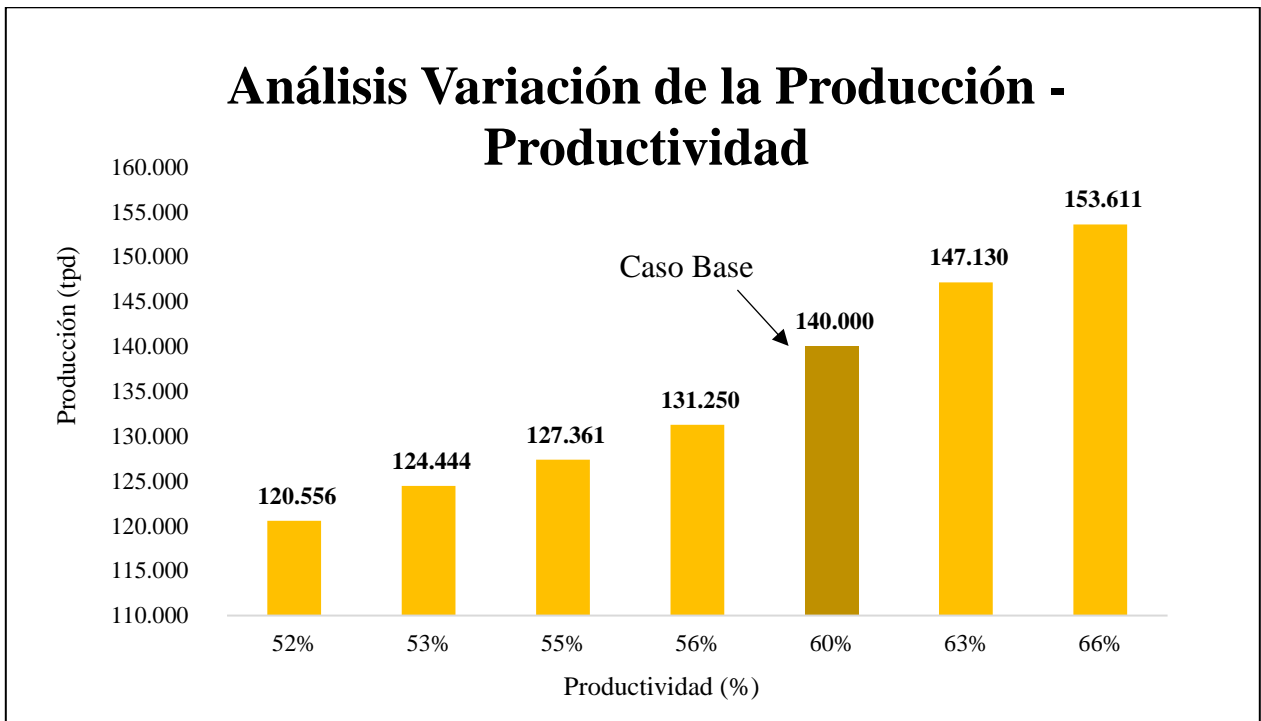
**Figura 8.19. Gráfico efectos en la producción según velocidad máxima (CM).**

El estudio realizado para la productividad tiene como objetivo cuantificar los efectos que las diversas variables estudiadas pueden tener directamente en la producción alcanzada de la operación. Para un escenario establecido, no sólo basta con estimar cuanto tiempo va a demorar un equipo en llegar al destino deseado, lo realmente importante es incorporar este efecto en un elemento importante para la compañía, es decir, cuánta será la producción alcanzada en un determinado día, mes u año.

Para ello, en primera instancia la Figura 8.19 muestra un gráfico que evidencia el efecto que tienen las horas efectivas de trabajo sobre la productividad e improductividad del trabajador (medido en horas efectivas/horas turno). Posteriormente, en la Figura 8.20 se presenta una relación que se tiene entre la productividad (según las horas efectivas de trabajo realizadas) y la producción estimada a partir de esos indicadores definidos.



**Figura 8.20. Gráfico efectos de las horas efectivas de trabajo en la productividad.**



**Figura 8.21. Gráfico efectos de la productividad en la producción.**

## 8.2. Suministro e Insumos.

El objetivo de este capítulo tiene relación a poder identificar mejoras al modelo logístico actual de abastecimientos y suministros. Para esto, se presentarán herramientas y conceptos que permitan enfocar adecuadamente las decisiones en futuros proyectos. Esta sección comienza desde la etapa de diagnóstico de la faena hasta finalizar con las recomendaciones a tener presente según el escenario establecido. Además, se busca determinar una gestión de tráfico y logística que permita un transporte y abastecimiento eficiente, seguro y confiable en los recursos materiales, y así otorgar un respaldo sólido a la operación futura de la Mina.

Cabe mencionar que no está en el alcance del proyecto la realización de simulaciones que permitan representar el escenario actual de todos los suministros e insumos de la faena, es decir, el estudio considera únicamente un análisis conceptual y de carácter cualitativo sobre la logística de suministros.

### 8.2.1. Diagnóstico Inicial de la Operación

Lo primero de esta etapa es poder definir y conceptualizar la estructura de logística de la faena, es decir, conocer los elementos principales que componen la logística de insumos y suministros. Es necesario tener claridad sobre las ubicaciones de las bodegas, insumos almacenados, capacidades de almacenamiento, etc. En relación al nivel de inventario de los productos, este va a depender directamente del nivel de demanda, tiempos de aprovisionamiento, espacio disponible, descuentos por cantidades y costos de mantenerlo.

Otro de los aspectos relevantes hace alusión al túnel de acceso principal que representa la única vía de entrada para el ingreso de los suministros desde la superficie hacia el interior mina. La normativa que rige el túnel se indica en la sección 4.10. Este túnel es de carácter bidireccional y según lo presentado en el Capítulo 8.1.2, se tiene una capacidad máxima de ingreso de 254 [veh/h].

**Tabla 8.2. Requerimientos de traslados diarios para personal e insumos.**

Ítem	Unidad	Requerimiento	Viajes/Día
Personal	-	2,500	80.0
Explosivo (ANFO)	t/mes	320	0.5
Malla Fortificación	m2/mes	33,672	0.3
Pernos Fortificación	t/mes	221	0.6
Estructuras Metálicas y Rieles	t/mes	450	0.8
Madera	m3/mes	12	0.0
Diésel	m3/mes	982	1.4
Aceros de Perforación	t/mes	19	0.1
Neumáticos	u/mes	47	0.1
Cañerías	t/mes	15	0.1
Arena - Grava para shotcrete	t/mes	2,695	3.7
Cemento para shotcrete	t/mes	630	0.8
Arena - Grava para hormigón	t/mes	3,920	5.4
Cemento para hormigón	t/mes	770	1.0
Lubricantes	m3/mes	27	0.2
Repuestos Equipos	t/mes	60	0.2

Tal como se aprecia en los siguientes cuadros, el movimiento de personal es el que representa el principal generador de viajes de ingreso mina. Notar que la tabla solo considera transporte de personal por medio de buses, es decir, no incorpora el personal transportado mediante equipos livianos utilizados por la supervisión (Ver Tabla 3.2). Un segundo generador de viajes importante corresponde a la arena (grava) para la fabricación de shotcrete.

Debido a los requerimientos de recursos que implica construir un modelo de simulación que pueda representar la complejidad del abastecimiento de suministros para una operación de esta magnitud, es que sólo se presenta un modelo conceptual de los aspectos y elementos claves que deben ser considerados. Los principales nodos del sistema son los que se describen a continuación.

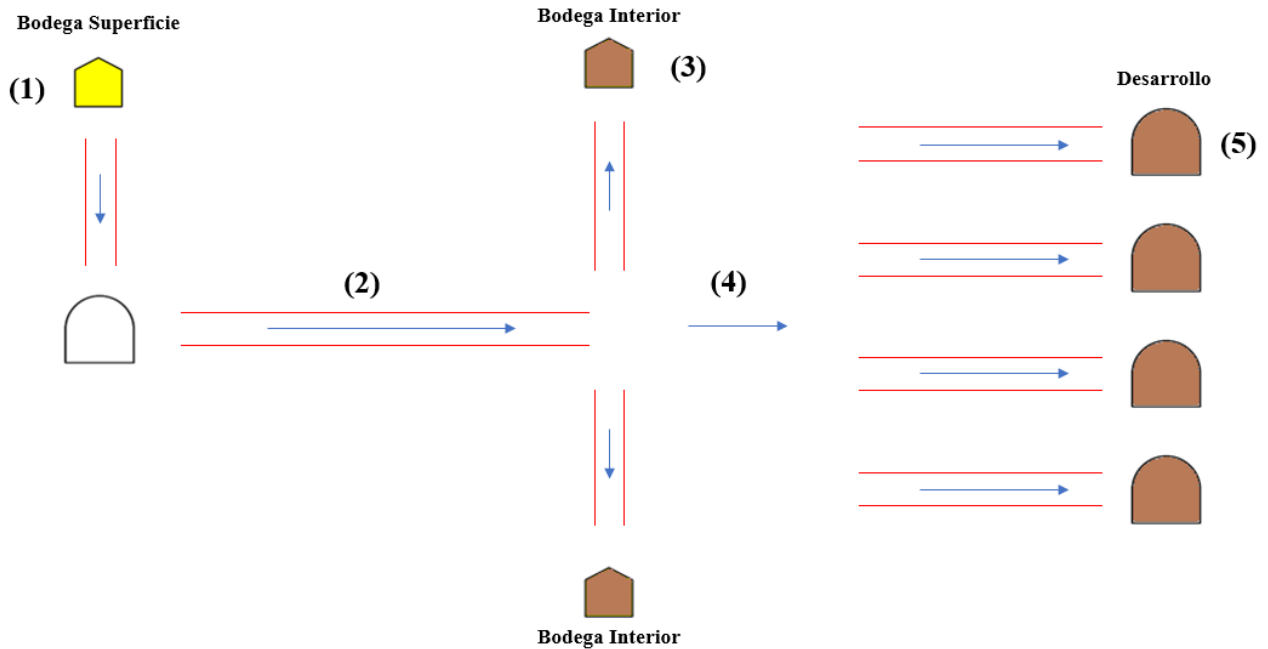


Figura 8.22. Diagrama ilustrativo para la logística de suministros.

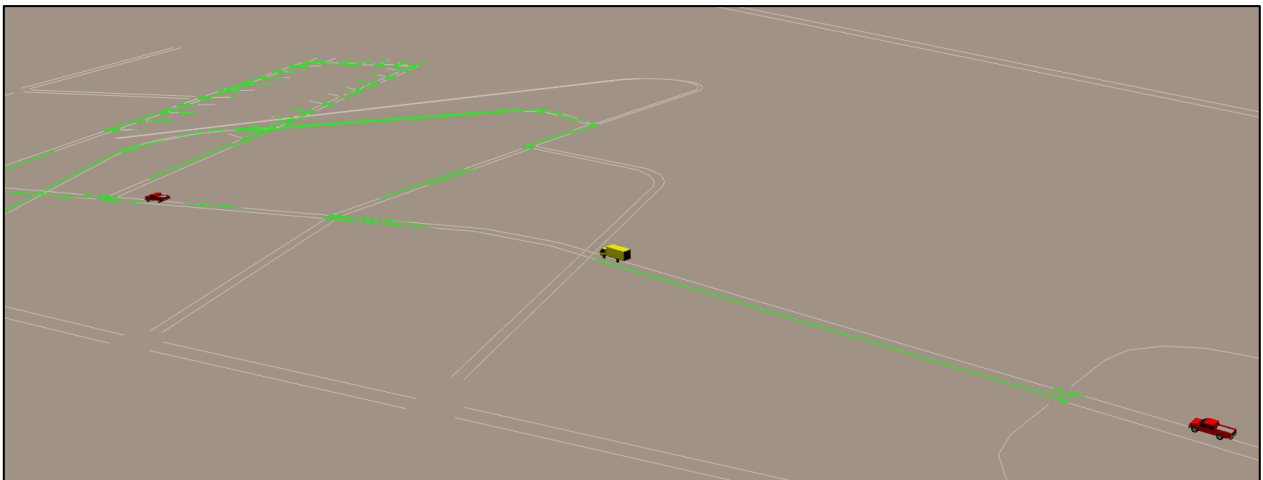
1. **Bodega de superficie:** Para este elemento, se debe tener claridad sobre las dimensiones, capacidad de almacenamiento, ubicación y que insumos o suministros puede abastecer. A su vez, es necesario conocer la demanda de los suministros desde el interior de la mina.
2. **Entrada y Salida de la Mina:** La mina posee 1 entrada principal bidireccional para ingreso de personal y materiales de distinta naturaleza. El tamaño del túnel permite la circulación de camiones de máxima capacidad de carga permitida en Chile. Es importante considerar la normativa para el transporte de cargas especiales y peligrosas que rigen las operaciones. Para este aspecto, juega un rol relevante las características del medio de transporte que se está utilizando (capacidad de transporte, tamaño, sistema de motor, etc.), ya que condicionara la cantidad de equipos que se requerirán, la frecuencia de viajes y con ello, la demanda por hacer uso del túnel de acceso principal (utilización de las vías).
3. **Bodegas Interiores:** Similar al elemento 1, se requiere conocer la ubicación de las bodegas interiores. Idealmente, es necesario contar con centros de distribución descentralizados que permitan un abastecimiento más eficiente a los puntos de trabajo, no obstante, una menor cantidad de bodegas de mayor tamaño en posiciones cercanas a la entrada facilitan el

abastecimiento de la superficie con camiones de grandes capacidades (menor remanaje del material). Además, se debe conocer la capacidad y tipo de almacenamiento.

4. **Subniveles y Galerías de Desarrollo:** Este ítem tiene relación al sentido de las vías y sus dimensiones. Es relevante conocer y tener claridad sobre las dimensiones de las rutas, pues ello condicionará el tipo de transporte que podrá ser utilizado, es decir, para vías de pequeñas dimensiones se deben utilizar camiones de menor capacidad, aumentando así las frecuencias de viajes de éstos. Idealmente, siempre será mejor contar con calles de grandes dimensiones que permitan el ingreso de equipos de mayor capacidad.
5. **Frentes de Desarrollo:** Si se requiere construir un modelo que simulación que represente de mejor manera el sistema de logística de la faena, es importante incluir en la simulación los requerimientos por insumos en las frentes de desarrollo. En estas zonas se generan demandas importantes de diferentes suministros. Aquí lo realmente importante es una correcta gestión que permita suplir la demanda en el menor tiempo posible, pues ello aumentará la productividad de los trabajadores y disminuirá los costos asociado a un uso ineficiente de los equipos.

Estos 5 aspectos que han sido descritos previamente resumen los aspectos principales que debe considerar un modelo de simulación que permita ilustrar de manera más representativa lo que es la logística de suministros de una operación.

De acuerdo a las normativas de tráfico indicadas en el capítulo 4.10, se tiene que para el transporte de cargas peligrosas (explosivos) se requiere exclusividad de tráfico para el túnel de acceso principal (2), o sea, tráfico unidireccional. Para ello, se debe establecer una norma de transporte y realizar una programación anticipada de fecha y hora del transporte a realizar. Este requerimiento hace necesario realizar una evaluación sobre el tiempo que la rampa de acceso principal permanecerá cerrada por el transporte de los explosivos. Para esto, se realiza una simulación que estimará este aspecto. Además, se tiene que para este tipo de cargas peligrosas es necesario el uso de vehículos escolta sobre el camión que transporta el material.



**Figura 8.23. Interfaz de visualización simulación transporte de cargas peligrosas.**

Para este tipo de transporte se tiene una velocidad máxima permitida de 25 [km/hr]. La distancia que comprende el traslado de los explosivos es de 8.3 [km] aproximadamente, la cual considera el

trayecto desde el barrio cívico de superficie hasta las bodegas interiores destinada a almacenar este tipo de materiales.

Luego de la simulación realizada, se obtiene que la rampa de acceso principal permanecerá cerrada durante 24 [min] producto del transporte de este tipo de material (exclusividad de tráfico). A su vez, se deberá establecer un procedimiento de operación para el transporte de cargas especiales o peligrosas, en el cual se indicará cual es el horario más adecuado del tiempo disponible del Túnel de Acceso (durante el cambio de turno).

### **8.2.2. Factor Multiplicativo de Viajes**

Un aspecto de análisis que no es considerado por el presente estudio tiene relación al factor multiplicativo de viajes. Este factor se define como el cociente entre la cantidad de viajes necesarios para transportar el personal desde el área de superficie del exterior mina, y la cantidad de viajes requeridos para transportar el mismo personal desde la ciudad o campamento hacia la zona exterior o paraderos de superficie (Ver Figura 3.3). Este factor entrega una medida rápida de eficiencia de la logística del personal en este caso. Si el factor multiplicativo es mayor que 1, es indicativo de que existen oportunidades de mejora en el proceso. Por otro lado, si el factor es menor que 1 (mayor que 0) es indicativo de que existen un remanejo de “material” durante el proceso logístico. No obstante, el indicador antes mencionado es aplicable tanto como para transporte de personal como para lo que corresponde al transporte de insumos y suministros.

Para el caso donde se tiene un factor multiplicativo de por ejemplo 1.4, significa que desde la superficie y hacia el interior mina se generan 1.4 viajes más por cada bus que llega hacia los paraderos de superficie provenientes de la ciudad o campamento respectivo. El que se tenga este indicador sobre 1.0 no necesariamente representa un proceso logístico deficiente, dado que existen muchas otras restricciones operacionales que no hacen posible obtener ese valor. Un ejemplo muy sencillo se puede ilustrar con el tamaño de los buses, ese decir, no es posible llegar con un bus de 40 personas a un sector particular de la mina donde las secciones de calle no permiten su ingreso.

Para el ejemplo anterior, un factor multiplicador de 1.4 se puede alcanzar por medio de tres factores principales que lo pudieran originar.

- Uno de ellos está vinculado a la menor capacidad de los buses que transportan el personal a partir de ese punto. Como fue indicado anteriormente, el uso de buses de menor capacidad para ingresar a la mina se debe en algunos casos al hecho que la zona de destino no admite vehículos de mayor tamaño debido al diseño de los túneles.
- Por otro parte, un elemento importante que también pudiese afectar y cambiar este valor tiene relación a una baja utilización o factor en la capacidad de los buses.
- Un tercer elemento que multiplica el número de viajes es el hecho que las actividades se encuentran dispersas en varios niveles, lo que finalmente lleva a requerir más viajes para transportar una cantidad dada de trabajadores. Esto hará que probablemente el costo unitario de transporte en el último ciclo (Ver Figura 3.3) se menor que en el primero.

### 8.2.3. Desafíos de la Logística en la Industria

Siempre es necesario hacer visible los problemas logísticos y desafíos que genera un proyecto de esta naturaleza. Esto permite visualizar los aspectos que presentan oportunidades de mejora y entregar conceptos y modelos que sean utilizables tanto en esta mina, como en otras actuales o futuras de propiedad de la compañía.

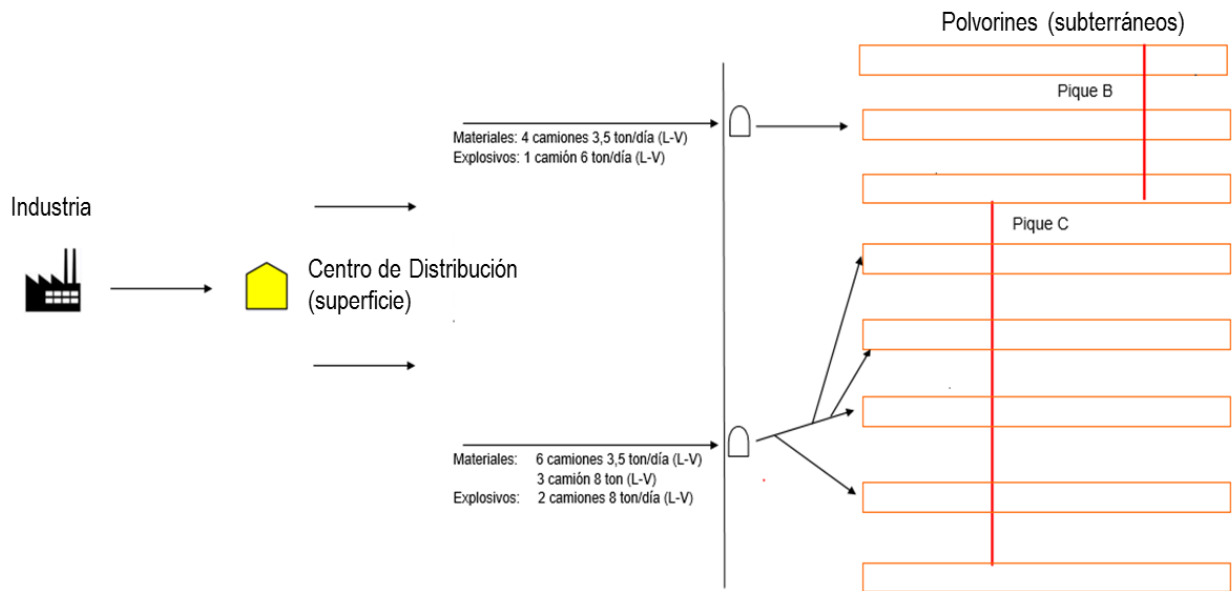
Actualmente, a nivel estratégico existen una serie de desafíos que en la industria son identificados y que deben ser considerados para el diseño de un buen modelo logístico por todas las compañías.

1. **Planes:** Resolver las fallas de mercado asociadas a costos de coordinación, externalidades y economías de red que impiden alcanzar soluciones socialmente eficientes sin una estrategia y política a largo plazo a nivel país.
2. **Foco:** Orientar las estrategias a la reducción de costos logísticos totales, y simultáneamente a la identificación y potenciamiento de atributos de valor al cliente.
3. **Colaboración:** Búsqueda permanente de sinergias en transporte, almacenamiento, información, inversión y uso de la tecnología.
4. **Sustentabilidad:** Respeto por el medio ambiente, potenciamiento del reciclaje, eficiencia energética y reducción de las huellas de carbono.
5. **Visibilidad:** La visibilidad en las cadenas logísticas (estado de los pedidos y productos), cercano al tiempo real agrega valor a toda empresa dando un mayor control de sus productos en tránsito y el modo en que llega hasta su destino final.

Uno de los desafíos comunes para la gran mayoría de las faenas está relacionado a la sinergia de transporte y almacenamiento que se traduce en el nivel de remanejo de materiales, es decir, mayor colaboración. Una herramienta para evaluar este aspecto está vinculado al indicador mencionado en el capítulo anterior (Factor Multiplicativo de Viajes).

A continuación, el diagrama de flujo de la Figura 8.24 muestra el caso de estudio de otra faena ya en operación en donde se busca evaluar el nivel de remanejo del transporte de explosivos [17]. El alcance definido para el sistema de suministro de explosivos y accesorios de tronadura, considera el suministro por parte de las empresas proveedoras al polvorín central ubicado en superficie, en un sector aledaño al barrio industrial de superficie de acuerdo a las distancias mínimas establecidas. El transporte hacia el interior de la mina se hace en vehículos acondicionados para el transporte de explosivos en un horario especial en el que el tránsito por la rampa de acceso principal es de uso exclusivo.

Para este caso, el factor de multiplicación de viajes es de 7.50. Esto es indicativo del remanejo que se realiza en la zona del centro distribución de superficie, además de existir oportunidades de mejoras en los procesos logísticos de este material específico. Para este caso, las oportunidades de mejoras consisten en eliminar el paso intermedio que constituye ese centro de despacho de superficie, recepcionando directamente dentro de la mina el flujo de explosivos que tiene por origen los proveedores.



**Figura 8.24. Diagrama esquemático de flujo para transporte de explosivo.**

Por otra parte, es prescindible elaborar un buen diseño logístico que pueda capturar la verdadera demanda requerida por la operación, tener en consideración los riesgos presentes y además, el tipo de contrato, su duración y las formas de pago se deben adecuar a los intereses de la compañía. Las alianzas estratégicas con empresas es una excelente alternativa para el desarrollo de proyectos y otros servicios. Esto se traducirá en una colaboración mutua de entrega de información y sinergias.

Para la construcción del modelo logístico se tiene una serie de necesidades que al momento de su elaboración deben ser tomadas en cuenta. Estas son infraestructura y construcción, tecnologías de la información, recursos energéticos, capital humano y aspectos regulatorios.

En la cadena logística se deben centrar los procesos de inicio a término y desde los proveedores, hasta su utilización por parte de la operación, resolviendo 5 grandes temas centrales:

- Planificación.
- Abastecimiento.
- Producción.
- El flujo de productos.
- Utilización.

Para el caso del transporte de insumos y suministros, a nivel general se aprecian una serie de oportunidades de mejora relacionadas a la optimización de fletes y composición de cargas, uso de tecnologías, desarrollo de mediciones, mejoramientos en los contratos y conocimiento de los clientes.



## 8.2.4. Abastecimientos y Desarrollo de Proveedores

Para el proceso de abastecimiento, se debe tener en consideración una serie de responsabilidades estratégicas en las compras que involucran reducción en el costo global de abastecimiento, participar en el armado del plan de compras y contrataciones, satisfacer las necesidades del plan de compras y reducir o mecanizar tareas propias que agregan costos sin agregar valor.

En la gestión de proveedores, es necesario seleccionar, evaluar y desarrollar a los proveedores. Un resultado deseado se logra más eficientemente si las actividades y recursos se gestionan como un proceso. De este modo, una organización y sus proveedores son interdependientes y su relación mutuamente beneficiosa aumenta la capacidad de ambos para crear valor.

La evaluación de un proveedor es un proceso de comunicación que proporciona retroalimentación sobre el desempeño del proveedor, tomando en cuenta los requerimientos y requisitos existentes (objetivos, estándares, responsabilidades, cumplimientos, calidad, etc.), las expectativas de los usuarios y en bien de la organización.

Por su parte, el desarrollo de proveedores obedece a las necesidades del sector. Estas deben efectuar el desarrollo de proveedores por tres objetivos.

1. La perspectiva de asegurar el suministro para un horizonte de largo plazo.
2. Desarrollo tecnológico.
3. Brechas entre la expectativa del comprador y la actuación del proveedor.

Además, el desarrollo de proveedores no se limita a habilitar proveedores que presenten brechas entre su actuación y la expectativa de la empresa cliente, sino también a identificar nuevas fuentes potenciales de abastecimiento para la empresa.

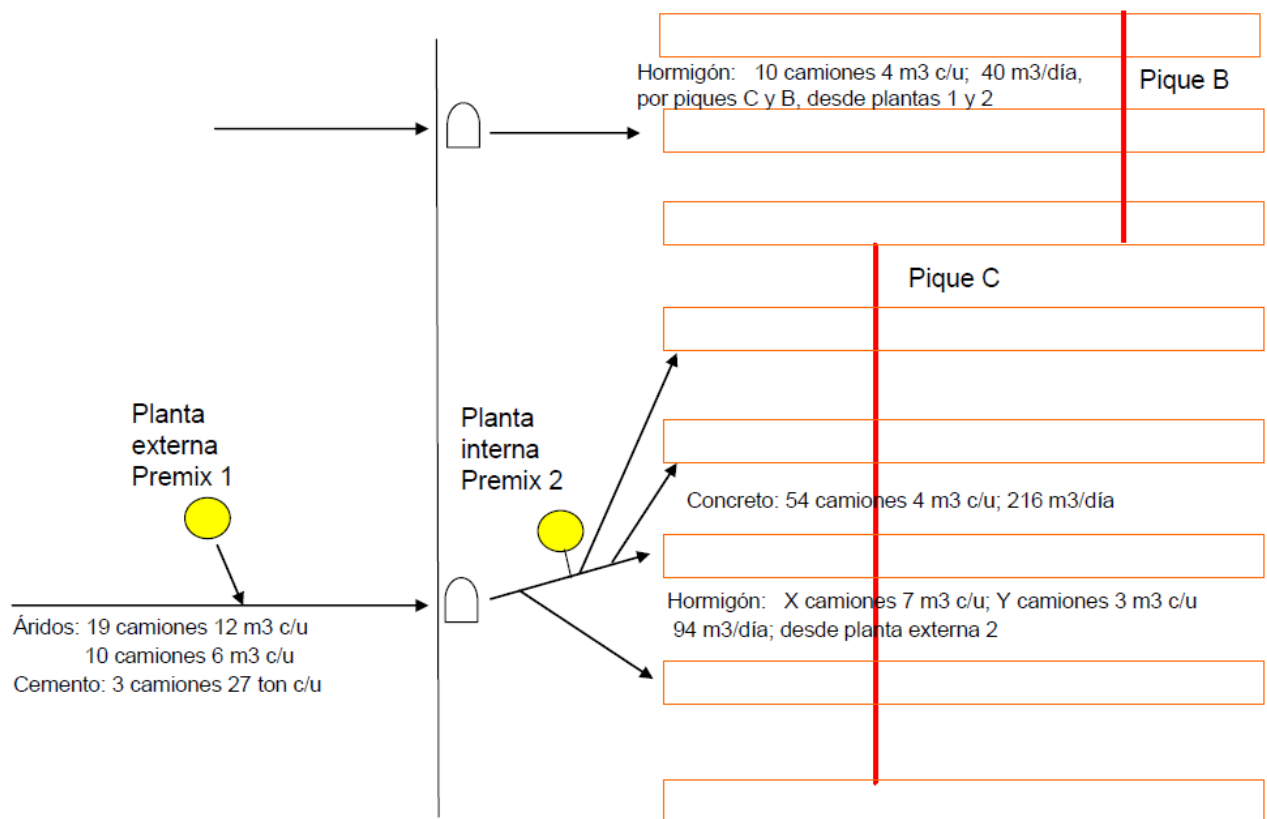
Los temas típicos a abordar de las empresas proveedoras son precios competitivos, tiempos de entrega, calidad, asistencia técnica, servicio al cliente y otros de carácter ambiental, comunicaciones, proyectos de mejora en general, etc. Por su parte, los beneficios esperados son los siguientes.

1. **Integración** de la cadena productiva y/o de servicios.
2. **Reducir** costos de producción y comercialización.
3. **Diversificar** proveedores.
4. **Desarrollar proveedores eficientes y competitivos** establecidos en nuestro país, coadyuvando al proceso de sustitución de importaciones.
5. **Establecer una relación más estrecha** con los proveedores, para lograr cubrir las necesidades de la operación.
6. **Eliminar trámites administrativos** y contables de las importaciones realizadas.

7. **Desarrollar una filosofía de trabajo** para cumplir con producto idóneo, precio adecuado, tiempo exacto y lugar preciso

Para conseguir estos beneficios la empresa debe asumir una serie de compromisos que apalanquen alcanzar las metas propuestas. Estos son compromisos de alta dirección con el proceso, dedicación y tiempo, involucramiento de distintas áreas de la empresa, disposición a mejorar prácticas de compra promover planes de mejora y voluntad de desarrollar proveedores locales.

A continuación, se muestra el caso de estudio de una faena en operación en donde se analiza el transporte de hormigón hacia los diferentes sectores demandantes de la mina [17]. Para este caso se presentan oportunidades referidas a la calidad del producto, el tiempo y lugar de entrega (se trabaja en desarrollar una filosofía de trabajo).



**Figura 8.25. Diagrama esquemático de flujo para transporte de hormigón.**

En este caso, se tiene un factor de multiplicación de viajes de 1.70. Esto valida por el lado de abastecimiento la ubicación de esa planta, dado que con ello se genera una demanda menos al túnel de ingreso a la Mina. No obstante, para validar completamente su ubicación, se deben conocer los antecedentes de la demanda y los lugares de destino del hormigón.

Uno de los problemas principales que presenta la distribución del hormigón corresponde a la oportunidad en las entregas. Debido a la lentitud del proceso por la baja velocidad de circulación de los camiones mixers mineros (a causa del bajo volumen por entrega), se generan condiciones que inciden finalmente en la velocidad de las obras de desarrollo y en los tiempos muertos que deben enfrentar las empresas de obras.

Es decir, en este escenario se procede a analizar métodos de logística innovadores para los materiales que representan la parte más importante del flujo de materiales generados por la mina. Entre ellos escenarios en donde se utilicen bombas de hormigón, sistemas de transporte de personal de gran capacidad y velocidad, y la centralización en agentes especializado la gestión, abastecimiento y almacenaje de los materiales de obra entre otras iniciativas.

### 8.2.5. Administración y Gestión de Contratos

La manera en la cual la industria minera satisface las demandas de suministros, tiene múltiples formas, ya sea a través de contratos de suministros de largo plazo, licitaciones anuales, compras spot, suministro a través de contratos Marc u otras formas. Una gran oportunidad de mejora en esta línea está asociado a los nuevos proyectos de desarrollo y expansión. En estos se planifica la operación futura de los nuevos proyectos, sin considerar necesariamente los impactos sobre los contratos vigentes en la operación actual.

La gestión de los contratos tiene un rol importante en las compañías, pues poco sirve haber realizado todo el proceso previo de la adquisición correctamente, si no se cuenta con una efectiva gestión de la información generada sobre adquisiciones previas que puedan ser aprovechadas en lugar de realizar nuevas licitaciones para satisfacer las demandas proyectadas a futuro. Además, debe existir una buena gestión para la aceptación oportuna y efectiva de los bienes y servicios y la gestión de post entrega.

La gestión de los contratos permitirá controlar 3 variables que tienen una alta incidencia en los procesos logísticos:

- **La Eficacia**, pues impacta positivamente el logro de los objetivos estratégicos y el buen funcionamiento diario de nuestra organización, al contar con nuestros requerimientos cuando y como los necesitamos.
- **La Eficiencia**, debido a que disminuye los costos de las compras, al buscar continuamente condiciones más ventajosas a los contratos vigentes, así como reduce los tiempos destinados a los procesos de compras al contar con una gestión coordinada con nuestro proveedor.
- **Transparencia**, ya que se cuenta con “reglas del juego” claras para comprador y proveedor.

Por otra parte, las actividades claves para la gestión de contratos de cualquier tipo de compra que realice la empresa son:

1. **Elaborar el contrato:** La elaboración de los contratos es una tarea conocida por el departamento de abastecimiento de la organización y tiene alta relevancia para gestionarlo posteriormente, una vez que ya han sido “firmados”.
2. **Definir roles y responsabilidades claras:** En toda compra debe haber un responsable de que el contrato llegue a buen término para ambas partes. Para las compras complejas o estratégicas, es recomendable que sea un equipo experto a cargo, que tenga los conocimientos y la disponibilidad de tiempo para cumplir con esta función.

3. **Gestionar la relación con el proveedor:** Mientras más compleja sea la compra, mayor importancia reviste manejar una buena relación con el proveedor. Ello significa mantener una relación abierta y constructiva, buscando resolver las tensiones y controversias tempranamente, especialmente en aquellos proyectos de larga duración
4. **Gestionar la entrega del producto o servicio:** Una vez ejecutada la compra, el bien o servicio deberá ser provisto de la manera en que fue acordada en el contrato. Una adecuada gestión de la entrega significa asegurar que el producto o servicio fue entregado en la cantidad acordada, la calidad acordada, en la fecha pactada y de la forma es que lo se esperaba.
5. **Gestionar el pago:** En el contrato se compromete a pagar de una determinada forma y en un plazo determinado, una o varias sumas de dinero contra la entrega de uno o varios productos o servicios. Aunque evidentemente el cumplimiento de los plazos y condiciones establecidos resulta muy importante para los proveedores, también es muy relevante para la compañía.
6. **Gestionar la modificación o el término anticipado del contrato:** Es posible que en el curso de una relación contractual entre el cliente y un proveedor ocurran hechos que, de alguna manera, alteren las circunstancias en que se contrató originalmente.
7. **Gestionar los servicios post entrega:** En algunos casos, la gestión de los contratos no finaliza con la entrega puntual del producto o servicio y el pago del mismo, sino que podría ir más allá de ese plazo, cuando subsisten obligaciones para el proveedor. Por ejemplo, ha comprometido garantías o servicios post venta en caso de fallas.
8. **Registrar y evaluar el contrato:** Es importante contar con un registro que permita, en el transcurso de la compra, poder ubicar rápidamente el contrato, las boletas de garantía y toda la documentación relacionada de tal manera que la información esté disponible a los interesados para su lectura o modificación.

En el transcurso y término del contrato, debe registrar información que sirva de material de consulta y para la toma de decisiones del proceso presupuestario, de planificación de compras y de adjudicación de nuevas compras. El registro, debiera contar con antecedentes que nos permitan evaluar a nuestros proveedores.

Una buena gestión en los contratos que realice la compañía se traducirá en que la planificación y licitación serán los aspectos esenciales de la administración de contratos, se basarán en el desempeño y los resultados, se pagará por resultados y agregación de valor, se desarrollarán un plan de performance y un plan de desempeño formales y se verán los incentivos como una parte central del contrato.

## 8.2.6. Oportunidades de Mejora en la Logística de Suministros

En etapas previas y estudios de ingeniería se deben realizar una serie de análisis que permitan asegurar la confiabilidad y sustentabilidad futura de la operación tales como:

- Dimensionar correctamente la capacidad de los sistemas de acceso y de circulación para permitir una adecuada operación logística.
- Diseñar adecuadamente las etapas, instalaciones y procesos que deben seguir los distintos materiales y el personal requerido para la operación logística de la nueva mina.
- Minimizar los costos logísticos de los procesos logísticos, tanto para el proceso de logística de entrada a la mina, como la de salida.
- La fase de ingeniería conceptual logística debe interactuar y retroalimentarse mutuamente con todos los demás procesos de diseño asociados a la ingeniería conceptual, de tal manera de generar una solución que represente un óptimo global para la operación de todo el sistema.

En el presente capítulo se describen los puntos de presión más significativos para la industria y que presentan oportunidades de mejora. Para ello, inicialmente se describen los desafíos a nivel estratégicos.

- Armonización entre la demanda, la producción y el manejo de stock de productos, utilizado como pulmón.
- Armonización de los flujos de información.
- Desconocimiento de la demanda.
- Diseño y layout de bodega (tráfico interno).
- Control de stock y sobre stock de productos.
- Preparación de cargas y el procesamiento de los pedidos.
- Preparación de rutas y administración del transporte.
- Optimización de costos de transporte y manejo de inventarios.
- Incorporación de tecnologías.
- Manejo de indicadores de eficiencia y eficacia.

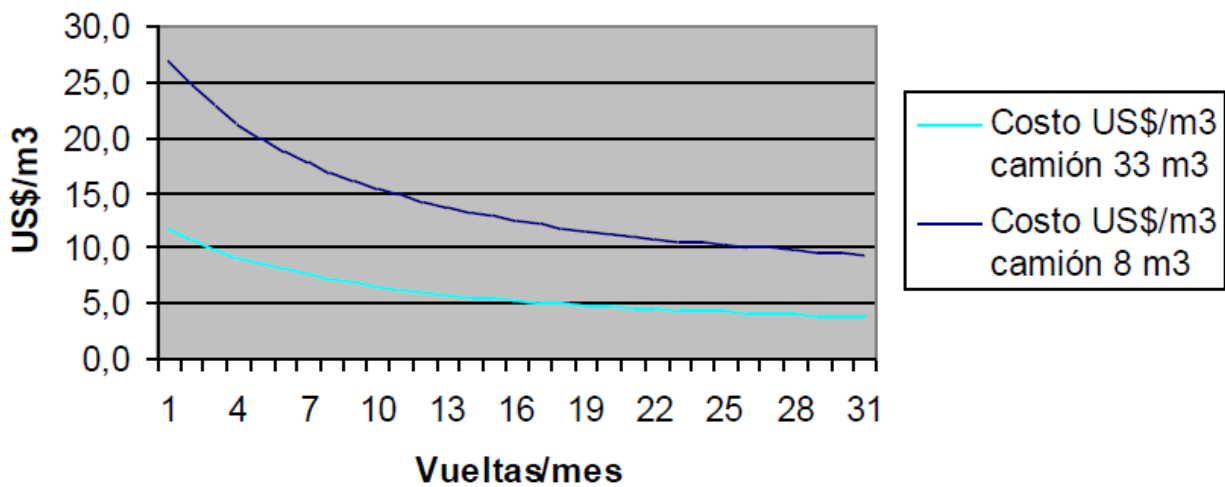
A nivel operativo esto se traduce en una serie de desafíos que pueden ser resueltos mediante el mejoramiento de aspectos esenciales y de gran impacto para el negocio. Estos se enumeran a continuación.

1. Evitar uso de camionetas para traslado de personal y materiales, dada la menor capacidad con la que estas cuentan y que harán aumentar la cantidad de flota de equipos en circulación por las vías. Es decir, se generan más viajes de los necesarios, lo que impacta en los tiempos de respuesta del túnel de acceso principal. Especialmente tener precaución en el caso del personal colaborador de obras.
2. Usar camiones más grandes para los casos que la demanda y el diseño y secciones de los túneles lo permitan. Esto hace referencia a diseñar los túneles de tal manera que sean compatibles con los tamaños y radios de giro de los camiones de mayor tamaño
3. Evitar el remanejo de materiales a través de un buen diseño logístico, el cual busque un factor multiplicador acorde a las necesidades del proyecto.
4. Localizar o relocalizar los elementos que más consumen materiales (combustible, áridos, cementos, etc.) en las proximidades del túnel de acceso, para poder llegar hasta ahí con camiones grandes. Ello con el fin de permitir el acceso efectivo de camiones de mayor tamaño.
5. Disponer de almacenes interiores que abastezcan a los colaboradores con los materiales de mayor consumo. Estos almacenes debieran ser administrados por un proveedor que tenga la suficiente escala para poder ingresar camiones completos para abastecer las obras y proyectos. Con ello se evita la generación de una parte de los viajes asociados a este concepto.
6. Para el caso particular de los camiones mixers, se tiene que un factor relevante a tener en consideración radica en evitar los atrasos en las entregas. Dado que el origen de atrasos provocará mayores costos de obras por baja productividad por la indisponibilidad del hormigón.
7. Generar un sistema de pedidos de hormigón abierto y visible por todas las empresas de obras, con el fin de facilitar su proceso de planificación de su trabajo.
8. Evitar procesos centralizados, dado que, si se encuentran centralizados en un lugar, se generan mayores tiempos de desplazamiento, lo que termina impactando en el tamaño de la flota requerida y el personal asociado.
9. Por otro lado, siempre es recomendable usar tecnologías de explotación y desarrollo menos intensivas en necesidades de mano de obra.
10. Apuntar a la existencia de un “diagrama de flujos logísticos” para toda la mina. La información de flujos y stocks no se debe encontrar descentralizada en muchas áreas. Es decir, buscar a la centralización de la información requerida para la administración de la logística de una mina subterránea. Esto se acompaña de una definición de la organización (quién debe proveer/gestionar cada tarea e información en el sistema).
11. Tener claridad de los costos logísticos. Si bien se puede conocer los costos unitarios de transporte, al visualizarlos como un conjunto no son conocidos. Para ello, se debe implementar una base de datos que sea actualizada permanentemente.

12. Poseer claridad completa de la información de destinos al interior mina de los camiones y vehículos livianos, además de los destinos finales de los colaboradores de obras y proyectos.
13. Hacer gestión sobre la generación de viajes, especialmente de los viajes de los vehículos pequeños y aquellos que tienen una velocidad de circulación menor.

Como una manera de ejemplificar el efecto que tiene el tamaño de los equipos de transporte referido en el punto 2.0, es que presenta el siguiente gráfico obtenido a partir de un caso de estudio [17]. En este análisis se discute sobre el efecto que tiene la eficiencia del tamaño del camión y la productividad mensual. En el gráfico se aprecia claramente las ventajas que se tienen al contar con equipos de transporte de mayor capacidad.

### Efecto eficiencia tamaño camión y productividad mensual



**Figura 8.26. Gráfico eficiencia del tamaño del camión y la productividad mensual**

En resumen, se debe centralizar la gestión logística conjunta a niveles estratégico, táctico y operacional, alimentando su base de información con todos los proyectos/cambios y expansiones futuras, además de los requerimientos que ellos generan.

### 8.3.Limitantes y Oportunidades de Mejora

Una de las limitantes del estudio es que no se pudo realizar una validación del modelo de simulación con datos reales puesto que la faena aún no ha comenzado su operación. En relación a esto, es que los datos fueron obtenidos de diversas fuentes tales como los informes de los estudios de ingeniería, referencias de la industria y recopilación bibliográfica.

Es importante indicar que dentro de este proyecto no se toman en cuenta las restricciones de ventilación en el túnel de acceso principal. Este escenario con distintas intensidades de tráfico y de potencias de equipos deben estar ajustados a un sistema de ventilación de manera de optimizar su efectividad en el control de la contaminación y reducir el consumo de energía de los ventiladores, incorporando además, conceptos de seguridad asociados al control de emergencias (eventuales

incendios al interior de esta infraestructura y de posibles incrementos inesperados en la concentración de contaminantes diésel). Es por este motivo que, para futuros estudio, se sugiere complementar este tipo de resultados con las restricciones de ventilación que presentan las rutas según su diseño.

Los resultados obtenidos asociados al transporte de personal durante el cambio de turno considerar 100% de disponibilidad del túnel de acceso principal. No se incluye en la simulación otros factores adicionales que hagan cambiar el estado funcionamiento “normal” del túnel de acceso. Es decir, no se incluyen las mantenciones preventivas al túnel de acceso, traslado vehículos de emergencia, traslado de explosivos, etc. Para lograr una mayor representatividad del modelo se debe incorporar periodos de indisponibilidad de las rutas, esto además permitirá evaluar las capacidades de respuesta ante casos límites que exigen el sistema.

Por su parte, es necesario poder estimar los efectos que las actividades vinculadas al transporte de personal puedan tener sobre la logística referida al transporte de los insumos (retrasos en la entrega, utilizations de rutas, etc.). Para esto, se debe incorporar en un mismo modelo de simulación todas las actividades que pudieran producir efectos negativos sobre otras. Esto incluye actividades que demandan insumos desde las frentes de desarrollo.

En relación a las interferencias de las actividades, este estudio no incorpora el efecto que todas las actividades relacionadas al transporte de los insumos puedan tener sobre la producción de la mina. Además, para futuros estudios se sugiere analizar el stock de suministros de los almacenes interiores. Una de las líneas de discusión referidas fluidez de información con las bodegas de superficie y otra vinculada a la capacidad que se tiene para satisfacer la demanda de los diversos sectores de la mina (con el objetivo de evitar interrupciones de las actividades por falta de algún suministro).



## 9. CONCLUSIONES

El estudio buscaba medir el impacto que ciertas variables que forman parte de un modelo logístico pueden tener en la operación de una mina subterránea de gran escala. Para ello, por medio de simulaciones se analizaron diferentes variables y los efectos que esta tenían en la productividad y producción de la faena (midiendo el efecto en los tiempos de viaje empleados por los buses).

En esta sección se presentan las principales conclusiones obtenidas luego de la realización del estudio. En primera instancia se determinó que las principales variables que afectan el sistema logístico de la faena corresponden a la cantidad de vehículos que circulan por las rutas, los tiempos de espera en los paraderos interiores, las velocidades máximas permitidas, los tiempos de atención en el control de acceso, las distancias recorridas y las ubicaciones de los elementos principales. El enfoque principal del estudio estuvo asociado al comportamiento de los buses de transporte de personal y su impacto en la productividad de la operación.

De acuerdo a los diversos escenarios simulados, se obtiene que el mejor escenario que se adecúa a los requerimientos de la operación en relación al transporte de personas considera un control de ingreso automatizado, una flota total de 40 buses por turno y establecer la normativa que considera restricciones de velocidad de 50 km/hr.

A su vez, se destaca que el acceso a la mina es la principal restricción del sistema, por lo que ella condiciona el desempeño de la logística de entrada de personal y materiales, como así también los costos logísticos incurridos. Esto hace alusión a lo que corresponde al control de acceso de personal ubicado en la entrada el túnel de ingreso principal.

Además, es relevante gestionar de manera correcta las esperas en los paraderos interiores de manera de minimizar estos tiempos que pueden afectar de forma importante los tiempos de viajes de los equipos. Una gestión en las 4 variables antes mencionadas se traduce en tener la capacidad de transporte para las 2,500 personas en los tiempos requeridos, menores tiempos de viaje desde los diferentes destinos, alzas en la producción alcanzada por la operación y menores tiempos de esperadas originadas en el control de acceso al interior de la faena.

Por otra parte, el transporte de materiales debe hacerse a través del medio de mayor capacidad posible permitida por los factores de demanda, la calidad de servicio, las restricciones legales y técnicas. Con ello se espera minimizar los costos unitarios de transportes. Ello debido a la fuerte influencia que tienen los costos fijos en el sistema de transporte y debido a las economías de escala que se obtiene en general con la razón entre la capacidad de transporte y la inversión requerida para disponer de esa capacidad.

Usualmente, el abastecimiento de los materiales de obra es responsabilidad de cada una de las empresas que trabajan en ese ámbito al interior de la mina. Ello duplica los esfuerzos logísticos para materiales iguales, debido a la tendencia natural de no colaboración entre dos empresas distintas. Lo anterior termina generando más viajes y mayores costos si es que la labor de los materiales comunes se encontrara centralizada. Por esto, se propone que el abastecimiento de los materiales de obra se centralice en uno pocos almacenes al interior de la mina, lugar en donde el proveedor de los materiales les vende a las empresas de proyectos según sus necesidades.

Es decir, para un concepto general del modelo logístico eficiente, se debe tener en consideración el remanejo de materiales. Así como los inventarios intermedios agregan costos muchas veces innecesarios al sistema. Se debe tender a un sistema que minimice tanto los remanejos, como las instalaciones intermedias, de tal manera de tener un flujo de materiales lo más eficiente posible. Para lograr lo anterior en una mina subterránea es necesario de disponer de túneles de tamaño que soporten los camiones de capacidades máximas admitidas en las carreteras de Chile.

Por su parte, para evitar una sobreinversión en túneles se debe localizar adecuadamente las zonas que deben recibir los principales materiales (incluido el personal), además de disponer, en caso que sea necesario, de un sistema de transporte adecuado para el último kilómetro. Además, las instalaciones receptoras de materiales al interior de la mina (petroleras, pañoles, polvorines, plantas de hormigón), como así también aquellas que consolidan los residuos, debiesen estar ubicados junto a los túneles de acceso con el fin de que puedan acceder a ellas camiones de gran tamaño.

De este modo, el desarrollo de estrategias logísticas efectivas y eficientes provocará respuestas rápidas frente a mercados, anticipación a los cambios, generar propios escenarios futuros, una gestión integrada y eficiente de todos los procesos del negocio, reducción de costos que se traducirá en un incremento en la rentabilidad del negocio. Para ello es necesario reinventar las reglas del juego del mercado, es decir, identificar nuevos objetivos estratégicos, realinear la estrategia organizacional, implementar metodologías innovadoras y utilizar herramientas tecnológicas.

En resumen, se debe adecuar la organización para soportar los procesos de centralización de la operación y de la información logística propuestas. Además, se debe centralizar la gestión logística conjunta a niveles estratégico, táctico y operacional, alimentando su base de información con todos los proyectos/cambios y expansiones futuras, además de los requerimientos que ellos generan.

Finalmente, para contribuir a obtener la rentabilidad y el retorno esperado de los activos incorporados es necesario incorporar en aspectos asociados al mantenimiento. El objetivo es asegurar la gestión del mantenimiento, es decir, gestionar el mantenimiento de las instalaciones consideradas, con posterioridad a la puesta en marcha de ellos, para así lograr la disponibilidad y productividad esperada de los equipos, según lo definido al momento de la formulación de un proyecto.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. S. Blanchard, *Ingeniería Logística*, Primera Ed. 1995.
- [2] H. A. Taha, “*Investigación De Operaciones.*” 2012.
- [3] S. L. Ting, Y. K. Tse, G. T. S. Ho, S. H. Chung, And G. Pang, “Mining Logistics Data To Assure The Quality In A Sustainable Food Supply Chain: A Case In The Red Wine Industry,” *Int. J. Prod. Econ.*, Vol. 152, Pp. 200–209, 2014.
- [4] V. P. M. C. S. Codelco, “*Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea Infraestructura Y Servicios.*,” 2012.
- [5] J. Banks, “Discrete Event Simulation,” In *Winter Simulation Conference*, 1999, Pp. 7–13.
- [6] C. Contreras, “*Simulación Como Herramienta Para La Planificación De La Preparación Minera En Minería Tipo Block/Panel Caving.*” Memoria Para Optar Al Título De Ingeniera Civil De Minas, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad De Chile., 2016.
- [7] E. García, H. García, And L. Cárdenas, *Simulación Y Análisis De Sistemas Con Promodel*, Primera Ed. México, 2006.
- [8] N. Çetin, “Open-Pit Truck/Shovel Haulage System Simulation,” In *Partial Fulfillment Of The Requirements For The Degree Of Doctor Of Philosophy In The Department Of Mining Engineering*. Middle East Technical University, 2004.
- [9] E. Torkamani, “Linkage Of Truck-And-Shovel Operations To Short-Term Mine Plans Using Discrete Event Simulation,” Thesis For The Degree Of Master Of Science. Universidad De Alberta, 2013.
- [10] V. P. M. C. S. Codelco, “*Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea Logística Suministro.*” 2009.
- [11] L. Fernández, S. Carmen, P. Andrade, P. Luis, D. Economía, And A. Ii, “Un Análisis De Los Modelos Y Métodos De Optimización Del Tráfico Urbano,” In *Xvii Jornadas Asepuma – V Encuentro Internacional*, 2013, No. 1, Pp. 1–22.
- [12] J. L. Maldonado, “*Modelo De Planificación Integrado Mina-Transporte-Planta.*” Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil De Minas. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad De Chile, 2009.
- [13] P. A. Prieto, “*Incorporación De La Confiabilidad En La Planificación Minera Y En La Asignación De Equipos.*,” Universidad De Chile, 2007.
- [14] S. O. Armijo, “*Modelo De Confiabilidad Operacional De Un Sistema Explotado Por Método Block Caving.*” Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil De Minas. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas. Universidad De Chile, 2014.
- [15] F. Manríquez, “*Simulación Como Herramienta De Planificación De Corto Plazo.*” In *Taller De Planificación Minera 2016*. Universidad De Chile., 2016.
- c16] S. I. Gass And M. Fu, “*Encyclopedia Of Operations Research And Management Science.*” Pp. 834–834, 2011.

- [17] C. M. L. IM2, “Modelo De Estrategia Logística Asociada A La Explotación Por Hundimiento De Minas Subterráneas De Codelco Chile,” 2005.
- [18] L. A. Mora García, “Indicadores De La Gestión Logística: Kpi ‘Los Indicadores Claves Del Desempeño Logístico,’” 2007.
- [19] S. A. Carvajal, “Modelo De Control De Gestión De Compras De La Cadena De Abastecimiento De Bienes Para Compañías Mineras,” Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Industrial. Facultad De Ingeniería. Universidad De Talca, 2011.
- [20] F. Córdova, C. Durán, J. Sepúlveda, A. Fernández, And M. Rojas, “Management & Innovation A Proposal Of Logistic Services Innovation Strategy For A Mining Company A,” Vol. 7, No. 1, 2012.
- [21] B. Hall, “Simulation Modelling Of Mining Systems,” In Massmin 2000, 2000.
- [22] G. A. Davis And A. M. Newman, “Modern Strategic Mine Planning,” In Proceedings Of The 2008 Australian Mining Technology Conference, 2008, Pp. 129–139.

## 11. ANEXOS

### 11.1. Layout General Caso de Estudio.

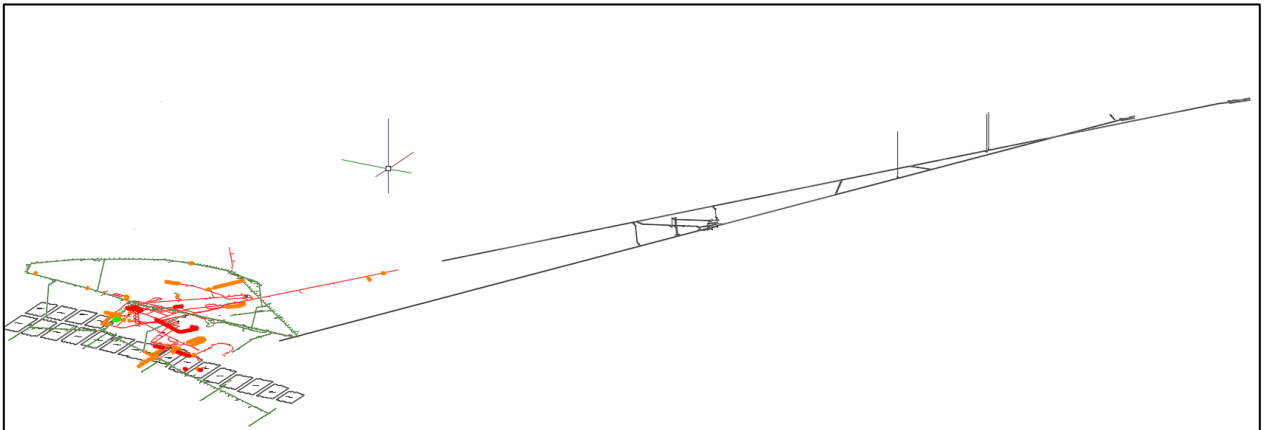


Figura 11.1. Esquema general infraestructura interior mina.

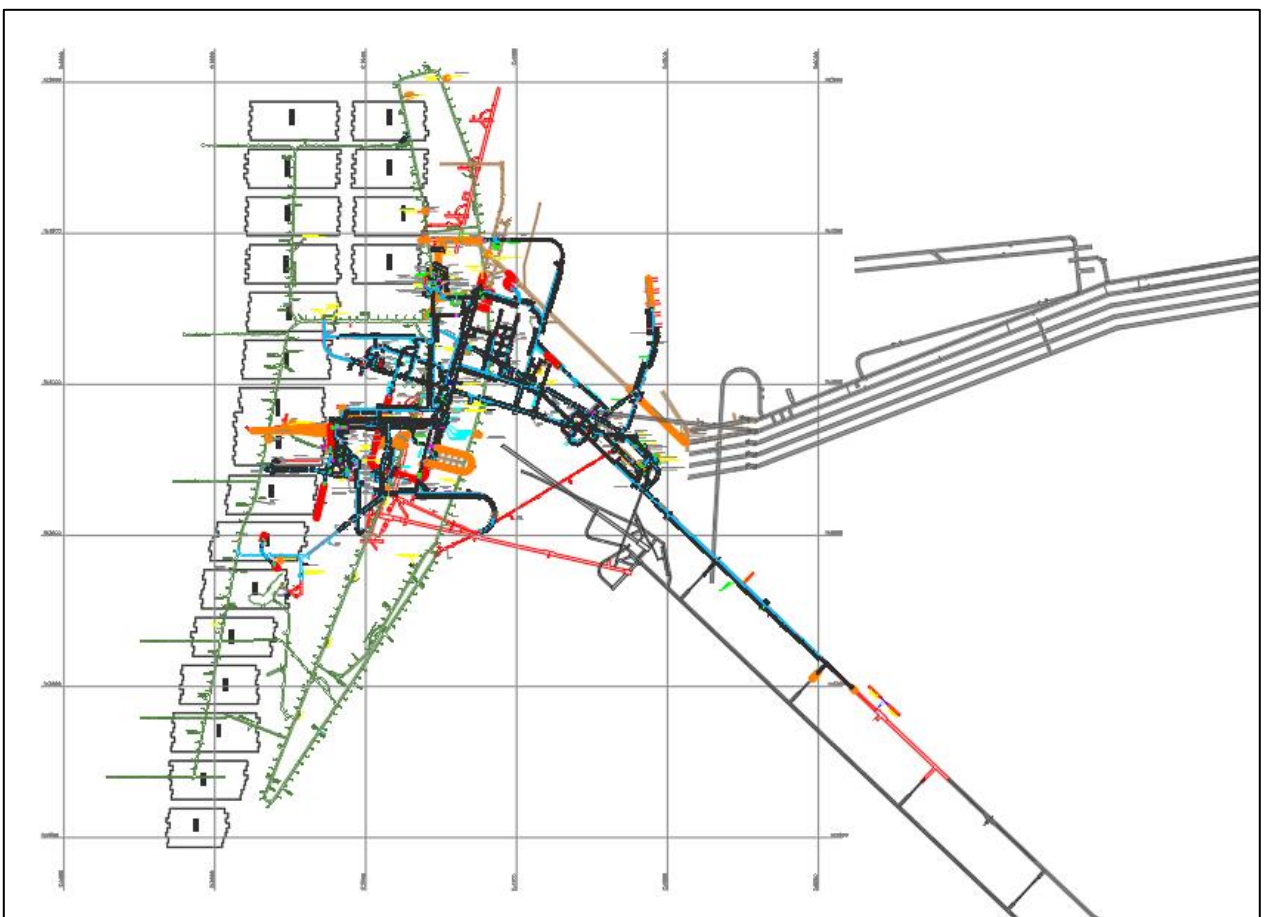


Figura 11.2. Esquema nivel de producción, transporte y ventilación.

## 11.2. Componentes Principales del Script de Simulación.

Tabla 11.1. Componentes principales script de simulación.

Clase	Atributo
Bus	Número de Personas Transportadas
	Velocidad
Paradero (FD_IN/FD_OUT)	Número de Personas Recogidas/Trasladadas
	Tiempo de Espera Promedio en el Paradero
Calle (Street)	Flujo de Vehículos
	Número de Veces que se ha Ingresado a la Calle
	Calle Ocupada/Libre

### 1). Class Bus

```
-def init (self,name,init_rpos,init_line,init_task,tareas_a_realizar={ }): # Se definen las variables y los atributos que se van a medir
-def Run (self):
-def DistribTiempo (self): # Crea una distribución aleatoria para los tiempos de espera
-def DistribPasajeros (self): # Crea una distribución aleatoria para los pasajeros
-def Mantencion (self, tiedown): # Asociado a la locación que recibe a los buses cuando no tienen actividad u están en mantención (área de descanso)
-def DecidirTarea (self, pensar): # Define la próxima actividad de un bus
-def TravelLinks (self, link): # Vinculado al momento donde buses circulan por las intersecciones
-def TravelStreet (self, street): # Vinculado al momento donde los buses circulan por las calles
-def Parada_OUT (self, Paradero_OUT): # Asociada a los paraderos de superficie
-def Parada_IN (self, Paradero_IN): #Asociada a los paraderos interiores de la mina
-def CreateVPythonFrame (self, now): # Visualización y definición de escala de colores
```

### 2). Class Street (Path):

```
-def __init__(self,name,points,frente_name,lista_aculatar=[]):"
-def Run (self):
-def ResetSister (self,sister_name):
-def Pack (self):
-def Unpack (self,attrs,time):
-def UpdateVPythonFrame (self,now):
```

3). Class FD\_IN/FD\_OUT (DSimObject):

-def `__init__` (self,name,Street):

-def `CreateVPythonFrame` (self):

