



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE CAMIONES AUTÓNOMOS EN DIVISIÓN  
RADIO MIRO TOMIC, CODELCO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN  
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS.**

**ANDRÉS EDUARDO MUJICA MOROVIC**

**PROFESOR GUÍA:  
LUÍS ZAVIEZO SCHWARTZMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALEJANDRO CANELO CARVAJAL  
GERARDO DÍAZ RODENAS**

**SANTIAGO DE CHILE  
2019**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA  
OPTAR AL GRADO DE:** Magister en  
Gestión y Dirección de Empresas.  
**POR:** Andrés Eduardo Mujica Morovic  
**FECHA:** 10/07/2019  
**PROFESOR GUÍA:** Luis Zaviezo S.

## **FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN DE CAMIONES AUTÓNOMOS EN DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC, CODELCO**

La minería chilena enfrenta un problema estructural. Las minas a rajo abierto que actualmente se encuentran operando son cada vez más antiguas y profundas. Las leyes de explotación han disminuido, los minerales se han vuelto cada vez más duros y la cantidad de lastre o material estéril que se debe remover para alcanzar el mineral en profundidad es cada vez mayor. A lo anterior se suma la casi inexistente disponibilidad de agua continental para suplir los consumos de nuevas operaciones y futuros proyectos mineros, lo que obliga a las compañías mineras a impulsar agua de mar a las operaciones muchas veces ubicadas a gran altitud y distancia.

Radomiro Tomic es una faena minera perteneciente a Codelco, la cual se encuentra en la transición de pasar de mineral de óxido a sulfuro. La expansión de la mina genera un aumento progresivo de las distancias de transporte, lo que lleva a un aumento en el costo de producción. Por lo anterior, cobra relevancia analizar metodologías que permitan el aumento de uso de activos, como es el caso de los camiones de extracción.

Hoy en día, a pesar de que el uso del camión autónomo se ha intensificado desde sus inicios en 2005 con la prueba industrial realizada precisamente en DRT, existe cierta resistencia a la incorporación de esta tecnología. Es por ello que se hace importante evaluar económicamente el impacto de aplicación y compararla con la tecnología actual de transporte para cuantificar el impacto económico de la implementación.

Esta tesis recoge y analiza la información de faenas en donde se ha implementado esta tecnología de transporte de material, de manera de poder identificar las variables operacionales y económicas que han permitido casos exitosos tanto nacional como internacionalmente.

Además, se determina qué debe tener una faena o qué debe cambiar en ésta para que se pueda implementar el uso de camiones autónomos, identificando necesidades operacionales de esta metodología, es decir, las condiciones que deben darse para que la nueva tecnología sea exitosa y sea haga sustentable en el tiempo pensando en el futuro de la escalabilidad del proyecto y el aprovechamiento de la misma en los años futuros.

Luego de realizar la evaluación económica del proyecto autónomo, se obtuvo como un resultado un ahorro considerable respecto a la tecnología de transporte actual utilizada en Radomiro Tomic, además de mantener los costos de transporte en el tiempo y aumentar la productividad por tonelada movida de la división. Sin embargo, el desafío más grande es su implementación, por lo que se hace importante considerar las barreras existentes para implementar cambios tecnológicos.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO</b> .....	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
3.1	OBJETIVO PRINCIPAL .....	5
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
3.3	ALCANCE .....	5
<b>4.</b>	<b>ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	<b>6</b>
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>9</b>
<b>6.</b>	<b>SISTEMA DE TRANSPORTE CAMIONES AUTÓNOMOS</b> .....	<b>10</b>
6.1	ACTUALIDAD EN EL USO DE CAMIONES AUTÓNOMOS .....	10
6.2	BENEFICIOS DEL USO DE CAMIONES AUTÓNOMOS .....	14
6.3	CARACTERÍSTICAS DE LA OPERACIÓN DE CAMIONES AUTÓNOMOS .....	17
6.4	FACTORES REQUERIDOS PARA OPERACIÓN DE CAMIONES AUTÓNOMOS .....	24
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE CAMIONES AUTÓNOMOS</b> .....	<b>35</b>
7.1	PLAN DE PRODUCCIÓN .....	36
7.2	COMPARACIÓN DE INDICADORES .....	37
7.3	VALORIZACIÓN DE ALTERNATIVA CAEX AUTÓNOMO .....	39
7.4	RESULTADOS PRINCIPALES .....	42
<b>8.</b>	<b>PLAN ESTRATÉGICO DE IMPLEMENTACIÓN DE CAEX AUTÓNOMO</b> .....	<b>45</b>
8.1	DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA .....	45
8.2	DESAFÍOS ESPECÍFICOS DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC .....	46
8.3	GESTIÓN DEL CAMBIO .....	47
8.4	CAMBIO ORGANIZACIONAL .....	48
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>50</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>52</b>

## 1. Introducción

Las economías basadas en recursos enfrentarán enormes desafíos para mantenerse competitivas en una economía global. Las operaciones mineras están ubicadas en muchos casos en áreas aisladas que hacen que la reubicación de personal sea muy costosa. Además, esta situación se está poniendo más difícil desde que los yacimientos son de menor tamaño y la vida de explotación del yacimiento no justifica el establecimiento de nuevos campamentos. El desarrollo de la automatización es uno de los factores claves para solucionar este problema. Sistemas automatizados y autónomos están comenzando a aparecer de forma importante en diferentes áreas. En el nivel más simple, como en sistemas adheridos a equipos tripulados entregando, por ejemplo, información de ubicación, sistema anti-colisión o mejoras a la conducción. (Nebot, 2006)

La clave para una gestión exitosa del Sistema minero complete es entender como los sistemas que lo componen necesitan trabajar juntos para idear tecnología y procedimientos para permitir que estos elementos funcionen como parte del Sistema global. Específicamente en minería, una faena minera consiste en personas, vehículos y equipos que están ubicados de acuerdo a la mayor información geofísica disponible, condiciones de mercado y restricciones financieras.

Hoy en día el ciclo de transporte de camiones representa aproximadamente el 50% del costo de operación de una mina rajo abierto. La División Radomiro Tomic (DRT) se encuentra evaluando opciones tecnológicas al sistema de transporte actual a fin de contener los costos de transporte mina, los cuales se estiman que en un horizonte de tiempo mediano / largo plazo podrían llegar a duplicarse. Radomiro Tomic, debe enfrentar un aumento progresivo en la distancia equivalente de transporte por la profundización del rajo y una disminución de ley por el envejecimiento del yacimiento.

En Chile solo existe una faena minera que ha logrado implementar el uso de camiones autónomos dentro del proceso de transporte de material (División Gabriela Mistral – Codelco) y a nivel mundial progresivamente se observa una tendencia por lo que incorporar tecnologías autónomas ya que significa un aumento de productividad, un mayor uso de activos y menor riesgo para el personal. Es por estas razones que se considera el uso de tecnología autónoma de camiones de extracción una alternativa atractiva para la División Radomiro Tomic para mejorar los futuros costos de operación.

De acuerdo con lo anterior, la motivación de esta tesis tiene relación con un análisis de alternativas de camiones autónomos que mejoren la relación de costos de producción y uso de activos, generando un análisis de variables asociadas al uso de camiones autónomos y determinar la manera de implementar esta tecnología en Radomiro Tomic.

## 2. Justificación del Estudio

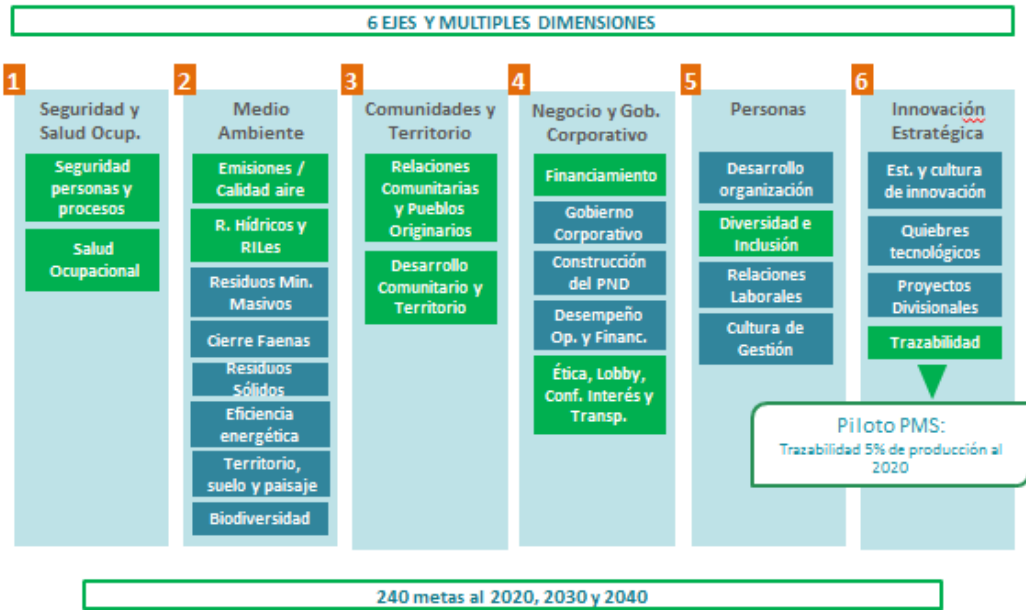
La minería chilena enfrenta un problema estructural. Las minas a rajo abierto que actualmente se encuentran operando son cada vez más antiguas y profundas. Las leyes de explotación han disminuido, los minerales se han vuelto cada vez más duros y la cantidad de lastre o material estéril que se debe remover para alcanzar el mineral en profundidad es cada vez mayor. A lo anterior se suma la casi inexistente disponibilidad de agua continental para suplir los consumos de nuevas operaciones y futuros proyectos mineros, lo que obliga a las compañías mineras a impulsar agua de mar a las operaciones muchas veces ubicadas a gran altitud y distancia.

La minería a rajo abierto requiere del desarrollo de soluciones y tecnologías que permitan mover grandes volúmenes de tierra a través de largas distancias y optimizar la gestión de activos. En la presente HRT (Hoja de ruta tecnológica) se expone un conjunto de líneas de I+D que, de desarrollarse e implementarse con éxito, incidirían directamente en la productividad de la industria minera. Entre los aspectos identificados, destaca el desarrollo de tecnologías de fragmentación y tronadura, correas de alto tonelaje, constructibilidad de taludes e integración de mina-planta. Otro desafío central para la sustentabilidad futura de la industria radica en mejorar los niveles de productividad de la minería subterránea para viabilizar el desarrollo futuro de una minería profunda a gran escala. Construir, gestionar y operar los grandes proyectos de minería subterránea constituye un reto sin precedentes para la industria minera mundial, y en particular para la chilena, tanto por su complejidad como por los volúmenes de producción asociados.

Tanto en la explotación a rajo como subterránea, las tecnologías de información, comunicación y automatización se vuelven fundamentales para el desarrollo de una minería autónoma de modo de transitar desde operaciones manuales, bajos niveles de mecanización y baja incorporación de tecnología a minas operadas a distancia, más eficientes, seguras y en las que la tecnología y los equipos autónomos ocupen un lugar central (Fundación Chile, 2016).

Entre los años 2000 y 2013 la productividad de la industria minera, medida como Productividad Total de Factores (PTF), disminuyó en 20%. Esto se explica en gran parte por el deterioro de la calidad del recurso geológico. La antigüedad de las minas en Chile y su creciente profundidad han derivado en un aumento de la dureza del mineral, de las distancias de acarreo, y en una disminución de las leyes promedio del mineral. La necesidad de mover una mayor cantidad de lastre y de moler una mayor cantidad de mineral cada vez más duro tiene un efecto directo en el consumo de energía, con su consecuente efecto en el aumento de los costos y disminución de la productividad.

El propósito de Codelco como compañía minera es de maximizar en el largo plazo su valor económico y su aporte al Estado por la extracción de minerales mediante la explotación eficiente de sus recursos en sus operaciones a lo largo de Chile. Hoy en día el Plan Maestro de Sustentabilidad, incorpora la sustentabilidad en visión de Codelco y la hace parte integral del desarrollo de su Plan de Negocios (Landerretche, 2018).



**Ilustración 1 – Plan Maestro de Sustentabilidad Codelco**

En línea con lo anterior, la División Radomiro Tomic (DRT) en su mapa estratégico (2015-2014) considera los primeros 4 ejes del Plan Maestro de Sustentabilidad de la corporación como los ejes centrales de su propio mapa estratégico (ver Ilustración 2).

Actualmente la producción de cobre fino de Radomiro Tomic está en torno a las 318.000 toneladas de cobre fino al año, las que son producidas en su mayor parte mediante la línea de procesamiento de óxidos de cobre y el procesamiento de los sulfuros de la mina se chancados en la división y transportados vía correa transportadora hacia la concentradora de la División Chuquicamata. Se espera a que estos sulfuros realicen su proceso de concentración en una nueva planta de procesamiento en DRT aproximadamente en el año 2024.



**Ilustración 2 - Mapa Estratégico División Radomiro Tomic (2019)**

En conjunto con lo anterior la productividad tanto de propios como de terceros y la ubicación de DRT en el primer cuartil de costos de la industria son compromisos importantes hacia la producción de más de 420.000 toneladas de cobre fino al año.

El costo de transporte representa a más del 50% del costo mina y el costo mina hoy en día representa al 60% del costo total de la división. Por lo tanto, el costo de transporte representa el 30% del total del costo de la división, por lo que las mejoras en esta área tienen un gran impacto en el costo directo de producción C1.

Es por ello que DRT se encuentra evaluando opciones tecnológicas al sistema de transporte actual a fin de contener los costos de transporte mina, los cuales se estiman que en un horizonte de tiempo mediano / largo plazo podrían llegar a duplicarse.

La justificación de este estudio consiste en la evaluación de la alternativa de uso de CAEX autónomos en DRT con foco principal en la disminución del costo de transporte para los próximos 7 años.

Hoy en día, a pesar de que el uso del camión autónomo se ha intensificado desde sus inicios en 2005 con la prueba industrial realizada precisamente en DRT, existe cierta resistencia a la incorporación de esta tecnología. Es por ello que se hace importante evaluar económicamente el impacto de aplicación y compararla con la tecnología actual de transporte para cuantificar el impacto económico de la implementación.

Entonces, adicionalmente la justificación de este estudio es presentar los requerimientos necesarios para implementar la tecnología, es decir, las condiciones que deben darse para que la nueva tecnología sea exitosa y sea haga sustentable en el tiempo pensando en el futuro de la escalabilidad del proyecto y el aprovechamiento de la misma en los años futuros.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo Principal**

El principal objetivo de esta tesis es determinar la factibilidad de la implementación de una flota autónoma dentro del proceso extractivo de Radomiro Tomic.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar casos de implementación de la modalidad de camiones autónomos en base al plan minero
- Analizar de las necesidades operativas del uso de camiones autónomos mediante proyección de costos y rendimientos
- Incorporar oportunidades asociadas al uso de automatización de camiones en Radomiro Tomic

#### **3.3 Alcance**

Este estudio realizará una comparación entre la tecnología convencional y la tecnología del camión autónomo en donde la posible implementación de este último no afecta de manera significativa al plan ya establecido. Este estudio no considera la modificación del plan de producción ni el plan de desarrollo del rajo.

Otras alternativas como la incorporación de correas tipo IPCC o correas verticales son motivo de otros estudios y el análisis de la implementación del camión autónomo se evalúa de forma independiente. Es por ello que este estudio considera la tecnología como implementación individual y se compara con el método de transporte convencional.



#### 4. Antecedentes Generales

La División Radomiro Tomic (DRT) es una división de la compañía minera Codelco que se emplaza a 40 kilómetros al norte de Calama, región de Antofagasta y se encuentra a 3000 metros sobre el nivel del mar. La división explota minerales oxidados de cobre y produce cátodos mediante electro obtención, además, Radomiro Tomic, cuenta con reservas del orden de 1800 millones de toneladas de sulfuros de cobre, con una ley media de 0.5%.

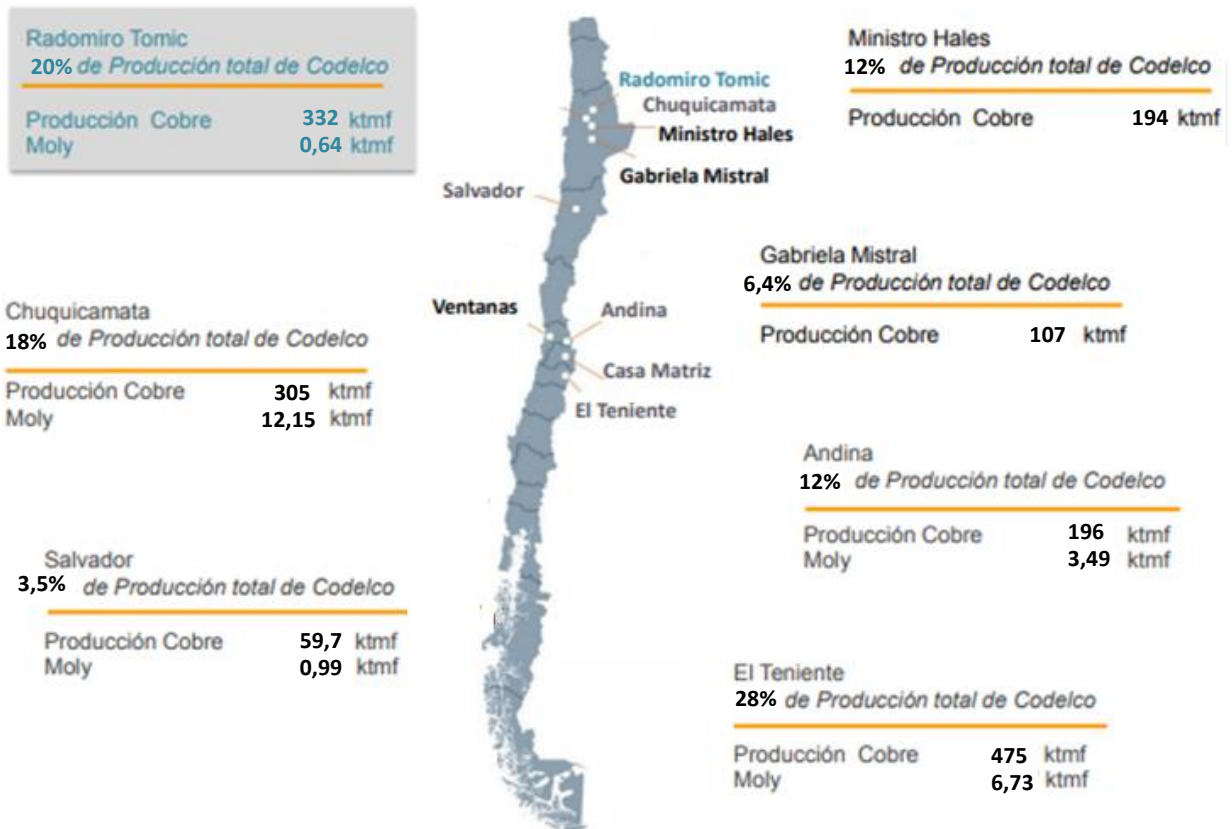
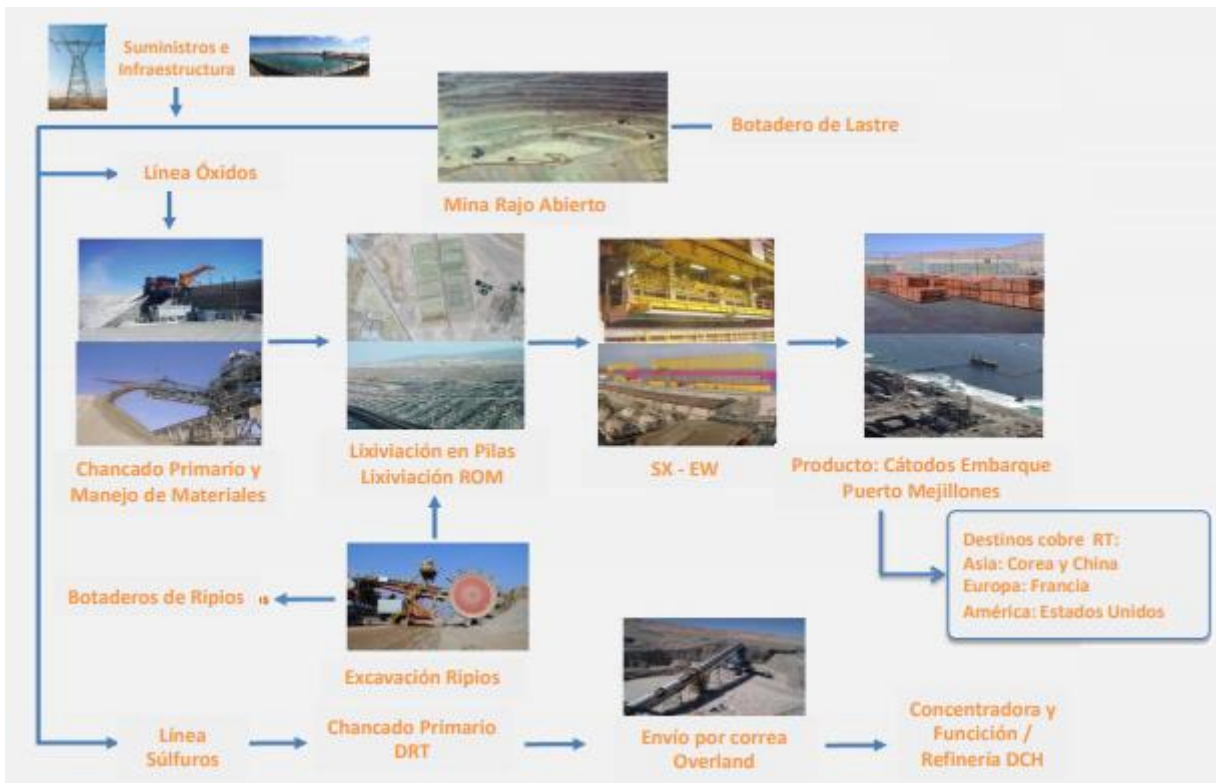


Ilustración 3 – Producción total Codelco año 2018

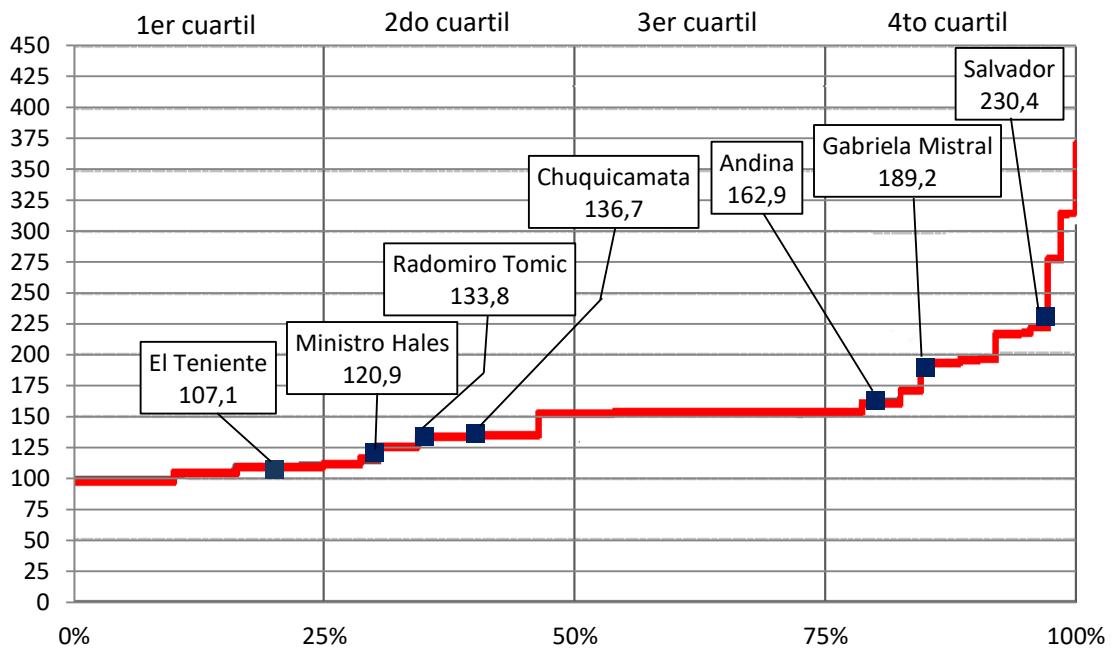
El inicio de operaciones de la División Radomiro Tomic comenzó en 1997 y el proceso hidrometalúrgico de minerales oxidados con planta propia. Y obtención de cobre de minerales sulfurados mediante planta concentradora de Chuquicamata (Ilustración 4).

La División Radomiro Tomic representa el 20% de la producción de Codelco y actualmente la producción de cobre fino de Radomiro Tomic está en torno a las 330.000 toneladas de cobre fino al año, las que son producidas en su mayor parte mediante la línea de procesamiento de óxidos de cobre y el procesamiento de los sulfuros de la mina se chancados en la división y transportados vía correa transportadora hacia la concentradora de la División Chuquicamata. Se espera a que estos sulfuros realicen su proceso de concentración en una nueva planta de procesamiento en DRT aproximadamente en el año 2024.



**Ilustración 4 – Proceso Hidrometalúrgico División Radomiro Tomic, Codelco**

En conjunto con lo anterior la productividad tanto de propios como de terceros y la ubicación de DRT en el primer cuartil de costos de la industria son compromisos importantes hacia la producción de más de 420.000 toneladas de cobre fino al año.



**Ilustración 5 - Curva de Costos Codelco 2018**

El costo de transporte representa a más del 50% del costo mina y el costo mina hoy en día representa al 60% del costo total de la división. Por lo tanto, el costo de transporte representa el 30% del total del costo de la división, por lo que las mejoras en esta área tienen un gran impacto en el costo directo de producción C1.

La flota de equipos de la mina para el año 2019 posee 98 camiones y diversos equipos de carguío, perforación y equipos de apoyo.

**Carguío:**

- 1 Pala de Cable 4100 A
- 3 Pala de Cable 4100 XPB
- 3 Pala de Cable 4100 XPC/AC
- 1 Pala Hidráulica Caterpillar 6060
- 1 Pala Hidráulica Komatsu PC8000
- 2 Cargadores Letorneau L-1850
- 2 Cargadores Letorneau L-2350
- 1 Pala en Arriendo

**Perforación:**

- 6 Perforadora Pit Viper
- 2 Perforadora DML
- 5 Perforadora Smart Roc

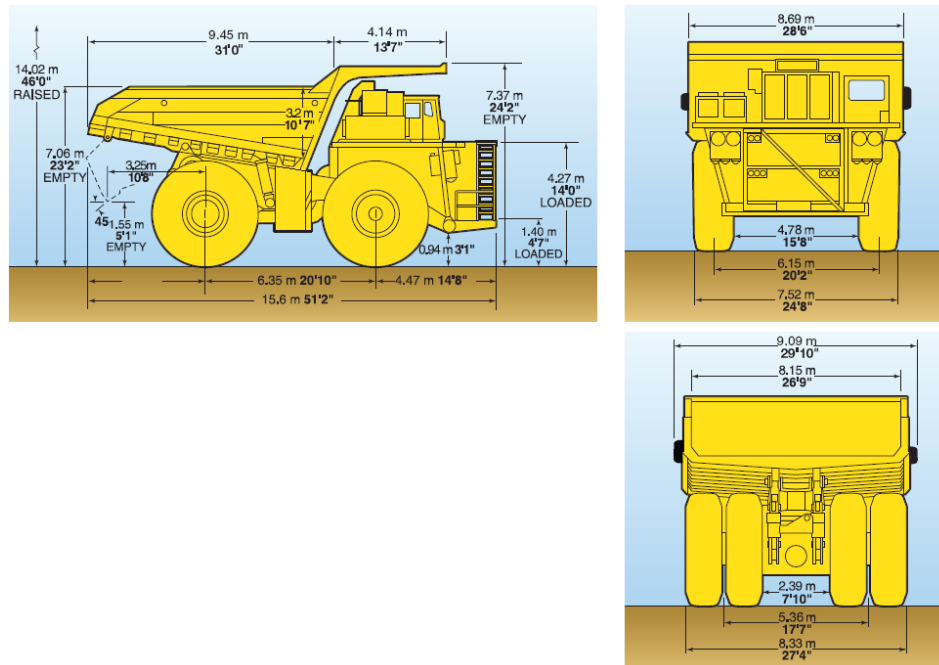
**Equipos de Apoyo:**

- 8 Wheeldozer
- 14 Bulldozer (2 arriendo)
- 8 Motoniveladora (1 arriendo)
- 8 Algibe (2 arriendo)
- 2 Cargador Bajo Perfil
- 6 Excavadora

**Transporte:**

- 71 Camiones Komatsu 930 E
- 27 Camiones Liebherr T282

La flota de transporte principal de la mina corresponde a la flota de camiones Komatsu 930 E y hoy en día existe la posibilidad de transformar esta flota de camiones convencionales en camiones autónomos mediante el retrofit de camiones, lo que será motivo de este estudio



**Ilustración 6 – Dimensiones Camión Komatsu 930 E4**

## 5. Metodología

La metodología propuesta para el análisis considera el desarrollo de la evaluación del sistema autónomo de transporte mediante una comparación del sistema actual de transporte, camiones de extracción manuales.

Para ello se evaluarán ambas tecnologías de forma independiente y luego se compararán en un plan minero de largo plazo. El objetivo de esto es determinar qué tecnología tiene el menor costo y su valorización para determinar su impacto en el plan estratégico de la División Radomiro Tomic. La metodología se representa en la Ilustración 7.



**Ilustración 7 – Metodología análisis sistema autónomo de transporte**

## 6. Sistema de Transporte Camiones Autónomos

Dadas las incertezas del estado de los recursos que actualmente posee la minería a rajo abierto para operar de manera sustentable dados los requerimientos del cliente y las ganancias de los accionistas. La minería del futuro será:

- **Orientada al producto:** los clientes demandarán productos especializados que puedan cubrir sus requerimientos.
- **Flexible:** emplearán métodos focalizados como contraposición a producciones convencionales.
- **Ágil:** capaces de operar en un mercado en donde los pedidos cambien rápidamente o incluso con particularidades diarias.

La operación unitaria que ofrece mayor potencial para reducir costos operacionales en la minería a rajo abierto es el transporte. La tecnologías habilitantes (navegación, control de flota y sistemas anticolidión) para camiones autónomos existen en una forma semi-madura y los prototipos de la integración de esas tecnologías son conocidas por el desarrollo y prueba por al menos dos grandes proveedores (Komatsu y Caterpillar). El sistema de Komatsu ha sido capaz de navegar la ruta de transporte, descargar automáticamente en botaderos o a nivel de piso y trabajar con ciertos tipos de equipos de carguío (Nebot, 2006).

Durante la última década, el interés en la automatización se ha vuelto más importante en la industria de la minería de superficie. En particular, las empresas de primer nivel están evaluando el uso de tecnologías autónomas, para mejorar su desempeño a través del aumento en productividad y eficacia de su trabajo. Esto ha dado lugar, a que los fabricantes de equipos se centren en el desarrollo de sistemas de minería automatizados para estar alineados a las necesidades del mercado. Los principales fabricantes de equipos de minería han estado desarrollando sus equipos autónomos y los sistemas de supervisión para asegurar la seguridad y el control completo de sus respectivas flotas autónomas. Komatsu Ltd. (Komatsu), Caterpillar Inc. (CAT), Hitachi Construction Machinery (Hitachi), Autonomous solutions Inc. (ASI), Liebherr Mining Equipment Newport News Co. (Liebherr), Belaz Holding (Belaz), Leica Geosystems (Leica), han adquirido o desarrollado sistemas de gestión de flotas para flotas mineras convencionales y automatizadas (Tellus, 2018).

### 6.1 Actualidad en el uso de camiones autónomos

Aunque los primeros intentos de automatización de equipos mineros comenzaron en los años 60s, los camiones autónomos fuera de carretera han estado en las operaciones mineras desde 2008. La primera prueba de camiones autónomos fue iniciada por Komatsu en la mina Gabriela Mistral de Codelco, Chile. Desde ese día, Komatsu, Caterpillar y Hitachi han sido los inversionistas prominentes del camión autónomo.



Un camión autónomo es un camión equipado con:

- a) Sistema de comunicación inalámbrica.
- b) Sensores de navegación y detección de obstáculos.
- c) Servidor de procesamiento de datos de sensores locales a bordo para aceleración.
- d) Hardware de control y coordinación de dirección y freno.
- e) Sistema GPS para detectar la ubicación real del camión y,
- f) Software para el control local y de supervisión.



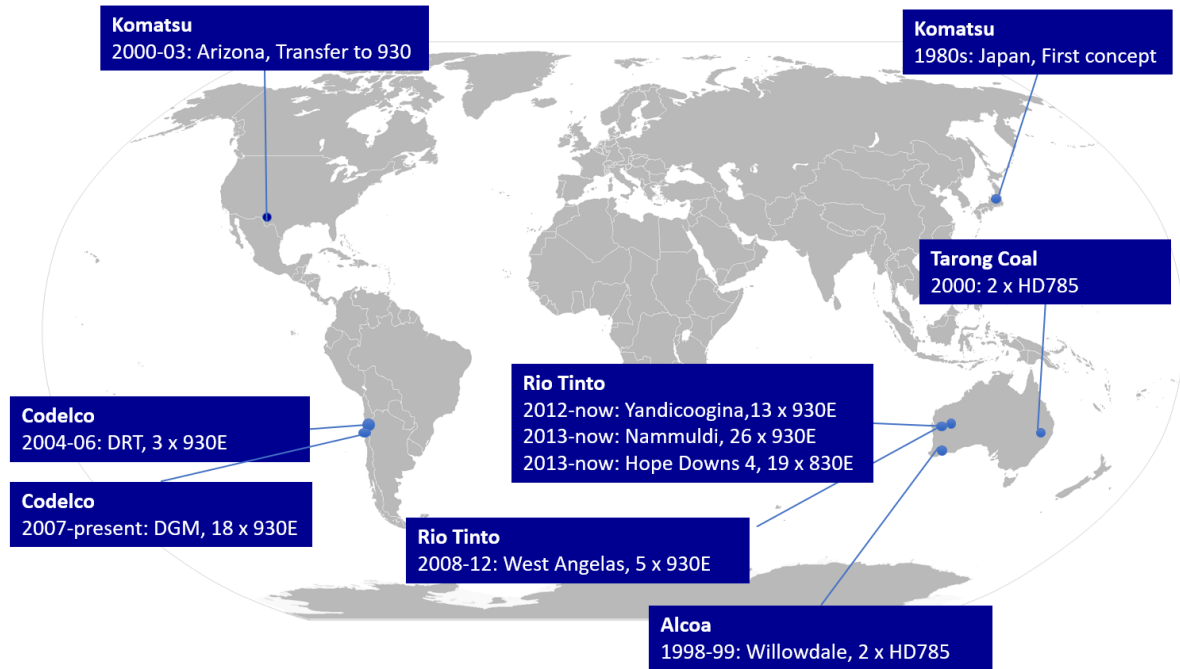
**Ilustración 8 – Diagrama componentes camión autónomo (División Gabriela Mistral, 2017)**

Los proveedores de camiones proveen el hardware necesario con su sistema de control de flota. En esta base, Komatsu, Caterpillar, Hitachi utilizan sistemas de control de flota llamados Modular Mining Systems, Minestar y Wenco International Mining Systems, respectivamente. Las estadísticas operacionales para estos proveedores y sus socios en minería se pueden ver en la Tabla 1 (Gölbasi & Dagdelen, 2017).

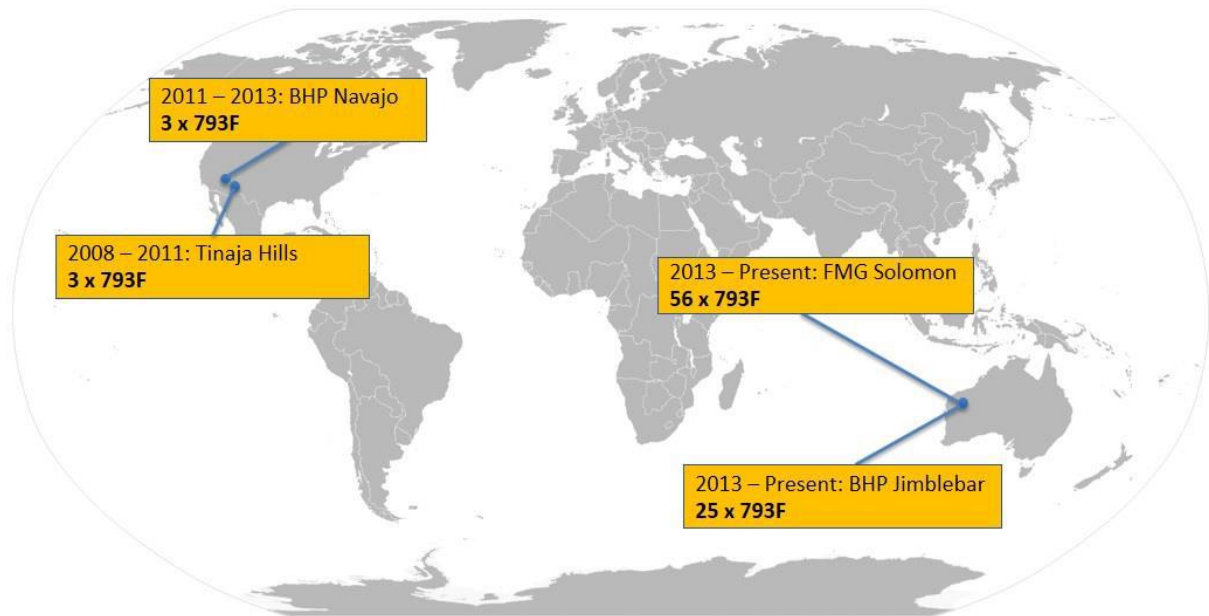
**Tabla 1 - Implementaciones de Camiones autónomos en minas en operación**

Año inicio	Compañía	Minera	Ubicación	Proveedor	Tipo Camión	Capacidad	Número
2008	Codelco	Gabriela Mistral	Chile	Komatsu	930E-AT	320 tons	17
2008	Rio Tinto	West Angelas	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	5
2011	BHP	Navajo Mine	USA	Caterpillar	Cat 793F	250 tons	3
2012	Rio Tinto	Yandicoogina	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	22
2012	Rio Tinto	Hope Downs	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	19
2012	Fortescue	Solomon	Australia	Caterpillar	Cat 793F	250 tons	54
2013	Rio Tinto	Nammuldi	Australia	Komatsu	930E-AT	320 tons	30
2014	BHP	Jimblebar	Australia	Caterpillar	Cat 793F	250 tons	18
2017	Stanwell	Meandu	Queensland	Hitachi	EH5000AC-3	326 tons	3

Los principales fabricantes de equipos han invertido fuertemente en tecnología de automatización de la mina con el fin de mantener o desarrollar una ventaja competitiva. Komatsu y Caterpillar han optado por desarrollar sus sistemas en camiones de tamaño mediano, como una etapa previa para ofrecer soluciones comerciales en sus flotas de transporte premium o high class. Hitachi está planeando competir en el mismo segmento de mercado (220-300 ton), para dar servicio a ese nicho de empresas mineras. En el contexto mundial existen diversas tecnologías en distintas etapas de desarrollo, Sin embargo, existen dos que han logrado alcanzar un nivel de madurez tecnológica y operacional adecuada: Komatsu y Caterpillar. En las siguientes ilustraciones se esquematizan las operaciones funcionando a nivel mundial con ambos oferentes y sus diferentes camiones que han participado en el desarrollo de la operación autónoma.



**Ilustración 9 – Realidad mundial de la tecnología autónoma de Komatsu**



**Ilustración 10 – Realidad mundial de la tecnología autónoma Caterpillar**

En lo referente a la tecnología de Komatsu, estos han logrado desarrollar dos camiones con desempeño adecuado para ser aplicado en las operaciones, se trata de los modelos Komatsu 830E-4 AT y Komatsu 930E-4 AT.

En el mediano plazo se espera tener el modelo de camión 980E AT, el cual contará con 360 toneladas de capacidad de carga. Este último se ha estado testeando en el campo de pruebas de Komatsu América Corp. en Tucson, Arizona.

A la fecha Komatsu cuenta con una flota AHS (Autonomous Hauling System) de más de 100 equipos, desplegados en 6 minas en las regiones de Australia, Sur América y Norte América, en faenas de hierro, cobre y arenas petrolíferas.

A finales del 2017 el sistema autónomo de Komatsu registró un acumulado de 1.5 billones de toneladas movidas. Por otro lado, en lo referente a la tecnología de Caterpillar, el modelo 793F AT, se encuentra presente en las dos operaciones más importantes de hierro del oeste de Australia: Mina de Hierro Solomon (Fortescue Metals Group) con una flota de 56 camiones operativos y Mina Jumblebar (BHP) con una flota de 25 camiones y en planes de duplicar la misma en el corto plazo.

Además de esta alternativa, Caterpillar en el mediano plazo estará en condiciones de contar con el camión de 360 ton, 797F AT, el cual al igual que el modelo de Komatsu 980E AT, debe ser adecuadamente probado para su correcta incorporación al mercado. Hitachi anunció el desarrollo de un sistema de transporte autónomo, con la prueba de campo inicial que se inició el 29 de abril de 2013 la mina de carbón Stanwell Meandu en Queensland. Una flota de tres camiones EH5500AC-3 de Hitachi comenzó el ensayo utilizando el módulo de gestión de la flota autónoma Wenco. Este equipo es un camión de una carga útil de 296 toneladas, que es similar al camión autónomo Komatsu 930E-4 AT.



Detalles limitados con respecto a la arquitectura del sistema y la integración con otros productos de Wenco se conocen hasta la fecha. Sin embargo, Hitachi se enfrentará a retos similares a Komatsu, ya que no tienen la amplitud de la gama de equipos de minería Caterpillar. La flota de equipos mineros Hitachi está focalizada en camiones fuera de carretera, excavadoras hidráulicas y palas.

Hitachi a través de su plataforma de gestión de flotas Wenco y la avanzada capacidad de tecnología de su maquinaria, puede convertirse en el tercer mayor proveedor de AHS. Una limitación que desafiaría la posición aspirada por Hitachi es la limitada capacidad de penetración en el mercado y la escasez de camiones mineros, en comparación a Caterpillar y Komatsu. Además, si su plataforma autónoma sigue limitada a las máquinas de su propia marca, la posible integración con otras maquinarias autónomas será insuficiente (Tellus, 2018).

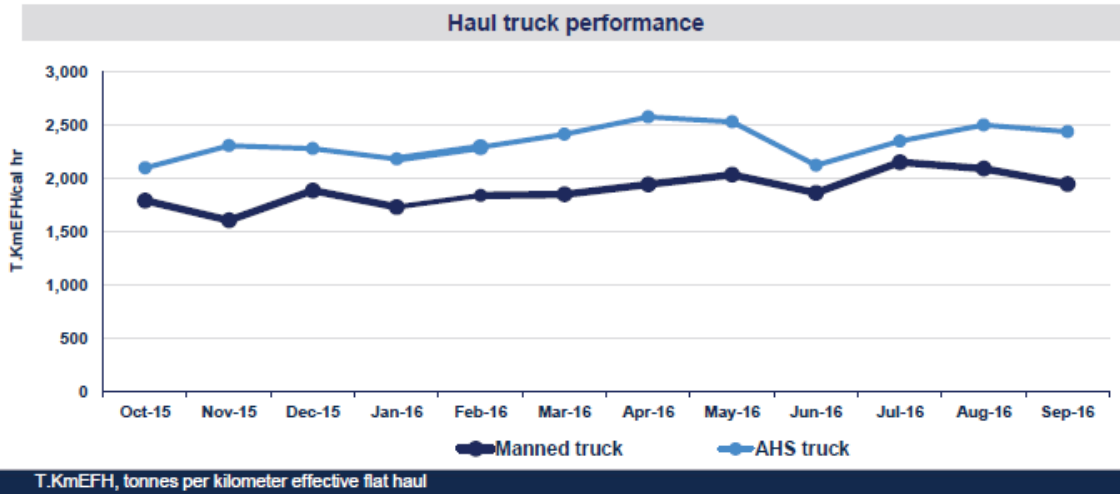
## **6.2 Beneficios del uso de camiones autónomos**

Las minas que prefieran adaptar la automatización a sus operaciones tendrán mayor oportunidad de ser un líder tecnológico en el sector y tener la ventaja competitiva local y global. Los principales beneficios de la automatización son: Seguridad, utilización de activos, eficiencia y costos.

Uno de los beneficios más importantes es la seguridad desde que las operaciones con camiones autónomos eliminan la mayoría de los factores humanos desde el sitio de la operación. El control de estos camiones es controlado de forma segura en áreas cerradas. Por ejemplo, Rio Tinto controla sus operaciones con camiones autónomos Yandicoogina y Nammuldi en Pilbara, Australia desde su centro de operaciones en Perth que está ubicado a casi 1.200 kilómetros del área de operación. Además, sensores mejorados y sistemas de comunicación en los camiones ayudan a la detección de todas las anomalías de las rutas de transporte incluidas personas.

El segundo factor importante es la utilización de los equipos, la que aumenta substancialmente dado que los camiones autónomos no requieren detenciones para cambios de turno ni colación (como ejemplo para el caso de DRT, se tiene una pérdida de 1 hora de tiempo de carguío de palas sólo por concepto de cambio de turno). Siendo más específico, la disponibilidad de un sistema autónomo vs sistema manual aumenta inmediatamente 4% al considerar que este porcentaje es la indisponibilidad asociada a fueros de servicio por cabina (aire acondicionado, asiento, radio, etc) que eventualmente el camión autónomo no tiene. Los reportes iniciales de la mina Fortescue indicaron que la operación de transporte full-autonomía incremento en un 21 por ciento comparado con la operación de camiones de forma manual. Más aún, Rio tinto reportó que su productividad incrementó un 13 por ciento con operaciones autónomas entre julio 2014 y julio 2015 (Gölbasi & Dagdelen, 2017).

AHS are 20 per cent more productive than regular fleet of trucks of the same type



**Ilustración 11 – Productividad Flota FMG Fortescue**

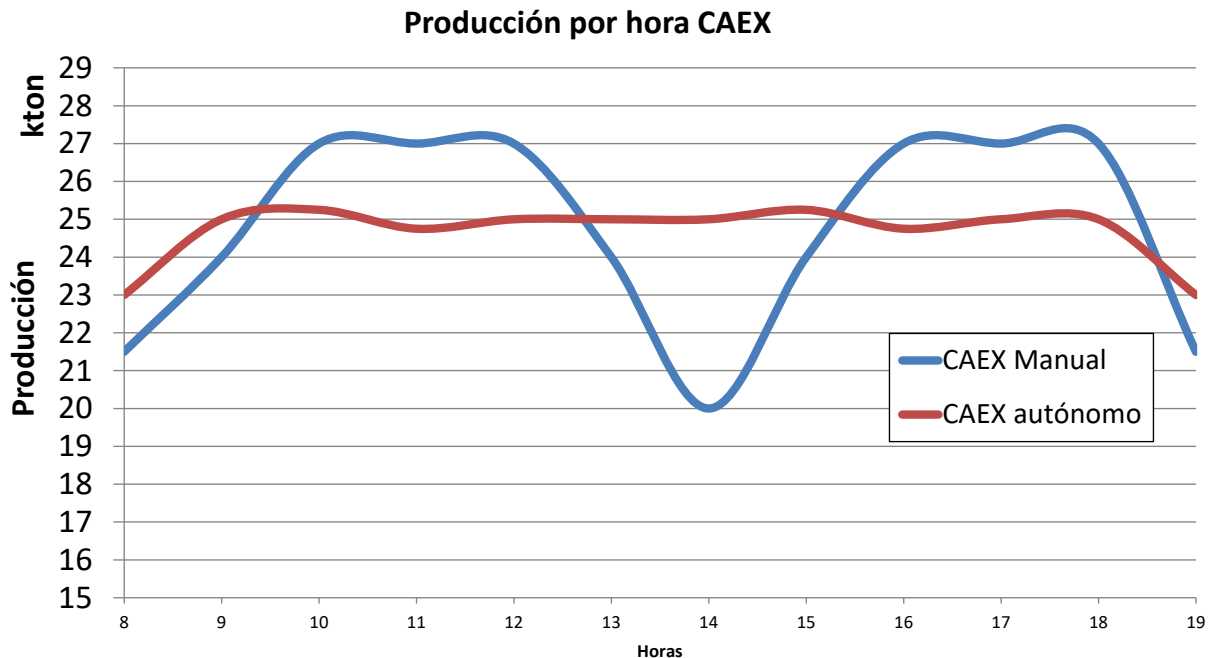
Otro factor a considerar son los factores humanos en la operación manual que generan variabilidad en el proceso productivo. Factores como la experiencia, acuatamiento en la frente de carguío, estado de ánimo, aversión al riesgo y somnolencia, por nombrar algunos se eliminan con la operación autónoma. Existen más factores a considerar, como el riesgo de transporte del personal a faena, la logística necesaria en casas de cambio, casinos, etcétera, que también podrían considerarse e incluso valorizarse, pero no se realizarán en este estudio.



**Ilustración 12 – Operación de camiones autónomos en División Gabriela Mistral**

Si es importante considerar el costo laboral como ahorro en el costo de transporte. Más adelante será analizada la cantidad de operadores requerida para operar una flota de camiones (factor dotacional), pero para nombrar el costo unitario por operador, este tiene un promedio de \$90.000 a \$120.000 USD/operador.

La producción por hora del proceso de transporte manual posee principales bajas durante los tiempos de cambio de turno y colocación de los operadores, esta reducción de producción en estos horarios y la variabilidad se ve reducida en el caso del camión autónomo (Rubilar, 2018).



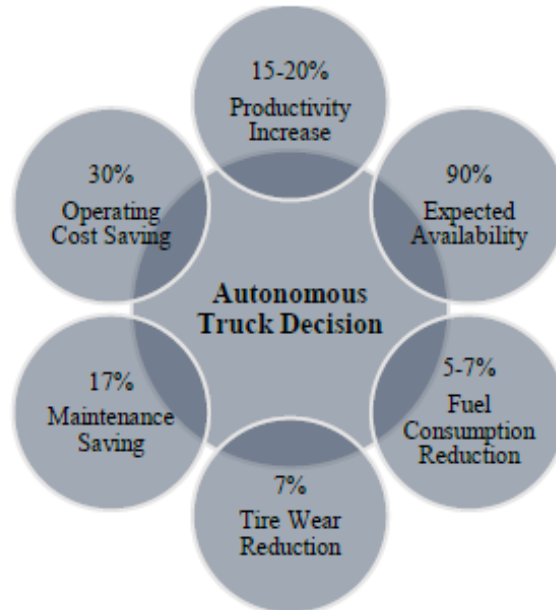
**Ilustración 13 – Comparación producción por hora transporte manual vs autónomo**

Otros costos que se reducen al utilizar camiones autónomos es el costo de neumáticos. La vida de un neumático promedio en la operación manual para el caso de DRT está aproximadamente en 5.500 hrs/neumático, al compararlo con el caso de operación autónoma de DGM (División Gabriela Mistral, Codelco) la vida de promedio de los neumáticos está aproximadamente en 9.000 hrs (Canelo & Aguilera, 2018).



**Ilustración 14 – Evolución vida útil de neumáticos en División Gabriela Mistral, Codelco**

En general, los principales beneficios de la tecnología de camiones autónomos versus la de camiones manuales se presenta en la Ilustración 15.



**Ilustración 15 – Beneficios Esperados de los Camiones Autónomos (Gölbasi & Dagdelen, 2017)**

### **6.3 Características de la operación de camiones autónomos**

Aunque la automatización de equipos de gran tamaño está muy avanzada, esta tecnología es limitada por la interacción de los camiones autónomos con otros equipos y con el sistema integral que pueda ser incorporado. Es decir, la aplicación exitosa de la autonomía tiene las siguientes características:

- Ambiente estructurado.
- Requerimientos de tareas autónomas bien definidas.
- Una necesidad para la solución.
- Un lugar que quiere adoptar la “nueva” tecnología.
- Tecnología simple/robusta.
- Sin interacción con equipos manuales.



**Ilustración 16 - Claves del éxito de la operación autónoma (Canelo & Aguilera, 2018)**

Por el contrario, el ambiente donde operan los equipos de transporte de la minería a rajo abierto es:

- Ambiente adverso (polvo, humedad, condiciones climáticas extremas)
- Dinámico y usualmente impredecible
- Sin estructura y usualmente definido por la geología
- Difícil para medir y costoso de incorporar integridad
- Dificultad para construir modelos simples efectivos y robustos
- Interacción significativa con equipos manuales

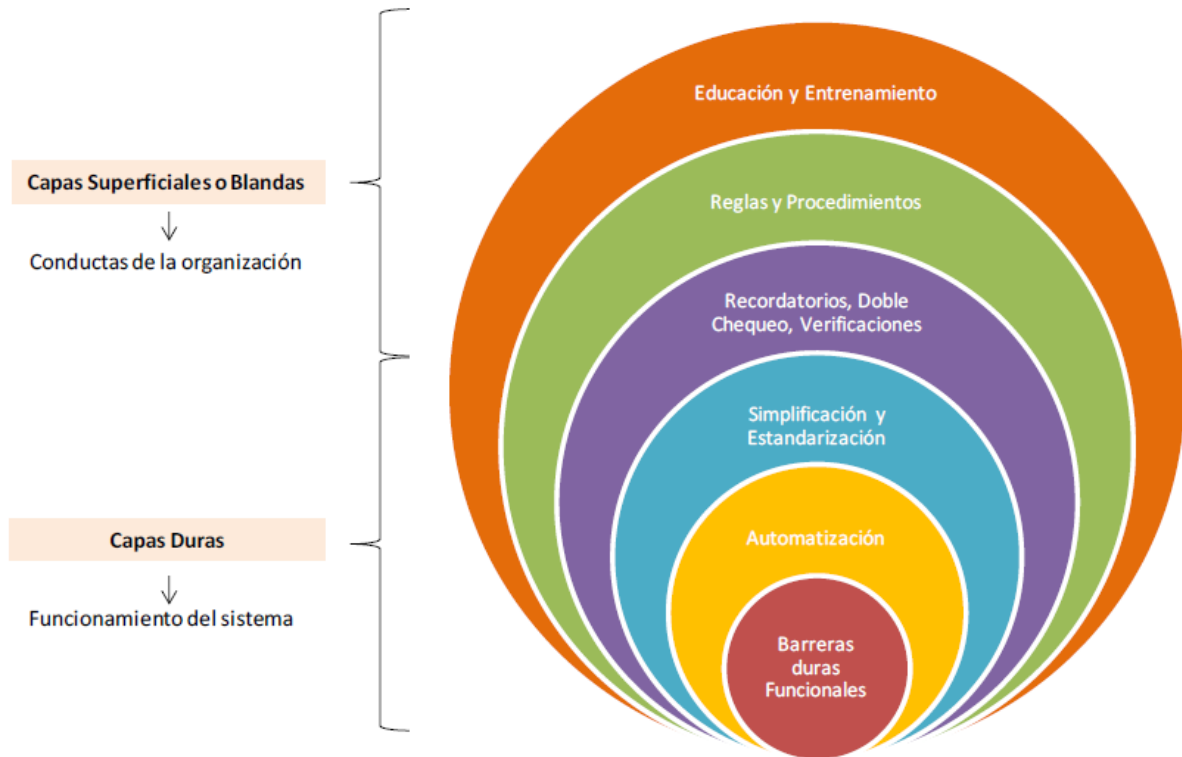
En general, los desafíos para la automatización en minería se ven incrementados increíblemente a medida que el nivel de autonomía aumenta (Nebot, 2006)

En una operación autónoma se tiene impacto en las personas, los cuales se identifican por:

- Cambio cultural: Mayor disciplina y rigurosidad
- Definición de nuevos roles propios de la operación autónoma
- Menor cantidad de operadores en el turno --> Mayor supervisión al tener menos gente a cargo

Lo anterior se ve reflejado, en el caso de una operación como la de División Gabriela Mistral (DGM) en la estructura organizacional, principalmente aquella relacionada directamente con la operación del sistema, es decir, el organigrama de la Gerencia Mina, así como también en los perfiles propios de dotación, el cual debe ser adaptado para su compatibilidad con el sistema (Piñeiro & Osorio, 2015).






## SEGURIDAD FUNCIONAL AHS



**Ilustración 17 – Esquema de Seguridad Funcional Sistema autónomo División Gabriela Mistral**

- i. Educación y entrenamiento: Educación y Entrenamiento corresponde a la primera capa superficial del sistema, la cual está sujeta al comportamiento humano. Esta capa consta de la capacitación que ofrece DGM a las personas para que conozcan e interactúen con el sistema según corresponda. La composición consta de dos capacitaciones orientadas al personal que tendrá intervención directa o indirecta con el sistema.
- ii. Reglas y Procedimientos: Segunda capa superficial del sistema que tiene relación con los cambios en las reglas y procedimientos (documentación) para la operación segura del sistema. Si bien las reglas y procedimientos están presentes en una operación convencional, éstos deben ser intervenidos a través de modificaciones para que se ejecute la operación autónoma.
- iii. Recordatorios, doble chequeo y verificaciones: Corresponde a la tercera capa superficial del sistema, la cual está sujeta al comportamiento humano por lo cual es una capa blanda. Si bien esta capa es más robusta que las anteriores, su activación, cumplimiento y correcto su está sujeta a la capacitación que se entregue respecto al funcionamiento del AHS.

- iv. Simplificación y Estandarización: Corresponde a una capa dura del sistema ya que está relacionada directamente con el funcionamiento del sistema para permitir una interacción segura.
- a) Luces Modales: Sistema de balizas o luces de modo instalado en la parte frontal y trasera de los AHT (Autonomous Hauling Truck o camión autónomo) cuyo objetivo es indicar el estado de operación del camión.

Autónomo			Camión se mueve continuamente entre puntos de carga y descarga, guiado por los datos de curso.
Manual			Camión puede ser operado como un camión de transporte normal, requiriendo de un operador. El sistema no tiene control sobre el camión. Se realiza cuando se hará: reabastecimiento de combustible, inspección o mantenimiento.
Excepción			Ocurre cuando hay detenciones no programadas por falla o condición reportada por el camión. El Controlador Central o el Operador del EMV pueden reiniciarlo una vez que haya sido autorizado.
Suspensión			Ocurre cuando el camión autónomo está en un modo de transición seguro entre Autónomo y Manual, lo que permite que el personal pueda abordar el camión.
Aislado			Ocurre cuando se apaga un camión autónomo en el área AT. El sistema luego crea un área de aislamiento alrededor del camión para evitar que otros camiones autónomos lo choquen.

**Ilustración 18 – Luces Modales Operación autónoma Gabriela Mistral**

- b) Obstáculos Virtuales: Barreras virtuales que se crean en el sistema para proporcionar una interacción y protección segura al interior del área autónoma, ya que permite a los operadores de equipos con sistema AHS crear o ingresar digitalmente obstáculos al área AT.

Tipos de Obstáculos Virtuales: Obstáculo general, obstáculo normal, obstáculo KOA, obstáculo cable.



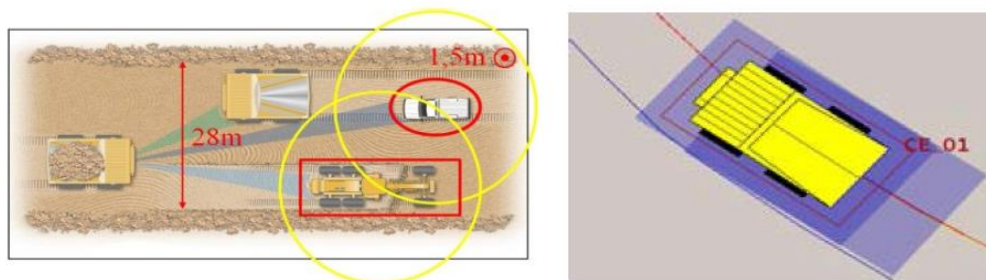
- v. Automatización: Capa dura del sistema AHS relaciona con la detención de los equipos ante una emergencia para mantener la seguridad del sistema.
  - a) Parada por pérdida de comunicación: Detención de los AHT o del Sistema Central por pérdida de cobertura de red de comunicaciones.
  - b) Parada por pérdida de posicionamiento: Detención total o parcial de los AHT que pierden señal de GPS o cuyo número de satélites es menor a la cantidad mínima requerida.
- vi. Barreras duras: Corresponde a la última capa del sistema que se activa en caso que alguna de las anteriores no se haya activado. Es la capa más segura y está relacionada con el funcionamiento del sistema.

Capa de seguridad que posee el Frontrunner (Sistema controlador camiones autónomos DGM) para equipos tripulados. Es un sistema definido para controlar los riesgos de colisión al interior del área autónoma, para lo cual se genera una envolvente de seguridad que rodea a cada equipo habilitado con sistema AHS. Tiene la capacidad de reconocer todos los equipos en área Autónoma.

El sistema CDS utiliza la envolvente junto con los permisos del camión para determinar si hay un riesgo de colisión entre el AHT y otros equipos con sistema AHS. Para lograrlo se proyecta continuamente la trayectoria de los AHT hacia adelante, enviando bloques de permisos a fin de determinar si la envolvente sobrepasa con otra envolvente de seguridad de otro equipo, situación que si sucede hará que el AHT se detenga.

- a) Sobre de seguridad: Última barrera en el equipo que alerta de riesgo de colisión, cuya finalidad es proteger a los equipos con sistema AHS al interior de la zona AT, generando una interacción segura con los camiones. El sobre de seguridad rodea y cubre a todos los equipos auxiliares, camionetas y camiones AHT (Autonomous Haul Truck).

El sobre de seguridad puede ser rectangular (para equipos con 2 antenas GPS: motoniveladoras, bulldozer, pala, cargador, etc) o circular (para equipos con 1 antena GPS: camiones, EMV's (camionetas)).

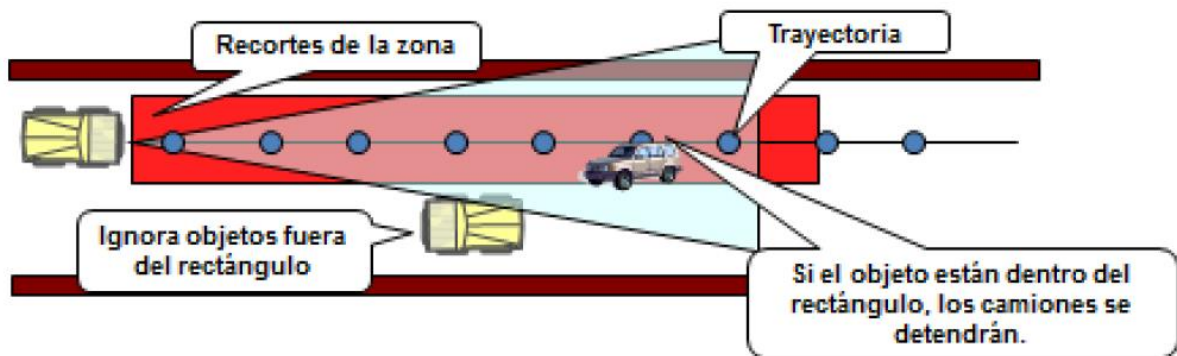


**Ilustración 19 – Sobres de seguridad sistema autónomo**

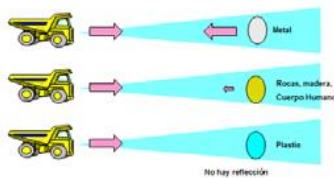


- b) Sistema de permisos: Área de avance que toma el AHT para evitar colisión entre un camión AHT y un vehículo tripulado con sistema EMV. Si detecta que un equipo de apoyo se acerca demasiado, envía un pitido en el CGC del equipo móvil para alertar al conductor.
- c) Sistema de detección de obstáculos (ODS): Sistema configurable que permite la detección de obstáculos en el camino. El alcance de detección de objetos es variable según el tamaño del objeto, las condiciones físicas en el que transita el camión, entre otras.

Consta de dos componentes para proporcionar la máxima protección y flexibilidad, los cuales son radares traseros y delanteros instalados en el AHT. En caso de que detecte un obstáculo, el camión se detiene hasta que el obstáculo sea removido, cambiando su estado de operación a modo Excepción. Luego, personal de operaciones debe verificar y confirmar con la Central la existencia del obstáculo, para lo cual se deberá despejar el camino y posteriormente, dar reinicio al camión, donde la EMV se debe posicionar a más de 30 metros de distancia del AHT con burbuja de tránsito.



Casos donde el radar no puede detectar:



Obstáculo	Habilidad de Detección
Equipo pesado	Siempre
Vehículo Liviano	Siempre (*)
Rocas	Posiblemente
Humanos	Posiblemente

**Ilustración 20 – Sistema de detección de obstáculos**

Existen ciertas condiciones de terreno necesarias para que el sistema de detección de obstáculos actúe correctamente. El radar tiene ciertas “falsas alarmas” dependiendo de las condiciones de la ruta y de los objetos que puedan estar en la ruta del camión. Por lo general, las condiciones mínimas de operación del camión autónomo tienen estas consideraciones de calidad de ruta para que la performance del camión sea óptima. Estas condiciones se muestran en la Ilustración 21.

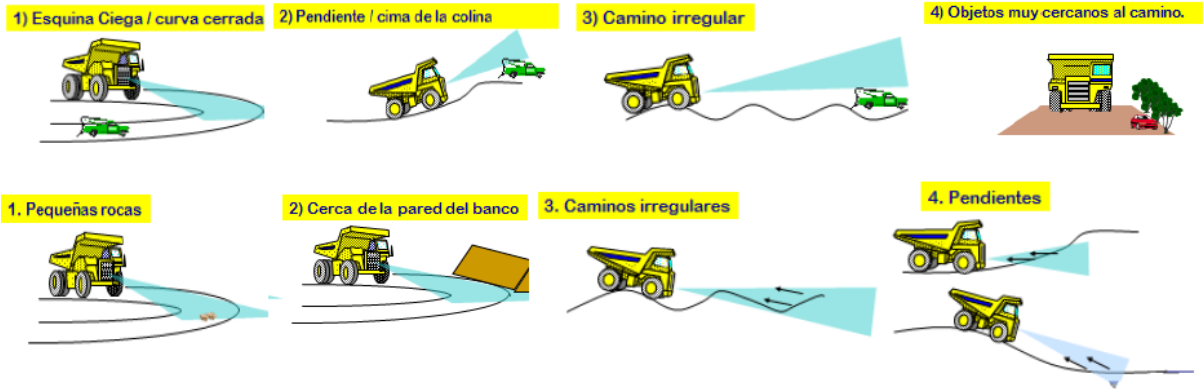


Ilustración 21 – Falsas alarmas sistema de detección de obstáculos (ODS)

d) Sistema de burbujas: Sistema cuyo objetivo es regular las interacciones que se dan en el área autónoma (AHT/AHT y AHT/EMV).

**Burbuja de tránsito** R=50 [m]

Permite viajar con seguridad en la zona AT, con plena protección ante camiones AHT en modo autónomo.  
Se utiliza durante procedimientos específicos para que el camión se detenga.

- Para realizar escoltas
- Abordar AHT por servicio
- Redefinición de áreas
- Zonas de carga y descarga

La burbuja de tránsito detiene el paso de los camiones AHT. El camión se comenzará a detener antes de la burbuja de tránsito, la distancia total de detención dependerá de las condiciones de operación.

**Burbuja de paso** R=50 [m]

La burbuja de paso permite que el equipo opere cerca de camiones autónomos sin detenerlos. Los camiones autónomos pueden ingresar a la burbuja amarilla a una velocidad reducida, dependiendo de la zona de traslado (plano, cargado, pendiente, etc)  
El radio es de 50 [m] desde la posición en que esté ubicada la antena GPS que determinará la zona de seguridad del equipo.

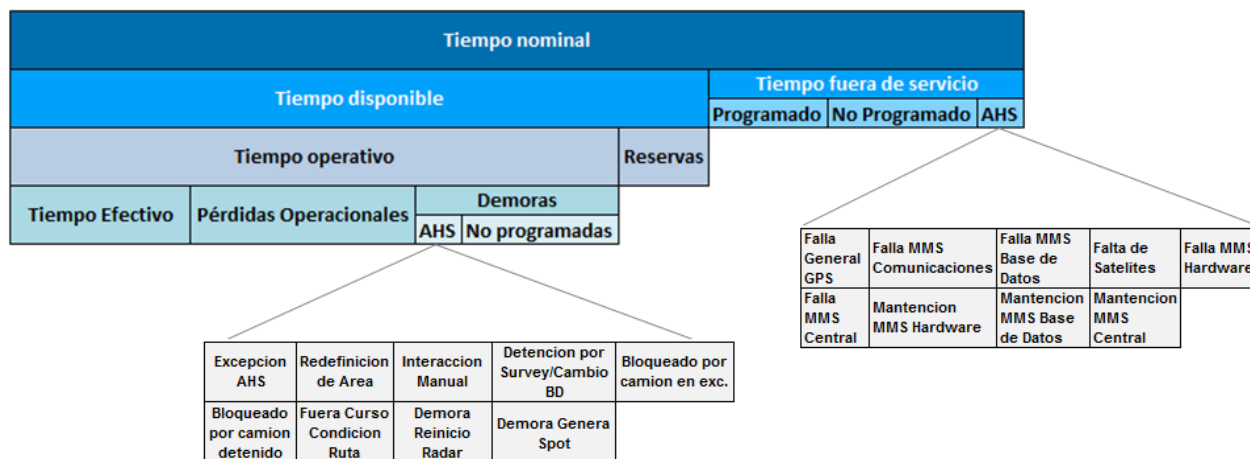
**Burbuja de estacionamiento** R=15 [m]

Permite proteger a un EMV o equipo de apoyo que esté estacionado en el área AT y al mismo tiempo, permite que los camiones autónomos trabajen cerca del equipo cuando éste está alejado o fuera del curso de navegación.  
Los camiones autónomos al aproximarse a una burbuja de estacionamiento, se detendrán siempre que esté en el curso de navegación de los camiones.  
A diferencia de las burbujas de paso y tránsito, la burbuja de estacionamiento no se mueve cuando se mueve la EMV.

Ilustración 22 - Sistema de burbujas para interacción autónoma

## 6.4 Factores requeridos para operación de camiones autónomos

La operación de camiones autónomos tiene algunas diferencias operativas que es importante tener en cuenta para el caso de su implementación. La diferencia operativa central es la incorporación de la red de comunicaciones habilitante para el movimiento de los camiones y la infraestructura requerida en los camiones para poder capturar la información de terreno.



**Ilustración 23 – Tabla ASARCO camiones autónomos**

Por lo anterior, en la descomposición de tiempos totales de operación es importante agregar las demoras y fueros de servicio asociados a la operación del camión autónomo. Estos indicadores son muy importantes de gestionar por parte de la supervisión e indican el foco de atención para disminuir tiempos improductivos del camión autónomo.

En la Ilustración 23 se aprecia como la interacción manual es un factor a considerar como demora para el camión autónomo y agrega otro foco de gestión adicional a la operación del sistema. La interacción manual se verá más adelante.

Otro de los componentes del Modelo Operacional AHS son los habilitadores tecnológicos que están relacionados con todos aquellos requerimientos ya sean habilitantes o adicionales que permiten el funcionamiento del sistema.

Si bien en DGM solo los camiones de extracción son autónomos, la operación en sí pasa a ser autónoma ya que requiere la intervención de sistemas e infraestructura que habiliten la operación.

Al respecto, se levantaron aquellos elementos habilitadores o requerimientos habilitantes que son trascendentales para que el AHS pueda funcionar en División Gabriela Mistral. Además, se identificaron los primeros requerimientos adicionales que están relacionados con el mejoramiento del sistema y son igual de importantes para lograr un óptimo y seguro desempeño (Piñeiro & Osorio, 2015).

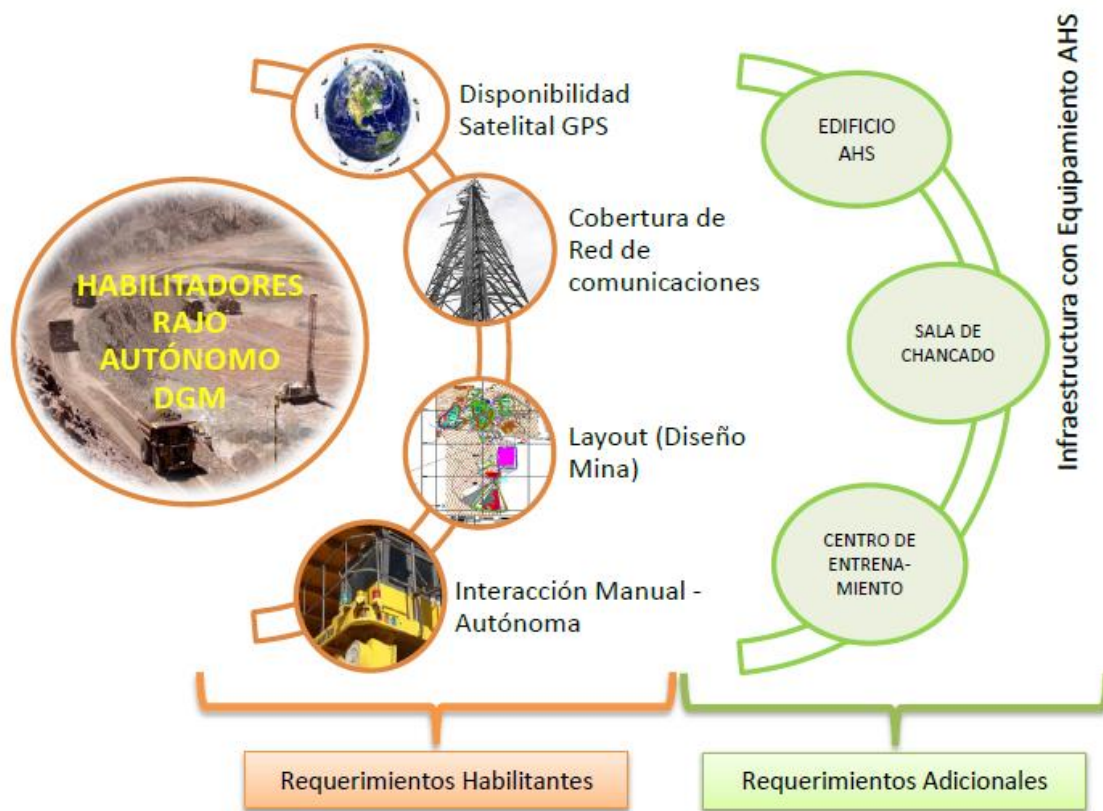


Ilustración 24 – Requerimientos habilitantes camión autónomo (Piñeiro & Osorio, 2015)

#### 6.4.1 Requerimientos habilitantes

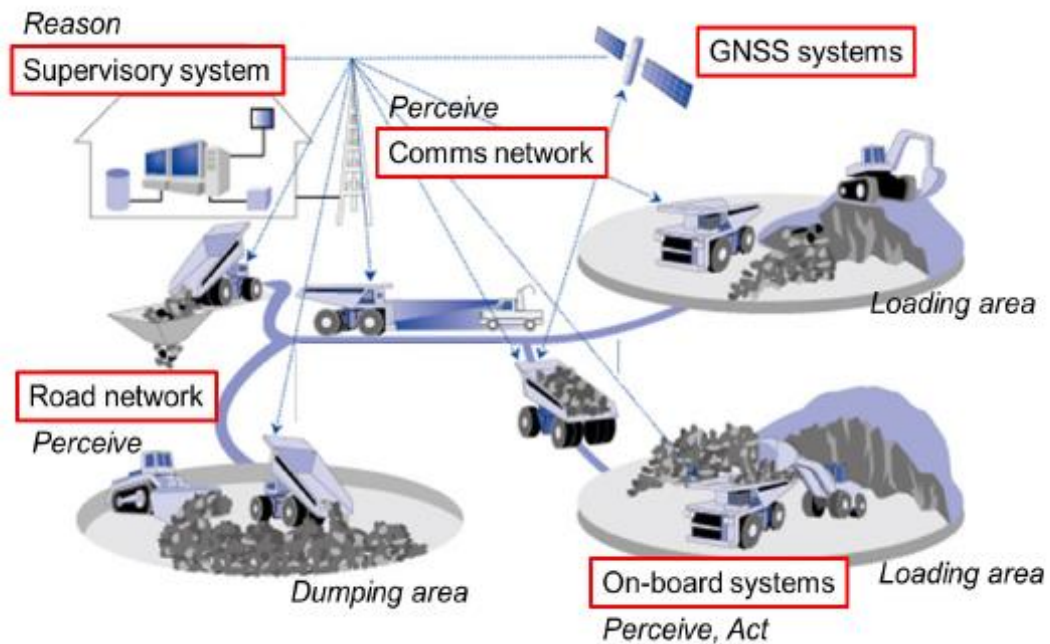
A continuación, se mostrarán de manera breve los requerimientos habilitantes definidos por la División Gabriela Mistral de Codelco (DGM) que son la base para el funcionamiento de la tecnología.

##### a) Disponibilidad Satelital

Los camiones autónomos realizan la navegación mediante trayectorias predefinidas mediante GPS. Por lo anterior, se necesita tener disponibilidad satelital para conocer la ubicación de todos los camiones y también de otros equipos y/o vehículos en la mina lo cual se realiza mediante triangulación satelital. Según los datos de DGM para que los camiones puedan seguir su trayectoria se necesita disponibilidad de mínimo 12 satélites.

Ante una falta de disponibilidad satelital, se intenta cambiar el frente de trabajo a uno que si posea disponibilidad a fin de no afectar el desempeño tanto del transporte como de la producción mina en general. Actualmente, la versión del AHS instalada en DGM utiliza el sistema satelital de navegación global solo por GPS (USA).





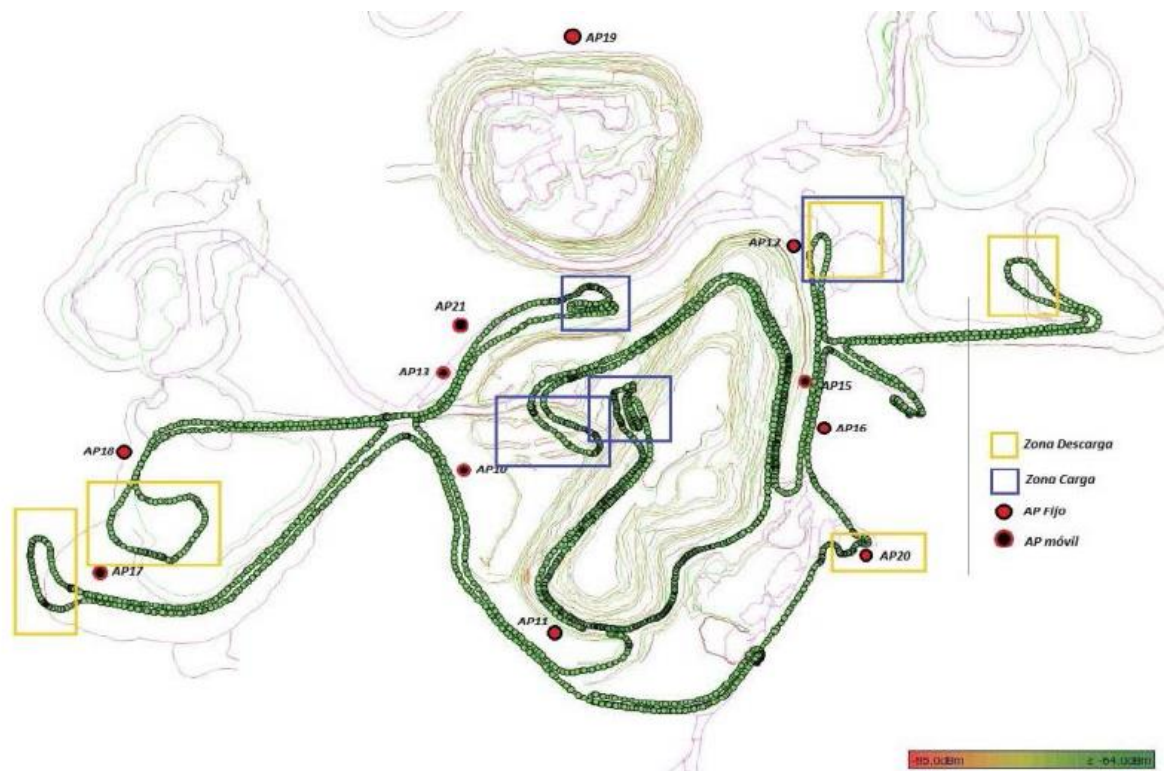
**Ilustración 25 – Esquema comunicaciones operación autónoma (Tellus, 2018)**

La particularidad que posee la División Radomiro Tomic (DRT) respecto a la operación de los camiones autónomos de la División Gabriela Mistral (DGM) son las dimensiones de mina. La profundidad de la operación minera puede ser un problema para la disponibilidad satelital. Es por ello que la operación de DRT se planea implementar de manera progresiva hacia la profundización del rajo comprobando paso a paso si la disponibilidad satelital es suficiente para pasar a operaciones cada vez más profundas.

b) Cobertura de Red de comunicaciones:

El funcionamiento del Modelo de Operación en DGM requiere de una cobertura de red de comunicaciones que permita mantener la conexión e intercambio de información entre los camiones, equipos de la mina y la estación central.

Debido a lo anterior, se necesita tener toda la mina con cobertura de red para que el sistema sea operativo.



**Ilustración 26 – Ejemplo estudio de cobertura DGM**

El proveedor de la tecnología autónoma realiza un estudio de cobertura con periodicidad semanal y mensual en el cual se tiene información respecto a la evaluación de las coberturas de comunicación en las áreas a operar en el rajo de acuerdo al plan minero, a fin de verificar la red de comunicación para la flota de equipos.

Por su parte, la Dirección de Telecomunicaciones posee las siguientes responsabilidades para el apoyo a la operación autónoma.

- Conexión Fibra Óptica Central AHS
- Confinar área Circuito Cerrado de Televisión y núcleo comunicaciones
- Reforzar infraestructura AHS existente:

Para el proyecto autónomo de DRT se realizó un estudio de cobertura para estudiar la factibilidad de las comunicaciones e interferencias en caso de implementar camiones autónomos en la División.

Como puede verse en Ilustración 27 el estudio de cobertura indica un espectro en el que existen muchas interferencias de comunicaciones, lo que en la operación de camiones autónomos se traduciría en constantes detenciones y la operación no sería viable de una forma normal.



**Ilustración 27 – Estudio de Cobertura DRT**

La cobertura de red hoy en día es la principal razón por la que la operación de camiones autónomos en DRT no sería posible a menos que se instale una red de comunicaciones sin interferencias y con mayor capacidad de transmisión de datos. La red de comunicaciones de DRT hoy en día está completamente saturada por la gran cantidad de requerimientos no sólo de la mina, sino que también de la división como, por ejemplo: geotecnia, mantenimiento, cámaras de video, etc.

Por lo tanto, la red de comunicaciones wifi hoy presente debe migrar a una red de comunicaciones tipo LTE y que permita su escalabilidad para incorporar un posible crecimiento de la flota de camiones autónomos y más aún su integración con otros sistemas de gestión como, por ejemplo, un centro integrado de operaciones.

Otra posibilidad es la interconexión interdivisional mediante la red de comunicaciones, es decir, que la instalación de una red de comunicaciones escalable y con suficiente capacidad puede ser aprovechada por todo el distrito norte de Codelco. En la Ilustración 28 se puede observar la idea conceptual de interconexión de datos entre DRT y la División Chuquicamata que están separadas por una distancia de 4 km aproximadamente.





**Ilustración 28 – Concepto de red de interconexión de Chuquicamata con Radomiro Tomic**

c) Layout (Diseño Mina):

Los camiones autónomos requieren condiciones de borde específicas respecto al diseño minero (layout) que se deben cumplir para un óptimo desempeño del sistema.

El Sistema de gestión de flota para camiones de transporte utiliza un modelo virtual definido por el usuario para asignar camiones de un área a la siguiente, se configura una pista virtual compilada desde los carriles para que los camiones tengan una ruta de una ubicación a otra. Los camiones solo pueden circular por carriles, el sistema usa "permisos" para emitir las asignaciones segmento por segmento de una ubicación a otra. Un solo camión puede tener permiso para un carril a la vez.

El modelo virtual es una representación exacta del mundo real. Los elementos que conforman el modelo virtual son las rutas estáticas, las rutas dinámicas, las zonas de descarga y los sectores de carguío.

En el sistema de gestión de flota de los camiones autónomos las rutas virtuales son construidas manualmente luego de que personal de terreno ha inspeccionado y creado y ha determinado dónde irán estas rutas. En el sistema, las rutas virtuales se utilizan para conectar áreas de carguío/fondo del pit áreas de descarga. Normalmente, este tipo de vía virtual se utiliza en caminos de transporte.





**Ilustración 29 – Representación virtual de rutas en el sistema de transporte (MineStar Command for Hauling, 2018)**

Cada sección de la ruta de transporte de acarreo se compone de 2 carriles, uno para cada dirección de viaje. Las rutas tienen por defecto 17.5 m de ancho en tramos rectos de caminos de transporte. En las esquinas, para permitir una velocidad de desplazamiento óptima, el ancho de la ruta puede aumentar hasta un máximo de 20 m, esto no siempre es así, pero cuando es posible, lo óptimo es diseñar anchos de camino para permitir esquinas más anchas. Esto generará una maniobrabilidad más suave y rápida de los camiones autónomos a través de las curvas.

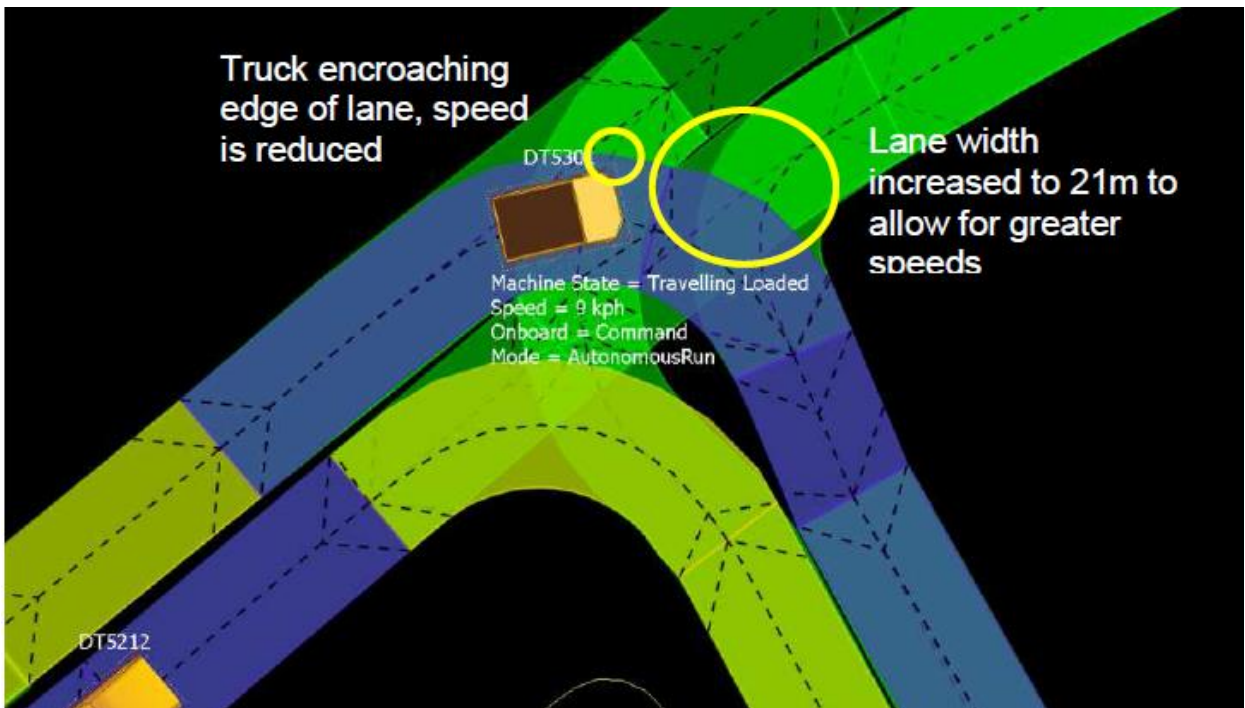


Ilustración 30 – Curvas y esquinas de las rutas virtuales de transporte (MineStar Command for Hauling, 2018)

Las rutas virtuales de transporte son generadas dentro de un límite definido, que inicialmente es una encuesta desde un vehículo liviano y luego se actualiza con encuestas de herramientas de carga a medida que la cara avanza. Las rutas dinámicas solo se encuentran en áreas dinámicas. Las áreas de vaciado se definen como áreas dinámicas, así como el área de carga en el pit y alrededor de las reservas.

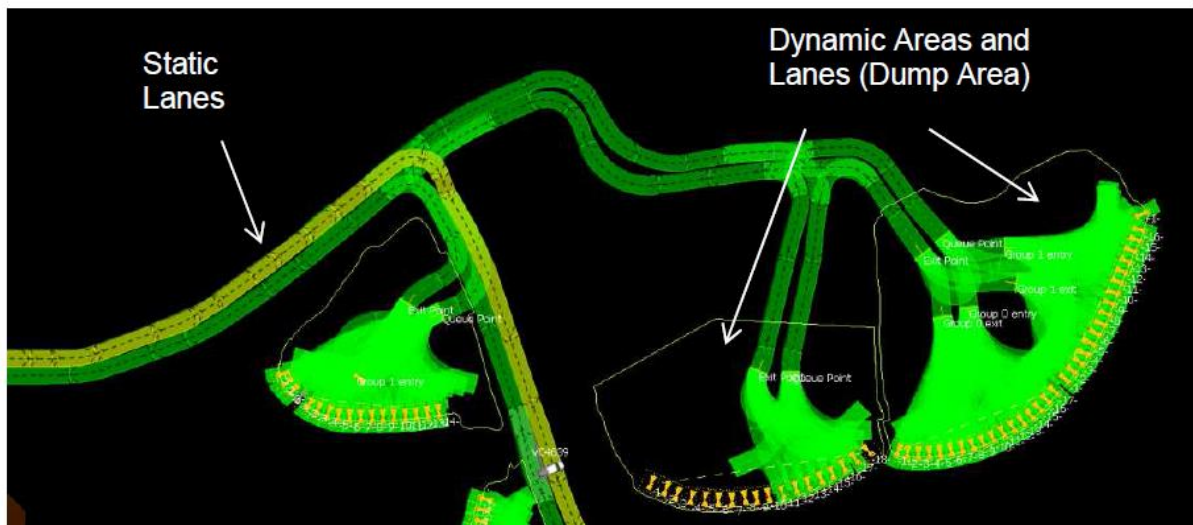


Ilustración 31 - Diagrama líneas estáticas y áreas dinámicas (MineStar Command for Hauling, 2018)

DGM indica que respecto del funcionamiento, en cuanto a velocidad y performance de los camiones dependerá de las condiciones del layout mina. Por lo anterior, es requisito fundamental para lograr un óptimo desempeño el cumplir con los requisitos y mantener y a la vez actualizar el layout mina en el sistema.

De acuerdo a la flota de transporte existente en DRT el ancho mínimo de ruta para que puedan transitar dos camiones en sentido contrario es de 28 [m]. Dado que el diseño minero es on-off, es decir, si no se tiene el ancho requerido los camiones no circularán por dicha ruta. Cabe destacar que el ancho de 28 [m] es para el modelo de camión de DRT, es decir, Komatsu 930E-A4 y su justificación se muestra en la siguiente figura.

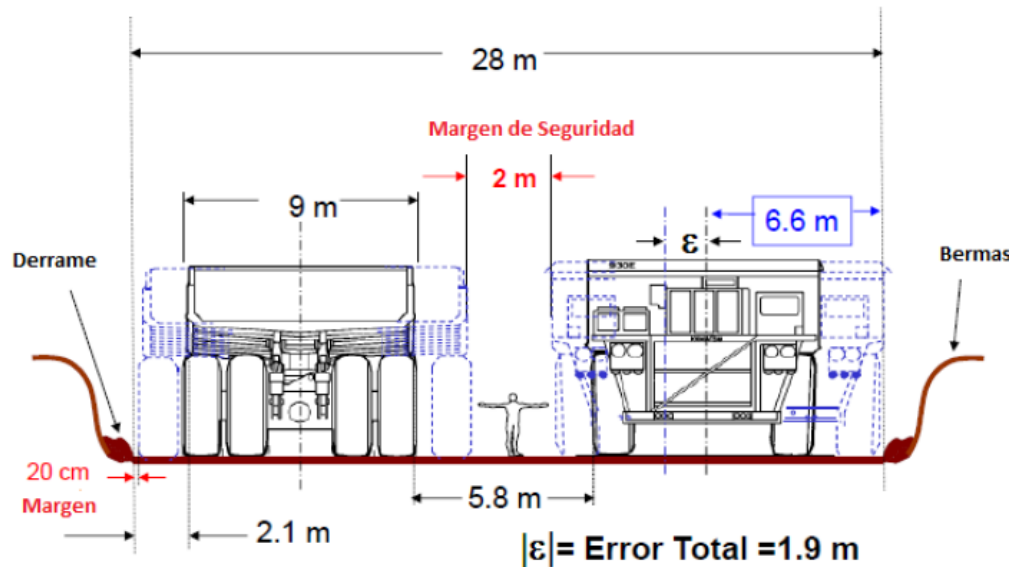


Ilustración 32 – Ancho mínimo de transporte sistema autónomo (Piñeiro & Osorio, 2015)

Para el caso de DRT se ha incorporado en consideración las dimensiones de los camiones de la flota de transporte existente (Komatsu 930 E-4) tanto para la planificación minera como para la operación.

Tabla 2 – Parámetros de Diseño para flota de transporte autónoma en DRT

Elemento del Rajo	Parámetros de Diseño		
	Mínimo	Intermedio	Ideal
Ancho camino transporte recto	36	38	36
Ancho camino transporte esquina	38	42	38
Ancho de Rampa	28 m	35 m	42 m
Pendiente de Rampa	10%	10%	8%
Bombeo en camino de transporte (0-3% Pendiente)	2,50%	2,50%	2,50%
Bombeo en camino de transporte (6-10% Pendiente)	1,50%	1,50%	1,50%
Radio de giro a la izquierda camión autónomo	15	15	15
Radio de giro a la derecha camión autónomo	18	18	18
Área para giro en 'U'	56	56	56
Área bahía petróleo	60m x 80m	85m x 85m	100m x 100m

d) Interacción Manual Autónoma:

El Modelo Operacional existente en DGM considera la operación de un rajo autónomo, sin embargo, solo los camiones de extracción actúan en forma autónoma, mientras que el resto de los equipos principales y de apoyo continúan funcionando en forma convencional con un operador a bordo.

Bajo este contexto, uno de los requerimientos propios del sistema en DGM es permitir una interacción segura entre equipos pertenecientes a una flota manual y una flota autónoma.

De esta forma, se estableció un sistema de balizas o luces modales como una estandarización para indicar el modo de funcionamiento de los camiones en todo instante.

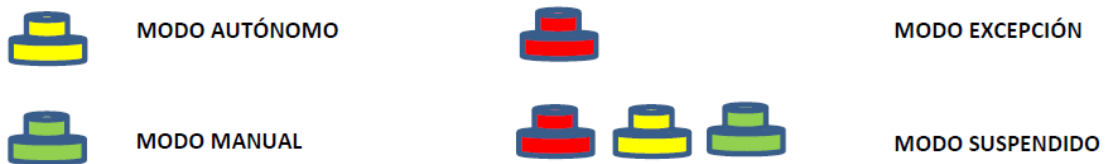


Ilustración 33 – Balizas para interacción Manual-Autónoma

### 6.4.2 Requerimientos adicionales

Como requerimiento adicional o de apoyo a la operación autónoma en DGM, se levantó la información referente a la infraestructura necesaria para la correcta operación del sistema. Es decir, si bien se hace uso de las instalaciones existentes, éstas deben ser equipadas con el sistema para que permita el funcionamiento.

a) Edificio AHS (Autonomous Hauling System) - Central

Edificio destinado al funcionamiento del sistema por lo cual es el lugar físico en el cual se ubica personal que controla el sistema (proveedor y cliente) que tienen intervención directa en el AHS.



- Posee Botón de Emergencia para que, ante una emergencia operacional, se detenga la flota de camiones autónomos. La acción debe ser informada al Ingeniero de Turno Mina.
- Esta sala debe contar con la tecnología necesaria para disponer de los servidores, UPS y red de comunicaciones necesaria para operar el sistema.

b) Sala de Chancado

Posee Botón de Emergencia para que, ante una emergencia operacional, se detenga la flota de camiones autónomos.

Posee pantalla gráfica que permite:

- Asignar la bahía de descarga a los camiones.
- Permitir o denegar el ingreso de camiones al área de vaciado.
- Detener camiones dentro del área autónoma mediante el botón de emergencia.
- Controlar la descarga del camión (puede detener o reiniciar el levante de la tolva).
- El operador del chancador debe estar atento a las condiciones de ruta para el ingreso de camiones a las bahías (derrames, desniveles) e informar inmediatamente al Ingeniero de Turno Mina para tomar acciones correctivas. Si detecta derrames en el camino, debe detener el camión o denegar su acceso a la bahía de vaciado.

c) Centro de Entrenamiento

Centro destinado a capacitar y entrenar a las personas que tendrán relación directa o indirecta con el sistema. En DGM además de la capacitación en operación convencional se han instalado simuladores de equipos que tienen incluido tanto los procedimientos como el equipamiento del sistema, es decir, pantalla CGC y botón de emergencia.

## 7. Análisis de Factibilidad de Camiones Autónomos

Para el análisis de factibilidad de implementación, una de las variables importantes a considerar es claramente el costo de la implementación. La metodología considerada involucra la comparación entre el sistema de transporte convencional (o manual) de camiones de extracción versus el sistema de transporte autónomo.

El siguiente análisis corresponde al análisis económico de ambas alternativas para el horizonte de evaluación 2019-2026 que representa la mayor parte del período de transformación del plan estratégico de la División Radomiro Tomic.

En los próximos años de operación de División Radomiro Tomic se necesitará explotar un proyecto que contempla **fases de lastre + Ripios**. La operación actual considera extraer estas fases por camiones manuales.

La inclusión de estas fases significa considerar los siguientes parámetros importantes:

- 104 camiones para cumplir el plan → esto implica compra y/o aumento de flota actual (95 camiones).
- 632 operadores para totalidad de equipos → necesidad de aumento de operadores para cumplir con PND.
- Aumento en el costo de transporte -> El costo de transporte aumenta a 1,3 US\$/ton (nuestro costo actual de transporte es 0,9 US\$/ton).

El análisis siguiente consiste en destacar la posibilidad de extraer el mismo plan de producción presupuestado actualmente por DRT de extraer con camiones autónomos como contraposición a los camiones manuales. La Ilustración 34 muestra como existe un aumento progresivo de los costos para la tecnología actual de transporte de la División, lo que hace buscar alternativas de transporte de menor costo que el convencional.

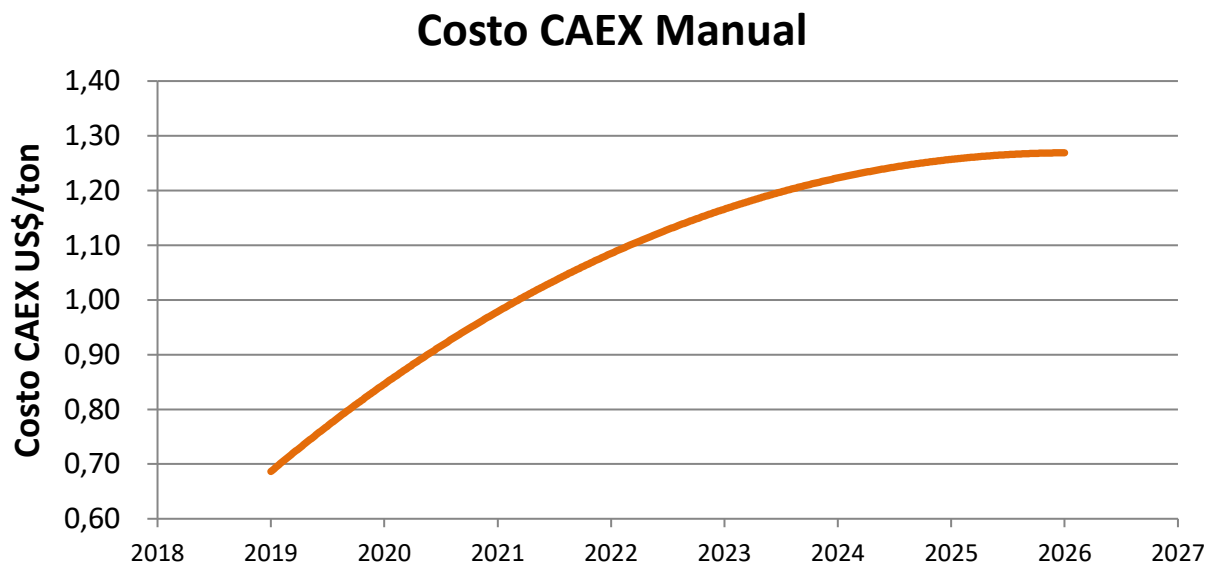


Ilustración 34 – Costo por tonelada transportada 2019-2026

## 7.1 Plan de producción

El plan de producción considerado es el plan que se muestra en la Ilustración 35 y que involucra la remoción de lastre en las fases indicadas y que además no posee interacción con los camiones manuales. El proyecto autónomo no considera la operación de camiones manuales de manera simultánea en un mismo circuito con los camiones autónomos.

Kton por año y fase									
Fase	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	Total
Ripios	1.944	7.594	7.594	7.594					24.726
F28		54.295	34.238						88.534
F36			42.220	67.329	55.293	25.392			190.234
F37				53.984	43.994	30.143			128.120
F38						44.595	50.142		94.736
F39							59.103	94.186	153.289
Total	1.944	61.889	84.052	128.906	99.287	100.130	109.244	94.186	679.639

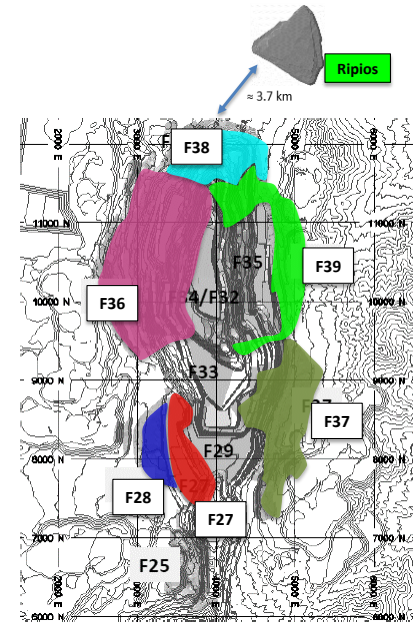


Ilustración 35 – Plan de producción para sistema de transporte autónomo

La primera parte del plan indica que es el sector de los ripios el primer sector a extraer y se considerará como el primer sector en donde se implementarían los camiones autónomos en DRT. El sector de ripios posee caminos anchos y se encuentra segregado del resto de la mina por lo que es un sector que posee ventajas respecto a la rapidez de la implementación de la tecnología ya que la preparación de caminos y sectores de vaciado sería muy poca o nula.



Ilustración 36 – Prueba de velocidad de camiones en sector Ripios DRT

## 7.2 Comparación de Indicadores

Para la valorización de ambas alternativas se consideraron ciertos indicadores para poder evaluar de manera cuantificable y homologada para ambas tecnologías. A continuación, se definen los indicadores a considerar en la evaluación económica.

- **Horas Efectivas:** Las horas efectivas corresponden a la cantidad de horas por día en que el camión está realizando el trabajo para lo que fue diseñado (cargar, transportar, descargar y viajar). Este indicador es una de las principales diferencias entre el camión autónomo y el camión manual. El camión autónomo no tiene tiempo de colación ni de cambio de turno, por lo que posee una ventaja sobre el camión convencional.
- **Consumo de neumáticos:** El consumo de neumáticos es menor para el caso del camión autónomo, debido a que su forma de trabajo posee una distancia respecto al pretil de referencia, lo que hace que los neumáticos reduzcan notoriamente los impactos en las bandas laterales de los neumáticos, aumentando su duración respecto de las duraciones logradas por la operación manual de camiones (Ilustración 14).
- **Utilización Operativa:** La utilización operativa corresponde al tiempo en que el camión está operando (es decir, con motor corriendo) respecto al tiempo al que el camión está disponible. La utilización operativa aumenta debido a que se reducen notoriamente las detenciones por cambio de turno y las detenciones por colación (Rubilar, 2018).
- **Disponibilidad:** Las principales diferencias por disponibilidad entre la operación de camiones manuales versus autónomos son los fueros de servicio por fallas asociadas a la cabina del operador. Fueros de servicio como, por ejemplo, aire acondicionado, calefacción, espejos, radio, asiento, etc, que son considerados como “fueros de servicio por cabina” no son necesarios de atender cuando el camión es autónomo, por lo que existe un aumento de disponibilidad. Además, los fueros de servicio por neumáticos también se reducen al aumentar la vida de los neumáticos. En definitiva, el camión autónomo tiene una mayor disponibilidad y un mayor cuidado del equipo.
- **Rendimiento:** La variable del rendimiento del camión por lo general se considera como que el camión autónomo tiene menores velocidades respecto a las velocidades logradas por el camión manual. La diferencia en velocidades está principalmente en la velocidad de bajada del camión autónomo. Se estima que en términos generales el rendimiento del camión autónomo es aproximadamente un 7% menor que el del camión manual.
- **Tiempo de Ciclo:** En línea con los rendimientos, al ser menor el rendimiento en el camión autónomo, el tiempo de ciclo también será menor.



- Pérdidas Operacionales: Las pérdidas operacionales del camión autónomo y manual dependen principalmente de la calidad de la distribución de la flota realizada por el despacho. En el caso particular de DRT, la asignación dinámica de la flota posee un plan progresivo de aumento para aprovechar de mejor forma la flota.
- Demoras: Como se ha nombrado anteriormente, la utilización del camión autónomo es mayor debido a un mejor aprovechamiento del horario de colación y de cambio de turno. En la Ilustración 23 se indicaron también demoras asociadas al camión autónomo, las que deben ser gestionadas durante su operación.

A continuación, se presenta una tabla resumen de comparación de indicadores de sistema de transporte autónomo vs sistema de transporte convencional. El objetivo de indicar esta tabla comparativa es establecer ciertas diferencias para la futura valorización de ambas tecnologías económicamente.

**Tabla 3 – Comparación de Indicadores Operación Manual vs Autónoma**

	Autónomos		Manuales					
	FMG CAT 2017	Gaby KOM 2017	RT 2017 Total Flota				RT 2018	DMH CAT 2017
			94 CAEX					
# CAEX	70	18	8	22	29	35	92	36
Longevidad Flota (horómetros)	40,000	53,000	Kom 930 E-4 10,000	Liebherr 41,000	Kom E-2 y E-3 66,000	Kom SE 26,000	Total 45,000	34,000
Disponibilidad %	90	85.3	84.78	74.4	78.2	82.54	76.1	85
Utilización Operativa %	90	94	88.9	88	85	88	85	89.3
Utilización Efectiva (BD) %	83.3	78.6	80.57	80.8	76.5	79.9	79.3	76
Hrs Operativas	19.44	19.1	18.01	15.7	16.0	17.4	15.45	18.2
Hrs Efectivas	18	16.1	16.4	14.44	14.36	15.83	14.5	15.6
Rend CAEX ton/hef/kmEq		186	47	59	44	57	58	72
Rend CAEX ton/día		12,000	7,300	8,058	5,888	8,422	7,482	9,600
Velocidad km/hr		16,92	14.9	16.0	14.4	16.3	19	22*
Distancia Km Eq		3,4 - 4,5	9.4				8.9	8.6

De acuerdo a los indicadores de la Tabla 3 y los siguientes parámetros económicos Tabla 4, se valorizará económicamente ambas alternativas para comparar el gasto total para ambas alternativas. Los valores de velocidades, disponibilidades, utilizaciones efectivas y uso de la disponibilidad son datos de acuerdo a la experiencia actual de la División Radomiro Tomic para el caso de la operación manual. Para el caso autónomo, corresponde a una recopilación y juicio experto de acuerdo a las experiencias de DGM y otras experiencias en el mundo siendo conservador en las horas efectivas por día, ya que las horas efectivas por día consideradas para la evaluación (17,3 horas efectivas por día) son menores que las alcanzadas en otras faenas a nivel mundial y local.

**Tabla 4 – Tabla de parámetros para evaluación económica autónomo y manual**

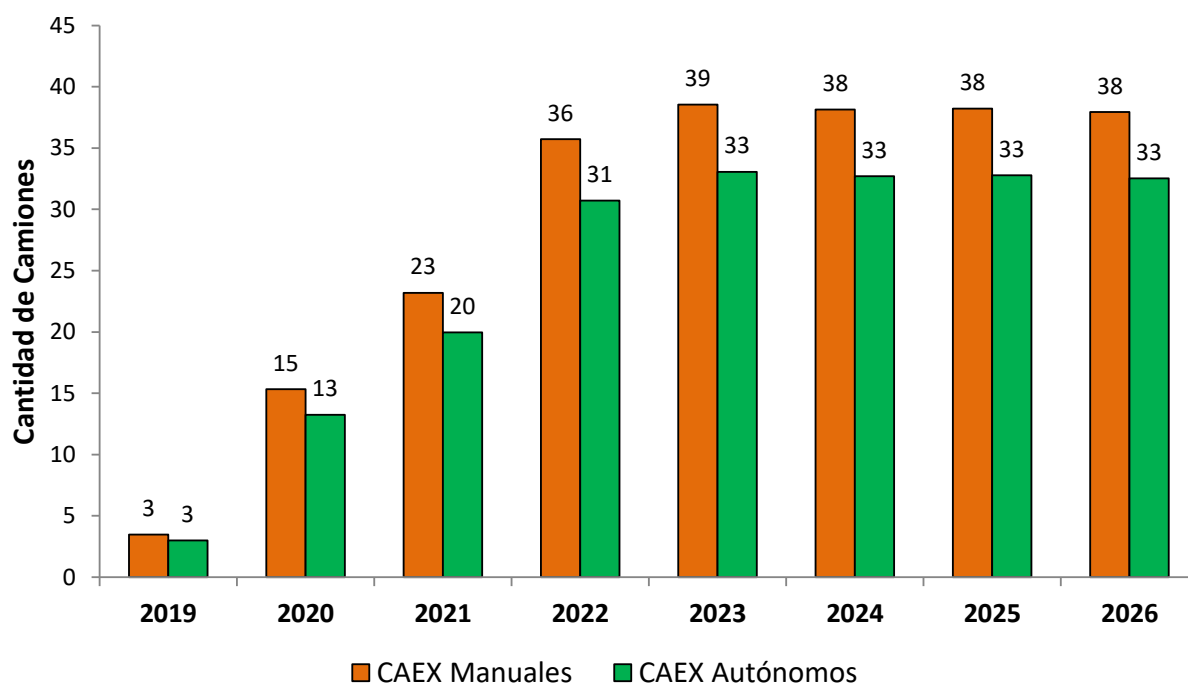
		<b>AHS</b>	<b>MAN</b>
Disponibilidad	%	86	80
Uso Disponibilidad	%	94	83
UEBD	%	84	81
U. Nominal	%	72	65
Hrs Efectivas	hrs	17,3	15,6
Velocidades	Sc	12,0	12,8
	Bc	24,0	25,7
	Hc	42,0	44,9
	Sv	24,6	26,3
	Bv	30,0	40,0
	Hv	42,0	45
Payload CAEX	ton	290	290
Neumáticos	Duración hrs	9.000	5.200
	Costo un KUS\$	50	50
Combustible	Lts/ton	0,48	0,51
Precio Combustible	US\$/Lt	0,58	0,58
Costo Retrofit	KUS\$	1000	0
Costo Operador	KUS\$/año/op	0	100
Factor Dotacional	un	4,51	4,51
Costo MARC	USD/hr	100	100
Costo Lub	US\$/hr	10	10
Costo Central AHS	MUS\$	3,5	0
Costo Licencias	MUS\$	0,28	0

### **7.3 Valorización de Alternativa CAEX Autónomo**

Para evaluar la factibilidad de implementación de la tecnología autónoma en Radomiro Tomic se compararán ambas tecnologías evaluándolas de manera simultánea de acuerdo al gasto necesario para cumplir el plan de producción de DRT.

Una de las diferencias principales en la evaluación de ambas tecnologías, es el ahorro de camiones logrado por el camión autónomo en comparación con el camión manual. La cantidad de camiones ahorra varía año a año como muestra la Ilustración 37 y esto se logra principalmente ya que el camión autónomo tiene mayor cantidad de horas efectivas de operación por día por camión. En otras palabras, el uso mayor por cada camión de la tecnología autónoma hace que la necesidad de camiones sea menor que la tecnología convencional. Esto marca diferencias importantes en el gasto global de cada alternativa.

## Vector de Camiones 2019-2026



**Ilustración 37 – Vector de Camiones plan de producción Manual y Autónomo**

Luego de valorizar individualmente cada plan de producción de acuerdo a cada tecnología, las principales diferencias en gasto están determinadas por el costo laboral y el costo de neumáticos, haciendo que la escala utilizada sea fundamental a la hora de valorizar la alternativa (Tabla 5 y Tabla 6).

**Tabla 5 – Valorización sistema de transporte manual**

Manuales	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
<b>Total (US\$ mill.)</b>	<b>1,7</b>	<b>51,9</b>	<b>72,9</b>	<b>118,7</b>	<b>107,9</b>	<b>107,1</b>	<b>108,7</b>	<b>106,2</b>
Lubricantes (\$)	0,03	1,22	1,48	3,06	2,20	2,09	1,90	2,16
Neumáticos (\$)	0,21	8,5	10,3	21,3	15,3	14,5	13,2	15,0
Combustible (\$)	0,58	18,3	24,9	38,1	29,4	29,6	32,3	27,9
Mantenimiento (\$)	0,6	16,8	25,4	39,1	42,2	41,9	41,9	41,5
Costo Operador (\$)	0,26	7,05	10,88	17,09	18,81	18,99	19,41	19,65
AHS (contrato) (\$)								
<b>Costo por CAEX MUS\$</b>	<b>0,49</b>	<b>3,39</b>	<b>3,15</b>	<b>3,32</b>	<b>2,80</b>	<b>2,81</b>	<b>2,84</b>	<b>2,80</b>
<b>Costo us/ton</b>	<b>0,88</b>	<b>0,84</b>	<b>0,87</b>	<b>0,92</b>	<b>1,09</b>	<b>1,07</b>	<b>0,99</b>	<b>1,13</b>

**Tabla 6 – Valorización sistema de transporte autónomo**

<b>Autónomos</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>
<b>OPEX (US\$ mill.)</b>	<b>2,0</b>	<b>38,7</b>	<b>55,7</b>	<b>85,6</b>	<b>81,2</b>	<b>81,0</b>	<b>83,5</b>	<b>78,9</b>
Lubricantes (\$)	0,03	0,92	1,40	2,16	2,34	2,32	2,32	2,30
Neumáticos (\$)	0,11	3,3	5,0	7,7	8,3	8,2	8,2	8,2
Combustible (\$)	0,54	17,2	23,4	35,9	27,6	27,9	30,4	26,2
Mantenimiento (\$)	0,5	13,5	20,3	31,3	33,7	33,4	33,4	33,1
Costo Operador (\$)								
AHS (contrato) (\$)	0,8	3,7	5,6	8,6	9,3	9,2	9,2	9,1
<b>CAPEX (US\$ mill.)</b>	<b>16,0</b>	<b>10,2</b>	<b>6,7</b>	<b>10,7</b>	<b>2,3</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
<b>Total (US\$ mill.)</b>	<b>18,0</b>	<b>48,9</b>	<b>62,4</b>	<b>96,4</b>	<b>83,5</b>	<b>81,0</b>	<b>83,5</b>	<b>78,9</b>
<b>Costo por CAEX MUS\$</b>	<b>6,01</b>	<b>3,69</b>	<b>3,13</b>	<b>3,14</b>	<b>2,53</b>	<b>2,48</b>	<b>2,55</b>	<b>2,43</b>
<b>Costo us/ton</b>	<b>9,28</b>	<b>0,79</b>	<b>0,74</b>	<b>0,75</b>	<b>0,84</b>	<b>0,81</b>	<b>0,76</b>	<b>0,84</b>

La valorización de cada alternativa posee diferencias en que el camión autónomo requiere un CAPEX adicional al camión manual. Esto se debe principalmente a los costos asociados a la instalación requerida para convertir los camiones manuales en autónomos (retrofit) y las instalaciones requeridas para el funcionamiento del sistema (central autónoma, red de comunicaciones, despacho, etc).

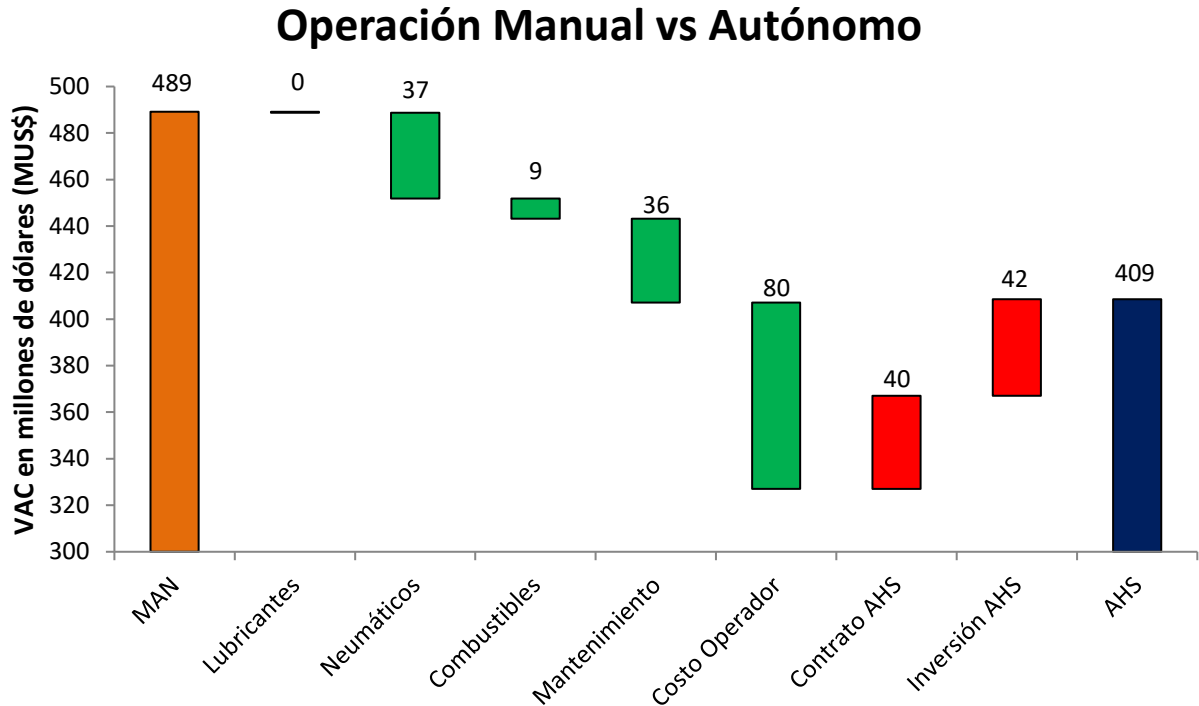
Para el análisis lo que se consideró para la tecnología manual es la no inversión requerida adicional durante los próximos años, es decir, se asume que no se requieren comprar camiones nuevos ni hacer mantenimientos mayores a la flota de transporte. Además se incorporó un aumento en el costo laboral del 2% anual según la experiencia de la división Radomiro Tomic respecto de los últimos años. El costo laboral por operador tiene gran impacto en el gasto total del sistema de transporte manual.

El costo por camión en MUS\$ por año en el caso del camión autónomo es mayor durante los primeros años debido a la infraestructura necesaria para que el sistema autónomo funcione. Este sistema es requerido tanto para 3 como para 33 camiones, por lo que, al incluir más camiones, el costo en infraestructura se reparte en cada camión y los años del proyecto y disminuye el costo por camión respecto del camión manual.

Adicionalmente, el costo por tonelada movida en el año 2026 para el caso del camión manual es 28% más alto que el costo del año 2019. Para el caso del camión autónomo, el costo por tonelada movida tiende a mantenerse en el tiempo.

## 7.4 Resultados principales

De acuerdo a lo expuesto anteriormente como objetivos y metodología, los resultados a los que se pretende llegar se pueden resumir en los siguientes:



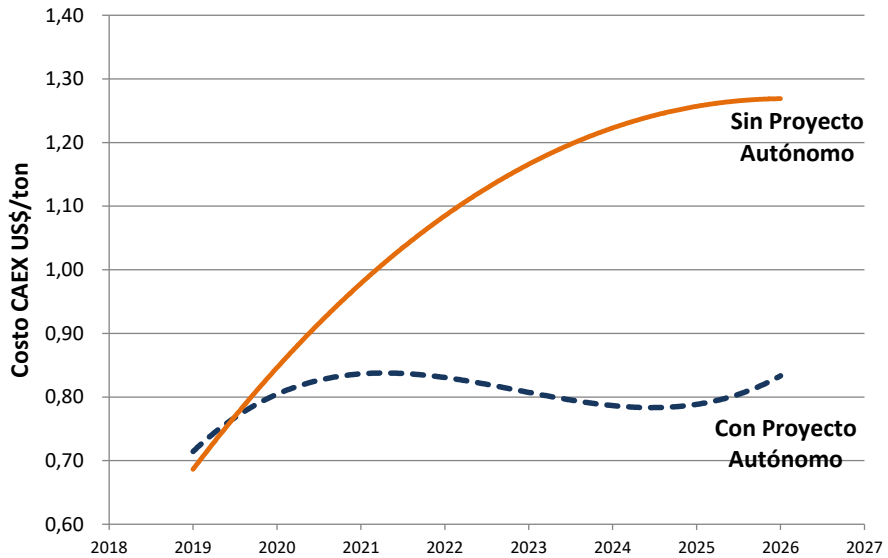
**Ilustración 38 – Gráfico de cascada de VAN de costos de tecnología manual vs autónoma**

La Ilustración 38 es una comparación del VAN de costos de ambas tecnologías incorporando cada uno de los ítems que afectan el costo directo de transporte. La comparación realizada se realizó con una tasa de descuento de 8% y además de considerar un reajuste anual del 2% en aumento al costo laboral por operador como se mencionó anteriormente.

En el gráfico es posible ver que las barras en verde son ahorros en la tecnología autónoma y las barras rojas corresponden a costos adicionales requeridos para el funcionamiento de la tecnología autónoma. Es importante destacar que el ahorro en el costo de operador está cercano a cubrir todas las inversiones y contratos necesarios para el camión autónomo.

El ahorro generado en valor presente por la tecnología autónoma está entorno a los 80 MUS\$ para los 7 años que se consideró en la evaluación del plan minero. Además, al comparar el costo de transporte de la tecnología manual actual sin proyecto autónomo y con proyecto autónomo, se proyecta que el costo sin proyecto está entorno a los 1,25 USD/ton transportada y a los 0,85 USD/ton transportada para el costo con proyecto autónomo (Ilustración 39).

### Costo CAEX Autónomo vs Manual

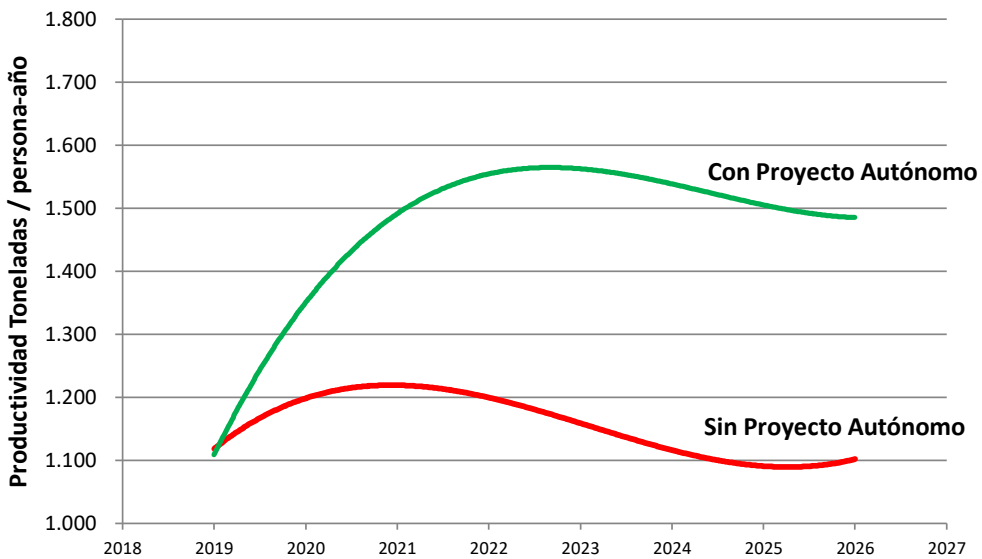


**Ilustración 39 – Comparación costo de transporte con y sin proyecto autónomo**

Por lo anterior, se puede evidenciar que la alternativa de transporte autónoma es una buena alternativa económica y que su implementación reduciría el gasto anual por año además de mantener el costo por tonelada transportada.

En línea con lo anterior, la evaluación económica no considera una mayor cantidad de camiones autónomos a implementar en faena ya que se requeriría cambiar el plan minero. Pero se tuviese la posibilidad de aumentar la cantidad de camiones autónomos, el ahorro sería aún mayor. Es decir, la escalabilidad del proyecto autónomo genera ahorros considerables en el gasto en el transporte de la mina ya que la infraestructura requerida para operar es la misma para una baja o una gran cantidad de camiones.

### Productividad DRT Con y sin Proyecto Autónomo



**Ilustración 40 – Productividad DRT con y sin Proyecto autónomo**

Otro beneficio valorizado como resultado es la productividad en caso de llevarse a cabo el proyecto. La productividad actual de la división está entorno a las 1.100 toneladas/persona-año la que, de no hacer proyecto, tiene una tendencia a mantenerse en el tiempo. En caso de realizarse el proyecto autónomo, la productividad por tonelada movida de la división aumentaría aproximadamente en un 40% respecto al caso actual.

El aumento de productividad calculado (Ilustración 40) está respecto a la cantidad de camiones consideradas en el plan. Cada camión autónomo utiliza 4.51 operadores menos que el camión manual, por lo que el aumento de productividad sería aún mayor si la cantidad de camiones autónomos fuese mayor a la obtenida.

Si bien el costo por tonelada y aumento de productividad son ahorros importantes de la tecnología autónoma respecto de la tecnología manual, cabe destacar que otra palanca importante a considerar es la exposición de menor cantidad de personas al riesgo de la operación. Para movilizar 40 camiones se necesitan aproximadamente 180 operadores, es decir, 180 personas no estarían expuestas al riesgo de operar en caso de implementar la tecnología autónoma en el plan minero.



## **8. Plan Estratégico de implementación de CAEX autónomo**

La disminución progresiva de las leyes de mineral a medida que aumenta el tiempo de explotación de la mina y el incremento de costos de las tradicionales técnicas de explotación, están forzando a las compañías mineras a buscar nuevas e innovativas formas de operar.

El descubrimiento es sólo el primer desafío para las compañías mineras. Actualmente implementar el cambio tecnológico de manera exitosa ha probado ser aún un desafío más grande (McCarthy B. , 2016).

Para los próximos años la disminución de las leyes y aumento de las distancias de transporte anticipan un aumento en los costos totales de producción de DRT y es sistema autónomo de camiones de extracción es una opción de innovación que requiere menor cantidad de infraestructura a instalar para su implementación.

Sin embargo, como se dijo anteriormente, el desafío más grande es su implementación, por lo que se hace importante considerar las barreras existentes para implementar cambios tecnológicos.

### **8.1 Desafíos en la implementación de tecnología**

Implementar un cambio tecnológico ha probado ser un desafío para las organizaciones, y la minería no ha sido la excepción. En la implementación de estos cambios tecnológicos, los siguientes factores han sido las habilidades de impacto negativo en las compañías mineras para la una implementación exitosa de las tecnologías (McCarthy R. J., 2005).

- Falta de liderazgo senior.
- Falta de un plan de comunicaciones.
- No comunicar a todos los stakeholders.
- Falta de atención al entrenamiento.
- Dejar todos los niveles del entrenamiento al proveedor.
- Diseño organizacional para acomodar las nuevas actividades y responsabilidades que requiere el nuevo sistema.
- Falta de gestión de proyectos fuerte del cliente y del proveedor.
- Dificultades técnicas con la tecnología propiamente tal.

La falta de una apropiada gestión del cambio es la raíz de los desafíos enfrentados. Las compañías mineras progresivamente reconocen la importancia de una buena gestión del cambio. Gavin Yeates, Vicepresidente de Optimización Minera de BHP Billiton, dijo lo siguiente (McCarthy B. , 2016)

“Realmente lo que nos importa es la gestión del cambio, los aspectos de personas son siempre los más desafiantes en vez de los aspectos tecnológicos. Nosotros tendemos a enfocarnos fácilmente en la tecnología. Siempre estamos enfrentándonos a desafiar a la

gente a cambiar y sus ‘no está inventado aquí’ o ‘esto aquí no funciona’; esas cosas tienden a presentar el mayor desafío para nosotros.”

## **8.2 Desafíos específicos División Radomiro Tomic**

Para el caso particular de los desafíos que tiene la División Radomiro Tomic en implementar camiones autónomos, existen algunas condiciones actuales que no permiten una implementación exitosa de la tecnología. Hoy en día las siguientes condiciones se tienen como características a considerar para la implementación de camiones autónomos:

- **Interacción manual-autónoma:** La falta de experiencia reciente y la cantidad de flota manual, hace muy difícil que la operación del camión autónomo pueda interactuar simultáneamente en sectores similares a la operación manual. Esto genera restricciones al plan minero de operación de manera aislada por parte del camión autónomo y énfasis en cierres efectivos al momento de operar.
- **Poca experiencia supervisión:** La supervisión actual de la división no tiene experiencia para operar con camiones autónomos. El plan de capacitación deberá ser riguroso además de seleccionar e incluso (si es necesario) reclutar personal idóneo que sea capaz de internalizar nuevos conocimientos de forma efectiva y rápida para lograr una curva de aprendizaje más rápida de la tecnología.
- **Estándar y cuidado de rutas:** Los estándares operacionales actuales de Radomiro Tomic permitirían una adaptación rápida pero no inmediata respecto a las condiciones del terreno. La mantención de caminos, badenes, pretilos y perfiles cobra mayor relevancia en la operación autónoma que en la manual. Además es importante de considerar que cada equipo de apoyo genera interferencias adicionales al circuito de camiones, por lo que los arreglos de caminos también deben hacerse en los momentos adecuados.
- **Interferencia y requerimientos de red de comunicaciones:** Esta es la principal limitante actual para implementar camiones autónomos en Radomiro Tomic. La limpieza del espectro de comunicaciones y la instalación de una nueva Red LTE es el requerimiento principal del proyecto.
- **Capacitación y nueva forma de operar:** Tanto el personal propio de supervisión y operadores como del personal de empresas contratistas deberán considerarse para ser capacitados e instruidos en la forma de operación autónoma. Una de las consideraciones inmediatas a tener por parte del personal, es que la operación autónoma se caracteriza por operar con menos personal dentro de la mina, por lo que los accesos son mucho más restringidos de lo que es la operación manual. El personal deberá tener presente lugares en donde no se interfiera el circuito y no entrar y salir de la mina de forma excesiva.

### 8.3 Gestión del cambio

La gestión del cambio se define como los procesos, herramientas y técnicas usadas para manejar el lado humano de un cambio de negocio para lograr capturar el valor del negocio.

Mientras que la gestión del proyecto trata con la parte técnica del cambio (recursos, presupuesto, programa y alcance), la gestión del cambio trata con el lado humano. En la gestión del cambio, personas individuales impactadas por el cambio son ayudadas durante el proceso para asegurar que apoyan el cambio y adquieran la necesidad de conocimiento y habilidades para ser exitosos durante y después del cambio – todo mientras se minimiza la resistencia.

La gestión del cambio es necesaria hoy más que en años pasados debido a que un existe un cambio fundamental en el valor de los sistemas. La cultura organizacional antigua, que confiaba en estilos de control y comando de arriba abajo está desapareciendo. En su lugar, nuevas formas de liderar empleados adquieren poder, responsabilidades y mejora continua. Así, cuando se introduce un cambio en este nuevo sistema, es natural para las personas cuestionar la nueva iniciativa y en efecto resistirla.

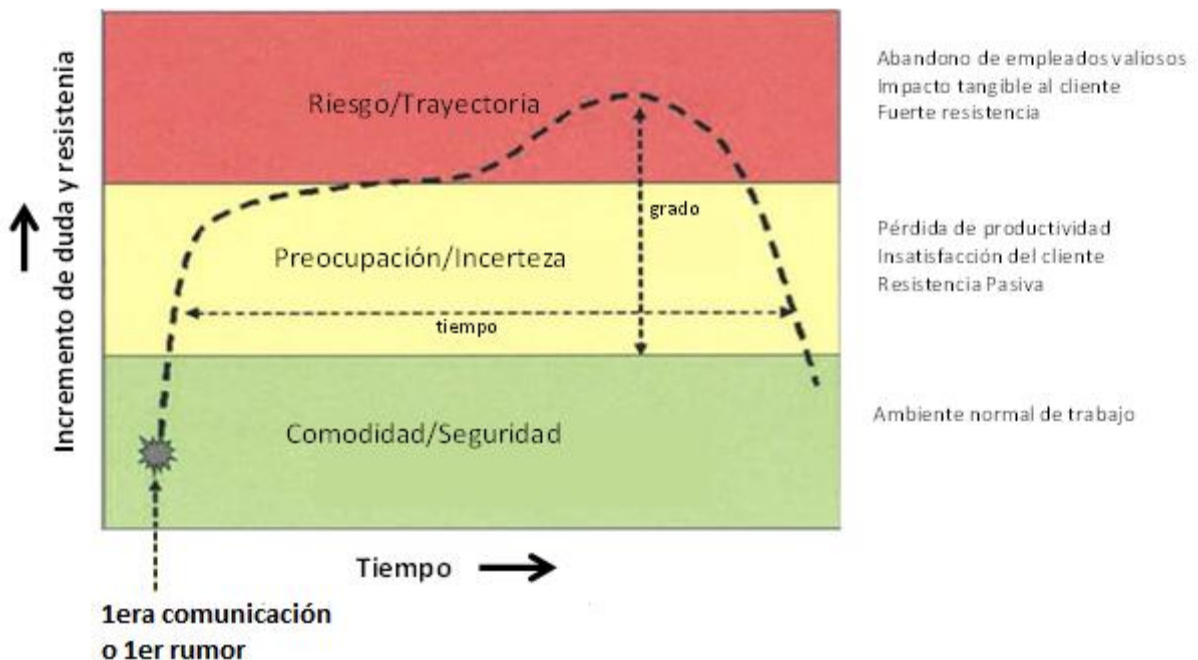


Ilustración 41 – Modelo de Riesgo/Trayectoria

Otra justificación de por qué es necesaria la gestión del cambio, es porque en la ausencia de la gestión del cambio, después de escuchar que un cambio va a impactar a un empleado, esa persona puede experimentar algo de ansiedad. Si se deja sin administrar, esto podría llevar a que el empleado ponga resistencia o peor, desconectarse de la iniciativa y buscar una salida (Ilustración 41). Incluso peor cuando un empleado que se desconecta, pero queda alrededor, poniendo un riesgo al cambio (McCarthy B. , 2016).

La cantidad de tiempo requerida para alcanzar la captura de valor del negocio va a depender tanto de la capacidad del personal para adaptarse al cambio como de la tecnología utilizada. Un punto importante a considerar es que DGM, desde el inicio de la operación de los camiones autónomos en 2008 fue una operación pionera en trabajar con esta tecnología, por lo cual su curva de aprendizaje puede haber considerado más tiempo que otras. Hoy en día, si bien se han sumado otras operaciones a nivel mundial en las cuales la flota de transporte opera en forma autónoma, en el país es la única organización que lo realiza, por lo tanto, toda su capacitación y entrenamiento debe originarse al interior de la organización.

## 8.4 Cambio organizacional

Existen muchos modelos respecto al cambio organizacional, sin embargo se ha optado por referir un modelo específico para realizar cambios en una organización minera considerando 4 fases principales (McCarthy B. , 2016).

**Tabla 7 – Marco de referencia para cambio organizacional para un cambio tecnológico minero**

<b>Fase</b>	<b>Actividades</b>
1.Preparación para el cambio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entender las razones del negocio para el cambio; establecer un sentido de urgencia.</li> <li>• Desarrollar una visión para el estado de cambio</li> <li>• Evaluar la habilidad y estado actual de la organización para cambiar</li> <li>• Seleccionar y preparar un equipo de gestión del cambio</li> <li>• Preparar un sponsor</li> </ul>
2. Planificación para el cambio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación de la gestión del cambio:               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Plan de comunicación</li> <li>○ Ruta de navegación del sponsor</li> <li>○ Plan de manejo de la resistencia</li> <li>○ Plan de coaching</li> <li>○ Plan de entrenamiento</li> </ul> </li> </ul>
3. Implementación del cambio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementar cambio</li> <li>• Medir progreso</li> <li>• Identificar brechas</li> <li>• Resolver problemas y ajustar planes</li> <li>• Administrar resistencia y reconocer detractores</li> </ul>
4. Reforzamiento y transición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recoger feedback en cambio exitoso (o fallido)</li> <li>• Auditoria de conformidad; identificar causas raíces de no-conformidades</li> <li>• Identificar e implementar acciones correctivas</li> <li>• Generar y celebrar logros a corto-plazo</li> <li>• Integrar cambio en la cultura</li> </ul>

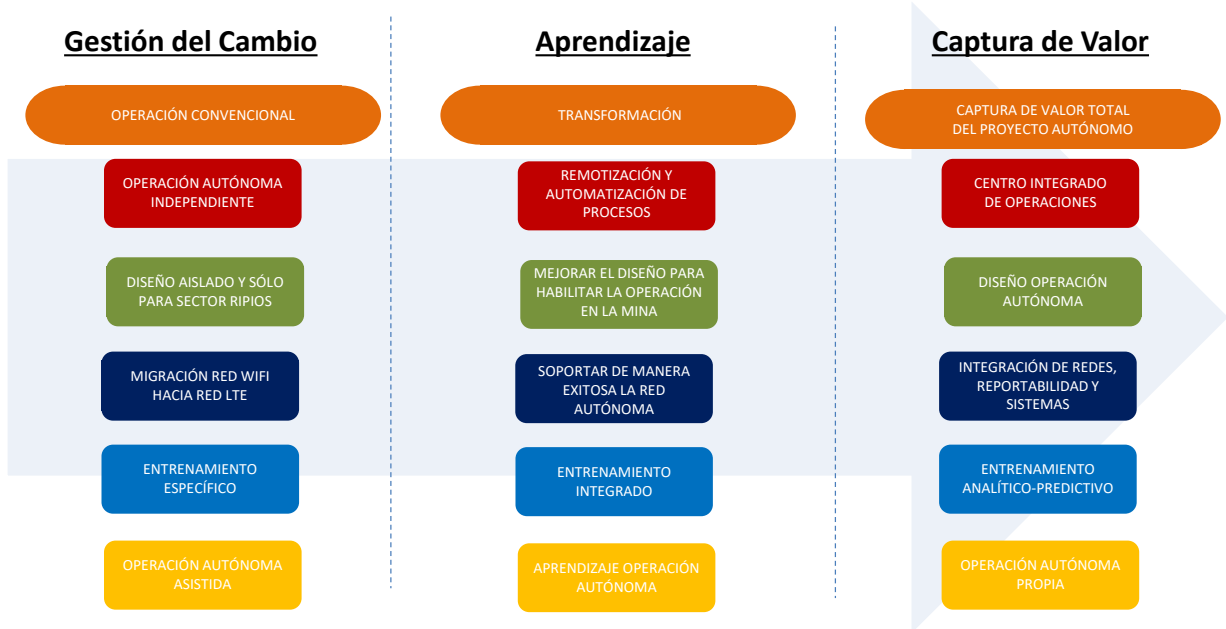
Como parte integral de cualquier proyecto de cambio es el equipo de gestión de cambio. Este equipo es en quien se delega la responsabilidad de asegurar que los principios de la gestión del cambio se adhieran.

El equipo de gestión de cambio tiene las siguientes características:

- Guiar el desarrollo de la estrategia de gestión del cambio
- Desarrollar el plan de gestión del cambio.
- Facilitar el entrenamiento y coaching de gerentes y supervisores.
- Hacer coaching y aconsejar al sponsor ejecutivo

- Monitorear el cambio para detectar señales de resistencia o oportunidades para celebrar el éxito.
- Generalmente asegurar que el marco de referencia para el cambio organizacional se siga.

A continuación, se presenta un diagrama para la implementación de camiones autónomos en DRT considerando 5 dimensiones: Operaciones mina, planificación, redes, entrenamiento y relación con el proveedor de la tecnología.



**Ilustración 42 – Plan de implementación de camiones autónomos en DRT**

El éxito de la implementación de la tecnología autónoma depende directamente de la capacidad y velocidad del personal tanto de la supervisión como de operación para capturar de forma total el valor del proyecto.

## 9. CONCLUSIÓN

Se puede evidenciar que la alternativa de transporte autónoma es una buena alternativa económica y que su implementación reduciría el gasto anual por año además de mantener el costo por tonelada transportada.

El ahorro generado en valor presente por la tecnología autónoma está entorno a los 80 MUS\$ para los 7 años que se consideró en la evaluación del plan minero. Además, al comparar el costo de transporte de la tecnología manual actual sin proyecto autónomo y con proyecto autónomo, se proyecta que el costo sin proyecto está entorno a los 1,25 USD/ton transportada y a los 0,85 USD/ton transportada para el costo con proyecto autónomo.

El uso mayor por cada camión de la tecnología autónoma hace que la necesidad de camiones sea menor que la tecnología convencional. Esto marca diferencias importantes en el gasto global de cada alternativa.

Para lograr de manera exitosa la captura valor total del proyecto de camiones autónomos, el desafío más grande es su implementación, por lo que se hace importante considerar las barreras existentes para implementar cambios tecnológicos.

La aplicación exitosa de la autonomía tiene características tanto de comunicaciones como de ordenamiento de las instalaciones y el personal requerido, por lo que hoy en día la División Radomiro Tomic no tiene las características necesarias para cumplir de una manera rápida la implementación de la tecnología autónoma.

La red de comunicaciones wifi hoy presente debe migrar a una red de comunicaciones tipo LTE y que permita el funcionamiento de los camiones además de su escalabilidad para incorporar un posible crecimiento de la flota de camiones autónomos y más aún su integración con otros sistemas de gestión como, por ejemplo, un centro integrado de operaciones.

En cuanto a velocidad y performance de los camiones dependerá de las condiciones del layout mina. Por lo anterior, es requisito fundamental para lograr un óptimo desempeño el cumplir con los requisitos y mantener y a la vez actualizar el layout mina en el sistema.

El éxito de la aplicación de camiones autónomos en División Radomiro Tomic necesita considerar las barreras existentes para implementar cambios tecnológicos y una gestión de cambio adecuada para. El éxito de la implementación de la tecnología autónoma depende directamente de la capacidad y velocidad del personal tanto de la supervisión como de operación para capturar de forma total el valor del proyecto.

La productividad actual de la división está entorno a las 1.100 toneladas/persona-año la que, de no hacer proyecto, tiene una tendencia a mantenerse en el tiempo. En caso de realizarse el proyecto autónomo, la productividad por tonelada movida de la división aumentaría aproximadamente en un 40% respecto al caso actual.

El aumento de productividad es un valor agregado de la implementación de la tecnología al tener una menor necesidad de personal para la operación. A mayor escala, mayor es el aporte en productividad.

Otra palanca importante a considerar es la exposición de menor cantidad de personas al riesgo de la operación. Para movilizar 40 camiones se necesitan aproximadamente 180 operadores, es decir, 180 personas no estarían expuestas al riesgo de operar en caso de implementar la tecnología autónoma en el plan minero.

La escalabilidad del proyecto generaría un mayor ahorro y una disminución en el costo de transporte al generar la economía de escala y el aprovechamiento de la infraestructura necesaria para la operación en más equipos.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Brundett, S. (2014). *Industry Analysis of Autonomous Mine Haul Truck Commercialization*. Simon Fraser University.
- Canelo, A., & Aguilera, C. (2018). 10 años de operación autónoma en División Gabriela Mistral, Codelco. Presente y Futuro. *XV Congreso Internacional Expomin*.
- CodelcoTech. (2018). *Tecnología AHS y escenarios de evaluación de Proyecto de camiones autónomos*.
- División Gabriela Mistral. (2017). *Gestión camión autónomo*.
- Fundación Chile. (2016). *Desde el cobre a la Innovación, Roadmap Tecnológico 2015-2035*. Santiago: Fundación Chile.
- Gölbasi, O., & Dagdelen, K. (2017). *Equipment Replacement Analysis of Manual Trucks with Autonomous Truck Technology in Open Pit Mines*.
- Landerretche, O. (2018). *Estrategia de Codelco para implementar una iniciativa responsable de minerales*.
- Magri Rivera, J. R. (2014). *Efectos de la Incorporación de Tecnologías Autónomas en el Diseño y la Planificación Minera*. Universidad de Chile, Santiago.
- McCarthy, B. (2016). *Successfully Implementing Technology-driven Change in the Mining Environment*. Brisbane.
- McCarthy, R. J. (2005). *When the right answer is not enough - Developing a change management service for the mining industry*. MBA thesis, University of Athabasca, Edmonton.
- MineStar Command for Hauling. (2018). *Autonomous Mining Design Parameters and System Considerations*. Caterpillar.
- Nebot, E. M. (2006). Surface Mining: Main Research Issues for Autonomous Operations. En *12vo Simposio Internacional ISRR* (págs. 268-280). Springer.
- Piñeiro, I., & Osorio, V. (2015). *Análisis Sistema de Transporte Autónomo (AHS) en División Gabriela Mistral (DGM)*.
- Rubilar, O. (2018). *Sistemas Autónomos Camiones*. *Convención Anual Instituto de Ingenieros de Minas de Chile*. Antofagasta.
- Tellus. (2018). *Informe Proyecto de Implementación de Sistema de Camiones Autónomos*.