

**Evaluación de las condiciones de seguridad en el transporte
subterráneo de mineral en la mina El Teniente y propuestas de
mejora tecnológica y operativa.**

Trabajo de Proyecto de Título para Optar al Título de Ingeniero Civil En Minas

Estudiante: Cristián Fabián Barrueto Catalán

Profesor Guía: Mg Luis de la Torre Urzúa

Santiago – Chile 2025

© Cristián Fabián Barrueto Catalán

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

Santiago, Chile.

2025

HOJA DE CALIFICACIÓN

En Santiago, el ____ del _____, los abajo firmantes dejan constancia que el estudiante _____ de la carrera Ingeniería Civil en Minas han aprobado el proyecto de título correspondiente, para optar al título de Ingeniero Civil en Minas con una nota de _____.

Luis de la Torre

Profesor Guía

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres, cuyo amor y confianza incondicional han sido un pilar fundamental en mi camino, creyendo en mis capacidades incluso más de lo que yo mismo lo he hecho. También a mis hermanas, sobrinos y sobrinas, con la esperanza de ser para ellos un referente y una inspiración en la búsqueda de sus propios sueños.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesor tutor, cuya paciencia y guía fueron fundamentales para el desarrollo y la conclusión de este proyecto. Asimismo, a mi familia, por su apoyo incondicional y por creer siempre en mí y en mi espíritu de superación.

Resumen

El presente proyecto de título tiene como objetivo evaluar las condiciones de seguridad en el transporte subterráneo de mineral en la mina El Teniente, la operación subterránea de cobre más grande del mundo, perteneciente a CODELCO. En este contexto, se identifican los principales riesgos asociados al uso de equipos como los cargadores frontales de bajo perfil (LHD) y camiones mineros en espacios confinados, los cuales incluyen colisiones, vuelcos, exposición a gases tóxicos y errores operacionales.

Mediante un análisis teórico basado en fuentes oficiales, normativa nacional e internacional (DS N°132 e ISO 45001:2018), así como herramientas de análisis de riesgos como el diagrama de Ishikawa, se realiza un diagnóstico integral de la situación actual. Asimismo, se comparan distintas tecnologías de transporte subterráneo y se estudian casos reales de accidentabilidad, con el fin de proponer mejoras operativas y tecnológicas.

Entre las propuestas se incluyen la incorporación de sensores de proximidad, monitoreo en tiempo real, optimización de la ventilación, capacitación continua del personal, mantenimiento predictivo y mejoras en la infraestructura de la mina. Estas medidas buscan reducir la accidentabilidad, proteger la vida de los trabajadores y aumentar la eficiencia del proceso de transporte de mineral.

El estudio se enmarca dentro de una investigación de carácter teórico, sin acceso a datos internos de la operación real, por lo que sus resultados representan una base de referencia para futuras implementaciones prácticas. En definitiva, este proyecto releva la importancia de fortalecer la cultura de seguridad en minería subterránea mediante una gestión integral del riesgo.

Abstract

This thesis project aims to evaluate the safety conditions of underground ore transportation at El Teniente mine, the largest underground copper operation in the world, owned by CODELCO. In this context, the main risks associated with the use of equipment such as Load-Haul-Dump (LHD) vehicles and underground mining trucks in confined spaces are identified. These include collisions, rollovers, exposure to toxic gases, and operational errors.

A theoretical analysis was conducted based on official sources, national and international regulations (DS No. 132 and ISO 45001:2018), and risk assessment tools such as the Ishikawa diagram. A comprehensive diagnosis of the current situation was developed, and various underground transportation technologies were compared alongside real accident case studies, aiming to propose both operational and technological improvements.

The proposed solutions include the incorporation of proximity sensors, real-time monitoring systems, ventilation optimization, continuous training for personnel, predictive maintenance, and infrastructure upgrades. These measures seek to reduce accident rates, protect worker safety, and improve the overall efficiency of underground ore transportation.

This study is theoretical in nature, given the limited access to internal operational data. Therefore, the results provide a reference framework for future practical implementation. Ultimately, the project emphasizes the importance of strengthening the safety culture in underground mining through comprehensive risk management.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	3
Agradecimientos	4
Resumen	5
Abstract	7
Índice de Tablas	10
Índice de Ecuación	10
Índice de Gráficos	11
Índice de Ilustraciones	11
Capítulo I	12
1 Introducción	12
1.1 Antecedentes	14
1.2 Motivación	16
1.3 Descripción del proyecto	17
1.4 Alcances y Delimitaciones	18
1.5 Marco teórico	20
1.5.1 Ubicación del Yacimiento	20
1.5.2 Método de Explotación	23
1.5.3 “El Teniente” y el uso del “Panel Caving”	26
1.5.4 Equipos de Carguío y Transporte en Minería Subterránea	27
1.5.5. Historia y Desarrollo de los LHD	27
1.5.6 Seguridad en el Transporte de Mineral	28
1.5.7 Contribución del Panel Caving a la Minería Chilena.	28
Capítulo II	29
2 Objetivos	29
2.1 Objetivo General	29
2.2 Objetivos Específicos.	29
Capítulo III	30
3 Metodología del Trabajo	30
3.1 Antecedentes	30
3.2 Diagnóstico de la situación actual	31
3.3 Seguridad	39
3.4 Extracto del reglamento de seguridad Minera:	40
3.4.1 Extracto de la Normativa ISO 45001:2018	42
3.4.2 Descripción de los puntos clave de la Normativa ISO 45001	42
3.5 Peligros con equipos LHD	44
3.6 Accidentabilidad con equipos LHD	45
Capítulo IV	46
4 Identificación de los peligros y evaluación de riesgos en el proceso de transporte, minera “El Teniente”	46
4.1 Ambientes	48
4.2 Equipos	49
4.3 Procedimientos asociados al método de explotación	50
4.4 Personas	52

4.5 Operación de transporte	54
4.6 Listado de Peligros vs Riesgos mineros en carguío y transporte subterráneo	59
4.7 Procedimientos asociados al método de explotación	60
Capítulo V	64
5 Comparación de equipos actuales	64
Caterpillar R1700	65
Caterpillar R2900XE	67
Epiroc ST14	69
Komatsu LHD WA900	71
Sanvik LH514	73
Sandvik LH517	75
Caterpillar AD45B	78
Minetruck MT6020	80
Minetruck MT536B	82
Komatsu HD785-7	84
Paus PMKM 8030	86
Sandvik TH551i	87
Sandvik TH665B	89
Capítulo VI	98
6 Propuesta de mejoras tecnológicas y operativas	98
6.1 Incorporación de Tecnología Avanzada basado en Roadmap Minería 4.0	98
6.2 Capacitación y Entrenamiento Continuo	99
6.3 Mejoras en la Infraestructura de la Mina	99
6.4 Sistemas de Mantenimiento Predictivo	99
6.5 Optimización de la Ventilación	100
6.6 Supervisión y Evaluación Continua	100
6.7 Propuesta de Innovaciones Futuras	101
Capítulo VII	105
7 Conclusiones y Recomendaciones	105
Bibliografía	107
Anexos	112
Casos reales de incidentes	113
Conceptos:	115

Índice de Tablas

Tabla 1 Colisiones	53
Tabla 2 Listado de Peligros vs Riesgos	59
Tabla 3 Matriz de Accidentes Potenciales, Soluciones y Nivel de Cumplimiento Legal	62
Tabla 4 Matriz de Accidentes Potenciales, Soluciones y Nivel de Cumplimiento Legal	63
Tabla 5 Características técnicas de equipos utilizados en el transporte chileno minero subterráneo	92
Tabla 6 Estadísticas en Minería Chilena de Accidentes Laborales con y sin Consecuencia Fatal	112
Tabla 7 Resumen Estadístico de Accidentes Mineros Chilenos	112

Índice de Ecuación

Ecuación 1	31
------------	----

Índice de Gráficos

Gráfico 1 Promedio por tipo de accidente Irwin Miller, 2021	31
Gráfico 2 Fatalidades en Transporte Minero Chileno	36

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Principales Faenas Mineras Región Libertador Bernardo O'Higgins	20
Ilustración 2 Principales Faenas Mineras, Región L. Bernardo O.	20
Ilustración 3 Catastro de Concesiones Mineras.....	21
Ilustración 4 Concesiones de la Explotación El Teniente	22
Ilustración 5 Método de Panel Caving en mina "El Teniente"	24
Ilustración 6 Número de trabajadores por división en CODELCO	33
Ilustración 7 Jerarquía del Control	39
Ilustración 8 Diagrama de Ishikawa	47
Ilustración 9 Caterpillar R1700	65
Ilustración 10 Caterpillar R2900XE	67
Ilustración 11 Epiroc ST14	69
Ilustración 12 Komatsu LHD WA900.....	71
Ilustración 13 Sandvik LH514	73
Ilustración 14 Sandvik LH517	75
Ilustración 15 Caterpillar AD45B.....	78
Ilustración 16 Atlas Copco Minetruck MT6020.....	80
Ilustración 17 Epiroc Minetruck MT436B	82
Ilustración 18 Komatsu HD785-7	84
Ilustración 19 Paus PMKM8030	86
Ilustración 20 Sandvik Th551i	87
Ilustración 21 Sandvik TH665B	89
Ilustración 22 Plan de Transición minero en Project Libre	102

1 Introducción

La minería subterránea ha sido, durante décadas, una de las principales formas de extracción de minerales valiosos. A lo largo de este tiempo, la industria ha incorporado importantes avances tecnológicos y mejoras en los métodos de trabajo, lo que ha permitido que las operaciones en entornos subterráneos sean más eficientes y seguras (P. Castro, 2018). No obstante, esta actividad sigue enfrentando riesgos significativos debido a las condiciones adversas en las que se desarrolla. Factores como la ausencia de luz natural, la generación de polvo, la presencia de gases tóxicos y el uso de maquinaria pesada, como los cargadores frontales de bajo perfil (LHD, por sus siglas en inglés), en espacios reducidos representan desafíos constantes para los trabajadores (Pérez, 2020). Estos riesgos, combinados con las exigencias físicas de la labor, hacen de la seguridad un aspecto central en las operaciones mineras subterráneas (Martínez, 2017).

En este contexto, el transporte de material dentro de la mina desempeña un rol crítico en el proceso productivo. Esta actividad es clave para trasladar el mineral extraído desde las zonas de trabajo hasta la planta de procesamiento o la superficie. La incorporación de los LHD ha transformado significativamente esta tarea, aportando mayor movilidad y eficiencia en el transporte de mineral (López et al., 2019). Sin embargo, la operación de estos equipos también implica riesgos

importantes, tales como vuelcos, colisiones y accidentes relacionados con la limitada visibilidad en espacios confinados (Silva, 2021).

Un sistema de transporte que no sea seguro y eficiente puede generar problemas que afecten tanto la productividad como la seguridad del personal. Por lo tanto, es fundamental garantizar que los cargadores LHD funcionen de manera óptima y con mínimas fallas, a fin de evitar retrasos operativos y reducir los riesgos asociados a su operación (Hernández, 2016).

1.1 Antecedentes

La mina El Teniente, ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, es la mayor mina subterránea de cobre del mundo y una de las más importantes a nivel global. Con más de un siglo de operación, esta faena ha destacado por su complejidad técnica y su capacidad para adaptarse a las innovaciones tecnológicas en la industria minera. El proceso de transporte de material en El Teniente es fundamental para la operación, ya que debe trasladar grandes volúmenes de mineral desde los puntos de extracción hasta las plantas de procesamiento, a través de una vasta red de túneles subterráneos. (CODELCO, 2024).

El Teniente dispone de una vasta red de túneles y galerías que supera los 3.000 kilómetros, lo que hace del transporte de material una operación crítica para la continuidad y eficiencia del proceso productivo (O. Araneda, 2020).

La minería subterránea en Chile enfrenta múltiples desafíos relacionados con las condiciones adversas del entorno, como la ausencia de luz natural, la generación de polvo, la acumulación de gases tóxicos y el manejo de maquinaria pesada en espacios confinados. Estas condiciones aumentan significativamente los riesgos operacionales y requieren de estrictas medidas de seguridad para proteger la vida de los trabajadores (Sernageomin, Informe Nacional de Seguridad Minera, 2022).

En particular, el transporte subterráneo de mineral es una de las operaciones más complejas y riesgosas, ya que implica la interacción constante entre equipos de gran tamaño, como los cargadores frontales de bajo perfil (LHD) y camiones mineros, y los operadores humanos. Este tipo de operación está asociado a riesgos de colisiones, vuelcos y accidentes debido a problemas de visibilidad y maniobrabilidad (J. Fuentes, 2019).

En Chile, la seguridad minera ha sido una preocupación prioritaria tras incidentes emblemáticos como el rescate de los 33 mineros de la mina San José en 2010, lo que ha impulsado una mayor fiscalización y la adopción de estándares internacionales en materia de seguridad laboral (Minería, 2023). En este contexto, realizar un análisis exhaustivo de los riesgos asociados al transporte subterráneo es esencial para implementar mejoras operativas y tecnológicas que no solo aumenten la eficiencia del proceso, sino que también reduzcan la tasa de accidentes y protejan a los trabajadores.

1.2 Motivación

La seguridad en la minería es un tema de creciente relevancia a nivel mundial, especialmente en Chile, donde esta actividad constituye uno de los pilares fundamentales de la economía nacional. Durante los últimos años, la minería subterránea ha experimentado una evolución significativa con la incorporación de tecnologías avanzadas que han mejorado tanto la eficiencia como la seguridad de las operaciones. No obstante, en minas de gran envergadura y complejidad como El Teniente, persisten desafíos importantes, particularmente en la gestión del transporte de material, donde los riesgos asociados pueden derivar en accidentes graves y pérdidas económicas significativas (Sernageomin, Informe Nacional de Seguridad Minera, 2022).

Este proyecto tiene como motivación principal la necesidad de analizar y fortalecer la seguridad en las operaciones de transporte subterráneo, con un enfoque en la identificación de las áreas críticas donde los riesgos son más elevados. Asimismo, busca proponer medidas correctivas y mejoras tecnológicas que puedan ser implementadas de manera efectiva para mitigar estos riesgos. Reducir los accidentes no solo protege la vida y la integridad de los trabajadores, sino que también contribuye a garantizar la continuidad operacional y maximizar la productividad de la faena. Este enfoque integral resalta la importancia de priorizar la seguridad como un componente clave del desarrollo sostenible en la minería chilena.

1.3 Descripción del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo analizar las condiciones de seguridad en el proceso de transporte de material en la mina subterránea “El Teniente”, con el fin de identificar riesgos críticos y proponer mejoras operativas y tecnológicas que contribuyan a la reducción de accidentes y a la optimización del proceso. Este análisis se centrará en evaluar las condiciones actuales de los equipos utilizados, los procedimientos operativos, y las medidas de seguridad implementadas, con especial atención al uso de cargadores frontales de bajo perfil (LHD) y otros equipos de transporte subterráneo.

Como parte del proyecto, se llevará a cabo un diagnóstico exhaustivo para identificar las principales áreas de riesgo. Este diagnóstico abarcará una revisión detallada de los equipos utilizados en el transporte de material, incluyendo LHD, camiones de bajo perfil y trenes subterráneos, evaluando su desempeño, condiciones operativas y los riesgos asociados. También se analizarán las medidas de seguridad aplicadas, considerando los registros de accidentes y las condiciones laborales actuales.

Además, se estudiará la incorporación de tecnologías disponibles en el mercado que puedan mejorar la seguridad y eficiencia del proceso, así como la optimización de los procedimientos existentes.

Las propuestas de mejora incluirán aspectos tecnológicos y operativos, con el objetivo de reducir los accidentes asociados con la operación de los LHD y otros equipos, y aumentar la productividad del transporte subterráneo de material en la mina El Teniente.

1.4 Alcances y Delimitaciones

El presente estudio es de carácter teórico y se fundamenta en la recopilación y análisis de antecedentes provenientes de diversos estudios y fuentes públicas. Dado que no se cuenta con acceso a información completa y detallada de CODELCO, es importante reconocer que muchas empresas mineras, incluida CODELCO, mantienen una parte considerable de sus datos como información confidencial.

En este marco, el alcance del estudio incluye un diagnóstico general de la situación actual del transporte de material en la mina El Teniente, enfocado en la evaluación de la flota de equipos utilizados, su desempeño, compatibilidad operativa y las medidas de seguridad asociadas. Este diagnóstico se realizará con base en datos disponibles y referencias relacionadas con la operación de minas subterráneas en contextos similares.

A partir del análisis, se propondrán mejoras operativas y tecnológicas, o incluso un rediseño parcial del proceso de transporte, con el objetivo de reducir la accidentabilidad y fatalidad en las operaciones subterráneas. Sin embargo, las

recomendaciones estarán delimitadas por la información disponible y no incluirán validaciones prácticas o pruebas directas en la operación real de la mina El Teniente. Por tanto, los resultados deberán considerarse como un aporte teórico que podría ser adaptado y complementado con datos internos en futuras implementaciones.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Ubicación del Yacimiento

La operación minera de “El Teniente” perteneciente a la compañía estatal CODELCO, es un yacimiento de cobre subterráneo, catalogado como el más grande del planeta. Este yacimiento se encuentra ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador General. (CODELCO, 2024) en las coordenadas 6.227.516 m Norte y 372.188 m Sur, sistema UTM 19S, WGS 84. (34°05'39"S 70°21'03"W). Comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. (SERNAGEOMIN, Anuario de la Minería de Chile, 2023).

Ilustración 1 Principales Faenas Mineras Región Libertador Bernardo O'Higgins



Fuente: (SERNAGEOMIN, Anuario de la Minería de Chile, 2023)

Ilustración 2 Coordenadas UTM El Teniente

Descripción de principales faenas mineras y yacimientos en explotación de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

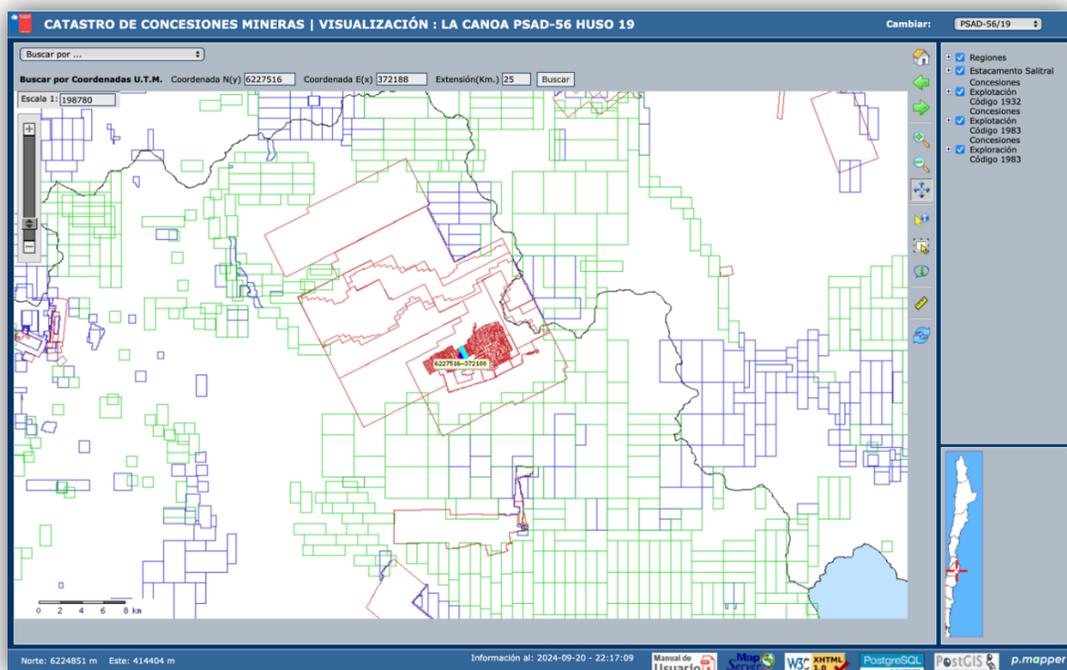
ID	Nombre Empresa	Nombre Yacimiento	Recurso Principal	UTM Norte	UTM Este
1	Codelco Chile División	El Teniente	Cobre, Molibdeno, Ácido Sulfúrico	6.227.516	372.188
2	Minera Valle Central S.A.	Planta Molibdeno	Cobre, Molibdeno	6.210.565	344.889

Fuente: Sernageomin

Fuente: (SERNAGEOMIN, Anuario de la Minería de Chile, 2023)

Al encontrar las coordenadas UTM que nos muestra en el Anuario de la minería de Chile, podemos dirigirnos a la URL <https://catastro.sernageomin.cl> en el costado superior izquierdo buscamos por las coordenadas UTM y nos despliega la VI Región, donde se ubica la faena, campamentos, etc, tal como lo muestra la ilustración 3.

Ilustración 3 Catastro de Concesiones Mineras



Fuente: (SERNAGEOMIN, Catastro Sernageomin, 2024)

Luego, al seleccionar el sitio de la faena, nos despliega un listado de concesiones asociadas a la Mina El Teniente, con diferentes ROL, N° de inscripción y año; según lo indica la ilustración 5

Ilustración 4 Concesiones de la Explotación El Teniente

Resultado Consulta												
Señor usuario Máximo de registros a desplegar por consulta: 1000.												
Regiones		Reg	Nombre Region									
1	06	Libertador General Bernardo O Higgins										
Concesiones Explotación Código 1932												
	Rol	Concesión	Rut Titular	Nro. Div	Nombre Titular	Situación	Fojas	Nro. Inscripción	Año de Inscripción	Ciudad	Tipo de Registro	
1	06102-0002-8	SOLDADO	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0001 V	0002	1898	RANCAGUA	PROPIEDAD	
2	06102-0005-2	SARGENTO	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0004	0005	1898	RANCAGUA	PROPIEDAD	
3	06102-0006-0	CENTINELA	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0005	0006	1898	RANCAGUA	PROPIEDAD	
4	06102-0007-9	SOLDADO SEGUNDO	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0002	0002	1906	RANCAGUA	PROPIEDAD	
5	06102-0012-5	CABO PRIMERO	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0007	0007	1906	RANCAGUA	PROPIEDAD	
6	06102-0051-6	ANACONDA SEGUNDA	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0 V	0029	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
7	06102-0076-1	BRIGIDA PRIMERA	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0071	0054	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
8	06102-0197-0	LEXINGTON	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0229 V	0175	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
9	06102-0198-9	LEXINGTON SEGUNDO	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0231	0176	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
10	06102-0199-7	LEXINGTON TERCERO	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0232	0177	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
11	06102-0229-2	VICTORIA TERCERA	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0270 V	0207	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
12	06102-0231-4	WASHOE SEGUNDA	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0273	0209	1930	RANCAGUA	PROPIEDAD	
13	06102-0373-6	BRADEN 1/465	061704000-K	4	CODELCO CHILE DIV EL TENIENTE	CONSTITUIDA	0053	0005	1958	RANCAGUA	PROPIEDAD	

Fuente: (SERNAGEOMIN, Catastro Sernageomin, 2024)

Esta ubicación estratégica permite la explotación de grandes reservas de cobre, siendo una fuente clave para la economía chilena y global. El portal de catastro minero de SERNAGEOMIN detalla las concesiones asociadas al yacimiento, como roles, inscripciones y años.

1.5.2 Método de Explotación

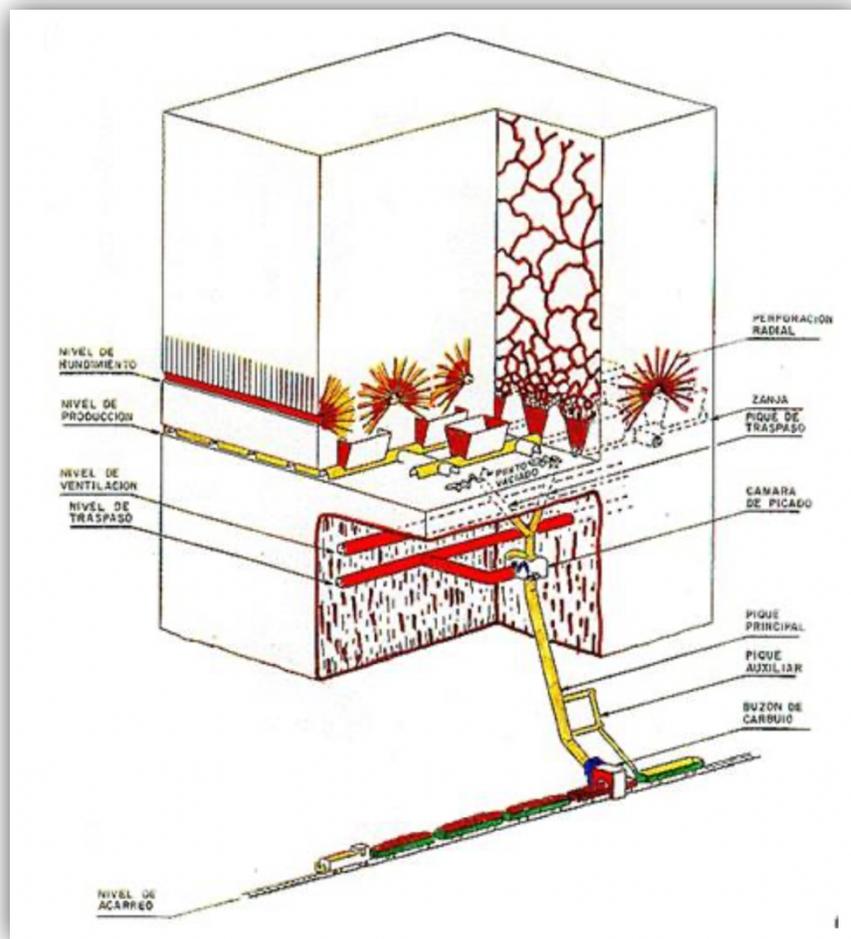
Cada yacimiento requiere un modelo específico de excavaciones para su extracción, basado en su naturaleza y factores técnico, económicos y geológicos. El método de explotación debe ser eficiente, sostenible y económicamente viable, considerando aspectos como la potencia, forma y extensión del depósito, distribución de la mineralización, propiedades geomecánicas y regulaciones. La mina subterránea consiste en una red de pozos, galerías y otras infraestructuras que permiten la extracción a profundidad, inaccesible por métodos a cielo abierto. El diseño de la explotación incluye aspectos como recuperación, dilución, seguridad, costos, rentabilidad y estimaciones de producción. (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2019).

El proceso de minería subterránea implica diversas fases, como la perforación, tronadura (voladura), carguío y transporte del material. Las galerías o túneles pueden construirse de forma horizontal (niveles) o vertical (piques o chimeneas), según la configuración del yacimiento. Existen distintos métodos de explotación subterránea, como el "Block Caving", "Cut and Fill", y "Room and Pillar", cada uno diseñado para optimizar la recuperación del mineral y minimizar el riesgo de colapso.

En El Teniente, el método de explotación subterránea predominante es el panel caving, implementado desde la década de 1980. Este método pertenece a los sistemas de minería por hundimiento, diseñados para yacimientos de baja ley y alta

continuidad geológica (CODELCO, Dirección de Comunicaciones Gerencia de sustentabilidad y asuntos externos, 2011).

Ilustración 5 Método de Panel Caving en mina "El Teniente"



Fuente: (Mena, 2024)

El panel caving utiliza la gravedad para inducir el colapso controlado de bloques de roca, facilitando la extracción del mineral. Este enfoque permite altos niveles de eficiencia y productividad, pero también implica desafíos significativos en términos de seguridad y manejo de dilución del mineral. Entre las fases clave se encuentran:

- **Preparación de niveles de extracción:** Construcción de túneles para recoger el mineral colapsado.
- **Derrumbe inducido:** Tronaduras controladas que desencadenan el colapso de bloques de roca.
- **Extracción:** Carguío y transporte del mineral fragmentado hacia la planta de procesamiento (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, 2019).
- **Teoría aplicada:** El principio de hundimiento gravitacional subyacente al panel caving se basa en las propiedades mecánicas de las rocas y su interacción con fuerzas naturales, optimizando recursos y minimizando costos operativos (Laubscher, 2000).

1.5.3 “El Teniente” y el uso del “Panel Caving”

La operación minera “El teniente” centra sus funciones en la explotación de Cobre (Cu) en minería subterránea. El método de explotación se realiza a través del hundimiento gravitacional o “panel caving”, en operación desde la década del ochenta. (revista minera el teniente, 2011). El panel caving es un método de minería subterránea que se utiliza para la extracción de grandes volúmenes de mineral en yacimientos de baja ley y alta continuidad geológica. Se clasifica dentro de los métodos de caving, junto con el block caving, y su principio básico es inducir el colapso controlado de una sección del yacimiento, permitiendo que la gravedad haga el trabajo de mover el mineral roto hacia puntos de extracción localizados en niveles inferiores de la mina. (CODELCO, Dirección de Comunicaciones Gerencia de sustentabilidad y asuntos externos, 2011) Este tipo de minería conlleva una serie de riesgos específicos, especialmente en lo que respecta a la seguridad de los trabajadores y el transporte dentro de los túneles.

El método panel caving ha permitido que El Teniente mantenga su competitividad a nivel global, optimizando costos operacionales y maximizando la recuperación de mineral. Según CODELCO (2011), este enfoque ha sido crucial para explotar reservas profundas que de otro modo serían inaccesibles, consolidando a “El Teniente” como un referente en minería subterránea sostenible.

1.5.4 Equipos de Carguío y Transporte en Minería Subterránea

En la minería subterránea, los equipos deben ser compactos, robustos y eficientes, dadas las limitaciones de espacio y las condiciones adversas de operación. En “El Teniente”, los LHD (Load-Haul-Dump) juegan un papel central en el proceso de transporte de mineral. Entre los modelos más utilizados están:

- 1) Caterpillar R1700 y R13000H
- 2) Sandvik LH514 y LH517
- 3) Epiroc ST14

Estos equipos están diseñados para operar en túneles estrechos y manipular cargas pesadas con altos estándares de seguridad. Por otro lado, los camiones subterráneos, como el Sandvik TH663i y el Epiroc Minetruck MT6020, aseguran un transporte eficiente en trayectos largos dentro de la mina (COCHILCO, 2021).

1.5.5. Historia y Desarrollo de los LHD

Los LHD surgieron en la década de 1950 como una respuesta a las necesidades específicas de la minería subterránea. Según (Mäkelä, 2020), su desarrollo se centró en aumentar la eficiencia operativa y minimizar los riesgos para los trabajadores. Hoy en día, estos equipos incorporan tecnologías avanzadas, como sistemas de automatización y monitoreo remoto, mejorando tanto la seguridad como la productividad.

Teoría aplicada: La evolución de los LHD refleja la teoría del progreso técnico, donde las innovaciones tecnológicas responden a las necesidades industriales de incrementar la seguridad y la eficiencia en condiciones extremas (Rosenberg, 1982).

1.5.6 Seguridad en el Transporte de Mineral

El transporte de mineral es una de las operaciones más riesgosas en la minería subterránea debido a la interacción constante entre maquinaria pesada y operadores en espacios confinados. En Chile, los incidentes asociados al transporte representan una proporción significativa de los accidentes mineros (SERNAGEOMIN, Anuario de la Minería de Chile, 2023). La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real y el uso de vehículos automatizados son estrategias clave para mitigar estos riesgos.

Teoría aplicada: La gestión de riesgos en minería subterránea está fundamentada en la teoría de sistemas sociotécnicos, que resalta la interacción entre tecnologías, personas y el entorno operativo (Sommerville, 2011).

1.5.7 Contribución del Panel Caving a la Minería Chilena.

El modelo de explotación utilizado en “El Teniente” ha servido como referencia para otras operaciones mineras en Chile y el mundo. Según (COCHILCO, 2021), la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas operativas eficientes ha permitido que Chile mantenga su liderazgo en la producción de cobre, con un enfoque cada vez mayor en la sostenibilidad y la seguridad laboral.

2 Objetivos

El transporte de material en la minería subterránea, como en la mina El Teniente, es crítico tanto para la seguridad como para la eficiencia operativa. A pesar de las mejoras tecnológicas, los accidentes en este proceso siguen siendo un desafío importante.

2.1 Objetivo General

Evaluar las condiciones de seguridad en el proceso de transporte de material en la mina subterránea El Teniente y proponer mejoras operativas que contribuyan a la reducción de accidentes y a la optimización de la operación.

2.2 Objetivos Específicos.

- Identificar los principales riesgos y fallos en las medidas de seguridad aplicadas en el proceso de transporte.
- Comparar las tecnologías de transporte subterráneo disponibles en el mercado y su impacto en la seguridad.
- Proponer mejoras tecnológicas y operativas para reducir los accidentes y aumentar la eficiencia del transporte de material.

3 Metodología del Trabajo

Para comenzar a desarrollar el contenido a exponer, se debe poner en contexto de qué método de extracción se usa en mina “El Teniente”, sistema de trabajo, equipos utilizados, etc.

3.1 Antecedentes

La seguridad es el estado en el que los riesgos están controlados, minimizando la posibilidad de accidentes o daños a las personas, el medio ambiente y los bienes materiales. Se refiere al conjunto de medidas preventivas y normativas cuyo objetivo es proteger la integridad física y mental de las personas, asegurar el buen funcionamiento de las operaciones y garantizar la sostenibilidad de los procesos.

En el contexto de la seguridad minera, se enfoca en la protección de los trabajadores que laboran en el entorno minero, donde los riesgos son elevados debido a las condiciones de trabajo subterráneo, por el movimiento de maquinaria pesada, la manipulación de materiales peligrosos, y el uso los procesos explosivos.

La seguridad minera incluye la implementación en políticas de seguridad, equipos de protección personal (EPP), capacitación continua de los trabajadores en la identificación de riesgos, la identificación de riesgos en las nuevas tecnologías mineras y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales como la Ley 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales en Chile, entre otras. (Ministerio del Trabajo y previsión social: Subsecretaría de previsión Social)

3.2 Diagnóstico de la situación actual

“El origen de las estadísticas está ligado a dos ramas del interés humano muy diferentes: los juegos de azar y lo que en la actualidad se llama “ciencia política”. Los estudios hechos a mediados del siglo XVIII sobre probabilidades, condujeron a la teoría matemática de los errores en las medidas y las “leyes de los errores” derivadas de ella fueron la base de los que hoy es la estadística matemática”. (Irwin Miller, 2021) Para este caso el uso de estadísticas matemáticas proporciona una base sólida para cuantificar los datos recopilados, aplicando métricas como promedios, logrando facilitar una comprensión detallada de los riesgos asociados a nivel nacional. Es así como este tipo de herramientas fundamenten datos objetivos y verificables. Este tipo de datos lo podemos medir de la siguiente forma:

Ecuación

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Irwin Miller, 2021

Donde:

\hat{x} = Promedio

n = Número total de valores en el conjunto

x_i = Cada uno de los valores del conjunto

$\sum_{i=1}^n$ = La suma de todos los valores del conjunto

Bajo este enfoque, junto a SERNAGEOMIN y basado en el decreto supremo 72 que refiere a revisión de reportes de seguridad y normativas mineras, se puede analizar las prácticas operativas actuales, identificando debilidades y áreas de mejora en los protocolos de seguridad.

La clasificación cualitativa de peligros más comunes, como derrumbes, caídas de roca, acumulación de gases tóxicos, y colisiones con maquinaria. Se evalúan mediante criterios de frecuencia (probabilidad de ocurrencia) y gravedad (impacto en personas o equipos).

La mayor parte de las mutualidades asignan una categoría de los accidentes como bajo, medio o alto riesgo. Estas matrices de riesgo cualitativas, combinan la probabilidad y severidad. Ayudándolas a realizar análisis de tendencias en accidentes para priorizar los riesgos más significativos.

La información utilizada para este diagnóstico proviene de SERNAGEOMIN, una institución reconocida a nivel nacional por su autoridad en el ámbito geológico y minero. Su relevancia radica en la confiabilidad y precisión de los datos reportados, así como en su capacidad para realizar auditorías y reportes periódicos de seguridad en faenas mineras. Esto garantiza que los análisis realizados en este estudio estén respaldados por una fuente válida y reconocida, lo que fortalece la credibilidad de los resultados y las recomendaciones.

La siguiente imagen presenta la distribución del personal empleado por Codelco en distintos centros de trabajo, desglosada por género. A continuación, se destacan dos aspectos principales:

1. En total, Codelco cuenta con **15.673 empleados**, de los cuales **13.066 (83%)** son hombres y **2.607 (17%)** son mujeres. Esto evidencia una significativa brecha de género en la composición de la fuerza laboral.
2. Los centros con mayor número de empleados son:

División El Teniente: 3.976 personas, equivalente al 25% del total de empleados.

División Chuquicamata: 3.865 personas (24.7%).

Estas divisiones concentran una proporción importante de la fuerza laboral de Codelco.

Ilustración 6 Número de trabajadores por división en CODELCO

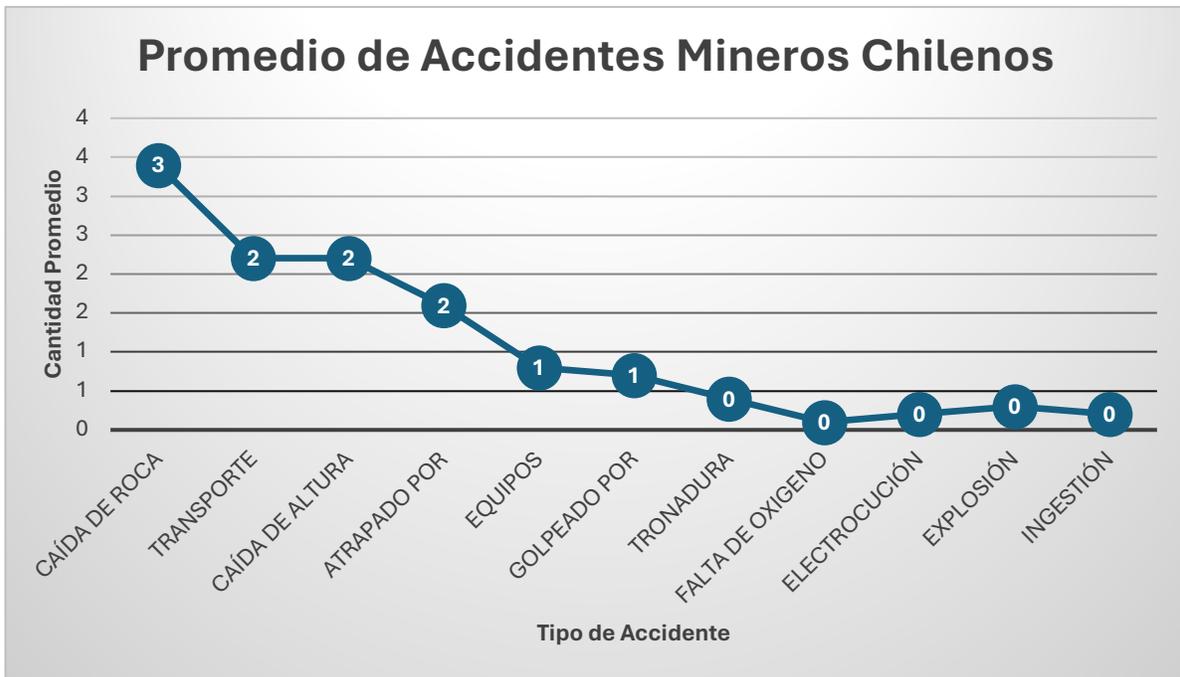
CENTRO DE TRABAJO	HOMBRES	MUJERES	TOTAL
Casa Matriz	500	299	799
Operación Norte	118	45	163
División Andina	1.320	132	1.452
División Chuquicamata	3.282	583	3.865
División Salvador	1.248	220	1.468
División El Teniente	3.420	556	3.976
División Gabriela Mistral	379	128	507
División Ministro Hales	663	161	824
División Radomiro Tomic	1.065	268	1.333
División Ventanas	482	55	537
Vicepresidencia de Proyectos	589	160	749
Total	13.066	2.607	15.673

Fuente: Reporte de Sustentabilidad 2023

El Gráfico 1 muestra un análisis de Pareto sobre el promedio de accidentes en minería subterránea chilena, permitiendo identificar cuáles ocurren con mayor frecuencia y representar un mayor riesgo para los trabajadores. Según los datos obtenidos en Sernageomin, llevados de manera resumida a una planilla en Excel y adjuntada en anexos como Tabla 6 y Tabla 7, el accidente más común es la caída de roca, lo que resalta uno de los principales desafíos en la minería subterránea. Este tipo de accidente está asociado a condiciones geomecánicas del macizo rocoso y la inestabilidad del terreno, factores que pueden ser difíciles de controlar completamente. Las caídas de roca pueden generar consecuencias graves o fatales, lo que enfatiza la necesidad de implementar sistemas de monitoreo geotécnico, inspecciones de estabilidad en galerías y el uso de métodos de sostenimiento adecuados, como pernos de anclaje y mallas de refuerzo.

En segundo lugar, los accidentes más frecuentes están relacionados con el transporte de mineral y personal, así como con caídas de altura. En el caso del transporte, estos accidentes suelen ocurrir en operaciones con maquinaria pesada como cargadores LHD (Load-Haul-Dump) y camiones de bajo perfil, los cuales operan en espacios confinados con visibilidad reducida. Esto incrementa el riesgo de colisiones y vuelcos, lo que puede derivar en accidentes graves si no se aplican las medidas preventivas adecuadas. La implementación de tecnologías de seguridad avanzadas, como sensores de proximidad, cámaras de retroceso y sistemas de alerta en tiempo real, puede ayudar a reducir estos incidentes.

Gráfico 1 Promedio de Accidentes Mineros Chilenos



Fuente: Elaboración Propia

El gráfico 2 se puede observar las fatalidades relacionadas con el transporte en minería subterránea chilena, a través de los años (2015 a 2024). El gráfico nos indica que el año 2022 tiene el mayor número de fatalidades en este rubro, con un total de cinco muertes. Aunque en los años previos se registraron una disminución en las fatalidades, cabe señalar que en el año 2020 vivimos una pandemia, la cual no se logró operar con un 100% de personal. Estos cambios no siguen un patrón predecible o una tendencia clara, tal como se hace referencia en el gráfico, lo que indica que las fatalidades en este sector dependen de múltiples factores operacionales y externos. Cabe señalar que durante el tiempo este patrón puede indicar: un tipo de alza en fatalidades en este tipo de actividad y también

fluctuaciones en las condiciones de seguridad y en las prácticas operativas, así como posibles cambios en los niveles de actividad minera o en el uso de maquinaria pesada. Esta tendencia señala la necesidad de un monitoreo constante y de la adaptación de las medidas de seguridad para abordar los riesgos específicos de cada año, especialmente en la operación de equipos de transporte.

El aumento de las fatalidades en años específicos, puede estar asociado a factores como la falta de mantenimiento en los equipos de transporte, errores operativos debido a falta de capacitación post a pandemia o a condiciones específicas de la mina que pudieron hacer más peligrosas las operaciones en esos períodos. Además, estos resultados destacan la necesidad de fortalecer las prácticas de prevención y la capacitación de operadores en cuanto al manejo seguro de los equipos de transporte.

Gráfico 2 Fatalidades en Transporte Minero Chileno



Fuente: Elaboración propia

Entre los años 2021 y 2024, los datos de accidentabilidad presentan variaciones significativas, con alzas y bajas que impiden establecer una tendencia clara. Este comportamiento, especialmente en accidentes por transporte y caída de roca, podría estar influido por factores operacionales, medidas de seguridad irregulares o situaciones externas como la pandemia. Aunque el gráfico 2 muestra un promedio más estable de dos accidentes fatales por año en transporte, esto no significa una menor exposición al riesgo, sino que reafirma la necesidad de reforzar la prevención en minería subterránea. Cabe señalar que el reporte de accidentabilidad minera del año 2024, declara solo hasta el primer trimestre de ese año

Los datos proporcionados por ambos gráficos identifican dos áreas de especial riesgo en la minería subterránea: las caídas de roca y el transporte de materiales y personas. La alta frecuencia de accidentes por caída de roca indica que se necesita un control geotécnico más riguroso para minimizar estos incidentes. Para esto, es crucial contar con monitoreos periódicos de estabilidad, métodos de soporte mejorados (como pernos de anclaje y mallas metálicas) y protocolos de inspección para identificar señales tempranas de inestabilidad. Además, la tecnología de monitoreo en tiempo real, como sensores de movimiento y sistemas de alerta, puede ser una herramienta útil para reducir el riesgo de estos accidentes, alertando a los operadores y supervisores sobre posibles desprendimientos.

En cuanto a los accidentes de transporte, la recurrencia de fatalidades sugiere la necesidad de mejorar tanto las prácticas de seguridad como las tecnologías aplicadas en el transporte subterráneo. La capacitación de los operadores es fundamental, enfatizando las mejores prácticas para maniobrar en espacios confinados y las técnicas de respuesta ante emergencias. Además, la implementación de sistemas de asistencia en los vehículos, como cámaras de retroceso, sensores de proximidad y frenos automáticos, puede reducir significativamente el riesgo de colisiones y vuelcos. Estos avances tecnológicos, combinados con una planificación rigurosa de rutas de transporte y protocolos de mantenimiento preventivo, mejoran tanto la seguridad como la eficiencia de las operaciones.

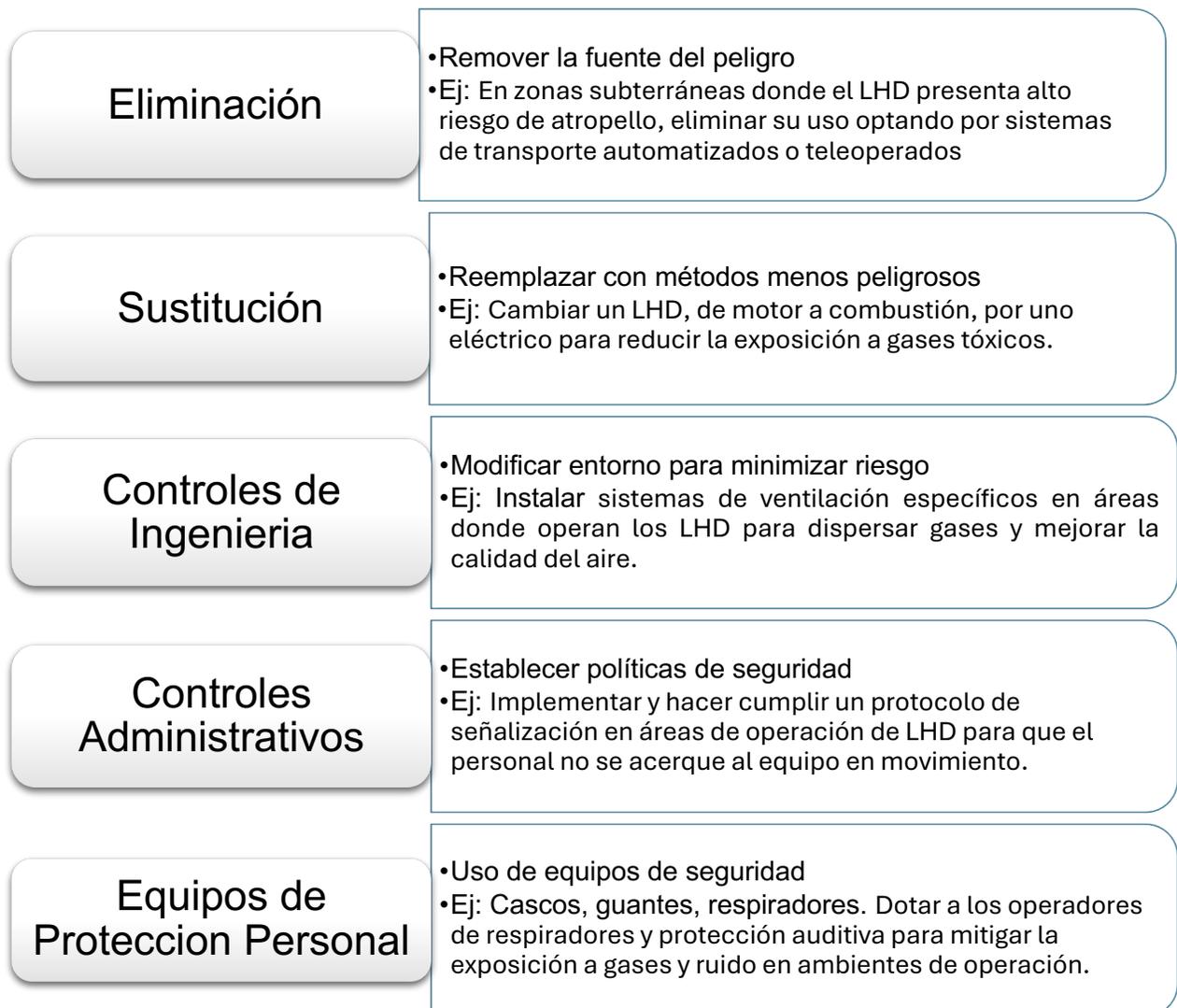
El análisis de los promedios de accidentabilidad y las fatalidades por tipo de accidente pone en relieve la importancia de una estrategia de seguridad integral en la minería subterránea. Es necesario fortalecer tanto los controles geotécnicos como las medidas de seguridad en el transporte para minimizar los riesgos y proteger la vida de los trabajadores. La combinación de estrategias preventivas, tecnología avanzada y capacitación continua constituye la base para crear un entorno de trabajo más seguro y eficiente en las operaciones mineras. Estas medidas no solo reducirán la accidentabilidad, sino que también contribuirán a mejorar la productividad, al evitar interrupciones por accidentes y mejorar las condiciones laborales en la mina.

3.3 Seguridad

Jerarquía del Control: Es un sistema para reducir riesgos en el lugar de trabajo mediante la implementación de medidas de control en orden de efectividad. Los niveles de la jerarquía de control incluyen eliminación, sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos, y el uso de equipo de protección personal (EPP).

Niveles de la jerarquía del control:

Ilustración 7 Jerarquía del Control



Fuente: Elaboración Propia

3.4 Extracto del reglamento de seguridad Minera:

Decreto Supremo N° 132

3.4.1. Seguridad en operaciones de carguío y transporte:

Artículo 254: Las operaciones de carguío y transporte de mineral y estériles en una mina a rajo abierto, mediante el empleo de equipos mecanizados, deberán ser reguladas por un reglamento interno elaborado por la Administración de la faena y aprobado por el Servicio.

Artículo 255: El vaciado de material en botaderos, parrillas, chancadores y otros puntos de descarga debe contar con barreras delimitadoras, iluminación, señalización y procedimientos para evitar caídas de equipos, vaciado accidental o daños a personas y estructuras.

Artículo 256: El diseño de caminos y rampas debe considerar la envergadura de los equipos, pendientes máximas, salidas de emergencia, bermas de contención y señalización efectiva.

3.4.2. Seguridad de los equipos de transporte:

Artículo 125: La pendiente máxima para la operación de un equipo de transporte debe ser la recomendada por el fabricante, sin sobrepasar la capacidad límite de diseño de la máquina.

Artículo 126: Los equipos automotrices de carguío, carguío-transporte y transporte deben contar con cabina resistente y sistemas de protección para el operador.

Artículo 127: Los lugares donde las máquinas diésel descarguen a piques o traspasos deben poseer topes de seguridad, iluminación y elementos supresores de polvo.

3.4.3. Reglas de tránsito en interior mina:

Artículo 121: El personal que trabaje o transite en áreas con circulación de equipos de carguío o transporte debe usar distintivos reflectantes de alta visibilidad.

Artículo 122: En galerías con tráfico compartido entre equipos y peatones, la preferencia es para los peatones, exigiendo señalización adecuada y detención de equipos cuando sea necesario.

Artículo 123: Se prohíbe realizar trabajos, trasladar personas y transportar explosivos sobre el balde de equipos de carguío o cualquier equipo no acondicionado para tal efecto.

Fuente: (Reglamento de seguridad minera, 2004)

3.4.1 Extracto de la Normativa ISO 45001:2018

La norma ISO 45001:2018 es un estándar internacional que establece los requisitos para un sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo (SST). Su objetivo principal es proporcionar un marco estructurado para que las organizaciones puedan garantizar lugares de trabajo seguros y saludables, prevenir lesiones, minimizar riesgos y mejorar continuamente el desempeño en SST. Aplicable a cualquier tipo y tamaño de organización, esta norma también fomenta la integración de la gestión de riesgos en los procesos operativos y estratégicos. En un contexto como la minería subterránea, donde los riesgos inherentes son elevados, la implementación de un sistema basado en esta normativa resulta esencial para salvaguardar a los trabajadores y optimizar los procesos operativos.

3.4.2 Descripción de los puntos clave de la Normativa ISO 45001

Gestión de Riesgos y Oportunidades

La norma enfatiza la identificación de peligros y la evaluación de riesgos en todas las actividades relacionadas con el trabajo. Esto incluye tanto situaciones rutinarias como no rutinarias, asegurando una respuesta integral a los riesgos y oportunidades.

ISO 45001 establece procesos para la identificación proactiva y continua de peligros, evaluación de riesgos, y planificación de acciones correctivas para prevenir accidentes y mejorar la seguridad.

En el proceso de carguío con LHD, la identificación de peligros (como riesgos de colisiones, desprendimientos de rocas, y fallas mecánicas) y la evaluación de riesgos operativos son cruciales para establecer medidas de control efectivas.

Liderazgo y Participación de los Trabajadores

La alta dirección debe asumir un rol de liderazgo activo, promoviendo una cultura de seguridad y salud, y asegurando la participación activa de los trabajadores en la identificación de peligros y en la mejora continua del sistema.

Incluye la participación de operadores de LHD y supervisores en la identificación de condiciones peligrosas y en la propuesta de mejoras operativas.

Planificación y Control Operacional

Requiere la planificación de acciones preventivas, la gestión de cambios operativos y la implementación de controles para minimizar riesgos en el entorno laboral.

Además, incluye la planificación de rutas de operación de LHD, optimización de tiempos de carguío, y procedimientos de emergencia para garantizar operaciones seguras en un entorno subterráneo.

Capacitación y Conciencia

Es fundamental que los trabajadores sean competentes para identificar peligros y riesgos. La norma promueve la educación y formación como medios para mejorar la comprensión de los riesgos y la implementación de medidas preventivas.

La capacitación de operadores de LHD en el uso seguro de equipos y en protocolos de respuesta ante emergencias es esencial para reducir incidentes.

Evaluación del desempeño y mejora continua

La norma fomenta el uso de indicadores de desempeño para evaluar la eficacia del sistema y propone la implementación de acciones correctivas y de mejora continua. El análisis de indicadores de seguridad (como incidentes y tiempo de respuesta) permite identificar oportunidades de mejora en los procesos de carguío.

Preparación y respuesta ante Emergencias.

Plantea la necesidad de establecer planes de emergencia efectivos que incluyan simulacros y capacitación para asegurar la reacción oportuna ante situaciones críticas. En el entorno subterráneo de El Teniente, es fundamental tener planes claros para evacuación y manejo de emergencias relacionadas con el LHD.

Fuente: (Secretaría Central de ISO en Ginebra, 2018)

3.5 Peligros con equipos LHD

Los peligros asociados al uso de LHD (Load-Haul-Dump) incluyen riesgos mecánicos, como colisiones y atrapamientos, y peligros relacionados con el entorno, como la ventilación deficiente y la exposición a polvo y ruido. Según la International Council on Mining and Metals (ICMM) (2019), "los peligros mecánicos y ergonómicos son los principales riesgos en la operación de equipos de carga y transporte en minería subterránea" (ICMM, 2019).

3.6 Accidentabilidad con equipos LHD

Los accidentes con LHD pueden incluir vuelcos, caídas de mineral y colisiones con otros vehículos o estructuras. Un estudio del Instituto de Seguridad Minera (ISMIN) (2020) indica que muchos accidentes se deben a errores humanos y fallas mecánicas: "La falta de capacitación adecuada de los operadores y el mantenimiento ineficiente de los equipos son factores que contribuyen a estos incidentes"

4 Identificación de los peligros y evaluación de riesgos en el proceso de transporte, minera “El Teniente”

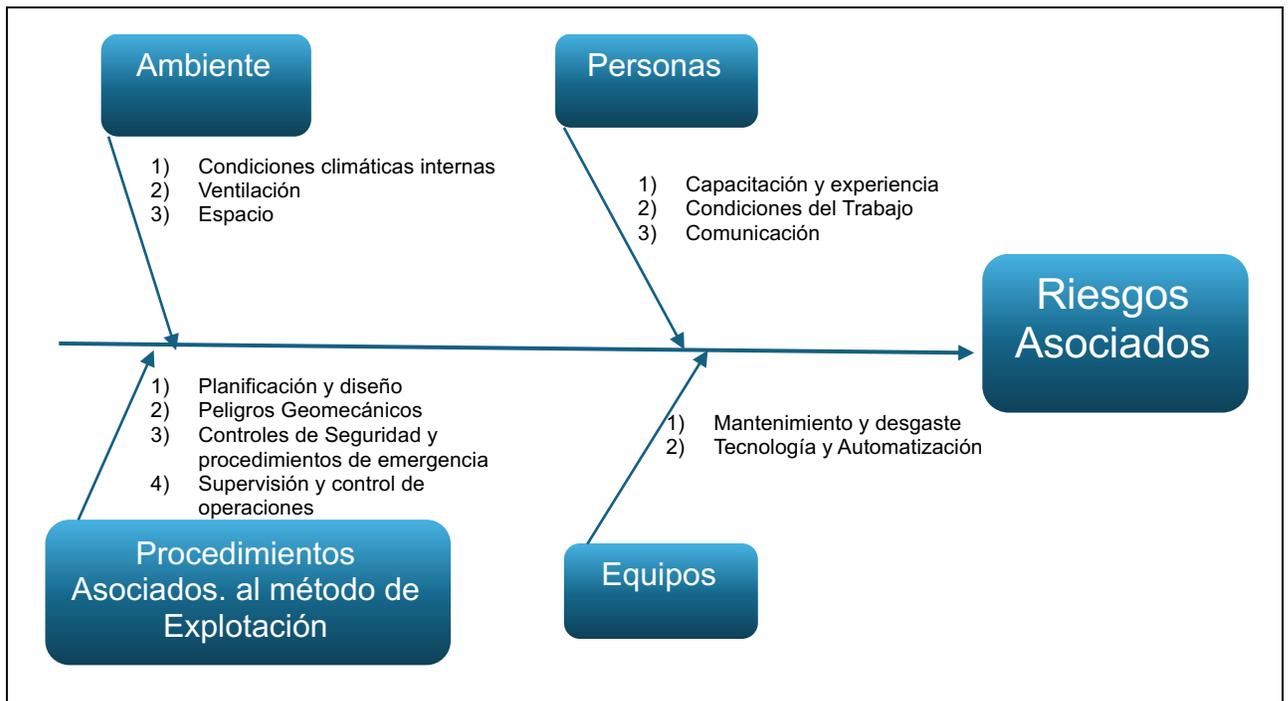
El método Panel Caving es una técnica de explotación subterránea altamente eficiente, utilizada principalmente en yacimientos de gran tamaño y baja ley. Este método se basa en el hundimiento controlado del macizo rocoso mediante el uso de la gravedad, lo que permite extraer grandes volúmenes de mineral con costos relativamente bajos.

En la mina El Teniente, el método Panel Caving ha sido implementado para explotar el yacimiento de cobre más grande del mundo. La operación incluye una red de galerías subterráneas y sistemas avanzados de transporte automatizado, diseñados para manejar el gran volumen de material fragmentado generado por el hundimiento (SERNAGEOMIN, 2020).

El Diagrama de Ishikawa, también conocido como diagrama de causa y efecto o de espina de pescado, es una herramienta utilizada para identificar, organizar y analizar las posibles causas de un problema específico. En el contexto de este proyecto, se ha empleado esta metodología para comprender de manera estructurada los factores que influyen en los accidentes relacionados con el carguío y transporte de minería subterránea.

Este enfoque permite identificar las causas raíces de los eventos no deseados, clasificándolas en categorías principales como ambiente, equipos, personas y procedimientos asociados al método de explotación. Cada una de estas categorías destaca los aspectos críticos que pueden contribuir al aumento del riesgo, proporcionando una base sólida para el diseño de estrategias de mitigación efectivas. A través de este análisis, se busca mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad en las operaciones mineras, alineando las soluciones propuestas con las normativas nacionales e internacionales vigentes.

Ilustración 8 Diagrama de Ishikawa



Fuente: Elaboración Propia

Este documento está diseñado para identificar y analizar las causas raíz de los accidentes y problemas operativos relacionados con el carguío y transporte en minería subterránea. Este diagrama se clasificó en las siguientes causas principales:

4.1 Ambientes

Incluye factores externos que influyen en la operación, como:

- a) Acumulación de gases tóxicos: La ventilación deficiente en las galerías puede conducir a la acumulación de gases nocivos, como monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno, representando un riesgo para la salud del personal.
- b) Inundaciones: La infiltración de agua subterránea puede causar inundaciones repentinas en las rutas de transporte, afectando las operaciones y la seguridad.
- c) Condiciones geotécnicas: La inestabilidad de las paredes de los túneles puede provocar derrumbes y caídas de rocas. El proceso de hundimiento controlado puede generar inestabilidades en el macizo rocoso, aumentando el riesgo de desprendimientos que afecten las galerías de transporte. Estos eventos pueden comprometer la seguridad del personal y la integridad de los equipos.
- d) Condiciones climáticas internas: Altas temperaturas o formación de polvo en áreas confinadas que afectan la salud y eficiencia de los operadores.
- e) Condiciones de terreno: Los terrenos accidentados y las pendientes pronunciadas son factores que afectan la estabilidad de los equipos, como

en el caso del Paus PMKM 8030, que presenta riesgos de vuelco en terrenos irregulares. Además, el riesgo de colisión en espacios reducidos es una constante en túneles subterráneos, especialmente con equipos más grandes como el Komatsu LHD WA900.

- f) Ventilación: En minas subterráneas con baja ventilación, los equipos con motores diésel, como el Caterpillar AD45B, incrementan la exposición a gases tóxicos, lo que representa un riesgo para la salud de los operarios y la seguridad en la operación. Los sistemas de ventilación deben estar optimizados para reducir este riesgo.
- g) Espacios reducidos: El tamaño de los equipos grandes, como el Komatsu HD785-7, Caterpillar R3000H o Sandvik TH551i, puede dificultar las maniobras en túneles estrechos, lo que incrementa el riesgo de accidentes y colisiones. Los equipos más pequeños, aunque más maniobrables, tienen capacidades de carga más limitadas, lo que puede afectar la eficiencia operativa.

4.2 Equipos

Se enfoca en las máquinas y herramientas utilizadas en el carguío y transporte.

Problemas comunes incluyen:

- a) Fallas mecánicas: Por mantenimiento inadecuado o desgaste excesivo.
- b) Tecnología desactualizada: Equipos sin sensores de proximidad o sistemas de seguridad automatizados.
- c) Mal diseño de los equipos: Por ejemplo, puntos ciegos en vehículos móviles.

d) *Mantenimiento y desgaste*: Los equipos como el Caterpillar R3000H o el Komatsu HD785-7, con alta capacidad de carga, son susceptibles a un mayor desgaste en condiciones de operación intensivas.

La falta de un mantenimiento preventivo adecuado o la desactualización de los sistemas de control puede generar fallas operacionales. Equipos con sistemas automatizados, como el Sandvik TH663i, también presentan el riesgo de malfuncionamiento si no se realizan las actualizaciones de software o el mantenimiento adecuado.

e) *Tecnología y automatización*: El uso de tecnologías avanzadas de automatización, como en el Epiroc ST14 y el Sandvik LH517, puede mejorar la eficiencia, pero a la vez genera dependencia de estos sistemas. Los fallos en la automatización pueden resultar en accidentes si no se cuenta con procedimientos claros para intervención manual y monitoreo constante de los sistemas.

4.3 Procedimientos asociados al método de explotación

Analiza los procesos operativos y su relación con los accidentes. Incluye:

a) *Falta de señalización*: En túneles y cruces, lo que puede ocasionar colisiones.

b) *Tronaduras mal planificadas*: Que generan inestabilidad en los túneles de carguío.

c) *Sismicidad inducida*: La liberación de tensiones en la roca durante la explotación puede provocar eventos sísmicos que impacten las estructuras subterráneas. En “El Teniente”, los eventos sísmicos han provocado

vibraciones que afectan las estructuras de transporte, generando riesgos para la seguridad del personal y los equipos, para esto se han implementado sistemas de monitoreo sísmico para detectar y mitigar estos riesgos.

- d) Mantenimiento irregular: De equipos y vías de transporte.
- e) Planificación y diseño de la mina: El diseño de los túneles, rampas y áreas de carga debe considerar el tamaño y las capacidades de los equipos. La falta de una adecuada planificación en las rutas de transporte subterráneo puede hacer que el proceso de carga y descarga sea más peligroso y menos eficiente.
- f) *Controles de seguridad y procedimientos de emergencia*: Los procedimientos establecidos para enfrentar incidentes, como accidentes de equipo o exposición a gases, son esenciales para minimizar riesgos. El uso de equipos con sistemas automatizados requiere protocolos específicos para asegurar que los operadores puedan intervenir rápidamente en caso de fallos.
- g) Supervisión y control de operaciones: La supervisión continua de los procesos y el mantenimiento adecuado de los equipos son esenciales para garantizar la seguridad en la mina. La implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real puede prevenir fallos operacionales y mejorar la seguridad en las operaciones subterráneas.

4.4 Personas

Los peligros operacionales abordan los aspectos humanos y la interacción con los equipos, algunos peligros asociados son:

- a) Falta de capacitación: Operadores que no conocen completamente las capacidades y limitaciones de los equipos.
- b) Fatiga laboral: Causada por turnos extensos o condiciones de trabajo exigentes.
- c) Errores humanos: Maniobras inseguras o descuidos.
- d) Capacitación y experiencia: La falta de formación o capacitación especializada en la operación de equipos puede generar errores humanos que resulten en accidentes. Esto es particularmente crítico para equipos con automatización avanzada, donde la intervención humana puede ser necesaria para corregir fallas o para la toma de decisiones rápidas.
- e) Condiciones de trabajo: Los turnos prolongados, la fatiga y la presión por cumplir plazos también son factores humanos que pueden aumentar la probabilidad de errores operacionales. La interacción de los operadores con los sistemas de control automatizados debe ser monitoreada para evitar desatenciones que causen accidentes.
- f) Comunicación: Los fallos en la comunicación entre los operadores y los equipos de soporte, especialmente en áreas subterráneas de difícil acceso, pueden dificultar la respuesta ante emergencias, aumentando los riesgos de accidentes.

- g) Fallas mecánicas: El desgaste natural y el mantenimiento inadecuado de los equipos de transporte pueden resultar en fallas que pongan en peligro la seguridad y la continuidad operativa. Programas de mantenimiento preventivo y predictivo son fundamentales para abordar este desafío.
- h) Colisiones y atropellos: La circulación de equipos pesados en espacios confinados incrementa la probabilidad de accidentes entre vehículos y personal.

Justamente en este peligro nos concentraremos: *“Colisión es el encuentro violento entre equipos móviles o entre estos y las instalaciones fijas. Se producen por problemas de señalización o descuido de los operadores.”* (SERNAGEOMIN, 2020)

Tabla 1 Colisiones

Riesgos	Mecanismos de Control	Problemas Asociados
<ul style="list-style-type: none"> • Este riesgo en minería subterránea es muy frecuente, por baja visibilidad, espacios reducidos para maniobrar, no respetar normas y procedimientos, estrés laboral, falta de mantención de los equipos, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emitir procedimientos, normas etc. • Capacitar a todo el personal, operadores, peatones, etc. • Dotar de una buena señalética. • Mejorar la iluminación, ventilación y mantención de vías y equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Atropellamiento a personas • Daños a equipos. • Disminución de la producción.

Fuente: SERNAGEOMIN: Modulo II Seguridad en Minería

4.5 Operación de transporte

La operación de transporte se define como el traslado de un material sobre una unidad de transporte, desde el punto de extracción en la mina hasta la planta de tratamiento, un botadero o un almacenamiento (stock).

Esta operación conforma el denominado “ciclo de transporte” conformado por las siguientes actividades principales:

- a) Acuatamiento en la zona de carga.
- b) Carguío del camión.
- c) Viaje cargado.
- d) Acuatamiento y descarga o vaciado en Planta, Botadero o almacenamiento (stock).
- e) Viaje vacío o retorno al punto de carga.

Causas principales de accidentes durante el carguío:

- a) Mala posición del operador del camión mientras está siendo cargado.
- b) Desestabilización del camión por imperfecciones en el piso del área de acuatamiento para el carguío.

Atropello y colisión de personas u otros equipos por:

- a) Visibilidad inadecuada.
- b) No respeto de las normas de tránsito de la mina.
- c) Bloqueo inadecuado.
- d) No visualizar el entorno antes y durante la operación del camión

Volcamiento del camión, se puede producir por:

- a) Mal estacionamiento.
- b) Inestabilidad del terreno en que se estaciona el equipo.
- c) Mala operación del chofer.
- d) Estado fisiológico del operador.
- e) Vehículos menores y personas no respetan las áreas ciegas de los camiones mineros.
- f) Piso inestable o irregular.

Causas principales de accidentes durante el viaje cargado:

- a) No tener una definición clara y asimilada por todo el personal de la faena acerca de preferencias de paso entre equipos mina. La prioridad la tiene una ambulancia, Condiciones del tránsito en caminos mina.
- b) Desestabilización del material en la tolva.
- c) Caídas del material transportado desde la tolva.
- d) Choques con otros camiones, otros equipos u obstáculos en la ruta, segunda prioridad vehículos con explosivos, resto equipos según normativa de seguridad de cada faena.
- e) Definición clara y asimilada por todo el personal operador de equipos móviles de la faena acerca del sentido del tránsito al interior de la mina.
- f) Señalización de tránsito en mal estado, faltante, sucia o poco visible.
- g) Resbalamientos, roncos y caídas

- h) Caídas (o derrames) de material desde las paredes o techo de la galería, sobre el camión o el camino. (mala fortificación).
- i) Atropellar vehículos menores sin pértigas de seguridad o por condiciones ambientales inadecuadas (levantamiento de polvo).
- j) Excesiva curvatura de curvas verticales y horizontales pueden disminuir el tiempo de reacción para frenar de los operadores por obstáculos en la ruta.

Vuelco del camión por:

- a) Mala mantención del sistema de frenado y dirección del camión.
- b) Mal estado del sistema de luces.
- c) Desplazamiento en carpetas de rodado resbalosas.
- d) Neumáticos gastados.
- e) Neumáticos sin la presión de aire correcta.
- f) Estacionamiento en pisos inestables.
- g) Mala operación del chofer.
- h) Mala visibilidad de los caminos, por falta de riego de los mismos.
- i) Adelantamiento de otras unidades de transporte. Esto debiera estar regulado por la misma faena.
- j) Distancia mínima de seguridad entre vehículos en movimiento, cargados o vacíos, esto debiera estar regulado por la faena.
- k) Velocidades máximas en rutas, cargados o vacíos, esto debiera estar regulado por cada faena.
- l) Estado fisiológico del operador.

Vaciado en Planta, Botaderos y almacenamiento (stock pile).

- a) **Vaciado en Planta:** corresponde al punto de vaciado exclusivamente de mineral extraído desde la mina
- b) **Vaciado en Botadero:** es un área de descarga de material estéril extraído de la mina y que permanecerá para siempre en ese lugar.
- c) **Vaciado en Stock Pile:** es un área de descarga en el que se deposita mineral extraído de la mina en forma provisoria.

La operación de vaciado es de alto riesgo y tiene la siguiente secuencia:

1. El camión llega a la zona de vaciado.
2. El operador examina el punto donde va a vaciar, especialmente verifica la existencia de un borde de contención para el camión en el borde de la zona de vaciado para evitar su caída. El borde de contención debe tener una altura, a lo menos, equivalente a $2/3$ del diámetro de la rueda del camión más grande existente en la faena.
3. El camión retrocede hasta el borde, apoya sus cuatro ruedas traseras en el borde de contención y levanta la tolva para vaciar el material.
4. Vaciada la tolva, la baja y vuelve al punto de carguío.

Causas principales de accidentes durante el vaciado:

1. Borde de contención de poca altura.
2. Velocidad excesiva al retroceder el camión, pudiendo sobrepasar el borde.
3. Aculatamiento en ángulo contra el borde de contención.
4. Mala visibilidad por polvo.

5. Mala iluminación del área de vaciado.
6. Mala operación del chofer.
7. Mala mantención del sistema de frenado del camión.
8. Si la berma de contención tiene una altura inferior a medio neumático del camión o existiera ausencia de ella, el operador debe avisar inmediatamente a su supervisor y por ningún motivo debe descargar en el borde, debe hacerlo directamente sobre el piso y a mas de 5 m del borde.
9. No descargar a menos de 10 m (más o menos un ancho de camión) de otro camión que está vaciando antes u otro equipo o vehículo en el área de descarga.
10. Cuando se descargue en botadero en que está trabajando un tractor, el chofer del camión debe verificar que éste se ubique a no menos de 30 m del camión y no perderlo de vista.
11. Falta de consideraciones específicas en la reglamentación interna para maniobras de vaciado.
12. No contar con indicadores que limiten el borde de los botaderos y/o con personal desarrollando el trabajo de colero.

4.6 Listado de Peligros vs Riesgos mineros en carguío y transporte subterráneo

En esta operación los aspectos claves que deben gestionarse para garantizar la seguridad de los trabajadores y la integridad de la operación son:

Tabla 2 Listado de Peligros vs Riesgos

Peligro	Riesgo
Colisiones con otros vehículos	Lesiones a operadores y personal cercano
Vuelcos del equipo	Lesiones graves o mortales
Caídas de mineral	Lesiones por impacto
Condiciones de ventilación inadecuadas	Exposición a gases tóxicos o falta de oxígeno
Ruido Excesivo	Pérdida auditiva
Exposición al Polvo	Enfermedades respiratorias
Fallas Mecánicas	Accidentes y lesiones

Fuente: Elaboración Propia

El análisis de los equipos de transporte subterráneo, complementado con un enfoque de Diagrama de Ishikawa, permite identificar y categorizar los factores que pueden influir en el rendimiento y los riesgos asociados a la operación. Este enfoque desglosa las causas posibles de los problemas en varias categorías: personas, equipos, ambiente de mina subterránea y procedimientos asociados al método de explotación. A continuación, se relacionan los elementos de cada categoría:

4.7 Procedimientos asociados al método de explotación

El análisis realizado mediante el enfoque de Ishikawa revela que los riesgos asociados a los equipos de transporte subterráneo en la minería son multifactoriales y dependen de la interacción entre las personas, los equipos, el ambiente de la mina subterránea y los procedimientos operacionales. Para reducir estos riesgos, es fundamental implementar medidas de control en cada una de estas categorías, que incluyan la capacitación continua del personal, un mantenimiento adecuado de los equipos, el monitoreo constante del ambiente de trabajo, y la optimización de los procedimientos operacionales.

Las tablas 3 y 4 permiten identificar y clasificar los accidentes potenciales, asociarlos con los equipos utilizados y evaluar el cumplimiento del Reglamento de Seguridad Minera (DS N°132). Su valor radica en evidenciar brechas de seguridad, especialmente donde las medidas existentes solo cumplen parcialmente con la normativa. Estas tablas respaldan técnicamente las propuestas del proyecto y funcionan como una conexión entre el diagnóstico de riesgos y las mejoras sugeridas, fortaleciendo así la gestión integral del riesgo y justificando la incorporación de tecnologías y prácticas orientadas a una operación más segura y eficiente.

Tabla 3 Matriz de Accidentes Potenciales, Soluciones y Nivel de Cumplimiento Legal

Categoría	Ejemplo de Accidente	Solución Propuesta	Fundamento Legal	Equipos Relacionados	Cumplimiento
P e r s o n a s	Lesiones por uso inadecuado de equipos de protección personal (EPP)	Garantizar el uso obligatorio de EPP adecuado y realizar auditorías frecuentes	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 34: Uso obligatorio de EPP en faenas mineras	NO APLICA	Parcialmente
	Fatiga laboral en operadores de carguío y transporte durante turnos prolongados	Implementar rotación de turnos y descansos obligatorios para operadores	Código del Trabajo Art° 184bis: Protección de la salud de los trabajadores	Sandvik TH663i; Epiroc MT6020	Parcialmente
	Colisiones entre equipos por falta de experiencia en maniobras de operadores nuevos	Realizar programas de entrenamiento con simuladores especializados en carguío y transporte	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 29 Capacitación obligatoria para operadores	Komatsu LHD WA900; Epiroc ST14	Parcialmente
	Trabajadores afectados por la exposición prolongada a vibraciones en los equipos	Incorporar asientos ergonómicos y sistemas de amortiguación en los equipos	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 37 Protección frente a vibraciones ocupacionales	Sandvik LH517; Caterpillar AD45B	Parcialmente
	Comportamiento temerario al operar equipos sin autorización	Aplicar sanciones estrictas y reforzar el control de acceso a los equipos	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 30 Restricción en el manejo de equipos	Caterpillar R3000H; Sandvik TH551i	Parcialmente
	Volcamiento de camiones por sobrecarga en pendientes	Establecer procedimientos estrictos de verificación de cargas y límites operativos	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 226 Verificación de capacidades de equipos de transporte	Caterpillar AD45B; Sandvik TH663i	Parcialmente
	colisiones en cruces de túneles por falta de señalización adecuada	Implementar señalización LED y sistemas de gestión de tráfico automatizados	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 124 Señalización en vías subterráneas	Sandvik TH551i; Epiroc ST14	Parcialmente
	Falla en el sistema de ventilación al operar múltiples equipos diésel simultáneamente	Planificar operaciones para limitar equipos diésel y optimizar la ventilación en tiempo real	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 125: Ventilación adecuada en operaciones subterráneas	Sandvik TH663i; Komatsu LHD WA900	Parcialmente
	Procedimientos deficientes durante, emergencias por derrumbes	Diseñar planes de evacuación claros y realizar simulacros periódicos con todos los trabajadores	Reglamento de seguridad Minera Art 47 Planes de emergencias y simulacros obligatorios	sanvik LH517; Caterpillar R3000H	Parcialmente
	Mantenimiento inadecuado de equipos que generen fallas recurrentes	Implementar sistemas de mantenimiento predictivo basados en inteligencia artificial	Reglamento de Seguridad Minera, Art° 226 Mantenimiento de equipos de transporte	Epiroc MT6020; Sandvik LH514B	Parcialmente
P r o c e d i m i e n t					

Tabla 4 Matriz de Accidentes Potenciales, Soluciones y Nivel de Cumplimiento Legal

Categoría	Ejemplo de Accidente	Solución Propuesta	Fundamento Legal	Equipos Relacionados	Cumplimiento
A m b i e n t e	Acumulación de gases tóxicos debido a emisiones de equipos diésel en túneles de carguío y transporte	Implementar sistemas de ventilación inteligente y utilizar equipos eléctricos o híbridos	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 125: Ventilación adecuada en operaciones subterráneas	Sandvik TH663i; Epiroc MT6020; Sandvik LH14BE	Cumple
	Formación de polvo en áreas de carguío que afecta la visibilidad y la salud de los operadores	Usar sistemas de riego y niebla seca para controlar la emisión de polvo	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 149: Control de material particulado	Caterpillar AD45B; Komatsu LHDWA900	Parcialmente
	Derrumbes por inestabilidad en las paredes del túnel durante maniobras de transporte	Realizar refuerzos geotécnicos y monitoreo constante con sensores de vibración	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 87 :Monitoreo y refuerzo del terreno	Sandvik LH517; Caterpillar R3000H	Cumple
	Inundaciones en áreas de carguío y transporte por falta de drenaje	Diseñar sistemas de drenaje adecuados y monitorear niveles de agua subterránea	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 154: Gestion de Aguas Subterráneas	Epiroc ST14	Cumple
	Altas temperaturas en túneles profundos que afectan el rendimiento de equipos y operadores	Implementar sistemas de enfriamiento localizados en las áreas de operación crítica	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 126 Control de condiciones ambientales	Sandvik LH514BE; Epiroc Minetruck MT6020	Cumple
	Falla de frenos en pendientes pronunciadas durante el transporte de mineral	Incorporar sistemas de frenado automático y realizar mantenimiento preventivo regular	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 226 Mantenimiento de equipos de transporte	Caterpillar AD45B; Sandvik TH551i	Parcialmente
	Atropellos por puntos ciegos en equipos de carguío como LHDS	Instalar sensores de proximidad y cámaras de retroceso en los equipos	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 225 Sistemas de seguridad en equipos móviles	Komatsu LHD WA900; Epiroc ST14	Parcialmente
	Caída de material desde tolvas durante el transporte	Inspeccionar mecanismos de cierre de tolvas y capacitar operadores en su manejo adecuado	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 227 Transporte seguro de materiales	Caterpillar R3000H; Sandvik TH663i	Cumple
	Explosiones de neumáticos debido al sobrecalentamiento por uso intensivo	Realizar controles periódicos de presión y temperatura de los neumáticos	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 228 Inspección periódica de componentes de equipos	Komatsu LHD WA900; Sandvik LH517	Parcialmente
	Incendios en motores diésel causados por fugas de combustible	Implementar inspecciones regulares de sistemas de combustible y sistemas de extinción automática	Reglamento de Seguridad Minera, Artº 230 Sistemas contra incendio en equipos móviles	Caterpillar AD45B; Epiroc MT6020	Parcialmente

5 Comparación de equipos actuales

En minería subterránea, los equipos y maquinarias utilizados están diseñados específicamente para afrontar las exigencias únicas de este entorno. Una de sus principales características es su diseño compacto, necesario para maniobrar en espacios reducidos y túneles estrechos, donde cada centímetro cuenta. Además, estos equipos deben contar con una gran potencia para poder mover y transportar enormes cantidades de material, como rocas y minerales, en condiciones que a menudo son extremas.

Otra cualidad fundamental es su robustez, ya que trabajan en un ambiente hostil donde están constantemente expuestos a polvo, humedad, vibraciones, altas temperaturas y terrenos irregulares. Esta combinación de compactibilidad, potencia y resistencia no solo garantiza su funcionalidad, sino que también busca minimizar los riesgos operativos y aumentar la eficiencia en un entorno tan desafiante como el de la minería subterránea.

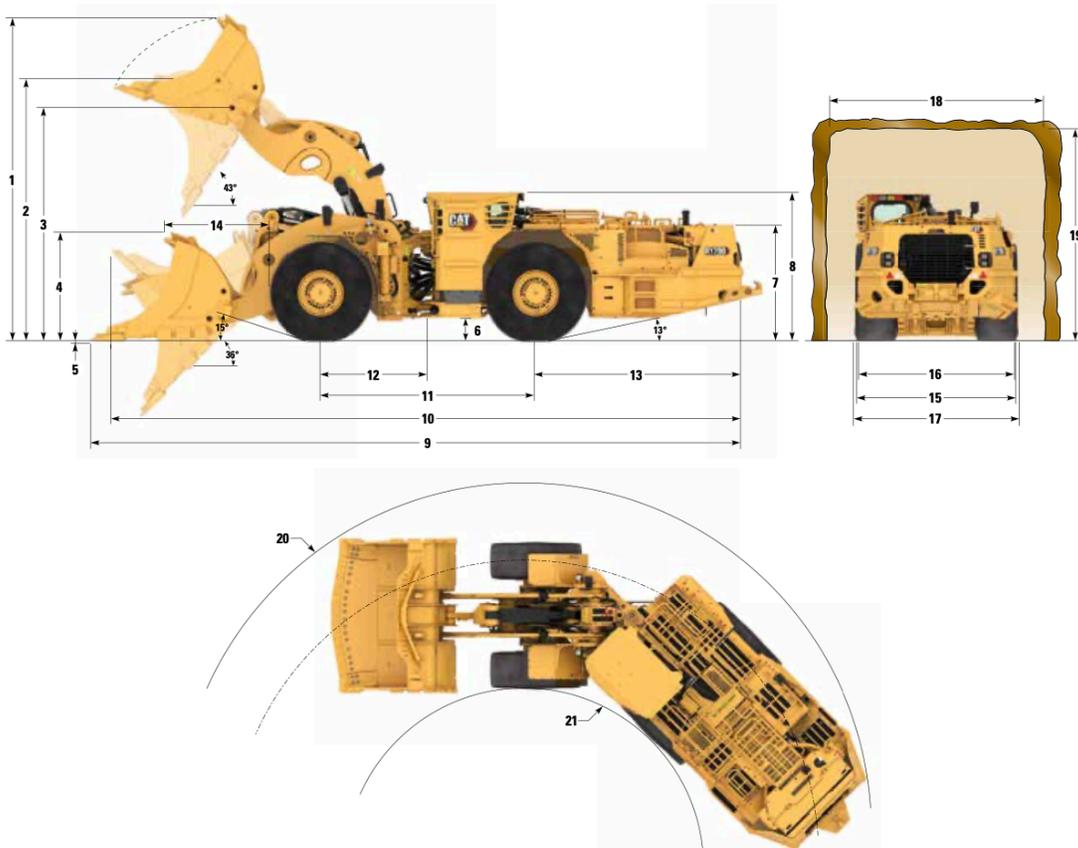
Para iniciar la comparación entre equipos, es fundamental identificar cuáles son las maquinarias de carguío y transporte más utilizadas en la industria minera nacional, así como aquellas propuestas para la transición hacia la Minería 4.0. Esto permitirá analizar sus características y ventajas con el fin de recomendar la opción más adecuada.

Caterpillar R1700

Ilustración 9 Caterpillar R1700

Características Técnicas

- Motor Cat C13: 257-269 kW (345-361 hp), con opciones de reducción de emisiones y operación en altitud.
- Capacidad de carga: 15,000 kg (33,069 lb).
- Peso total cargado: 62,739 kg (138,316 lb).
- Velocidad: Máxima de 32.5 km/h en avance y retroceso.
- Tiempo del ciclo hidráulico: 13.2 segundos.
- Cucharones: 5.7 - 8.6 m³ (7.5 - 11.2 yd³).
- Sistemas electrónicos: Product Link™ Elite para monitoreo remoto y Command for Underground para automatización.



	Cucharón para Material Liviano 467-1831		Cucharón Empernado 561-1775		Cucharón Empernado 581-6671		Cucharón Expulsor 467-1746	
	8,6 m ³	11,2 yd ³	6,8 m ³	8,9 yd ³	7,5 m ³	9,8 yd ³	5,8 m ³	7,6 yd ³
Capacidad del cucharón								
Ancho del cucharón sobre la cuchilla sin GET	3.492 mm	137"	2.962 mm	117"	3.376 mm	133"	2.780 mm	109"
1 Altura: cucharón levantado al máximo	5.859 mm	231"	5.809 mm	229"	5.808 mm	229"	5.885 mm	232"
2 Altura máxima de descarga	4.921 mm	194"	4.917 mm	194"	4.915 mm	194"	4.983 mm	196"
3 Altura: pasador del cucharón a levantamiento máximo	4.108 mm	162"	4.108 mm	162"	4.108 mm	162"	4.108 mm	162"
4 Altura: espacio libre de descarga a levantamiento máximo	2.283 mm	90"	2.336 mm	92"	2.376 mm	94"	2.268 mm	89"
5 Altura: profundidad de excavación	62 mm	2"	86 mm	3"	93 mm	4"	98 mm	4"
6 Altura: espacio libre sobre el suelo	393 mm	15"	393 mm	15"	393 mm	15"	393 mm	15"
7 Altura: parte superior del capó	1.987 mm	78"	1.987 mm	78"	1.987 mm	78"	1.987 mm	78"
8 Altura: parte superior de la ROPS	2.541 mm	100"	2.541 mm	100"	2.541 mm	100"	2.541 mm	100"
9 Longitud: total (excavación)	11.362 mm	447"	11.292 mm	445"	11.236 mm	442"	11.405 mm	449"
10 Longitud: total (acarreo)	10.985 mm	432"	10.937 mm	431"	10.899 mm	429"	11.079 mm	436"
11 Longitud: distancia entre ejes	3.680 mm	145"	3.680 mm	145"	3.680 mm	145"	3.680 mm	145"
12 Longitud: desde el eje delantero hasta el enganche	1.840 mm	72"	1.840 mm	72"	1.840 mm	72"	1.840 mm	72"
13 Largo: desde el eje trasero hasta el parachoques	3.552 mm	140"	3.552 mm	140"	3.552 mm	140"	3.552 mm	140"
14 Longitud: alcance	1.907 mm	75"	1.715 mm	68"	1.805 mm	71"	1.938 mm	76"
15 Ancho: total entre neumáticos	2.767 mm	109"	2.767 mm	109"	2.767 mm	109"	2.767 mm	109"
16 Ancho: máquina sin cucharón	2.727 mm	107"	2.727 mm	107"	2.727 mm	107"	2.727 mm	107"
17 Ancho: máquina con cucharón	3.614 mm	142"	3.042 mm	120"	3.370 mm	133"	2.894 mm	114"
18 Ancho de espacio libre recomendado	4.000 mm	157"	4.000 mm	157"	4.000 mm	157"	4.000 mm	157"
19 Altura de espacio libre recomendada	4.000 mm	157"	4.000 mm	157"	4.000 mm	157"	4.000 mm	157"
20 Radio de espacio libre exterior	7.276 mm	286"	7.034 mm	277"	7.136 mm	281"	7.022 mm	276"
21 Radio de giro interior	3.139 mm	124"	3.139 mm	124"	3.139 mm	124"	3.139 mm	124"

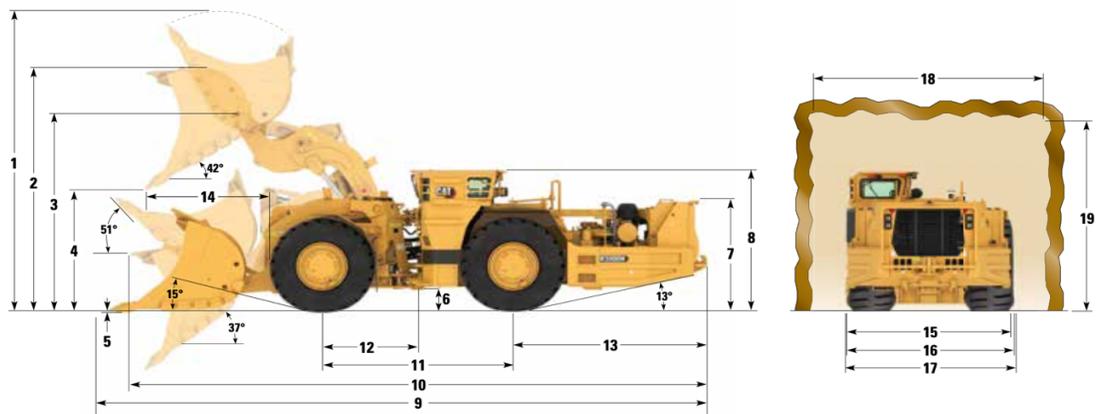
Características Seguridad

- Cabina con protección ROPS/FOPS contra vuelcos y caída de objetos.
- Cámara retrovisora y luces LED para mayor visibilidad.
- Pasadores de seguridad y bloqueo central para mantenimiento seguro.
- Llenado rápido de combustible y gancho de recuperación para emergencias.
- Cabina ergonómica y ventanas de doble panel para comodidad del operador.
- Sistema de detección de presencia del operador, que protege la máquina y al operador de movimientos sin control de la máquina, con neutralización del sistema hidráulico y sensor de puerta.
- Monitoreo de seguridad: Presencia del operador, presión de neumáticos (TPMS), cinturón de seguridad.
- Supresión de incendios: Sistema Ansul LVS con activación en múltiples puntos.
- Visibilidad mejorada: Cámara retrovisora, luces LED protegidas con plexiglás.
- Sistema de frenos mejorado: Indicadores de desgaste y retención en pendientes.
- Facilidad de mantenimiento: Lubricación automática, llenado rápido de combustible, panel de bloqueo central.

Fuente (Especificaciones Técnicas Caterpillar R1700, 2025)

Características Técnicas

- Modelo Cat® C15
- Potencia: Stage V: 335 kW (449 hp) Tier 2/Stage II: 333 kW (447 hp)
- Cilindrada: 15.2 L
- Transmisión: Mando eléctrico de reluctancia conmutada Cat / 5 marchas virtuales en avance y retroceso
- Velocidades: Máxima en avance: 33.4 km/h / Máxima en retroceso: 32.9 km/h
- Capacidades de operación:
- Carga útil nominal: 18,500 kg (40,785 lb)
- Peso bruto de la máquina: 78,089 kg (172,157 lb)
- Capacidad del cucharón: 7.4 - 9.8 m³ (9.7 - 12.8 yd³)
- Fuerza de desprendimiento:
- Levantamiento: 32,500 kg (71,500 lb)
- Inclinación: 42,000 kg (92,500 lb)
- Hidráulica:
- Controles electrohidráulicos
- Bomba de pistón de desplazamiento variable
- Flujo máximo: 479 L/min (126.5 gal/min)
- Sistema de mando eléctrico:
- Control de velocidad continuamente variable
- Retardador automático en pendientes
- Antirretroceso
- Control del par para reducir el uso de frenos
- Rendimiento en pendientes:
- Mejor aceleración y menor consumo de combustible



	638-3510		638-3511		638-3512		638-3513	
	Cucharón de descarga (estándar)		Cucharón de descarga		Cucharón de descarga		Cucharón de descarga	
Capacidad del cucharón	7,4 m ³	9,7 yd ³	8,6 m ³	11,2 yd ³	9,2 m ³	12 yd ³	9,8 m ³	12,8 yd ³
	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg
Ancho del cucharón sobre la cuchilla	3.054	120	3.154	124	3.354	132	3.454	136
1 Altura: cucharón levantado al máximo	6.560	258	6.560	258	6.560	258	6.560	258
2 Altura máxima de descarga	5.497	216	5.497	216	5.497	216	5.497	216
3 Altura: pasador del cucharón a levantamiento máximo	4.663	184	4.663	184	4.663	184	4.663	184
4 Altura: espacio libre de descarga a levantamiento máximo	3.016	119	2.835	112	2.824	111	2.808	111
5 Altura: profundidad de excavación	80	3	111	4	111	4	117	5
6 Altura: espacio libre sobre el suelo	405	16	405	16	405	16	405	16
7 Altura hasta la parte superior del protector trasero	2.291	90	2.291	90	2.291	90	2.291	90
8 Altura: parte superior de la ROPS	2.860	113	2.860	113	2.860	113	2.860	113
9 Longitud: total (excavación)	11.320	446	11.582	456	11.599	457	11.618	457
10 Longitud: total (acarreo)	11.033	434	11.198	441	11.208	441	11.223	442
11 Longitud: distancia entre ejes	3.780	149	3.780	149	3.780	149	3.780	149
12 Longitud: desde el eje delantero hasta el enganche	1.890	74	1.890	74	1.890	74	1.890	74
13 Longitud: desde el eje trasero hasta el parachoques (con tuberías auxiliares)	3.660	144	3.660	144	3.660	144	3.660	144
14 Longitud: alcance	1.652	65	1.843	73	1.857	73	1.868	74
15 Ancho: total entre neumáticos	2.938	116	2.938	116	2.938	116	2.938	116
16 Ancho: máquina sin cucharón	3.028	119	3.028	119	3.028	119	3.028	119
17 Ancho: máquina con cucharón	3.090	122	3.226	127	3.436	135	3.532	139
18 Ancho de espacio libre recomendado	4.500	177	4.500	177	4.500	177	4.500	177
19 Altura de espacio libre recomendada	4.500	177	4.500	177	4.500	177	4.500	177
Radio de espacio libre exterior	7.270	286	7.444	293	7.536	297	7.595	299
Radio de giro interior	3.391	134	3.391	134	3.391	134	3.391	134

Características de Seguridad

- Estructura ROPS/FOPS integrada
- Amortiguación en el bastidor para reducir vibraciones
- Cabina presurizada con aire acondicionado y filtrado HEPA
- Sistema de presencia del operador con sensor en la puerta
- Monitoreo del cinturón de seguridad
- Cámaras trasera y lateral para mejor visibilidad
- Protección de ventanas y techo reforzado
- Inhibidor de deslizamiento en posición neutral
- Paradas de emergencia iluminadas en ambos lados
- Sistema de dirección secundaria
- Sistema de control de tracción para maximizar la vida útil de los neumáticos
- Retardador automático con control en pendientes
- Sistema de supresión de incendios Ansul LVS (líquido)
- Activación de extinción desde la cabina
- MineStar™ para operación remota y automatización
- Monitoreo de carga útil y presión de neumáticos
- Sistema Product Link™ Elite para seguimiento en tiempo real

Fuente: (Caterpillar, Especificaciones Técnicas de R2900XE, 2025)

Características Técnicas

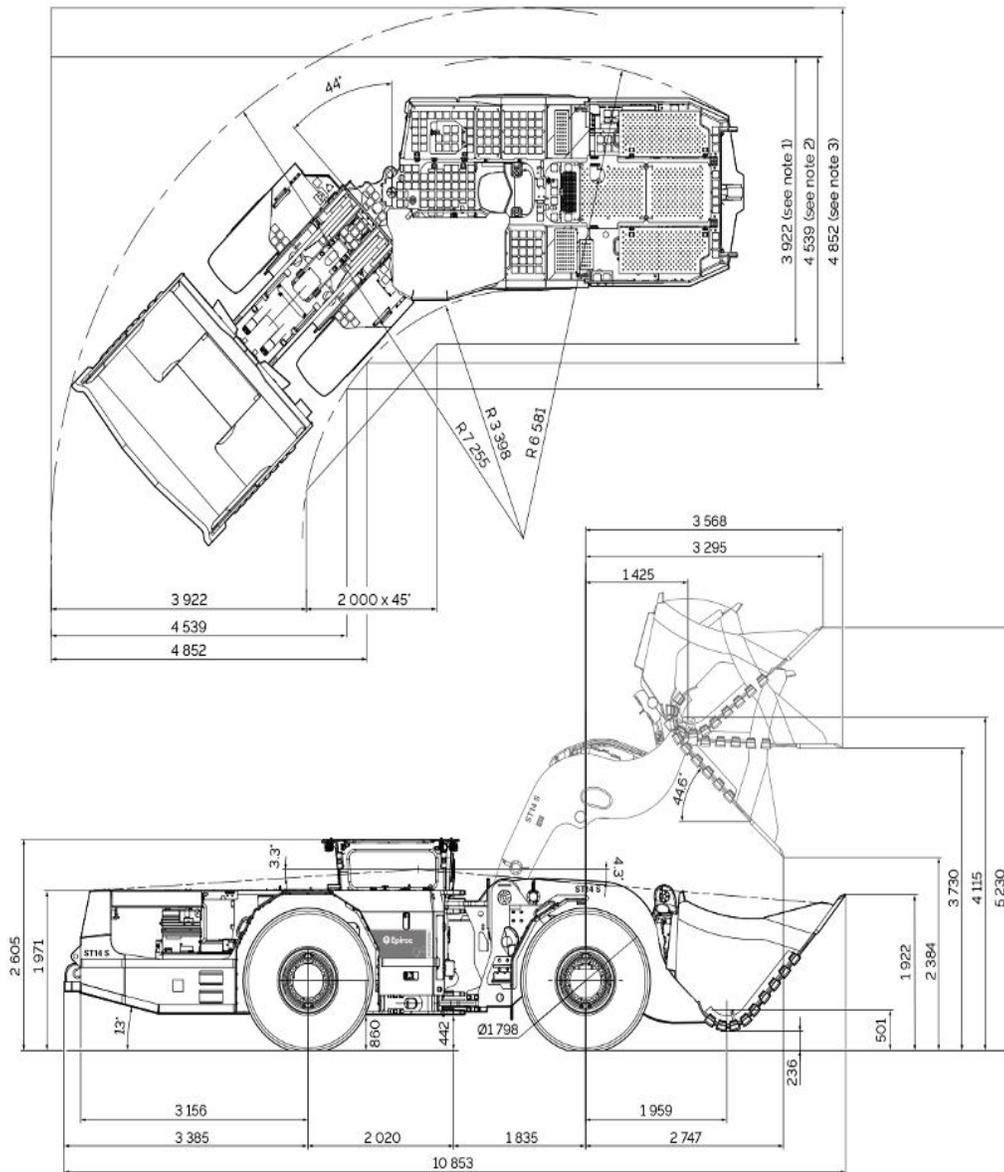
- Motor: Cummins QSM11
- Norma de emisiones: EPA Tier 3 / EU Stage IIIA
- Potencia: 250 kW (335 hp) a 2.100 rpm
- Torque máximo: 1.674 Nm a 1.400 rpm
- Sistema de enfriamiento: Líquido con ventilador controlado por bomba
- Transmisión: Automática Power Shift con 4 velocidades
- Marca del eje: Kessler D106
- Diferencial delantero y trasero: Autoblocante (Limited Slip)
- Oscilación del eje: 16° (+/- 8°)
- Capacidad de carga útil: 14.000 kg
- Fuerza de desprendimiento (hidráulica y mecánica): 22.300 kg
- Capacidad del tanque de combustible: 390 litros
- Presión del sistema hidráulico: 29.6 MPa
- Capacidad del tanque hidráulico: 218 litros
- Sistema de control Rig Control System (RCS)
- Monitoreo en tiempo real de producción y datos de la máquina
- Sistema de prueba automática de frenos
- Control de tracción y limitador de velocidad
- Indicador de estado de la máquina
- Sistema telemático My Epiroc con conectividad WiFi y LTE
- Sistema de pesaje de carga (Loadrite)

Características de Seguridad

- Cabina certificada ISO ROPS y FOPS (Protección contra vuelcos y caída de objetos)
- Puerta con bloqueo de seguridad
- Vidrios de seguridad con salida de emergencia
- Protección contra colisiones CAS Nivel 9 (opcional)
- Sistema lógico de desconexión segura
- Asas de agarre y acceso seguro con tres puntos de contacto
- Frenos de servicio, estacionamiento y emergencia SAHR (Spring Applied, Hydraulic Released)
- Control de amortiguación para mayor estabilidad en terrenos irregulares
- Dirección secundaria de emergencia
- Cámara de visión trasera y delantera con pantallas dedicadas
- Luces de trabajo LED de alta intensidad (1,400 lúmenes)

- Alarma de reversa audiovisual
- Sistema de monitoreo de presión de neumáticos (TPMS)
- Cabina insonorizada con barreras aislantes de sonido
- Joysticks ergonómicos ajustables
- Botón de parada de emergencia en 3 ubicaciones
- Sistemas Contra Incendios y Mantenimiento
- Sistema de supresión de incendios Ansul A-101 con activación manual
- Extintor de mano

Turning radius and dimensions (2.2 t/m³ bucket)



All dimensions are shown in millimeters (mm). Dimensions and calculations shown are based on standard vehicle configuration with 27 mm tire deflection, unloaded.

Fuente: (Características Técnicas Epiroc ST14, 2025)

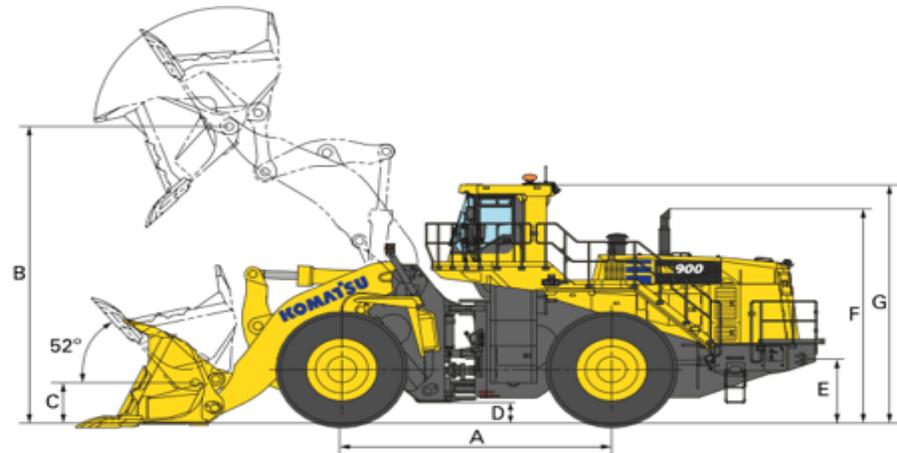
Características Técnicas

- Modelo de motor: Komatsu SAA12V140E-7
- Potencia neta: 895 HP (668 kW) a 1,800 rpm
- Normativa de emisiones: Cumple con Tier 4 Final
- Sistema de inyección de combustible: Common Rail de alta presión
- Capacidad del tanque de combustible: 1,320 litros
- Peso de operación: 116,400 kg
- Capacidad del cucharón: 11.5 m³ - 14.5 m³
- Carga útil nominal: 20,500 kg
- Fuerza de arranque: 98,740 kgf
- Fuerza de tracción máxima: 145,000 kgf
- Velocidad máxima de desplazamiento: Avance: 40 km/h Reversa: 27 km/h
- Dirección hidráulica con sensor de carga
- Ángulo de articulación: 43°
- Radio de giro mínimo: 10,525 mm

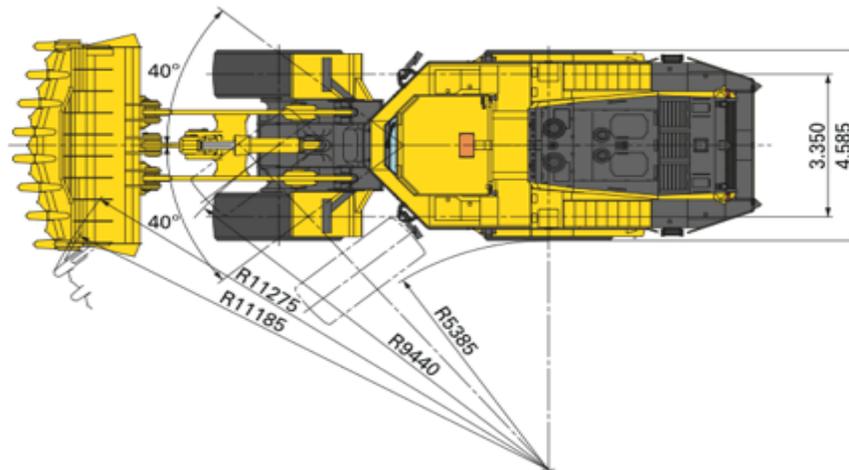
Características de Seguridad

- Cabina con certificación ROPS/FOPS (Protección contra vuelcos y caída de objetos)
- Sistema de monitoreo KomVision con cámaras de visión perimetral en 360°
- Vidrios de seguridad tintados con reducción de reflejo
- Sistema de presurización de cabina para evitar ingreso de polvo
- Sistema de filtración de aire HEPA
- Escalera de acceso retráctil con accionamiento eléctrico
- Puerta con apertura remota desde el suelo
- Alarma de reversa audiovisual
- Frenos de servicio: Multidisco húmedos, accionados hidráulicamente
- Freno de estacionamiento: Automático, con liberación hidráulica
- Sistema de control de estabilidad (Komatsu SmartLoader Logic)
- Control de amortiguación del cucharón para reducir impactos
- Sistema de protección contra sobrevelocidad del motor
- Desconexión automática del motor en caso de temperatura alta
- Tres interruptores de parada de emergencia
- Sistema de detección de proximidad para evitar colisiones
- Sistema de supresión de incendios con activación automática
- Extintores de mano en cabina y en chasis

Medido con neumáticos 45/65 R45 (L-5) y cabina ROPS/FOPS (ISO 3471/ISO 3449).



	Aguilón estándar	Aguilón de gran elevación
Banda de rodadura	3.350 mm	3.350 mm
Ancho sobre neumáticos	4.585 mm	4.585 mm
A Distancia entre ejes	5.600 mm	5.600 mm
B Altura del pasador de la bisagra, altura máx.	6.975 mm	7.485 mm
C Altura del pasador de la bisagra, posición de acarreo	955 mm	1.050 mm
D Distancia al suelo	485 mm	485 mm
E Altura de enganche	1.510 mm	1.510 mm
F Altura total, parte superior de la columna	5.040 mm	5.040 mm
G Altura total, cabina ROPS	5.600 mm	5.600 mm



Fuente: (Catálogo Komatsu WA900, 2025)

Características Técnicas

- Modelo de motor: Volvo TAD1340VE
- Potencia: 256 kW (343 hp) a 2,100 rpm
- Torque máximo: 1,770 Nm a 1,260 rpm
- Sistema de enfriamiento: Líquido con ventilador controlado por bomba de pistón
- Capacidad del tanque de combustible: 540 litros
- Consumo promedio de combustible: 33 l/h
- Transmisión: Dana SOH 6000 Power Shift automática, 4 marchas adelante y 4 en reversa
- Capacidad de carga útil: 14,000 kg
- Fuerza de levantamiento: 28,042 kg
- Tiempo de ciclo hidráulico: Levantamiento del brazo: 7.0 s / Descenso del brazo: 4.0 s / Volteo del cucharón: 2.3 s
- Cucharón estándar: 5.4 m³
- Capacidad del tanque hidráulico: 240 litros
- Ángulo de oscilación del eje trasero: $\pm 8^\circ$
- Peso operativo: 38,100 kg
- Peso total cargado: 52,100 kg
- Longitud: 11,100 mm
- Ancho: 2,770 mm
- Altura: 2,653 mm
- Radio de giro mínimo: 10,525 mm

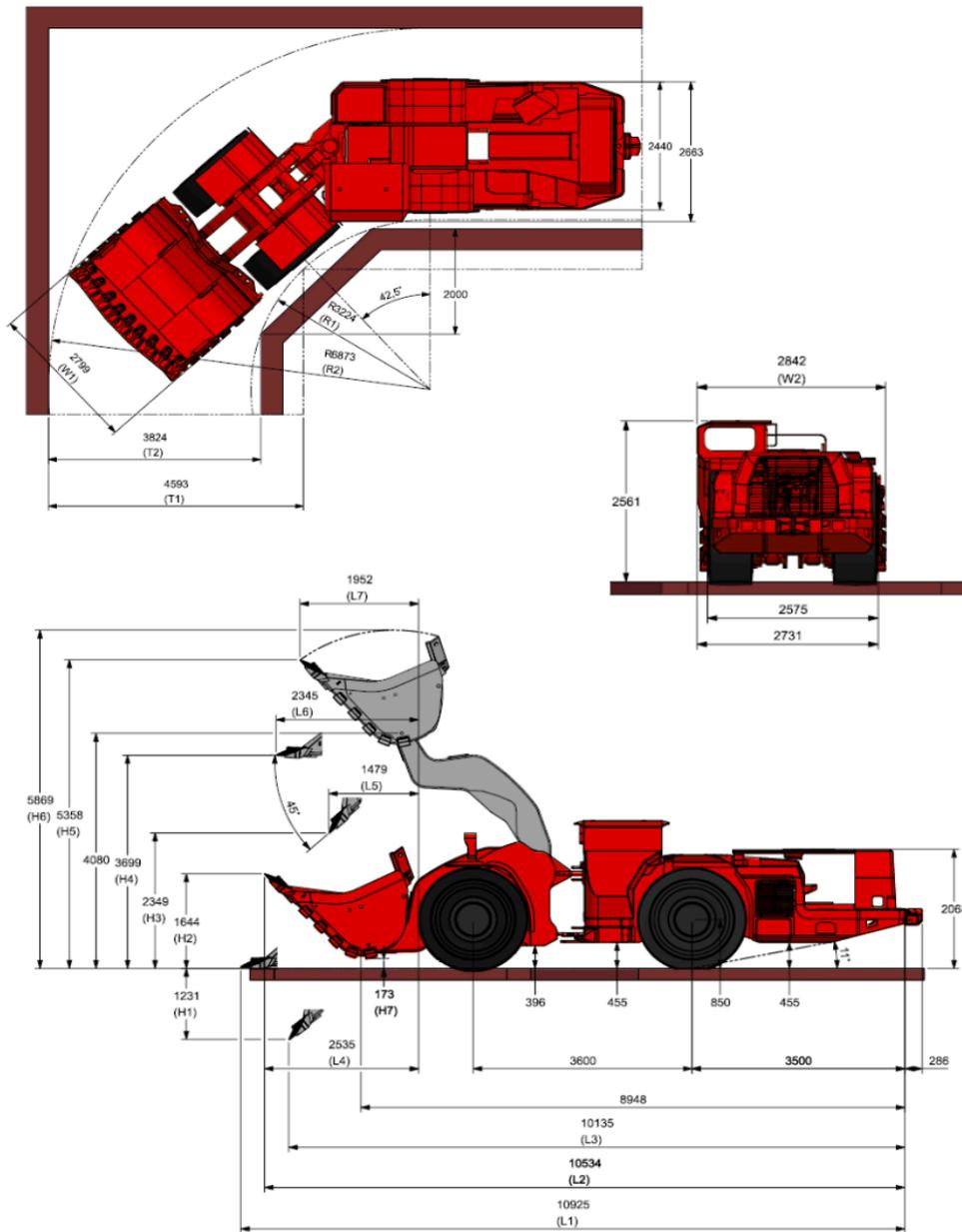
Características de Seguridad

- Cabina certificada ROPS/FOPS (Protección contra vuelcos y caída de objetos)
- Cabina sellada y presurizada con aire acondicionado y reducción de ruido
- Unidad de aire acondicionado ubicada fuera de la cabina para menor ruido interno
- Frenos de servicio: Multidisco húmedos, operados hidráulicamente en todas las ruedas
- Freno de estacionamiento y emergencia: Aplicado por resorte, con liberación hidráulica
- Sistema de activación automática de frenos (ABA)
- Sistema de inclinómetro para monitorear ángulos de operación
- Control de amortiguación para evitar vibraciones en terrenos irregulares
- Sistema de monitoreo remoto Sandvik Knowledge Box™

- Compatibilidad con transmisión de datos 3G, 4G, LTE y WLAN
- Cámaras de monitoreo delantera y trasera
- Iluminación LED de alta intensidad
- Sistema de alerta de reversa
- Sistema de detección de proximidad para evitar colisiones
- Baliza de estacionamiento y luces de advertencia
- Sistema de extinción de incendios ANSUL Twin (opcional con CHECKFIRE)
- Extintor portátil de 12 kg

Dimensiones con 5,4 m³ Cubo de Get (estándar)

Las dimensiones son sólo indicativas.



Información obtenida de www.rocktechnology.sandvik

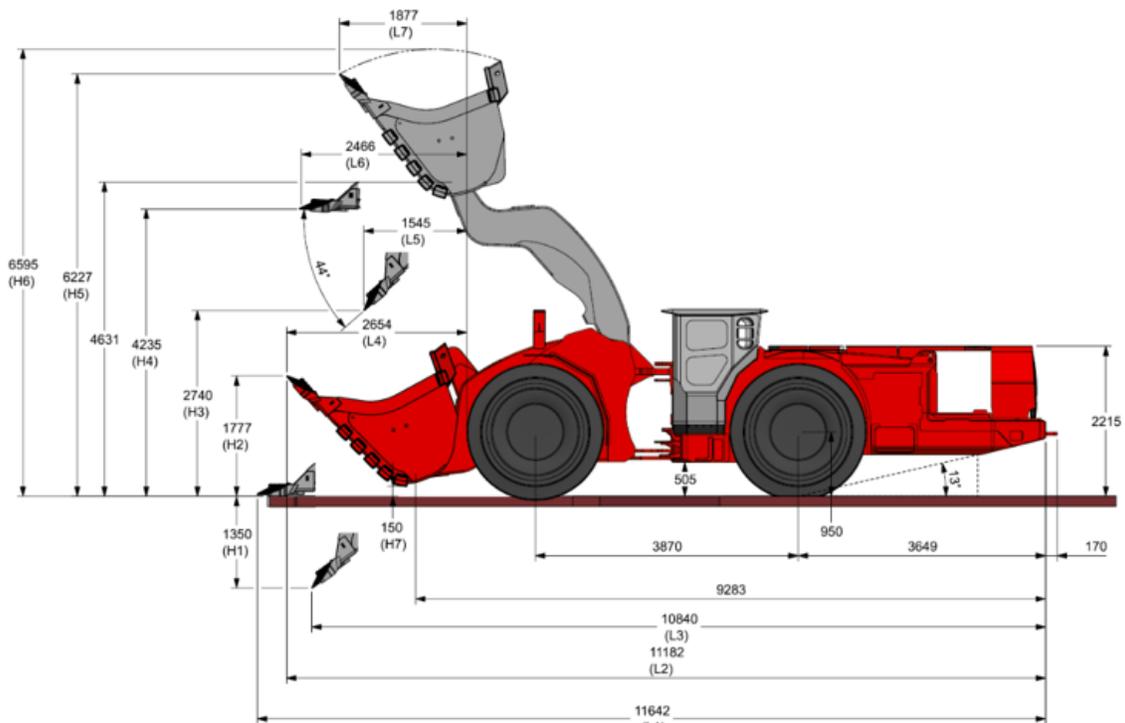
Características Técnicas

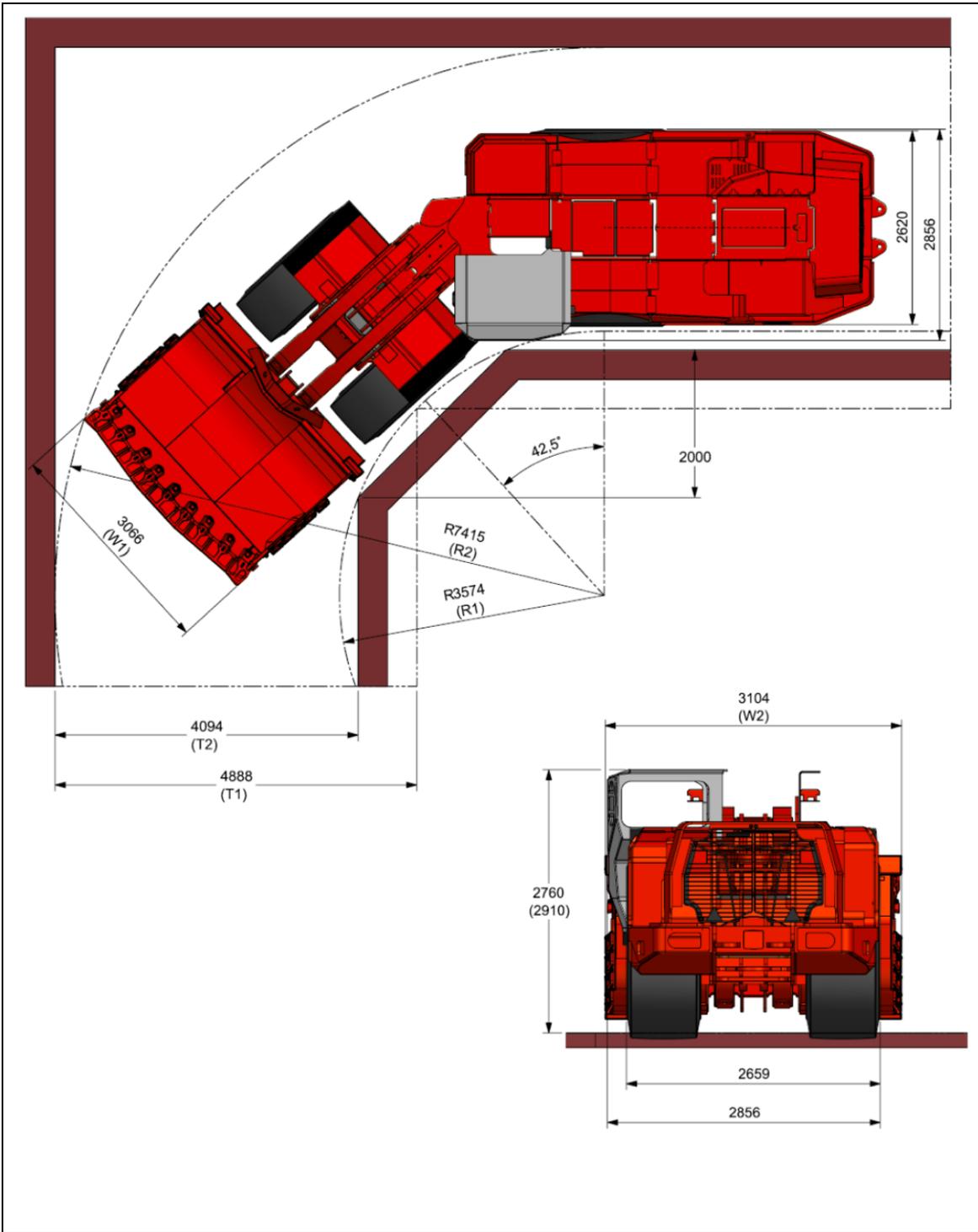
- Modelo de motor: Volvo TAD1342VE
- Potencia: 310 kW (416 hp) a 2,100 rpm
- Torque máximo: 2,005 Nm a 1,260 rpm
- Sistema de enfriamiento: Líquido con ventilador controlado por bomba de pistón
- Capacidad del tanque de combustible: 580 litros
- Consumo promedio de combustible: 32 l/h
- Transmisión: Dana SOH 6000 Power Shift automática, 4 marchas adelante y 4 en reversa
- Convertidor de par: Dana SOH 9000 con bloqueo automático
- Capacidad de carga útil: 17,200 kg
- Fuerza de levantamiento: 35,000 kg
- Fuerza de inclinación del cucharón: 29,450 kg
- Tiempo de ciclo hidráulico: Levantamiento del brazo: 8.3 s / Descenso del brazo: 4.3 s / Volteo del cucharón: 2.0 s
- Cucharón estándar: 7.0 m³
- Peso operativo: 48,400 kg
- Peso total cargado: 65,600 kg

Características de Seguridad

- Cabina certificada ROPS/FOPS (Protección contra vuelcos y caída de objetos)
- Cabina sellada y presurizada con aire acondicionado y reducción de ruido
- Vidrios de seguridad laminados de 3 capas
- Inclínómetros para indicar ángulos de operación
- Salida de emergencia en la cabina
- Sistema de monitoreo con pantalla táctil de 7": Información en tiempo real / Alarmas y advertencias de fallas / Gráficos optimizados para reducir la fatiga ocular
- Frenos de servicio: Multidisco húmedos, operados hidráulicamente en todas las ruedas
- Freno de estacionamiento y emergencia: Aplicado por resorte, con liberación hidráulica
- Sistema de activación automática de frenos (ABA)
- Sistema de inclinómetro para monitorear ángulos de operación
- Dirección secundaria de emergencia

- Control de amortiguación para evitar vibraciones en terrenos irregulares
- Sistema de monitoreo remoto Sandvik Knowledge Box™
- Compatibilidad con transmisión de datos 3G, 4G, LTE y WLAN
- Cámaras de monitoreo delantera y trasera
- Iluminación LED de alta intensidad: Luces delanteras, traseras y en la cabina / Luces de advertencia en color rojo/verde / Luces de estacionamiento, freno e intermitentes
- Iluminación LED de 50W a 20 m de distancia
- Sistema de alerta de reversa
- Sistema de pesaje integrado (opcional)
- Sistema de detección de proximidad para evitar colisiones
- Asistente de velocidad del operador
- Sistema de extinción de incendios ANSUL Twin (opcional con CHECKFIRE)
- Extintor portátil de 12 kg
- Baliza de estacionamiento y luces de advertencia





Fuente: (Especificaciones Técnicas Sandvik El Toro LH 514, 2025)

Características Técnicas

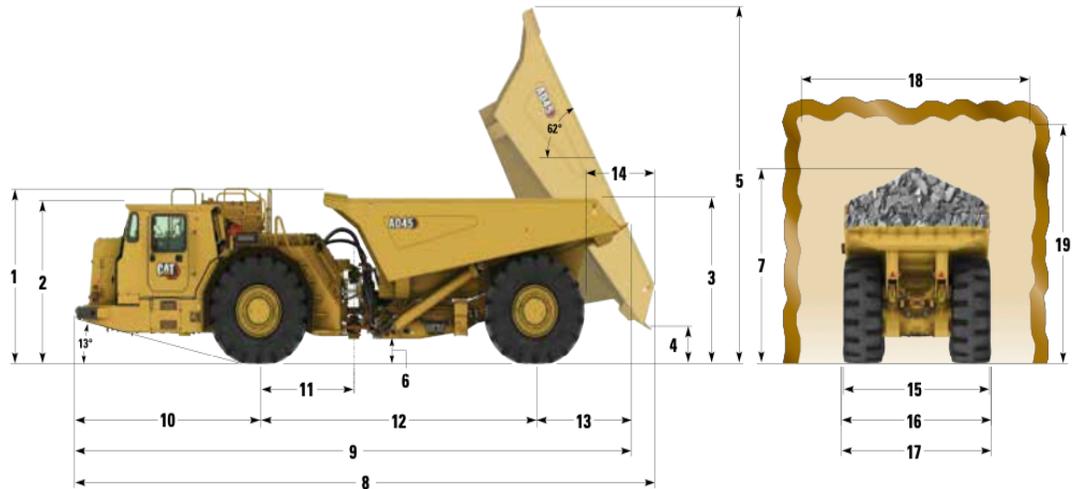
- Motor Stage V: 446 kW (598 hp)
- Motor Tier 3 / VR: 433 kW (581 hp)
- Opción Stage V de la UE (cumple con regulaciones más estrictas)
- Opción Tier 3/Stage IIIA de la EPA de EE.UU.
- Cilindrada: 18.1 L
- Sistema de enfriamiento: Radiador de flujo cruzado
- Frenos de disco múltiples en las cuatro ruedas, refrigerados con aceite
- Capacidad de carga útil nominal: 45,000 kg (99,208 lb)
- Masa bruta de la máquina: 89,250 kg (196,765 lb)
- Cajas disponibles: Caja estándar: 21.3 m³ (27.9 yd³) / Caja de mayor capacidad: 25.1 m³ (32.8 yd³) / Caja expulsora: 22.9 m³ (29.9 yd³)
- Levantamiento: 15 segundos
- Descarga: 21 segundos
- Longitud total: 11,620 mm
- Ancho total: 3,020 mm
- Altura total con caja levantada: 6,361 mm
- Radio de giro exterior: 9,420 mm
- Oscilación del bastidor: 10°
- Ángulo de articulación: 42.5°
- Neumáticos: 29.5 × R29

Características de Seguridad

- Cabina certificada ROPS/FOPS (Protección contra vuelcos y caída de objetos)
- Cabina cerrada insonorizada con HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado)
- Evita movimientos incontrolados del camión si el operador no está presente / Activa automáticamente el freno de estacionamiento
- Vidrio de seguridad con empuje hacia afuera en caso de emergencia
- Cámaras de visión trasera y lateral
- Sistema de detección de proximidad para evitar colisiones
- Pasamanos y escalones iluminados para acceso seguro
- Regula la velocidad en pendientes y optimiza la temperatura del aceite
- Mejora la seguridad y reduce la fatiga del operador
- Sistema de gestión de carga útil TPMS: Optimiza la carga y evita sobrecargas
- Pantalla en cabina para monitoreo en tiempo real
- Sistema de extinción de incendios Ansul LVS con activación manual

Dimensiones

Todas las dimensiones son aproximadas.



	568-7264		568-7256		568-7260		568-7265	
	Caja del camión		Caja del camión (STD)		Caja del camión		Caja expulsora	
Capacidad de la caja	18,0 m ³	23,5 yd ³	21,3 m ³	27,9 yd ³	25,1 m ³	32,8 yd ³	22,9 m ³	29,9 yd ³
	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg
1 Altura hasta la parte superior de la caja vacía	2.830	111,4	3.035	119,5	3.181	125,2	3.464	136,4
2 Altura: parte superior de la ROPS	2.820	111,0	2.820	111,0	2.820	111,0	2.820	111,0
3 Altura: carga en la caja	2.720	107,1	2.924	115,1	3.070	120,9	3.177	125,1
4 Altura: espacio libre de descarga**	659	25,9	659	25,9	659	25,9	961	37,8
5 Altura: hasta la parte superior con la caja levantada	6.019	237,0	6.361	250,4	6.607	260,1	—	—
6 Altura: espacio libre sobre el suelo	441	17,4	441	17,4	441	17,4	441	17,4
7 Altura: hasta la parte superior de la carga (SAE 2:1)	3.424	134,8	3.628	142,8	3.834	150,9	3.920	154,3
8 Longitud: longitud total máxima	11.535	454,1	11.620	457,5	11.680	459,8	12.125	477,4
9 Longitud: caja en posición normal	11.196	440,8	11.196	440,8	11.196	440,8	11.325	445,9
10 Longitud: desde parachoques delantero hasta eje delantero	3.720	146,5	3.720	146,5	3.720	146,5	3.720	146,5
11 Longitud: desde el eje delantero hasta el enganche	1.920	75,6	1.920	75,6	1.920	75,6	1.920	75,6
12 Longitud: entre ejes	5.570	219,3	5.570	219,3	5.570	219,3	5.570	219,3
13 Longitud: desde el eje trasero hasta la cola	1.906	75,0	1.906	75,0	1.906	75,0	2.035	80,1
14 Longitud: desde las ruedas traseras hasta la caja levantada	1.275	50,2	1.275	50,2	1.275	50,2	1.835	72,2
15 Ancho: total entre neumáticos	3.020	118,9	3.020	118,9	3.020	118,9	3.020	118,9
16 Ancho: máquina con caja	3.020	118,9	3.020	118,9	3.200	126,0	3.200	126,0
17 Ancho: máquina sin caja	3.020	118,9	3.020	118,9	3.020	118,9	3.020	118,9
18 Ancho de espacio libre recomendado*	4.500	177,2	4.500	177,2	4.500	177,2	4.500	177,2
19 Altura de espacio libre recomendada*	4.500	177,2	4.500	177,2	4.500	177,2	4.500	177,2

* Las dimensiones de espacio libre se usan solo como referencia.

**Las mediciones se tomaron con la compuerta trasera bajada para la caja expulsora.

Fuente: (Caterpillar, Características Técnicas Caterpillar AD45, 2025)

Características Técnicas

- Capacidad de carga útil: 60 toneladas métricas.
- Motor: Cummins QSK19 MCRS C760, con potencia de 567 kW (760 hp) a 2.100 rpm y un torque máximo de 3.084 Nm a 1.300 rpm.
- Transmisión: Planetaria, automática de 6 velocidades adelante y 2 reversas, con convertidor de torque de una sola etapa con bloqueo automático.
- Ejes: Kessler D111, con diferencial convencional en el eje delantero y trasero.
- Suspensión: Gas-hidráulica en el eje delantero para mejorar el confort y la maniobrabilidad.
- Frenos: Frenos de discos múltiples húmedos y forzadamente refrigerados en cada rueda. Freno de servicio, estacionamiento y emergencia con tecnología SAHR (Spring Applied Hydraulic Released).
- Retardador hidráulico. Capacidad del tanque de combustible: 844 litros.
- Consumo de combustible: 67 litros por hora (a plena carga).
- Sistema hidráulico:
- Presión del sistema: 20.7 MPa.
- Capacidad del tanque hidráulico: 238 litros.
- Cilindros de dirección: 160 mm.
- Cilindros de elevación: 177.8 mm.
- Cilindros de suspensión: 125 mm.
- Velocidad máxima: 37.5 km/h.
- Volumen de tolva (SAE heaped): 27 m³.

Características de Seguridad

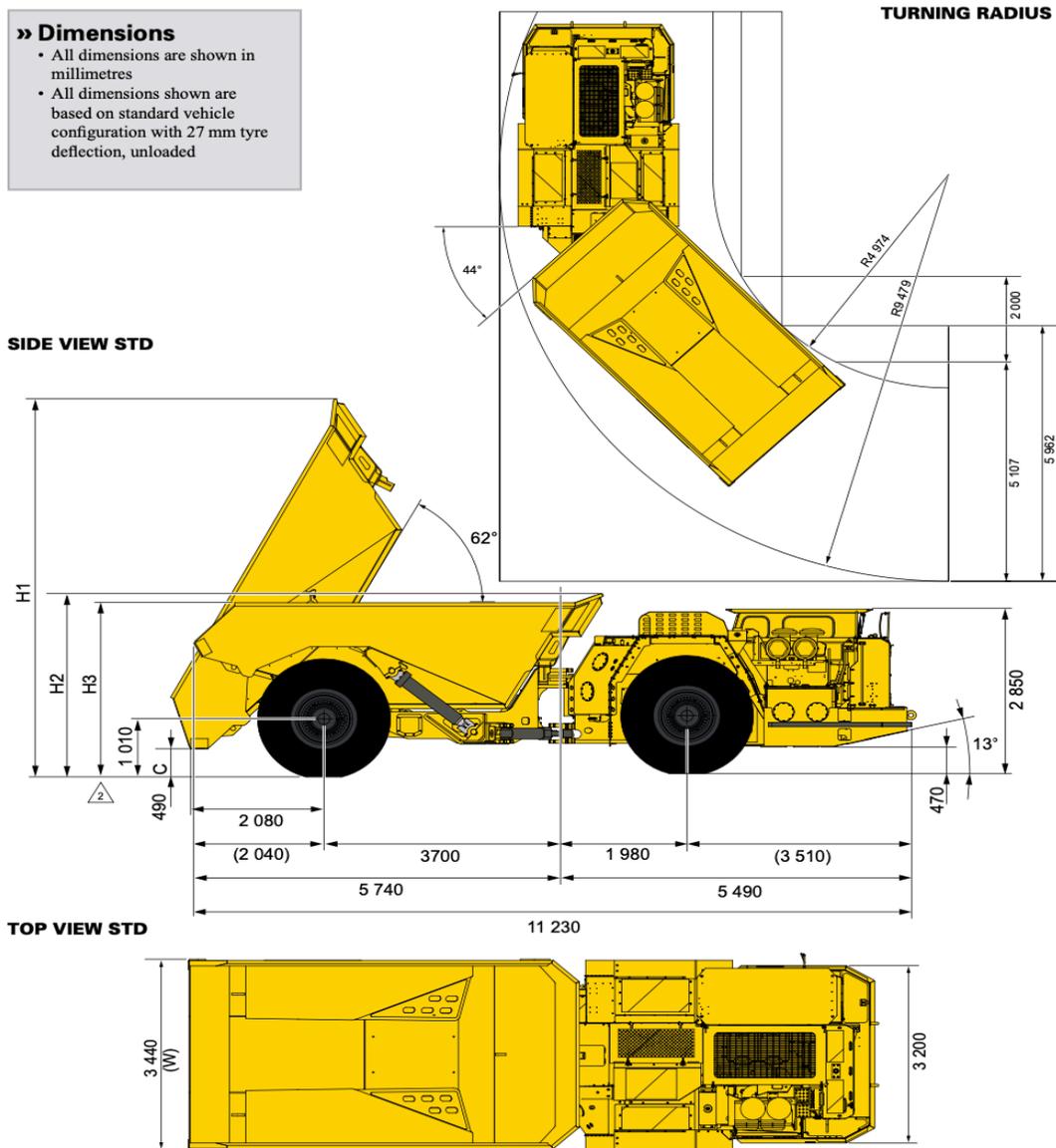
- Cabina certificada ROPS/FOPS, asegurando la protección contra vuelcos y caída de objetos.
- Asiento con suspensión KAB 555, con cinturón de seguridad retráctil.
- Cámara de retroceso y monitor, para mejorar la visibilidad trasera.
- Sistema de dirección de emergencia (opcional) con acumulador.
- Sistema de frenos de emergencia y estacionamiento con tecnología SAHR.
- Iluminación LED con luces de freno y marcha atrás.
- Sistema de seguridad contra incendios, con opciones de:
- Supresión de incendios Ansul de doble botella con apagado automático del motor.
- Extintores de 6 kg y 8 kg.

- Escalones y puntos de acceso con material antideslizante para mayor seguridad en el ingreso y salida del operador.
- Sistema de lubricación central manual para mantenimiento seguro y eficiente.
- Protección térmica en el sistema de escape para evitar incendios y accidentes por altas temperaturas.
- Sistema de aislamiento eléctrico con interruptor de desconexión para mayor seguridad durante el mantenimiento.

Measurements and weights

» Dimensions

- All dimensions are shown in millimetres
- All dimensions shown are based on standard vehicle configuration with 27 mm tyre deflection, unloaded



Fuente: (Características Técnicas Minetruck MT6020, 2025)

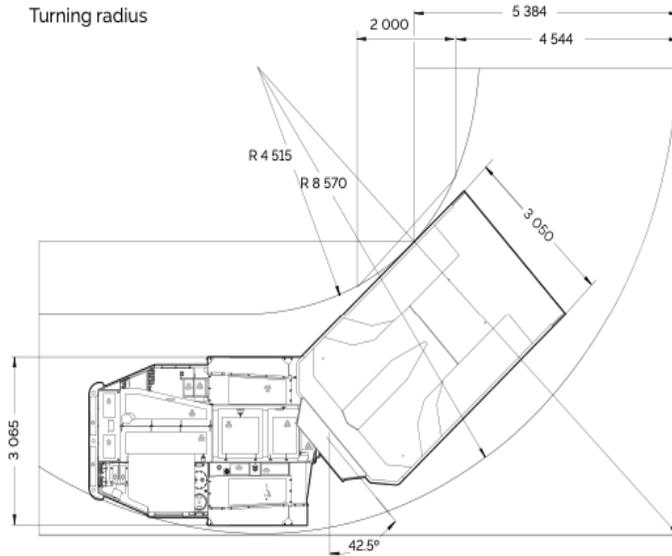
Características Técnicas

- Capacidad de carga útil: 32.6 toneladas métricas.
- Motor: Modelo estándar: Cummins QSM11 EPA Tier 3, con 298 kW (400 hp) a 2.100 rpm y un torque máximo de 1.898 Nm a 1.350 rpm. / Opcional: Cummins X12 Tier 4 final/EU Stage V, con mismas especificaciones de potencia y torque.
- Frenos: Sistema SAHR (Spring Applied Hydraulic Released) en todas las ruedas. / Frenos de discos múltiples húmedos y forzosamente refrigerados. / Freno de compresión del motor
- Capacidad del tanque de combustible: 439 litros.
- Sistema hidráulico: Presión del sistema: 15.8 MPa. / Capacidad del tanque hidráulico: 238 litros.
- Capacidad máxima de la tolva (SAE heaped): 20 m³.
- Neumáticos: Tubeless para descarga horizontal en espacios reducidos.
- Velocidad máxima: 30.7 km/h en vacío. / 30.0 km/h con carga.
- Neumáticos: Tubeless, tamaño 26.5R25.

Características de Seguridad

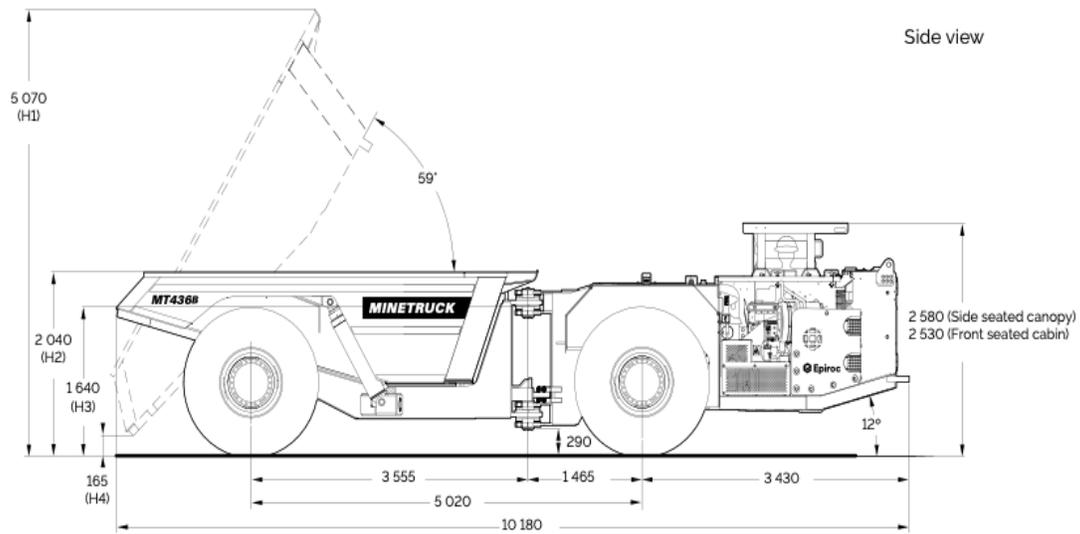
- Cabina certificada ROPS/FOPS, asegurando protección contra vuelcos y caída de objetos.
- Frenos de emergencia y estacionamiento SAHR, con activación automática tras 3 segundos en neutral (opcional).
- Cámara trasera y monitor, para mejorar la visibilidad del operador.
- Bloqueo de articulación y tolva levantada, asegurando estabilidad en mantenimiento.
- Sistema de iluminación LED de alta intensidad, incluyendo: Luces de conducción delanteras. / Luces de freno y cola. / Luz ámbar intermitente de encendido (opcional). / Luces de carga y luces laterales (opcional).
- Sistema de supresión de incendios Ansul (opcional), con apagado automático del motor.
- Extintores manuales opcionales.
- Sistema de lubricación centralizado, reduciendo riesgos durante mantenimiento.
- Protección térmica en el sistema de escape, minimizando riesgos de incendio.
- Sistema de dirección de emergencia (opcional).
- Alarma auditiva y visual de reversa.

Measurements and weights



Dimensions

- Turning angle +/- 42.5°
- Turning radius left and right are symmetrical
- Dimensions shown are based on standard vehicle configuration, with loaded box with 25 mm tire deflection
- All dimensions are shown in millimetres



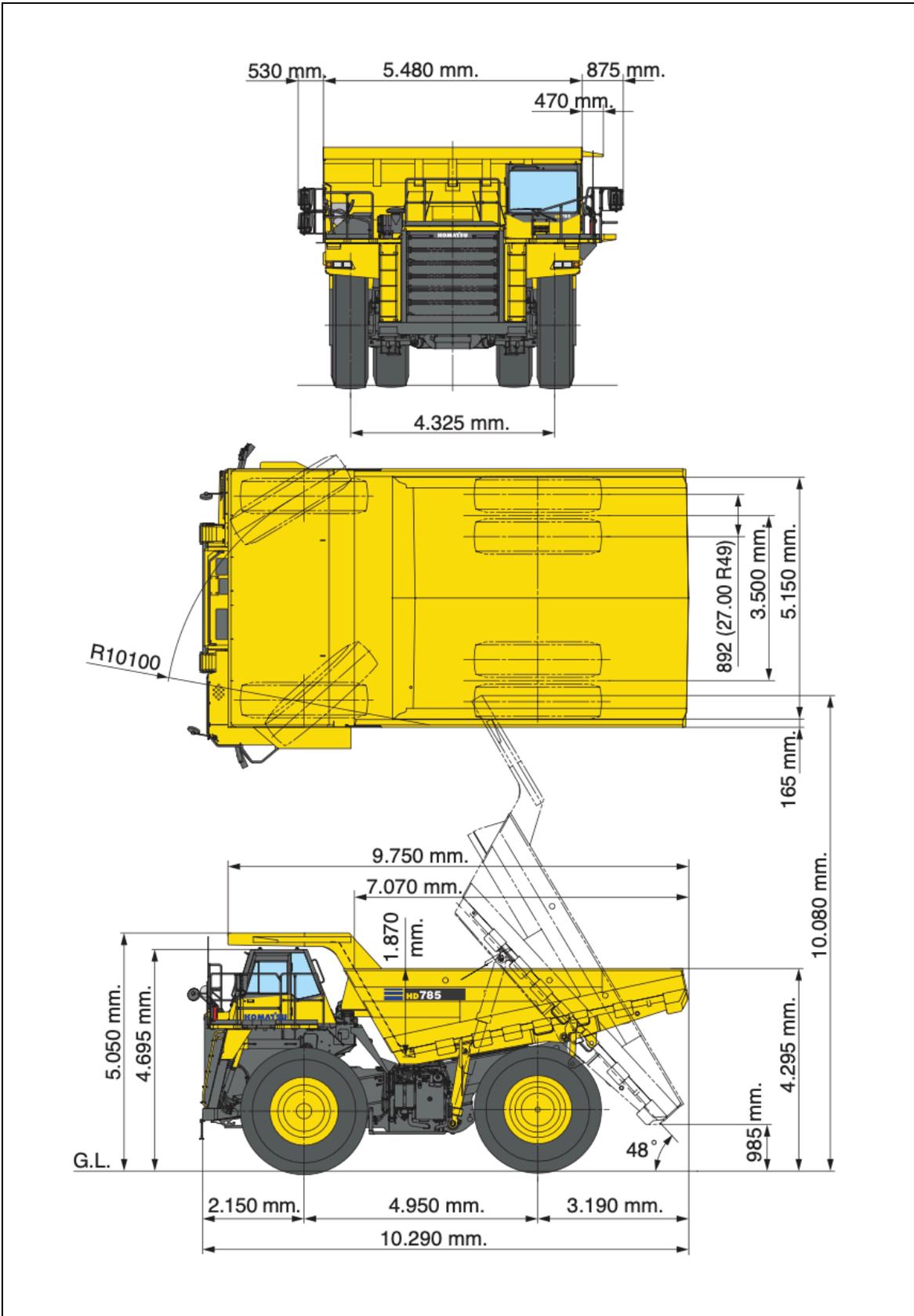
Fuente: (Epiroc, Características Técnicas Minetruck MT436, 2025)

Características Técnicas

- Motor: Komatsu SAA12V140E-3, turbocargado y refrigerado por agua, con una potencia neta de 879 kW (1.178 hp) y una potencia bruta de 895 kW (1.200 hp).
- Capacidad de carga útil: 91.7 toneladas métricas.
- Transmisión: 7 marchas hacia adelante y 2 reversas (RH, RL), con un sistema de engranaje planetario totalmente automático.
- Suspensión: Suspensión delantera tipo MacPherson y suspensión trasera hidroneumática automática de tres modos.
- Frenos: Frenos de disco múltiple enfriados por aceite en las 4 ruedas, con un sistema hidráulico controlado y un retardador de 1.092 kW (1.464 hp).
- Dirección: Dirección asistida hidráulica con 2 cilindros de doble efecto.
- Sistema de combustible: Inyección directa con control electrónico.
- Capacidad del tanque: 1.308 litros para aceite de motor, 129 litros para convertidor de torque y transmisión.
- Rendimiento de viaje: Hasta 65 km/h.
- Neumáticos: Tamaño estándar de 27.00 R49.

Características de Seguridad

- Cabina: Incorpora estructuras ROPS (protección contra vuelcos) y FOPS (protección contra caídas de objetos), asegurando la protección del operador.
- Frenos de estacionamiento: En las 4 ruedas, aplicados por resorte, con discos múltiples húmedos.
- Sistema de monitoreo KOMTRAX Plus: Permite monitorear las condiciones del equipo, incluyendo el rendimiento y el consumo de combustible.
- Sistema antibloqueo de frenos (ABS) y regulador de giro automático (ASR): Mejoran la seguridad en terrenos difíciles.
- Cámara trasera y monitor LCD: Mejora la visibilidad trasera del equipo.
- Alarma de sobrecarga: Un sistema que avisa cuando la carga del camión supera los límites recomendados.
- Escaleras y barandillas: Facilitan el acceso seguro al equipo.
- Protección contra incendios y sistemas de escape: Con sistemas de protección térmica y calefacción de la tolva.



Fuente: (Komatsu, Catálogo Komatsu HD785-7, 2025)

Características Técnicas

- **Diseño Compacto:** Con un ancho de tan solo 2.02 metros, es ideal para operaciones en minas subterráneas con secciones de 2.8 metros.
- **Capacidad de Carga:** 17 toneladas métricas y una tolva de 8 m³ (colmada).
- **Motor:** Equipado con un motor Caterpillar C7.1 que entrega una potencia neta de 225 HP.
- **Peso Operativo:** 15,260 kg.
- **Chasis y Articulación:** Cuenta con un chasis de servicio pesado y una articulación central de $\pm 42^\circ$, lo que le otorga gran maniobrabilidad.
- **Tracción:** En las cuatro ruedas, optimizando su desempeño en terrenos difíciles.
- **Cabina:** Diseñada con doble consola y timón, asiento giratorio de 180°, controles ergonómicos y protección ROPS/FOPS, garantizando la seguridad y comodidad del operador.

Características de Seguridad

- **Protección ROPS/FOPS:** La cabina está equipada con estructuras de protección contra vuelcos (ROPS) y contra la caída de objetos (FOPS), asegurando la integridad del operador en situaciones adversas.
- **Controles Ergonómicos:** Diseñados para minimizar la fatiga del operador y reducir el riesgo de errores operativos.
- **Asiento Giratorio:** El asiento con capacidad de giro de 180° facilita las operaciones en espacios reducidos y mejora la visibilidad, contribuyendo a una operación más segura.



Fuente: (Características Técnicas Paus PMKM8030, 2025)

Características Técnicas

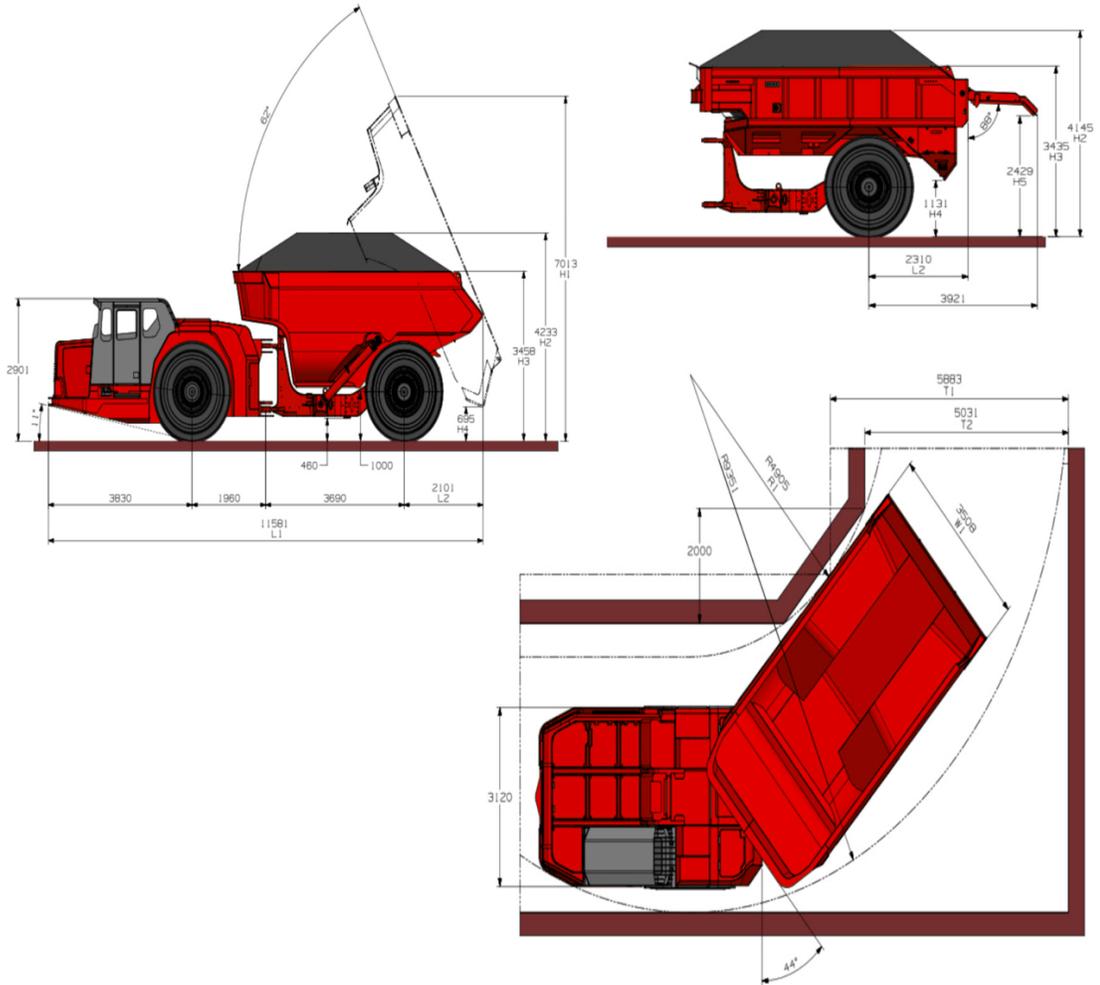
- Capacidad de carga: 51 000 kg (SAE heaped 2:1).
- Caja estándar: 28.0 m³ (rango de 24 a 30 m³).
- Velocidades (con carga en terreno plano): hasta 33.4 km/h.
- Motor: Volvo TAD1642VE-B (Tier 2), 6 cilindros en línea, 16.1 L, 515 kW (691 hp) a 1900 rpm, torque de 3221 Nm a 1300 rpm.
- Sistema de escape: Convertidor catalítico con silenciador.
- Consumo de combustible: 46 l/h (carga media 50%).
- Transmisión: Automática Dana con 8 marchas adelante y 2 en reversa, con asistencia de velocidad y retardo eléctrico.
- Frenos: De disco múltiples en baño de aceite, hidráulicos, aplicados por resorte.
- Sistema eléctrico: 24 V, alternador de 28 V, 150 A; luces LED en la cabina, trabajo y reversa.
- Dimensiones: Longitud total de 11 581 mm, altura de descarga 690 mm (con caja estándar).
- Sistemas electrónicos: Sandvik Intelligent Control System, My Sandvik Digital Services, AutoMine® Trucking readiness.

Características de Seguridad

- Cabina certificada: ROPS (protección en vuelcos) y FOPS (protección contra caída de objetos).
- Diseño de cabina: Aislada acústicamente, con ventanas de vidrio laminado y sistema de ventilación y aire acondicionado.
- Acceso seguro: Escalones iluminados, sistema de tres puntos de contacto con pasamanos codificados por color.
- Sistema de freno neutral (se activa tras 3 s en punto muerto).
- Sistema de activación automática del freno (ABA).
- Detección y visibilidad: Cámara de reversa. / Alarma de reversa. / Baliza intermitente. / Espejos con desempañador.
- Protección contra incendios: Extintor portátil de 12 kg. / Separación de fuentes de calor y combustibles. / Aislamiento térmico en el sistema de escape. / Opción de sistema de supresión de incendios Ansul Twin o Sandvik Eclipse con apagado automático.

Dimensions

The dimensions shown in the pictures are from Toro® TH663i truck. Refer to the table below for accurate measurements of Toro® TH551i.



Fuente: (Sandvik, Características Técnicas TH551i, 2025)

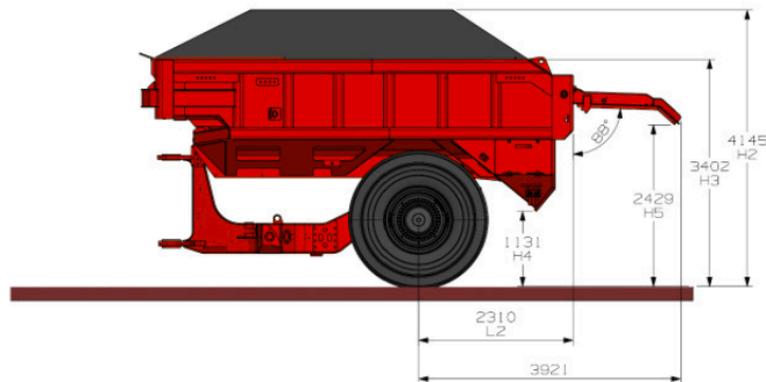
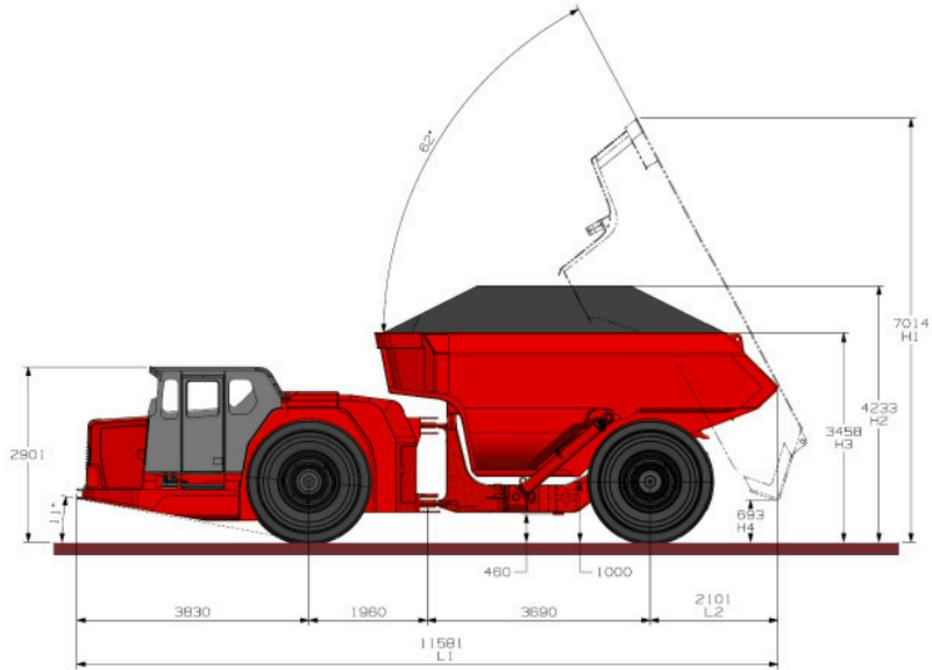
Características Técnicas

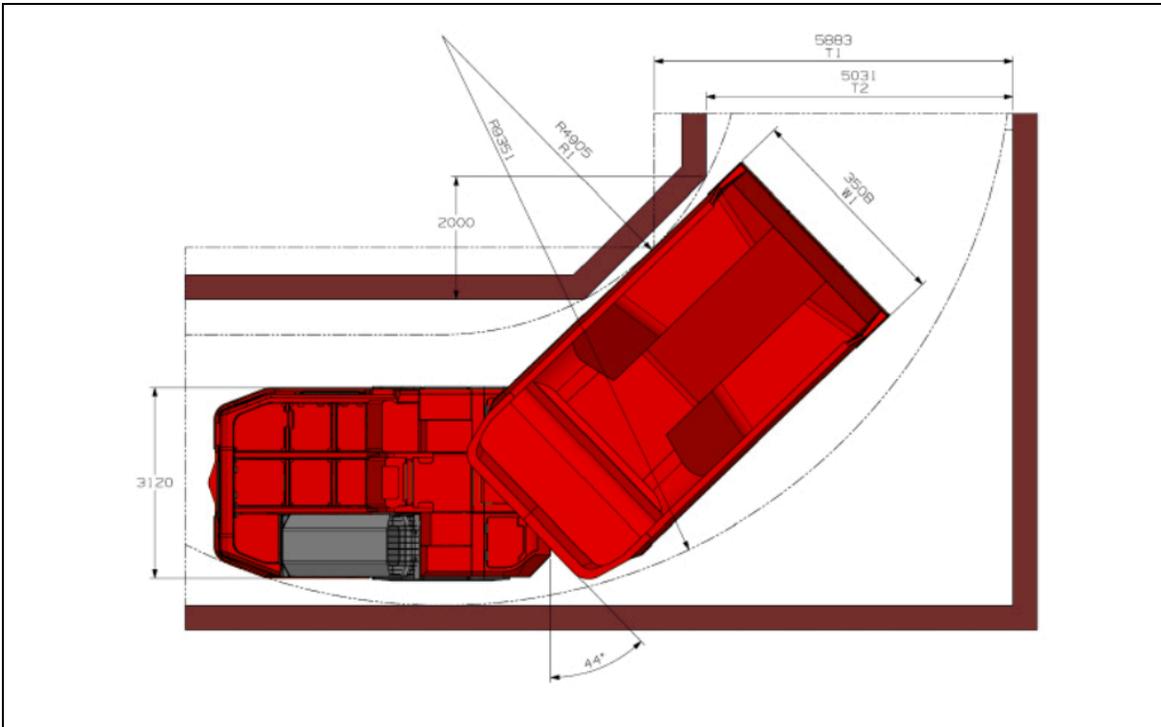
- *Capacidad de carga: 65,000 kg.*
- *Caja estándar: 36 m³, con opciones que varían entre 32 y 40 m³.*
- *Velocidades: Gracias a su tren motriz eléctrico de alta eficiencia, el TH665B puede ser hasta un 30% más rápido en rampas de 1:7 en comparación con camiones diésel convencionales.*
- *Peso en operación: 56,400 kg.*
- *Peso total cargado: 121,400 kg (peso en vacío más capacidad de carga máxima).*
- *Motor: El TH665B está equipado con cuatro motores eléctricos independientes, uno por rueda, cada uno con una potencia continua de 180 kW, totalizando 720 kW.*
- *Potencia: Potencia continua total de 720 kW.*
- *Sistema eléctrico: Utiliza tecnología de batería de fosfato de hierro y litio (LiFePO₄ o LFP). La batería principal tiene una energía nominal de 354 kWh y una capacidad nominal de 576 Ah.*

Características de Seguridad

- **Cabina del Operador:**
- **Diseño ergonómico:** Basado en la cabina del modelo Toro™ TH663i, ofrece una ergonomía de primer nivel con múltiples ajustes para un entorno operativo cómodo y seguro
- **Aislamiento acústico y de vibraciones:** La cabina está sellada y presurizada, utilizando materiales resistentes al polvo, y cuenta con ventanas de vidrio de seguridad laminado de tres capas, salidas de emergencia, una entrada iluminada y escalones antideslizantes
- **Reducción de Emisiones y Calor:**
- **Sin emisiones de escape:** Al utilizar tecnología de batería de fosfato de hierro y litio, el TH665B no produce emisiones subterráneas de escape en comparación con los motores tradicionales
- **Menor generación de calor:** Genera hasta un 80% menos de calor que los camiones diésel tradicionales, mejorando las condiciones laborales en minas subterráneas
- **Frenado Regenerativo:**
- **Conversión de energía:** Convierte la energía mecánica en eléctrica durante el frenado, utilizando el frenado regenerativo para el control de velocidad en descensos, reduciendo la dependencia de los frenos de fricción y extendiendo la vida útil de los frenos
- **Sistema de Monitoreo:**

- Interfaz optimizada: Pantalla a color de 12 pulgadas con funcionalidad táctil avanzada que muestra toda la información y alarmas necesarias en una sola pantalla oscura, diseñada específicamente para el entorno subterráneo para reducir la fatiga visual
- Sistema de control inteligente: Monitorea y advierte al operador antes de que ocurran fallas, previniendo daños severos y posibles pérdidas de producción





Fuente: (Sandvik, Características Técnicas Sandvik TH665B, 2025)

A continuación, se observa un cuadro comparativo con: dimensiones, ventajas, desventajas y riesgos asociados, con equipos de carguío y transporte.

Tabla 5 Características técnicas de equipos utilizados en el transporte chileno minero subterráneo

Equipo	Dimensiones (L x h x A)	Ventajas	Desventajas	Riesgos Asociados
Caterpillar R1700	9,3 m x 2,8 m x 2,4 m	Alta capacidad de carga y maniobrabilidad en espacios reducidos. Sistema eficiente de control de emisiones.	Capacidad limitada en comparación con equipos más grandes. Alto costo de mantenimiento.	Riesgo de volcamiento en terrenos irregulares. Exposición a gases de escape en túneles confinados.
Caterpillar R2900XE	11,7 m x 3,4 m x 3,2 m	Propulsión eléctrica, reduce emisiones de CO ₂ . Mayor eficiencia energética y menor impacto ambiental.	Alto costo de adquisición e infraestructura para carga eléctrica.	Posibles riesgos eléctricos y necesidad de capacitación especial para operarios.
Epiroc ST14	10,3 m x 2,8 m x 2,4 m	Eficiencia en consumo de combustible. Sistema de control automatizado para mejorar la seguridad.	Menor capacidad en comparación con otros modelos más grandes. Requiere un alto nivel de mantenimiento técnico.	Falla en sistemas automatizados puede causar accidentes operacionales.
Komatsu LHD WA900	14,5 m x 4,2 m x 4,9 m	Gran capacidad de carga y buena adaptabilidad para transporte de grandes volúmenes.	Tamaño grande que dificulta maniobras en túneles estrechos.	Riesgo de colisión en espacios reducidos.
Sandvik LH514	10,3 m x 2,8 m x 2,4 m	Eficiencia en operaciones de carga subterránea. Sistema de bajo consumo energético.	Capacidad limitada en comparación con otros equipos de la misma categoría.	Riesgo de accidentes por sobrecarga o fallas en frenos en terrenos inclinados.
Sandvik LH517	11,1 m x 3,0 m x 2,4 m	Mayor capacidad de carga y mejor eficiencia energética comparado con el LH514.	Requiere más espacio de operación que el LH514.	Riesgos asociados a su mayor tamaño y peso en maniobras difíciles.

Equipo	Dimensiones (L x h x A)	Ventajas	Desventajas	Riesgos Asociados
Caterpillar AD45B	10,4 m x 3,2 m x 3,3 m	Capacidad para grandes volúmenes. Eficiencia en operaciones subterráneas.	Requiere túneles grandes para su operación eficiente. Alto consumo de combustible.	Exposición a gases de escape en zonas subterráneas sin ventilación adecuada.
Epiroc Minetruck MT6020	10,6 m x 3,1 m x 3,1 m	Alta capacidad de carga (60 toneladas) en op. subterráneas. Motor eficiente y bajos costos de op. a largo plazo.	Requiere infraestructura adecuada por su tamaño. Difícil maniobrabilidad en túneles estrechos.	Riesgos de colisión en espacios confinados. Falla en sistemas de ventilación podría incrementar exposición a gases.
Epiroc Minetruck MT436B	9,5 m x 2,6 m x 2,9 m	Alta maniobrabilidad en espacios reducidos. Buen rendimiento en pendientes.	Capacidad de carga más baja (32 toneladas).	Riesgo de sobrecarga en pendientes pronunciadas.
Komatsu HD785-7	11,5 m x 5,0 m x 5,0 m	Alta capacidad de carga (100 toneladas). Ideal para operaciones a cielo abierto.	Requiere amplio espacio de operación. Mayor costo por su tamaño y capacidad.	Riesgo de colisión en zonas de operación a cielo abierto con tráfico mixto.
Paus PMKM 8030	7,5 m x 2,1 m x 2,2 m	Excelente versatilidad en espacios subterráneos. reducidos. Sist. hidráulico eficiente.	Capacidad de carga limitada en comparación con otros equipos similares.	Riesgo de vuelco en terrenos accidentados o pendientes.
Sandvik TH551i	11,1 m x 3,1 m x 3,2 m	Tecnología avanzada de automatización. Alta capacidad de carga.	Costos elevados por la integración de sistemas automatizados.	Riesgos asociados a la programación de sistemas autónomos o semiautónomos.
Sandvik TH665B	12,5 m x 4,0 m x 3,8 m	Capacidad de carga de 65 toneladas, maximizando eficiencia en transporte. Sistemas avanzados de control y monitoreo para mejorar seguridad.	Gran tamaño, reduciendo maniobrabilidad en túneles estrechos.	Posibles fallos eléctricos en ambientes con alta humedad y polvo. Necesidad de personal especializado en mantenimiento eléctrico.

Fuente: Elaboración Propia

La elección de los equipos utilizados en la mina El Teniente está directamente relacionada con las necesidades operativas y las características del entorno subterráneo. La comparación de los equipos actuales no solo se basa en su capacidad de transporte y carga, sino también en factores como la seguridad, la eficiencia, el consumo de energía, y la facilidad de mantenimiento.

Comparación de Tecnologías

1. Dimensiones y Maniobrabilidad:

- a) **Compactos:** Equipos como el Epiroc ST14 y el Sandvik LH514, Paus PMKM8030 destacan por su capacidad para maniobrar en espacios reducidos, una ventaja significativa en los túneles estrechos. Sin embargo, su capacidad de carga limitada puede afectar la eficiencia general.
- b) **Grandes:** Equipos como el Komatsu LHD WA900, Caterpillar R2900XE, Sandvik TH665B aunque ofrecen mayor capacidad de carga, ofreciendo mayor producción, presentan dificultades en maniobras en túneles estrechos y un mayor riesgo de colisiones.
- c) **Intermedios:** Modelos como el Sandvik LH517, Caterpillar R1700 y Epiroc Minetruck MT436B buscan equilibrar maniobrabilidad y capacidad de carga, siendo opciones adecuadas para minas con túneles de tamaño mediano.

2. Consumo de Energía y Emisiones:

- a) Los equipos como el Sandvik TH665B, Caterpillar R2900XE incorporan tecnología eléctrica o híbrida que reducen emisiones de gases contaminantes. Estos modelos son especialmente relevantes en ambientes donde la ventilación es crítica.
- b) Los modelos diésel tradicionales, como el Caterpillar AD45B, Komatsu HD785-7 generan mayores emisiones que pueden requerir sistemas avanzados de ventilación para mitigar los riesgos de exposición a gases tóxicos. La transición hacia tecnologías híbridas o eléctricas podría representar una solución sostenible a largo plazo.

3. Tecnología y Automatización:

- a) La automatización avanzada en equipos como el Sandvik TH551i Caterpillar R2900XE, Sandvik TH665B permite una mayor eficiencia y seguridad al minimizar la intervención humana en condiciones peligrosas. Siendo capaces de operar en forma autónoma o semiautónoma y así aumentar la eficiencia. Representando menores costos operativos en un largo plazo.
- b) Los sistemas manuales como Caterpillar R1700, Komatsu LHD WA900, aunque más económicos, dependen en gran medida de la capacitación y experiencia de los operadores, lo que incrementa el riesgo de accidentes.
- c) **Integración de IoT:** La conectividad de los equipos mediante el Internet de las Cosas (IoT) como por ejemplo Sandvik TH663i, Epiroc

Minetruck MT6020 permite monitoreo en tiempo real y diagnóstico remoto, mejorando la eficiencia operativa y la gestión del mantenimiento.

4. Mantenimiento y Durabilidad:

- a) Equipos como el Caterpillar AD45B, Komatsu HD785-7 requieren un mantenimiento regular debido a su alta capacidad de carga y operación intensiva. La falta de mantenimiento puede resultar en desgaste por uso constante en entornos hostiles, fallas mecánicas que aumentan el riesgo operacional, llevando a costos elevados en repuestos y tiempos de inactividad.
- b) Programas de mantenimiento predictivo como Caterpillar R2900XE, Sandvik TH665B, basados en inteligencia artificial, como el uso de sensores y software para predecir fallas antes de que ocurran, podrían optimizar los tiempos de reparación y reducir los costos operativos.
- c) La sostenibilidad de equipos como Caterpillar R2900XE, Sandvik TH665B evidencian un menor impacto ambiental al no generar emisiones de combustible. Además, tienen una vida prolongada en comparación con equipos diésel.

5. Seguridad y Riesgos Asociados:

- a) Equipos como Caterpillar R2900XE, Sandvik TH551i se destacan en la NO generación de gases tóxicos, mejorando condiciones de ventilación en minaría subterránea, que también en la disminución del ruido y vibraciones en el entorno del trabajo. Y lo más importante es la reducción de exposición humana en zonas de alto peligro
- b) con tecnología de sensores y automatización presentan menores riesgos de colisiones, accidentes operacionales y vuelcos.
- c) Tecnologías emergentes como sistemas de frenado automático y detección de proximidad podrían integrarse para aumentar la seguridad. Por otro lado, los modelos convencionales tienen mayor probabilidad de accidentes debido a la limitada visibilidad y maniobrabilidad.

El análisis muestra que mientras los equipos tradicionales ofrecen robustez y simplicidad, los modelos más nuevos con tecnologías avanzadas ofrecen mejoras en seguridad y eficiencia, aunque con costos iniciales más altos y mayores requerimientos de mantenimiento. Este balance debe ser cuidadosamente considerado al planificar inversiones futuras en infraestructura minera.

6 Propuesta de mejoras tecnológicas y operativas

Con base en la evaluación de los equipos actuales y el Diagrama de Ishikawa presentado en el Capítulo IV, se proponen las siguientes mejoras tecnológicas y operativas para optimizar la seguridad y la eficiencia en el transporte de mineral en la mina El Teniente.

6.1 Incorporación de Tecnología Avanzada basado en Roadmap Minería 4.0

- **Automatización de Equipos:** Ampliar el uso de equipos autónomos como Caterpillar R2900XE, Sandvik TH665B. Estos modelos permiten reducir los riesgos asociados al factor humano y optimizar el consumo de energía. Además, incorporar sistemas de navegación autónoma basados en inteligencia artificial puede mejorar la precisión en rutas complejas.
- **Monitoreo en Tiempo Real:** Implementar sensores avanzados para detectar condiciones peligrosas, como fallas mecánicas, presencia de gases tóxicos y obstrucciones en los túneles. Sistemas como LiDAR y cámaras térmicas podrían integrarse para un monitoreo más completo.

6.2 Capacitación y Entrenamiento Continuo

- **Diseñar programas de capacitación** específicos para operadores en el manejo seguro de equipos avanzados.
- **Implementar simuladores de realidad virtual** para entrenar a los operadores en maniobras complejas y respuesta a emergencias. Estos simuladores pueden incluir escenarios específicos de El Teniente, mejorando la relevancia del entrenamiento.

6.3 Mejoras en la Infraestructura de la Mina

- **Diseño de Túneles:** Adaptar los túneles para facilitar la operación de equipos de mayor tamaño, con especial atención a la estabilidad del terreno y la ventilación. Además, incorporar sensores geotécnicos para monitorear la estabilidad en tiempo real.
- **Señalización y Control de Tráfico:** Establecer rutas exclusivas para diferentes tipos de equipos y mejorar la señalización dentro de los túneles. Esto podría incluir el uso de paneles LED con información en tiempo real.

6.4 Sistemas de Mantenimiento Predictivo

- **Utilizar herramientas de inteligencia artificial** para predecir fallas mecánicas en los equipos y planificar mantenimientos preventivos, minimizando interrupciones operativas. Estos sistemas también podrían generar reportes automáticos sobre el estado del equipo.

6.5 Optimización de la Ventilación

- **Incorporar sistemas de ventilación inteligente** que ajusten el flujo de aire según la concentración de gases y el número de equipos en operación. Tecnologías basadas en sensores de calidad del aire y controladores automáticos pueden aumentar la eficiencia.
- **Evaluar la viabilidad de utilizar equipos eléctricos o híbridos** para reducir la emisión de gases. Modelos como Caterpillar R2900XE, Sandvik TH665B, representan opciones sostenibles.

6.6 Supervisión y Evaluación Continua

- **Implementar auditorías periódicas** basadas en indicadores de seguridad y eficiencia. Esto incluye el uso de plataformas digitales para monitorear en tiempo real los indicadores clave.
- **Utilizar el Diagrama de Ishikawa** para identificar y corregir proactivamente problemas recurrentes en las operaciones. Este enfoque podría complementarse con metodologías como Six Sigma para garantizar mejoras continuas.

6.7 Propuesta de Innovaciones Futuras

- **Drones de Monitoreo:** Usar drones para inspeccionar condiciones de los túneles y monitorear operaciones en tiempo real, especialmente en áreas de difícil acceso. Equipos equipados con cámaras HD y sensores de gases podrían mejorar la seguridad.
- **Digital Twins:** Crear modelos virtuales de los equipos y operaciones para simular escenarios y planificar mejoras. Estos gemelos digitales podrían integrarse con sistemas IoT para monitoreo continuo.
- **Robótica Avanzada:** Investigar la viabilidad de utilizar robots para tareas de mantenimiento en áreas de alto riesgo, como inspección de túneles y reparación de equipos.

6.8 Propuesta de Innovaciones Futuras

Con estas propuestas, se busca no solo optimizar la productividad de la mina El Teniente, sino también mejorar las condiciones de seguridad y reducir los riesgos asociados al transporte de mineral. Estas estrategias también contribuirán al desarrollo sostenible de las operaciones mineras, alineándose con los estándares internacionales de seguridad y medio ambiente. En este contexto, a continuación, se presentará un plan de transición operativa, realizado en el programa Project Libre, orientado al reemplazo progresivo de los equipos convencionales actualmente utilizados por Minera El Teniente, con el objetivo de incorporar equipos autónomos de última generación, tales como el Caterpillar R2900XE y el Sandvik TH665B.

Ilustración 22 Plan de Transición minero en Project Libre

	Nombre	Duración	Inicio	Terminado
1	1 Evaluación y Planific...	46 days	3/03/25 8:00	5/05/25 17:00
2	2 Análisis de viabilidad...	8 days	3/03/25 8:00	12/03/25 17:00
3	3 Evaluación del impa...	8 days	11/03/25 8:00	20/03/25 17:00
4	4 Definición de indica...	8 days	19/03/25 8:00	28/03/25 17:00
5	5 Identificación de ries...	8 days	27/03/25 8:00	7/04/25 17:00
6	6 Aprobación de inver...	8 days	4/04/25 8:00	15/04/25 17:00
7	7 Determinación de re...	8 days	14/04/25 8:00	23/04/25 17:00
8	8 Elaboración del cron...	6 days	21/04/25 8:00	28/04/25 17:00
9	9 Consulta con entes r...	6 days	28/04/25 8:00	5/05/25 17:00
10	10 Adecuación de infrae...	53 days	2/05/25 8:00	15/07/25 17:00
11	11 Modificación de túne...	15 days	22/05/25 8:00	22/05/25 17:00
12	12 Instalación de seña...	12 days	19/05/25 8:00	3/06/25 17:00
13	13 Implementación de ...	10 days	29/05/25 8:00	11/06/25 17:00
14	14 Habilitación de esta...	14 days	9/06/25 8:00	26/06/25 17:00
15	15 Evaluación estructu...	10 days	23/06/25 8:00	4/07/25 17:00
16	16 Actualización de sist...	10 days	2/07/25 8:00	15/07/25 17:00
17	17 Capacitación del Per...	63 days	14/07/25 8:00	8/10/25 17:00
18	18 Diseño de programa...	15 days	14/07/25 8:00	1/08/25 17:00
19	19 Implementación de ...	20 days	28/07/25 8:00	22/08/25 17:00
20	20 Plan de reubicación ...	15 days	18/08/25 8:00	5/09/25 17:00
21	21 Talleres de segurida...	10 days	1/09/25 8:00	12/09/25 17:00
22	22 Capacitación en ma...	15 days	10/09/25 8:00	30/09/25 17:00
23	23 Charlas informativas...	10 days	25/09/25 8:00	8/10/25 17:00
24	24 Implementación de T...	50 days	15/09/25 8:00	21/11/25 17:00
25	25 Integración de siste...	17 days	15/09/25 8:00	7/10/25 17:00
26	26 Instalación de senso...	14 days	2/10/25 8:00	21/10/25 17:00
27	27 Mantenimiento predi...	14 days	16/10/25 8:00	4/11/25 17:00
28	28 Sincronización de flo...	20 days	6/10/25 8:00	31/10/25 17:00
29	29 Despliegue de red d...	20 days	27/10/25 8:00	21/11/25 17:00
30	30 Pruebas y Optimizaci...	71 days	14/11/25 8:00	20/02/26 17:00
31	31 Puesta en marcha c...	20 days	14/11/25 8:00	11/12/25 17:00
32	32 Evaluación de dese...	15 days	4/12/25 8:00	24/12/25 17:00
33	33 Auditoría de segurid...	15 days	19/12/25 8:00	8/01/26 17:00
34	34 Implementación de ...	15 days	5/01/26 8:00	23/01/26 17:00
35	35 Análisis de reducció...	15 days	19/01/26 8:00	6/02/26 17:00
36	36 Documentación final...	15 days	2/02/26 8:00	20/02/26 17:00

- pagina

Fuente: Elaboración propia

El proyecto inicia el 03 de marzo de 2025 y está planificado para finalizar el 27 de febrero de 2026, cumpliendo exactamente con el plazo de 12 meses, lo que demuestra una planificación ajustada al año calendario.

Estructura Jerárquica

El proyecto está organizado en fases principales (Nivel 1) y subtarefas (Nivel 2):

NIVEL	DESCRIPCIÓN
1	Fases generales del proyecto
2	Subtarefas técnicas y operativas

Esta estructura permite un control ordenado y una visualización clara de cada etapa del proyecto.

Principales Fases del Proyecto

1. Evaluación y Planificación
2. Adecuación de Infraestructura
3. Capacitación del Personal y Gestión del Cambio
4. Implementación de Tecnología y Automatización
5. Pruebas y Optimización del Sistema

Cada fase contiene entre 5 y 8 subtarefas, distribuidas secuencialmente.

Duración y Holgura

La mayoría de las subtareas tienen duraciones entre 6 y 20 días, dependiendo de su complejidad.

Se ha incorporado holgura (TotalSlack) en cada tarea para permitir cierta flexibilidad en el cronograma:

- Holgura promedio: entre 1 y 3 días
- Tareas críticas: aquellas con holgura = 0, si existieran, indicarían que no pueden retrasarse sin afectar el plazo total del proyecto.

Tarea	Inicio	Fin	Duración	Holgura
Instalación de sensores para monitoreo en tiempo real	02-10-2025	16-10-2025	14 días	1 día
Mantenimiento predictivo basado en IA	16-10-2025	30-10-2025	14 días	1 día
Evaluación del impacto en la operación actual	11-03-2025	19-03-2025	8 días	1 día

Esta planificación permite mitigar riesgos de atrasos menores sin afectar el calendario global.

7 Conclusiones y Recomendaciones

El presente estudio ha permitido evaluar las condiciones de seguridad en el transporte subterráneo de mineral en la mina El Teniente, identificando los principales riesgos operacionales y proponiendo mejoras tecnológicas y operativas para su mitigación. A través de un análisis exhaustivo de la normativa vigente (DS N°132 e ISO 45001:2018), el uso de herramientas de evaluación de riesgos como el diagrama de Ishikawa y la comparación de tecnologías disponibles en el mercado, se han determinado los factores críticos que afectan la seguridad en la operación de cargadores frontales de bajo perfil (LHD) y camiones mineros en espacios confinados.

Los resultados de la investigación han evidenciado que los riesgos más recurrentes en el proceso de transporte incluyen colisiones, vuelcos, exposición a gases tóxicos y errores operacionales, muchos de los cuales pueden reducirse mediante la implementación de tecnologías avanzadas. En este sentido, se destacan medidas como la incorporación de sensores de proximidad, monitoreo en tiempo real, optimización de la ventilación, capacitación continua del personal y mantenimiento predictivo de los equipos. Estas estrategias no solo contribuirían a mejorar la seguridad de los trabajadores, sino que también optimizarían la eficiencia operativa y la sostenibilidad del proceso minero.

Dado el carácter teórico de este estudio y la limitada disponibilidad de datos internos de la operación, los resultados obtenidos constituyen una base de referencia para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en faenas mineras. Se recomienda que investigaciones futuras profundicen en el impacto real de las tecnologías propuestas mediante pruebas piloto y estudios de campo, a fin de validar su efectividad en entornos operacionales reales.

Finalmente, esta investigación resalta la importancia de fortalecer la cultura de seguridad en minería subterránea, promoviendo una gestión integral del riesgo basada en la innovación tecnológica y la mejora continua de los procesos. La seguridad debe ser entendida no solo como un requisito normativo, sino como un pilar fundamental para la sostenibilidad y competitividad de la industria minera en Chile y el mundo.

Bibliografía

Caterpillar. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas Caterpillar AD45*. Obtenido de https://www.cat.com/es_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-trucks/104983.html

Caterpillar. (10 de 02 de 2025). *Especificaciones Técnicas Caterpillar R1700*.

Obtenido de

https://www.cat.com/es_ES/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/112580.html

Caterpillar. (17 de 02 de 2025). *Especificaciones Técnicas de R2900XE*. Obtenido de https://www.cat.com/es_ES/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/112580.html

COCHILCO. (2021). *Estudio de la productividad y seguridad en la minería subterránea: el caso de los equipos LHD*.

CODELCO. (01 de Septiembre de 2024). *División el Teniente*. Obtenido de <https://www.codelco.com/division-el-teniente>

CODELCO, (2011) Dirección de Comunicaciones Gerencia de sustentabilidad y asuntos externos. El Teniente Minería del futuro. *EL TENIENTE*, 45.

Copco, A. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas Minetruck MT6020*. Obtenido de <https://qme.ie/wp-content/uploads/Minetruck-MT6020.pdf>

Epiroc. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas Epiroc ST14*. Obtenido de <https://www.epiroc.com/content/dam/epiroc/underground-mining-and-tunneling/lhd/diesel->

scooptram/st14/9869%200057%2001g%20Scooptram%20ST14%20Technical%20Specification%20Eng_lowres.pdf

Epiroc. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas Minetruck MT436*. Obtenido de <https://www.epiroc.com/es-cl/products/loaders-and-trucks/diesel-trucks/minetruck-mt436b>

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. (2019). Introducción a la Minería Subterránea. Vol 1. *Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras, 7*.

Gonzalez, J. (2022). *Seguridad Minera en Operaciones Subterráneas: Una guía para la prevención en riesgos*. Ediciones Mineras.

Hernández, P. S. (2016). *Optimización del transporte en minería subterránea*. Congreso Latinoamericano de Minería.

ICMM. (2019). *Health and Safety in Mining: A Priority for All*.

Irwin Miller, J. F. (2021). *Probabilidades y Estadísticas para Ingenieros*. Barcelona : Reverté S.A.

J. Fuentes, P. R. (2019). *Evaluación de Riesgos en Minería Subterránea en Chile*. Boletín Técnico de Minería y Seguridad.

Komatsu. (17 de 02 de 2025). *Catálogo Komatsu HD785-7*. Obtenido de <https://www.komatsulatinamerica.com/chile/productos/hd785-7/>

Komatsu. (17 de 02 de 2025). *Catálogo Komatsu WA900*. Obtenido de <https://www.komatsulatinamerica.com/chile/productos/wa900-8r/>

Laubscher, D. (2000). *A Geomechanics Classification System for the rating Rock mass in mine design*. Journal of Mining and metallurgy.

- Mäkelä, K. (2020). *Innovations in Load-Haul-Dump Systems in Underground Mining. Journal of Mining Science,*.
- Martínez, C. (2017). Condiciones Laborales en minería Subterránea. *Minería Segura*, 23-30.
- Mena, E. C. (2024 de Septiembre de 2024). *Prevención Integral*. Obtenido de <https://www.prevencionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2010/gestion-riesgos-en-codelco-division-teniente-seguridad-gestion-riesgos>
- Minería, M. d. (2023). *Seguridad en la Minería Chilena: Avances y desafíos* . Gobierno de Chile.
- Ministerio del Trabajo y previsión social: Subsecretaría de previsión Social. (17 de Febrero 2025.). Ley, 16744. *Establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales*.
- NCh 18000, N. (Of 2004). Proyecto de Norma en Consulta Pública. *Prevención de Riesgos Profesionales - Sistema de gestión - Vocabulario*.
- O. Araneda, M. P. (2020). *La operación subterránea en El Teniente: Innovación y desafíos*. Revista Minería Chilena 46.
- P. Castro, R. L. (2018). *Avances tecnológicos en la minería subterránea*. Editorial Minera.
- Paus. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas Paus PMKM8030*. Obtenido de <https://www.paus.de/en/mining-and-tunneling/pmk/pmk-8000-series.html>
- Pérez, M. G. (2020). Riesgos Laborales en minería subterránea. *Revista de Seguridad Minera*, 45-56.
- Ramírez, L. M. (2023). *Gestión de riesgos y peligros en minería subterránea*. Editorial de Seguridad Minera.

Rosenberg, N. (1982). *Inside the Black Box: Technology and Economics*. Cambridge University Press.

Sandvik. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas Sandvik TH665B*. Obtenido de <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/noticias-y-medios/archivo-de-noticias/2022/02/sandvik-presenta-el-camión-bev-de-más-capacidad-para-minería-subterránea/>

Sandvik. (17 de 02 de 2025). *Características Técnicas TH551i*. Obtenido de <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/camiones/th551i/>

Sandvik. (17 de 02 de 2025). *Especificaciones Técnicas Sandvik El Toro LH 514*. Obtenido de <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/equipo/cargadores/lh514/>

Secretaría Central de ISO en Ginebra, S. (03 de 2018). *campusvirtual.cenoeder.com*. Obtenido de https://campusvirtual.cenoeder.com/wp-content/uploads/2025/02/NORMA-ISO-45001_2018.pdf

Sernageomin. (07 de 02 de 2004). *Reglamento de seguridad minera*. Obtenido de Ministerio de Minería: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/Reglamento-seguridad-minera.pdf>

SERNAGEOMIN. (2020). *Curso Experto en prevención de riesgos de la industria extractiva minera nacional: Módulo II Seguridad en Minería*. Santiago.

SERNAGEOMIN. (2020). *Guía de seguridad minera subterránea*.

Sernageomin. (2022). *Informe Nacional de Seguridad Minera*. Servicio nacional de Geología y Minería.

SERNAGEOMIN. (01 de Sept de 2023). Anuario de la Minería de Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, 128 - 129. Obtenido de <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/>

SERNAGEOMIN. (01 de Sept de 2024). *Catastro Sernageomin*. Obtenido de <https://catastro.sernageomin.cl>

Silva, L. R. (2021). *Seguridad Operativa en la Minería Subterránea*. Universidad de Ingeniería y Tecnología.

Sommerville, G. B. (2011). *Socio-technical system: From design methods to systems engineering*. Interacting with Computer.

Anexos

Tabla 7 Resumen Estadístico de Accidentes Mineros Chilenos

Tipo de Accidente	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Caída de roca	6	3	3	5	6	4	2	2	1	2
Transporte	2	3	3	1	4	1	0	5	2	1
Caída de altura	1	3	4	4	2	2	1	1	4	0
Atrapado por	3	2	0	2	0	1	4	2	1	1
Equipos	3	1	0	1	0	0	3	0	0	0
Golpeado por	0	2	2	1	0	2	0	0	0	0
Tronadura	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0
Falta de oxígeno	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Electrocución	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Explosión	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0
Ingestión	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 6 Estadísticas en Minería Chilena de Accidentes Laborales con y sin Consecuencia Fatal

Sernageomin	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Accidentes	15	17	13	14	10	11	10	11	12	4
Fallecidos	17	18	14	15	14	13	12	12	13	4
M. Subterránea	8	6	7	8	6	9	2	8	5	2
Rajo Abierto	9	12	7	7	8	4	10	4	8	2

Casos reales de incidentes

1. **Machalí, 25 de septiembre de 2013.-** Con profundo pesar, Codelco informa el fallecimiento de don Fernando Pérez Villaseca (QEPD), de 47 años de edad, ayudante de operador de camión aljibe de la empresa Sacyr, constructora que trabaja para la Vicepresidencia de Proyectos en las obras del Nuevo Nivel Mina El Teniente. De acuerdo a los antecedentes recabados hasta el momento, el deceso del trabajador ocurrió hoy aproximadamente a las 13:30 horas, producto de un accidente registrado en el sector de acceso A-5, cercano a botadero minero 2, donde la empresa Sacyr construye un camino.

En este lugar, ubicado dentro de las instalaciones industriales de la División El Teniente, comuna de Machalí, por causas que se investigan se produjo el volcamiento de un camión aljibe, en el cual Fernando Pérez Villaseca (QEPD) iba como copiloto.

Al conocer este lamentable accidente, Codelco procedió en forma inmediata a la suspensión de las faenas de construcción de la empresa Sacyr, dándose aviso a las autoridades competentes e iniciando el proceso investigativo que permita determinar las causas de este hecho.

Codelco lamenta profundamente este accidente fatal y expresa sus más sentidas condolencias a la familia del señor Fernando Pérez Villaseca (QEPD), al mismo tiempo que reafirma su compromiso con la seguridad de todas las personas que se desempeñan en sus distintos proyectos y faenas.

El Presidente Ejecutivo de Codelco, Thomas Keller, junto con reiterar las condolencias a la familia y compañeros de trabajo de don Fernando Pérez Villaseca (QEPD), ordenó suspender de manera indefinida todas las actividades de la empresa Sacyr en el proyecto Nuevo Nivel Mina hasta que no se aclaren las causas de este accidente.

2. Fecha : 20 de Octubre de 2014

Lugar : Mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O´Higgins

Empresa : CODELCO Chile, División El Teniente El trabajador se encontraba en tarea de confección de mufa eléctrica (unión de cable eléctrico de alta potencia), por razones que se investigan, el trabajador fue encontrado sin conocimiento al interior de la faena por sus compañeros de trabajo. Falleciendo posteriormente.

3. Fecha : 07 de Noviembre de 2014

Lugar : Mina El Teniente, Región del Libertador Bernardo O´Higgins

Empresa : CODELCO Chile, División El Teniente.

El trabajador ingresó al túnel para el relevo del operador del equipo roboshot (equipo que proyecta concreto para fortificación). En el momento que el trabajador llegaba y posicionaba a un costado del mixer se produce fenómeno sísmico explosión de roca (rock burst), con desprendimiento de roca y fisura hacia la frente; Cayendo sobre el trabajador rocas que le producen lesiones generando su muerte instantánea.

Conceptos:

Riesgo: Es la probabilidad de que un peligro se materialice en un accidente o en una afectación a la salud, junto con la severidad de las consecuencias. (NCh 18000, Of 2004) En minería, el riesgo evalúa la exposición a peligros específicos y la posible magnitud de los daños.

Ejemplo en LHD: Un riesgo común en la operación de LHD es la posibilidad de atropellar a un trabajador en el túnel debido a la limitada visibilidad en espacios subterráneos y la maniobrabilidad restringida del equipo. La severidad de este riesgo es alta debido a las consecuencias potencialmente fatales.

Peligro: Es cualquier fuente o situación que tiene el potencial de causar daño, lesiones o afectaciones a la salud. (NCh 18000, Of 2004) En el contexto de LHD, esto se refiere a condiciones o elementos que pueden provocar accidentes.

Ejemplo en LHD: Un peligro asociado a los LHD es el riesgo de exposición a gases tóxicos, como el monóxido de carbono, que se libera por la combustión del motor. Este peligro es mayor en áreas con ventilación limitada, donde los gases se acumulan y representan un riesgo de intoxicación para los operadores y el personal cercano.

Incidente: Suceso que surgen del trabajo o en el transcurso del trabajo que podría tener como resultado lesiones y deterioro de la salud. Evento que deteriora o podría deteriorar la eficiencia operacional, origina o posee el potencial para producir un accidente, enfermedad profesional o daño a la propiedad. (NCh 18000, Of 2004)

Accidente de Trabajo: toda lesión que una persona sufra a causa o con ocasión del trabajo, y que le produzca incapacidad o muerte. Son también accidentes del trabajo los ocurridos en el trayecto directo, de ida o regreso, entre la habitación y el lugar de trabajo. Se considerarán también accidentes del trabajo los sufridos por dirigentes de instituciones sindicales a causa o con ocasión del desempeño de sus cometidos gremiales. Se exceptúan los accidentes debido a la fuerza mayor extraña que no tengan relación alguna con el trabajo y los producidos intencionalmente por la víctima. Las pruebas de las excepciones corresponderá al organismo administrador.

Acción Insegura: Es un comportamiento de un trabajador que aumenta la probabilidad de que ocurra un accidente. En el caso de los LHD, esto incluye prácticas inadecuadas en la operación de la maquinaria.

Ejemplo en LHD: Una acción insegura es que el operador no use el cinturón de seguridad mientras maniobra el LHD en una pendiente. Esto aumenta el riesgo de sufrir lesiones en caso de un movimiento brusco o un accidente, como un vuelco.

Condición Insegura: Se refiere a características del entorno, equipo o instalaciones que aumentan la probabilidad de un accidente. Las condiciones inseguras suelen estar relacionadas con el mantenimiento o diseño inadecuado.

Ejemplo en LHD: Un ejemplo de condición insegura en los LHD es la falta de mantenimiento en los frenos del equipo. Si los frenos están desgastados o defectuosos, existe un riesgo elevado de pérdida de control del equipo, especialmente en áreas de pendiente o cuando se transporta material pesado.