



# UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

## **Revisión Sistemática de la Automatización de Camiones Autónomos en la Mitigación de Riesgos Operativos en Minas de Cielo Abierto.**

Proyecto de Seminario de Título para optar al título profesional de Ingeniero Comercial

Clemente Morales

**Profesor**

René San Martín

2024



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):** ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** Revisión Sistemática de la Automatización de Camiones Autonomos en la Mitigación de Riesgos Operativos en Minas de Cielo Abierto.

**Nombre del candidato(a):** Clemente Morales Manríquez

**Carrera / Grado:** Ingeniería Comercial

**Campus:** Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Ingeniería Comercial

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rene San Martin, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 05-12-2025

**; Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 05-12-2025

**; Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## Resumen

La automatización de camiones autónomos ha emergido como una innovación clave en la minería a cielo abierto, transformando las operaciones al abordar los principales desafíos de seguridad operativa, mitigación de riesgos y eficiencia productiva. Esta tecnología ha permitido reducir significativamente los accidentes laborales, principalmente aquellos derivados de errores humanos y fatiga, mejorando la seguridad de los trabajadores y optimizando la sostenibilidad de las operaciones mineras.

Este estudio presenta una revisión sistemática sobre cómo la automatización de camiones autónomos contribuye a la mitigación de riesgos operativos en minas a cielo abierto, y analiza los principales desafíos asociados con su implementación. Utilizando la metodología PRISMA, se seleccionaron estudios publicados entre 2020 y 2024, con palabras clave como "Autonomous trucks", "Open-pit mining", "Risk mitigation", "Mining automation", y "Safety in mining". Los estudios revisados destacan la evolución de la gestión de riesgos mediante la automatización, así como los beneficios operativos y económicos derivados de su adopción.

Además, se incorporó el uso de ChatGPT como herramienta auxiliar para la extracción y síntesis de datos, lo que permitió una revisión más eficiente y detallada de la literatura. Los resultados preliminares indican que la automatización ha mejorado la eficiencia en la gestión de recursos, el mantenimiento predictivo de equipos y ha reducido los costos operativos a largo plazo. En cuanto a la distribución de los estudios, se observó que la mayoría se concentraron en las dimensiones de Tecnologías Autónomas, con un enfoque particular en los avances en sensores y automatización, y en los desafíos futuros relacionados con la infraestructura y las barreras regulatorias. También se identificaron



vacíos en la literatura, particularmente en la dimensión de Sostenibilidad Operativa y Ambiental, que recibió menos atención en comparación con otras áreas.

Este estudio concluye que los camiones autónomos no solo han mejorado la seguridad en las operaciones mineras, sino que también han desempeñado un papel crucial en la mitigación de riesgos y en la optimización de la productividad. Finalmente, se identifican áreas clave para futuras investigaciones, especialmente en la integración de nuevas tecnologías y en la superación de las barreras técnicas y económicas para la adopción masiva de los sistemas autónomos en la minería. Además, se pudo descubrir que este campo de estudio ha mostrado un importante crecimiento en los últimos años, pero aún enfrenta desafíos significativos, como los altos costos iniciales de implementación. La literatura sugiere que persisten vacíos en torno a la sostenibilidad, tanto operativa como ambiental, que requieren mayor atención en estudios futuros.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por ser mi guía en este camino y darme la fuerza necesaria para enfrentar cada desafío.

A mi familia, especialmente a mi abuela y a mi tía, porque sin ellas nada de esto habría sido posible. Su amor, apoyo y confianza incondicional me han dado el impulso para alcanzar esta meta.

A las chiquillas: Marta, Olga, Anaís, Dafne y Romyna. Gracias por toda la ayuda, las risas y el respaldo que me brindaron durante estos años universitarios. Su compañía hizo este viaje mucho más entretenido.

A la Cata, por aguantarme en mis momentos más difíciles y estar siempre allí para escucharme. A Jason, por entrenarme y ayudarme a mantenerme en forma. Al Betito, por enseñarme el verdadero significado de la ambición y recordarme la importancia de soñar en grande.

A mi profesor René, por sus valiosos consejos y su infinita paciencia.

Finalmente, a don Federico, por su gran contribución a la sociedad al fundar esta increíble universidad. Su visión y dedicación han hecho posible que tantos estudiantes podamos cumplir nuestros sueños.

## ÍNDICE

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                               | <b>7</b>  |
| <b>2. PREGUNTA Y OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN .....</b>                      | <b>9</b>  |
| 2.1. Pregunta de investigación.....                                        | 9         |
| 2.2. Objetivos.....                                                        | 9         |
| <b>3. METODOLOGÍA.....</b>                                                 | <b>11</b> |
| 3.1. Estrategia de búsqueda .....                                          | 11        |
| 3.2. Criterios de inclusión y exclusión .....                              | 12        |
| 3.3. Aplicación del enfoque prisma .....                                   | 12        |
| 3.4. Organización y análisis de datos .....                                | 13        |
| 3.5. Extracción de datos y análisis manual.....                            | 14        |
| 3.6. Revisión sistemática independiente por inteligencia artificial: ..... | 16        |
| 3.7. Comparaciones y análisis crítico.....                                 | 17        |
| 3.8. Evaluación de calidad.....                                            | 17        |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>                                                 | <b>19</b> |
| 4.1. Extracción de datos asistida por inteligencia artificial.....         | 19        |
| 4.1.1. Análisis de campo de estudio y tecnologías clave.....               | 19        |
| 4.1.2. Análisis de palabras clave (keywords).....                          | 21        |
| 4.1.3. Distribución de los estudios por dimensión .....                    | 23        |
| 4.1.4. Distribución temporal de los estudios por año .....                 | 25        |
| 4.1.5. Distribución de los estudios por país .....                         | 26        |
| 4.1.6. Principales autores y fuentes de estudio .....                      | 28        |
| 4.2. Revisión sistemática generada por inteligencia artificial .....       | 31        |
| 4.2.1. Instrucciones y resultados .....                                    | 31        |
| 4.2.2. Principales hallazgos revisión .....                                | 46        |
| 4.2.3. Análisis de palabras clave (keywords).....                          | 49        |
| <b>5. EVALUACIÓN DE CALIDAD.....</b>                                       | <b>52</b> |
| 5.1. Criterios de evaluación .....                                         | 52        |
| 5.2. Resultados evaluación de calidad.....                                 | 54        |
| 5.3. Nivel de calidad asignado.....                                        | 54        |



|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6. RECOMENDACIONES GENERALES .....</b>                                | <b>55</b> |
| 6.1. Recomendaciones para mejorar la calidad .....                       | 55        |
| 6.2. Recomendaciones para el uso de inteligencia artificial.....         | 57        |
| 6.3. Recomendaciones bibliográficas para el campo de estudio .....       | 59        |
| <b>7. REFERENCIAS.....</b>                                               | <b>62</b> |
| <b>8. ANEXOS .....</b>                                                   | <b>78</b> |
| 8.1. Textos descartados bajo metodología PRISMA .....                    | 78        |
| 8.1.1. Estudios descartados luego de revisión de título y abstract ..... | 78        |
| 8.1.2. Estudios descartados luego de revisión de resumen .....           | 79        |
| 8.2. Distribución de artículos por año .....                             | 80        |
| 8.3. Distribución por país .....                                         | 82        |
| 8.4. Tabla de información extraída .....                                 | 84        |
| 8.5. Nubes de palabras.....                                              | 92        |
| 8.5.1. Extracción asistida por inteligencia artificial .....             | 92        |
| 8.5.2. Revisión sistemática generada por inteligencia artificial.....    | 93        |

## 1. Introducción

La minería es no solo la industria más importante de Chile, sino también un pilar fundamental para la transición energética global. Representando el 12% del Producto Interno Bruto (PIB) y más del 50% de las exportaciones del país, la minería, particularmente la extracción de minerales como el cobre y el litio juega un papel esencial en la provisión de materias primas para tecnologías limpias, como los vehículos eléctricos y las energías renovables. Estos minerales, especialmente abundantes en Chile, son cruciales para cumplir con los objetivos internacionales de sostenibilidad energética y lucha contra el cambio climático.

Sin embargo, el crecimiento sostenido de la minería viene acompañado de desafíos importantes, especialmente en términos de seguridad operativa. A pesar de que la minería emplea menos del 1% de la fuerza laboral mundial, la Organización Internacional del Trabajo (OIT) estima que concentra alrededor del 5% de las muertes laborales globales, lo que no solo resulta en pérdidas humanas irreparables, sino también en costos económicos significativos. La alta exposición a riesgos asociados con la operación de maquinaria pesada, condiciones extremas y entornos peligrosos hace que la seguridad de los trabajadores sea una prioridad urgente en el sector.

Para abordar estos desafíos, mi investigación se centra en cómo la automatización de camiones autónomos en las minas a cielo abierto puede contribuir a la mitigación de riesgos operativos, mejorando la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras. Esta tecnología tiene el potencial de reducir significativamente la intervención humana en tareas peligrosas, disminuir los accidentes laborales y optimizar la gestión de recursos, lo que en conjunto contribuye a una minería más segura y productiva.

La metodología empleada en este estudio se basa en un enfoque innovador que integra inteligencia artificial (IA), utilizando ChatGPT como herramienta clave en la realización de una revisión sistemática de la literatura. Este enfoque permite analizar un volumen significativo de información de manera eficiente, facilitando la identificación de tendencias, vacíos y soluciones relacionadas con la automatización de camiones y la seguridad minera. Al integrar herramientas de IA en la revisión de estudios existentes, se optimiza la precisión y la velocidad del análisis, permitiendo un proceso más dinámico y riguroso en comparación con los métodos tradicionales de investigación.

Este estudio no solo busca proporcionar una visión integral de cómo la automatización de camiones autónomos contribuye a la mitigación de riesgos operativos en la minería a cielo abierto, sino que también plantea una metodología innovadora para realizar revisiones sistemáticas, a través de la inteligencia artificial. El uso de IA en la investigación académica puede transformar profundamente la forma en que se lleva a cabo la recopilación, el análisis y la síntesis de información, abriendo nuevas oportunidades para realizar estudios más dinámicos, profundos y adaptados a los retos actuales del sector minero.

## **2. Pregunta y objetivos de investigación**

### **2.1. Pregunta de Investigación**

En base a este contexto prometedor para la industria pero también desafiante surge la siguiente pregunta:

¿Qué dice la literatura existente sobre cómo la automatización de camiones de extracción autónomos contribuye a la mitigación de riesgos operativos en minas de cielo abierto, y cuáles son los principales desafíos reportados en su implementación?

### **2.2. Objetivos**

#### **Objetivo General**

Sistematizar la investigación científica y técnica existente sobre cómo la automatización de camiones de extracción autónomos contribuye a la mitigación de riesgos operativos en minas de cielo abierto, y analizar los principales desafíos asociados con su implementación.

#### **Objetivos Específicos**

1. Identificar y clasificar los principales temas que se abordan en la literatura relacionada con la automatización de camiones autónomos en minas de cielo abierto.
2. Analizar los riesgos operativos en minas de cielo abierto que se mitigan mediante la automatización de camiones autónomos, basándose en la literatura revisada.



3. Identificar y evaluar los principales desafíos de implementación de la automatización de camiones autónomos, considerando la diversidad de estudios técnicos y casos prácticos incluidos en la revisión.

### 3. Metodología

#### 3.1. Estrategia de búsqueda

En este estudio, se realizó una revisión sistemática basada en la metodología PRISMA (Page et al., 2021) (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar la transparencia y el rigor en la identificación, selección y análisis de la literatura relevante.

La búsqueda se llevó a cabo en Google Scholar utilizando una lista de palabras clave ingresadas de manera continua y separadas por comas, con el objetivo de identificar estudios relevantes sobre la automatización en minería de cielo abierto. Las palabras clave empleadas fueron:

- Autonomous trucks
- Open-pit mining
- Risk mitigation
- Mining automation
- Safety in mining

Para asegurar la pertinencia y actualidad de los datos, se incluyeron exclusivamente estudios publicados entre 2020 y 2024. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionaron los primeros 100 estudios más relevantes. Esta estrategia facilitó una búsqueda exhaustiva y una selección adecuada de los estudios más pertinentes.

### **3.2. Criterios de inclusión y exclusión**

Para asegurar la relevancia y calidad de los estudios seleccionados, se aplicaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

#### **Criterios de inclusión**

- Año de publicación entre 2020 y 2024.
- Estudios empíricos, revisiones técnicas y estudios de caso.
- Publicación en inglés o español.
- Estudios publicados en revistas revisadas por pares o respaldados por instituciones académicas o científicas reconocidas.

#### **Criterios de exclusión**

- Artículos de opinión o aquellos sin datos sólidos.
- Estudios que no abordaran directamente la minería a cielo abierto o los camiones autónomos.

### **3.3. Aplicación del enfoque PRISMA**

La metodología PRISMA, propuesta por Page et al. (2021), es ampliamente reconocida para revisiones sistemáticas, ya que proporciona un marco claro para identificar, seleccionar, evaluar y sintetizar estudios relevantes, asegurando la trazabilidad y reproducibilidad de los resultados. En este estudio, el enfoque se adaptó y estructuró en cuatro fases principales.

1. Identificación: Se recopilaron los 100 resultados más relevantes utilizando la

estrategia de búsqueda definida.

2. Filtrado: En esta fase, se revisaron los títulos y resúmenes de los 100 estudios iniciales. Se eliminaron duplicados y aquellos que no cumplían con los objetivos de la investigación. Esto redujo el conjunto a 84 estudios.

3. Elegibilidad: Los 84 estudios restantes fueron analizados utilizando herramientas de inteligencia artificial para generar una síntesis preliminar. Esta etapa permitió seleccionar 70 estudios relevantes.

4. Inclusión: Finalmente, los 70 estudios seleccionados pasaron a formar parte del análisis sistemático.

### **3.4. Organización y análisis de datos**

Para abordar la pregunta de investigación de manera estructurada, los estudios fueron organizados en cuatro dimensiones clave:

- Automatización y Tecnologías Autónomas: Análisis de los componentes tecnológicos principales y avances recientes en camiones autónomos.
- Seguridad y Mitigación de Riesgos: Evaluación de cómo estas tecnologías han contribuido a reducir accidentes y mitigar riesgos operativos en minas a cielo abierto.
- Sostenibilidad Operativa y ambiental: Exploración de la optimización de recursos, la reducción de costos y la mejora de la eficiencia energética.
- Desafíos Futuros: Examen de barreras para la implementación eficiente y sostenible de estas tecnologías.

Como complemento a la organización por dimensiones, se incluyó el análisis de palabras clave extraídas de cada texto. Esta estrategia permitió identificar los términos más representativos en cada dimensión, con el fin de validar empíricamente la coherencia temática de los estudios asignados. Para ello, se consideró tanto la frecuencia de aparición de las palabras como su visualización mediante nubes de palabras, facilitando una comprensión global de los enfoques predominantes en la literatura.

El análisis se llevó a cabo mediante dos enfoques complementarios:

### **3.5. Extracción de datos y Análisis Manual**

Se pidió a ChatGPT que evaluara el contenido de cada artículo en función de cuatro dimensiones definidas, utilizando una escala de 0 a 3 para reflejar el nivel de profundidad con el que cada artículo aborda dichas dimensiones. Esta escala se definió de la siguiente manera:

- 0: No mencionado en el texto.
- 1: Mención superficial, con poca o ninguna profundización.
- 2: Análisis moderado, con una discusión sustancial pero no exhaustiva.
- 3: Contribución significativa, con análisis detallado y aporte clave al tema.

#### **Dimensiones evaluadas:**

- Avances tecnológicos: Innovaciones y desarrollos tecnológicos en camiones autónomos.
- Seguridad y mitigación de riesgos: Impacto en la reducción de accidentes y riesgos

operativos.

- Sostenibilidad operativa y ambiental: Optimización de recursos, reducción de costos y mejora de la eficiencia energética.
- Desafíos futuros: Barreras identificadas para la implementación eficiente y sostenible de estas tecnologías.

Además de la evaluación de las dimensiones, se solicitó a la herramienta extraer información específica de cada texto, organizada en columnas separadas:

- Tecnología más relevante mencionada: Se registró únicamente el nombre de la tecnología clave relacionada con camiones autónomos, según su relevancia dentro del artículo.
- Año de publicación: Se extrajo el año en que el artículo fue publicado.
- País del estudio: Se identificó el país donde se realizó el estudio o donde se enfoca el artículo.
- Palabras clave más relevantes: Se identificaron las 10 palabras más significativas o frecuentemente repetidas dentro del texto, representando los temas principales discutidos en cada artículo.

Estos datos permitieron realizar un análisis cuantitativo manual, incluyendo la distribución de estudios por dimensión, año y país, así como un análisis de palabras clave por dimensión.

### 3.6. Revisión Sistemática Independiente por Inteligencia Artificial:

Se instruyó a ChatGPT para generar una revisión sistemática detallada por dimensión.

Para ello, se siguió un proceso estructurado que garantizó claridad y precisión:

- Los estudios fueron proporcionados divididos por dimensión para asegurar claridad y evitar errores en el análisis.
- Una vez entregados todos los textos de una dimensión, se dieron las siguientes indicaciones a la IA:

*"En el contexto de esta investigación, que aborda una revisión sistemática sobre la automatización de camiones de extracción minera en minería a cielo abierto, ya se han llevado a cabo las etapas iniciales de la misma, incluyendo la definición del protocolo, la búsqueda de literatura, y la selección de estudios relevantes. La etapa actual corresponde al desarrollo del cuerpo o sección de resultados de la revisión, que requiere un análisis detallado de cada texto seleccionado. El objetivo es identificar y analizar los principales avances relacionados con la tecnología de interés, en este caso, los camiones autónomos, y evaluar cómo esta ha influido en la seguridad operativa y la mitigación de riesgos en la minería a cielo abierto. El análisis deberá enfocarse específicamente en la dimensión asignada para esta parte de la revisión, destacando las contribuciones clave de los autores, las concordancias y discrepancias entre ellos, y proporcionando una visión integral de los desarrollos más relevantes en la literatura."*

Estructura del análisis solicitado: Se solicitó un texto continuo de al menos 1,000 palabras por dimensión, que incluyera:

- Principales avances tecnológicos.

- Impactos en la seguridad minera.
- Desafíos futuros relacionados con la implementación de las tecnologías.
- Concordancias y discrepancias entre los estudios analizados.

Formato de las referencias: Se indicó que las citas se presentaran en formato APA, vinculando la información directamente con los estudios analizados.

Este enfoque permitió generar un análisis integral de los textos entregados, identificando avances tecnológicos, impactos en la seguridad minera y desafíos futuros.

### **3.7. Comparaciones y análisis crítico**

Los resultados obtenidos mediante ambos enfoques fueron sometidos a comparaciones detalladas para identificar similitudes, discrepancias y áreas complementarias. Este análisis crítico permitió contrastar los hallazgos de la revisión sistemática tradicional y la asistida por inteligencia artificial, proporcionando una visión más completa de los avances, impactos y desafíos de las tecnologías autónomas en la minería a cielo abierto.

### **3.8. Evaluación de calidad**

Para medir el rigor metodológico del estudio, se utilizó AMSTAR (A Measurement Tool to Assess Systematic Reviews), una herramienta diseñada para evaluar la calidad de revisiones sistemáticas. Propuesta inicialmente por Shea et al. (2007), esta metodología proporciona un marco claro para evaluar aspectos clave de las revisiones sistemáticas, como la exhaustividad en la búsqueda, la independencia en la selección de datos, la evaluación de sesgos y la transparencia en el reporte de resultados.



AMSTAR es ampliamente reconocida en el ámbito académico por su capacidad para identificar fortalezas y debilidades en revisiones sistemáticas, permitiendo no solo validar la calidad del trabajo realizado, sino también formular recomendaciones para futuras investigaciones. En este estudio, AMSTAR se aplicó y adaptó para evaluar el rigor metodológico, asegurando que se cumplieran los estándares más altos en la ejecución de la revisión sistemática.

## **4. Resultados**

### **4.1. Extracción de datos asistida por inteligencia artificial**

En esta sección, se evaluaron los campos de estudio a los que más aportan los estudios dentro de cada dimensión de la investigación. A cada uno de los estudios asignados a las dimensiones se le calculó el promedio de relevancia por cada uno de los siguientes criterios:

- Progreso en Tecnologías Autónomas
- Seguridad y Riesgos Mitigados
- Sostenibilidad Operativa y Ambiental
- Desafíos Futuros

El campo con el mayor promedio de relevancia fue identificado para cada dimensión, y se verificó si este criterio coincidía con la dimensión estudiada. Este análisis permitió validar la asignación de los estudios y también establecer relaciones con la tecnología más relevante por dimensión.

Los resultados numéricos que respaldan este análisis, incluyendo las puntuaciones asignadas a cada estudio por temática y su correspondiente asignación dimensionalse presentan en los Anexos (ver sección 8.4).

#### **4.1.1. Análisis de Campo de Estudio y Tecnologías Clave**

##### **Tecnologías Autónomas**

El criterio más relevante en la mayoría de los estudios asignados a esta dimensión fue el Progreso en Tecnologías Autónomas, validando la correcta asignación de los estudios.

Además, la literatura podría sugerir que los Mapas HD (High Definition Maps) son fundamentales para este campo de estudio, ya que fueron la tecnología más mencionada en esta dimensión. Este hallazgo refuerza la importancia de esta tecnología para el desarrollo de sistemas autónomos en la minería a cielo abierto.

### **Seguridad y Riesgos Mitigados**

El criterio más relevante en la mayoría de los estudios asignados a esta dimensión fue el Progreso en Tecnologías Autónomas, lo cual no valida la correcta asignación de los estudios a esta dimensión. Este hallazgo sugiere que los estudios en esta categoría abordan en mayor medida los avances tecnológicos en lugar de centrarse exclusivamente en la seguridad y mitigación de riesgos, como se esperaría en esta dimensión. Además, no se identificó una tecnología predominante en la literatura, ya que los estudios presentaron una amplia diversidad de tecnologías, lo que indica que las soluciones en seguridad minera son multifacéticas y no están asociadas a una única tecnología.

### **Sostenibilidad Operativa y Ambiental**

El criterio más relevante en los estudios asignados a esta dimensión fue el Progreso en Tecnologías Autónomas, lo cual no valida la correcta asignación de los estudios a esta dimensión. Los estudios mostraron que los avances en automatización fueron los que más se destacaron en esta categoría, lo que sugiere que los estudios en esta dimensión están más centrados en la tecnología que en los aspectos ambientales y de sostenibilidad. La tecnología principal en esta dimensión fue la automatización, lo cual refuerza esta interpretación.

### **Desafíos Futuros**

Los estudios asignados a esta dimensión destacaron como los campos de estudio más relevantes los Desafíos Futuros, lo que valida la correcta asignación de los estudios a esta dimensión. Además, la tecnología principal asociada con esta dimensión fue Minería 5.0, lo que respalda la relevancia de los estudios para abordar los obstáculos en la implementación de tecnologías autónomas, como la automatización y los desafíos regulatorios.

#### **4.1.2. Análisis de palabras clave (Keywords)**

Para complementar el análisis de los estudios asignados a cada dimensión, se llevó a cabo un análisis de palabras clave basado en la frecuencia de aparición de términos clave en los textos. Las palabras más repetidas en cada dimensión fueron agrupadas para identificar los temas predominantes dentro de cada campo de estudio. Para visualizar los resultados, se generaron diagramas de nube de palabras para cada dimensión, donde las palabras más frecuentes se representan con mayor tamaño.

Estas visualizaciones se presentan en el Anexo 8.5.

### **Tecnologías autónomas**

Las palabras clave predominantes en esta dimensión fueron “Sensores”, “Seguridad”, “Planificación”, “Transporte” e “IoT (Internet de las cosas)”. Estos términos reflejan los avances tecnológicos clave en la automatización de camiones y sistemas autónomos en minería, destacando la importancia de los sensores y la conectividad digital para mejorar la eficiencia y seguridad operativa.

El 21ptimizis muestra que “Sensores” y “Seguridad” fueron los términos más destacados, lo que indica que estos aspectos son centrales en el desarrollo y funcionamiento de tecnologías autónomas para la minería. Esta información puede orientar futuras

investigaciones enfocadas en la integración de sistemas inteligentes y conectividad avanzada en entornos mineros complejos.

### **Seguridad y riesgos mitigados**

En esta dimensión, los términos más recurrentes fueron “Seguridad”, “Sostenibilidad”, “Planificación”, “Eficiencia” y “Riesgos”. Estas palabras subrayan el enfoque de la literatura en la gestión del riesgo operativo y en la optimización de procesos orientados a reducir accidentes y mejorar condiciones laborales en minería.

El predominio del término “Seguridad” en la nube de palabras confirma que esta es la preocupación principal en los estudios sobre mitigación de riesgos. Este análisis permite delimitar temas clave como la planificación segura, la eficiencia operativa y el rol de la automatización como estrategia preventiva, proporcionando una base útil para investigaciones centradas en seguridad minera y tecnologías de soporte.

### **Sostenibilidad operativa y ambiental**

Las palabras clave más relevantes en esta dimensión fueron “Sostenibilidad”, “Optimización”, “Tecnología”, “Electrificación” y “Digitalización”. Estos términos reflejan la creciente preocupación por reducir el impacto ambiental de la minería mediante procesos más eficientes, tecnologías limpias y automatización.

El predominio de “Sostenibilidad” en la nube de palabras sugiere un fuerte enfoque de la literatura en el desarrollo de operaciones más limpias, eficientes y responsables. Este análisis permite identificar líneas de investigación centradas en la transición energética, la electrificación de equipos y la integración de criterios ambientales en la minería

automatizada.

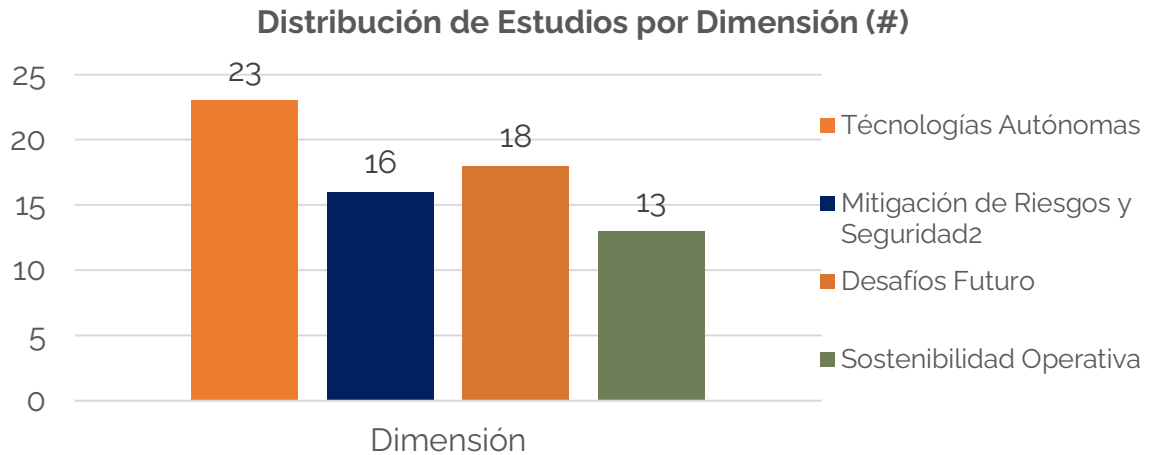
## **Desafíos futuros**

Las palabras clave más frecuentes en esta dimensión fueron “Seguridad”, “Sostenibilidad”, “Automatización”, “Optimización” e “IA”. Estos términos reflejan los desafíos técnicos y organizacionales que enfrenta la industria minera en la implementación de tecnologías autónomas, destacando el papel de la automatización y la inteligencia artificial en la superación de barreras operativas.

El predominio de “Seguridad” y “Automatización” en la nube de palabras sugiere que los estudios se centran en cómo afrontar los riesgos emergentes, las limitaciones de infraestructura y la resistencia al cambio. Estos hallazgos orientan futuras investigaciones hacia la proyección estratégica de las tecnologías autónomas y sus implicancias en el largo plazo.

### **4.1.3. Distribución de los estudios por dimensión**

En esta sección, se presenta la distribución de los estudios según las dimensiones de la investigación, lo cual permite observar la concentración de estudios en cada área. A continuación, se muestra un gráfico que ilustra cómo se distribuyen los estudios por dimensión.



*\*Elaboración propia*

El análisis de los resultados muestra que la dimensión con mayor cantidad de estudios es “Tecnologías Autónomas”, con un total de 23 estudios. Este hallazgo es consistente con la naturaleza de la investigación, ya que la automatización de camiones autónomos es el tema central de este trabajo, lo que probablemente ha llevado a un mayor enfoque en esta área.

Por otro lado, la dimensión con menos estudios es “Sostenibilidad Operativa y Ambiental”, con 13 estudios. Este resultado sugiere que la sostenibilidad en el contexto de la automatización de camiones en minería a cielo abierto es un tema menos explorado, lo que podría señalar un vacío en la literatura actual.

Las demás dimensiones presentan la siguiente distribución:

- Seguridad y Riesgos Mitigados: 16 estudios
- Desafíos Futuros: 18 estudios

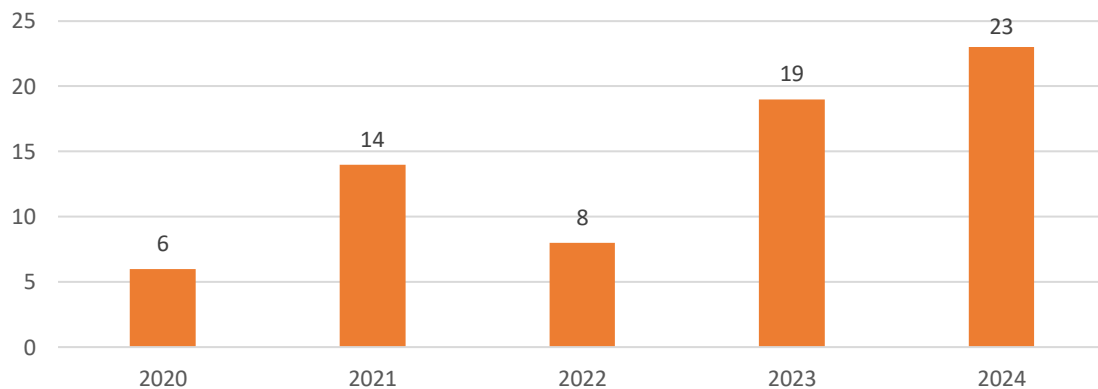
Estos números sugieren que, aunque estas dimensiones también son relevantes para la automatización de camiones en la minería, la tecnología autónoma es, con diferencia, el área más investigada, seguida de los temas de seguridad y desafíos futuros, mientras que la

sostenibilidad sigue siendo un tema menos abordado.

#### 4.1.4. Distribución temporal de los estudios por año

En esta sección se presenta la distribución de los estudios según el año de publicación, con el fin de observar las tendencias y la evolución en la cantidad de estudios a lo largo del tiempo. A continuación, se muestra un gráfico que ilustra la distribución de los estudios entre los años 2020 y 2024.

**Crecimiento de Estudios de Interés para la Investigación (2020-2024) (#)**



*\*Elaboración propia*

Los resultados muestran que los estudios han mostrado una tendencia constante de aumento en los años evaluados, con la excepción del año 2022. En particular, el año 2020 tuvo la menor cantidad de estudios, con un total de 6, mientras que desde entonces, la cantidad de estudios ha ido en aumento cada año, con la única excepción de 2022, que presentó 8 estudios. A partir de 2021, se observó un crecimiento continuo en el número de estudios:

- 2020: 6 estudios
- 2021: 14 estudios

- 2022: 8 estudios
- 2023: 19 estudios
- 2024: 23 estudios

Este patrón sugiere un creciente interés en la automatización de camiones en minería a cielo abierto, con un aumento constante en la cantidad de investigaciones, particularmente entre 2021 y 2024.

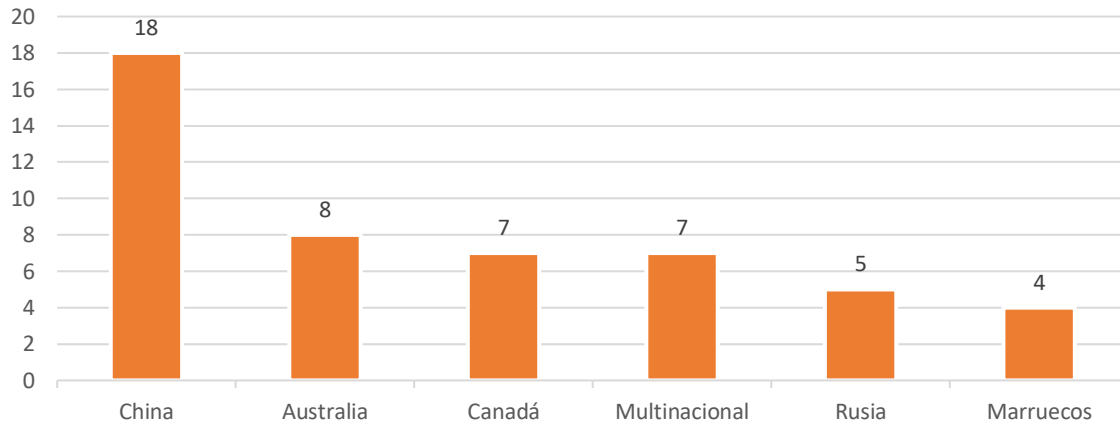
Al desglosar los resultados por dimensiones de estudio, se observa que el aumento en la cantidad de estudios se ve principalmente impulsado por las dimensiones de “Tecnologías Autónomas” y “Desafíos Futuros”, las cuales han mostrado un aumento considerable en el número de estudios a lo largo de los años. En cambio, las dimensiones de “Seguridad y Riesgos Mitigados” y “Sostenibilidad Operativa y Ambiental” han mantenido una tendencia más constante, sin grandes fluctuaciones a lo largo del tiempo.

El desglose detallado de la distribución por dimensiones a lo largo de los años será adjuntado en el Anexo B, donde se podrán observar las tendencias específicas de cada área de estudio.

#### **4.1.5. Distribución de los estudios por país**

En esta sección, se presenta el análisis de la distribución de los estudios según el país en el que se llevaron a cabo. A continuación, se incluye un gráfico que muestra la cantidad de estudios realizados en los cinco países principales según el número de investigaciones realizadas.

### Distribución de Estudios por País



*\*Elaboración propia*

El análisis revela que los países líderes en minería son los que también encabezan la lista en términos de publicaciones sobre la automatización de camiones en minería a cielo abierto. Los primeros cinco países en cuanto al número de estudios realizados son:

- China: 18 estudios
- Australia: 8 estudios
- Canadá: 7 estudios

Este patrón refleja la prevalencia de la automatización en países con una fuerte industria minera, lo cual resalta la importancia de la investigación en estos países para el desarrollo de tecnologías autónomas en la minería.

Al desglosar los resultados por dimensiones de estudio, se observa lo siguiente:

- En la dimensión de Tecnologías Autónomas, China lidera con 11 estudios, lo que refleja su fuerte enfoque en el desarrollo de tecnologías avanzadas para la minería.

- En la dimensión de Seguridad y Riesgos Mitigados, Canadá lidera con 4 estudios, lo que resalta su enfoque en la seguridad minera y la mitigación de riesgos operativos.
- En la dimensión de Sostenibilidad Operativa y Ambiental, Australia lidera con 2 estudios, mientras que en Desafíos Futuros, Australia también lidera con 4 estudios, lo que indica su interés en superar los desafíos asociados con la automatización y la sostenibilidad en la minería.

Los gráficos desglosados por dimensión estarán disponibles en el Anexo C, donde se podrá observar más detalladamente la distribución de los estudios por país y su relación con las dimensiones analizadas.

#### **4.1.6. Principales autores y fuentes de estudio**

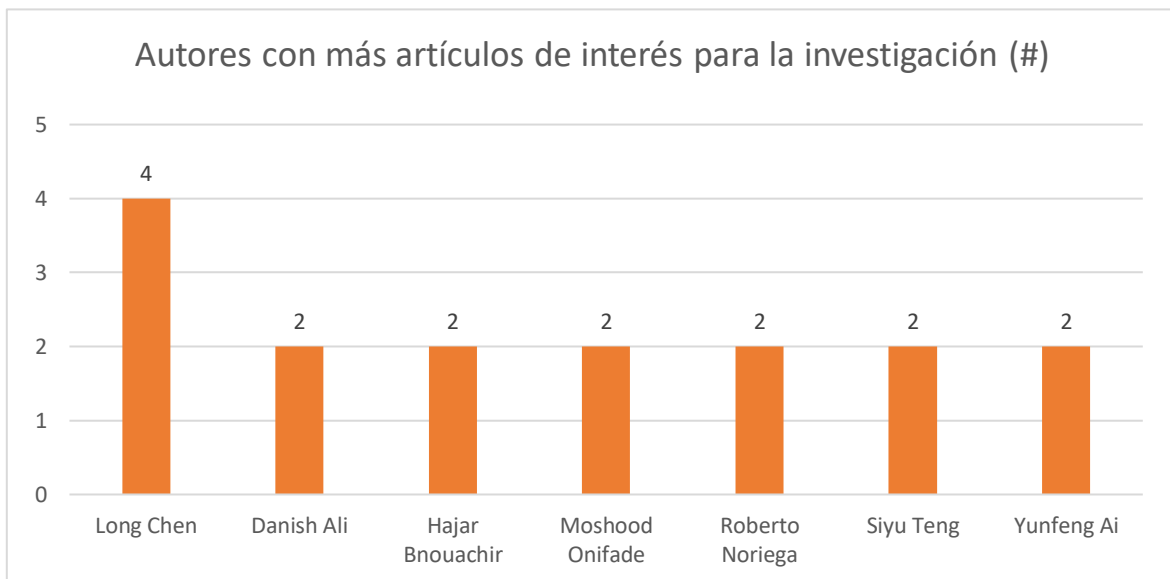
Identificar a los principales autores en el campo de la automatización de camiones en minería a cielo abierto es crucial para comprender el desarrollo y la evolución de este ámbito de investigación. Los autores con mayor cantidad de publicaciones suelen ser considerados expertos en el área, ya que su trabajo refleja un conocimiento profundo y una dedicación constante al avance de la tecnología y las soluciones aplicadas a la minería. Reconocer a estos líderes permite no solo valorar su impacto académico, sino también identificar fuentes confiables y tendencias clave en el desarrollo de tecnologías autónomas en minería.

En este análisis se destacan los siguientes autores, con el número de estudios relacionados con esta temática:

- Long Chen: 4 estudios.

- Danish Ali: 2 estudios.
- Hajar Bnouachir: 2 estudios.
- Moshood Onifade: 2 estudios.
- Roberto Noriega: 2 estudios.
- Siyu Teng: 2 estudios.
- Yunfeng Ai: 2 estudios.

A continuación, se presenta un gráfico que presenta esta información de forma visual:



*\*Elaboración propia*

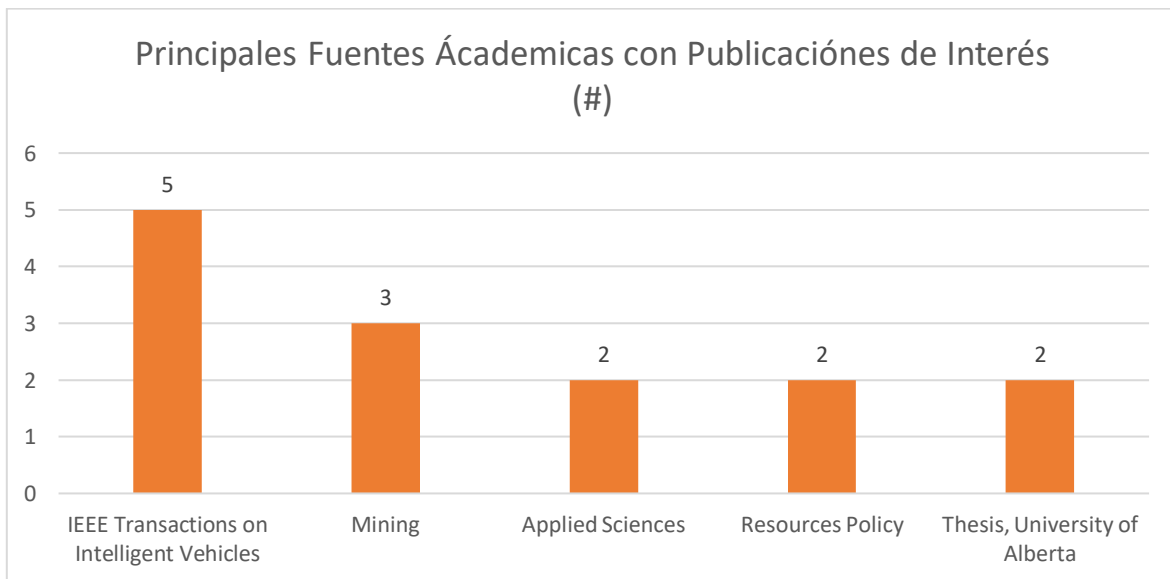
Además de identificar a los autores más destacados, es importante analizar las principales fuentes donde se concentran las publicaciones relacionadas con esta investigación. Estas fuentes representan los espacios académicos clave para la discusión y el desarrollo de tecnologías autónomas en minería a cielo abierto. Identificarlas no solo resalta

los centros de difusión del conocimiento más relevantes, sino que también orienta a futuros investigadores hacia los lugares donde se está generando mayor impacto en este campo.

Entre las fuentes más significativas, destacan:

- IEEE Transactions on Intelligent Vehicles: 5 publicaciones.
- Mining: 3 publicaciones.
- Applied Sciences: 2 publicaciones.
- Resources Policy: 2 publicaciones.
- Thesis, University of Alberta: 2 publicaciones.

A continuación, se presenta de manera visual las principales fuentes académicas con publicaciones de interés para el estudio:



*\*Elaboración propia*

## **4.2. Revisión sistemática generada por inteligencia artificial**

### **4.2.1. Instrucciones y resultados**

#### **Instrucciones**

Como complemento al análisis manual y la extracción de datos, se realizó una revisión sistemática independiente utilizando inteligencia artificial (ChatGPT). Esta revisión proporcionó un análisis detallado y automatizado de los estudios seleccionados, con el objetivo de identificar los principales avances tecnológicos, impactos en la seguridad minera y los desafíos futuros relacionados con la automatización de camiones en minería a cielo abierto.

La metodología seguida para la revisión sistemática generada por inteligencia artificial fue la siguiente:

1. Entrega de estudios: Los estudios fueron proporcionados en bloques por dimensión para garantizar la claridad y precisión en el análisis.
2. Instrucciones específicas: ChatGPT fue instruido para generar un análisis detallado de cada dimensión, enfocándose en los avances tecnológicos, la mitigación de riesgos, la sostenibilidad y los desafíos futuros, con un enfoque particular en la minería autónoma.
3. Redacción: El análisis resultante fue redactado de manera continua, incluyendo citas en formato APA y proporcionando un análisis exhaustivo basado en los estudios revisados.

## Resultados

A continuación, se presenta el análisis sistemático generado por inteligencia artificial, tal como fue redactado por ChatGPT:

### Automatización y Tecnologías Autónomas

“La automatización de camiones autónomos en minas de cielo abierto representa uno de los avances más significativos en la industria minera contemporánea, impulsando la eficiencia operativa y la seguridad en entornos complejos y desafiantes. A lo largo de la última década, la investigación y el desarrollo en este ámbito han evolucionado notablemente, integrando tecnologías de vanguardia como sistemas de navegación autónomos, percepción avanzada y comunicación máquina a máquina. Este análisis se centra en explorar los avances clave en esta dimensión, considerando concordancias y diferencias entre las perspectivas y hallazgos de diferentes autores.

Uno de los aspectos fundamentales de la automatización en camiones autónomos es la implementación de sistemas de navegación basados en sensores avanzados y algoritmos de aprendizaje automático. Según Chen et al. (2024), los sistemas de posicionamiento de alta precisión que combinan GNSS y sistemas de navegación inercial (INS) permiten que los camiones operen con precisión en ambientes con poca visibilidad y caminos no estructurados, características típicas de las minas a cielo abierto. Este enfoque se refuerza con tecnologías de percepción 9 DoF para la detección tridimensional de objetos, lo que mejora significativamente la capacidad de los vehículos para identificar obstáculos y tomar decisiones autónomas en tiempo real. De manera similar, investigaciones previas destacan el uso de LiDAR, cámaras de alta resolución y radares mmWave para ampliar el campo de

percepción de los vehículos autónomos, permitiendo la detección de objetos estáticos y dinámicos incluso en condiciones adversas (Ge et al., 2022; Teng et al., 2023).

Los sistemas de gestión de flotas autónomas también juegan un papel crítico en la automatización minera, integrando vehículos individuales en operaciones coordinadas para maximizar la eficiencia. Según Ge et al. (2022), los sistemas de transporte autónomo en minas a cielo abierto dependen de plataformas de simulación paralelas que utilizan gemelos digitales para optimizar la planificación de rutas y las interacciones entre vehículos. Este enfoque permite una mejor coordinación en tiempo real, mejorando la productividad general y reduciendo los costos operativos. Los avances en plataformas de gestión colaborativa, como los sistemas de carga coordinada, también han sido identificados como áreas de mejora, ya que conectan vehículos autónomos y equipos de carga, asegurando que las operaciones sean continuas y sin interrupciones innecesarias. Además, el desarrollo de plataformas de simulación para la validación y calibración de sistemas autónomos ha permitido reducir los riesgos asociados con las pruebas físicas en minas activas, lo que refuerza la confianza en las tecnologías antes de su implementación a gran escala (Fiscor, 2023)

En cuanto a los desafíos de implementación, las condiciones extremas de las minas a cielo abierto, como el clima adverso y los caminos accidentados, presentan barreras significativas. Según un estudio de Fiscor (2023), los sistemas autónomos en estas minas han demostrado ser efectivos para mantener operaciones continuas, incluso en entornos con temperaturas extremas y tormentas de polvo. Sin embargo, se identifican diferencias en la capacidad de los sistemas autónomos para adaptarse a estas condiciones dependiendo de las tecnologías específicas utilizadas. Por ejemplo, el uso de redes 5G para la comunicación en tiempo real entre vehículos y centros de control ha sido señalado como un avance esencial

para superar las limitaciones de conectividad en áreas remotas (Ge et al., 2022). Otros estudios también destacan que la incorporación de algoritmos de aprendizaje profundo para la detección y clasificación de obstáculos ha mejorado la capacidad de los camiones autónomos para operar en condiciones de baja visibilidad y entornos dinámicos (Chen et al., 2024).

Los beneficios económicos de la automatización de camiones también son un tema recurrente en la literatura. País Cerna et al. (2023) realizaron una evaluación de la efectividad global del equipo autónomo (OEE) y concluyeron que las operaciones autónomas mejoran significativamente la disponibilidad y el rendimiento, con un impacto directo en la reducción de costos y un aumento del 14,54% en comparación con las operaciones manuales. Esta ventaja se traduce no solo en mayor eficiencia, sino también en una reducción significativa de los riesgos para los trabajadores humanos, lo que alinea estas tecnologías con los objetivos de sostenibilidad y seguridad de la industria. Además, las operaciones autónomas permiten un uso más eficiente del combustible, lo que no solo reduce los costos operativos, sino que también contribuye a los objetivos globales de sostenibilidad ambiental al disminuir las emisiones de carbono.

A pesar de estos avances, las diferencias en la implementación de tecnologías autónomas en diferentes contextos mineros destacan las discrepancias en la estandarización. Mientras que los estándares como los desarrollados en China han sido elogiados por su capacidad para guiar el desarrollo de sistemas inteligentes y autónomos (Ge et al., 2022), otros autores destacan la falta de uniformidad en la adopción de tecnologías y prácticas, lo que puede generar desafíos en términos de interoperabilidad y costos iniciales altos (Teng et al., 2023). La creación de estándares internacionales podría facilitar una implementación más

amplia y eficiente, promoviendo la interoperabilidad entre tecnologías y reduciendo las barreras de entrada para minas más pequeñas.

Además, varios estudios subrayan la importancia de la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático en la toma de decisiones operativas. Por ejemplo, los modelos predictivos basados en datos históricos permiten optimizar la planificación de rutas y minimizar interrupciones no planificadas, como fallas mecánicas o condiciones imprevistas del terreno (Fiscor, 2023; País Cerna et al., 2023). Esta capacidad para anticipar problemas y ajustar operaciones en tiempo real representa una de las áreas más prometedoras para futuras investigaciones. Además, el uso de análisis de datos en tiempo real para monitorear el estado de los vehículos y predecir fallas ha sido señalado como un avance crucial para mejorar la eficiencia y la confiabilidad de las operaciones autónomas (Ge et al., 2022).

Finalmente, una convergencia notable en la literatura radica en el impacto positivo de la automatización sobre la sostenibilidad ambiental de las operaciones mineras. Al reducir el consumo de combustible y las emisiones de carbono mediante operaciones más eficientes, los camiones autónomos contribuyen a los objetivos globales de minería verde y sustentable (Chen et al., 2024; País Cerna et al., 2023). Además, la reducción de la necesidad de infraestructura física y el uso optimizado de recursos naturales son beneficios indirectos que refuerzan la sostenibilidad de estas tecnologías en el largo plazo.

En resumen, la automatización de camiones autónomos en minas de cielo abierto ha avanzado significativamente, integrando tecnologías de percepción avanzada, navegación precisa y gestión colaborativa para transformar las operaciones mineras. Si bien existen desafíos técnicos y de estandarización, los beneficios en términos de eficiencia, seguridad y

sostenibilidad justifican el creciente interés en esta área. Este análisis resalta tanto las concordancias como las divergencias en la literatura, proporcionando una visión integral del estado actual de la tecnología y sus perspectivas futuras.”

### **Mitigación de Riesgos y Seguridad en Minería Automatizada**

“La automatización de camiones en minería a cielo abierto representa una de las innovaciones más prometedoras para mitigar riesgos y mejorar la seguridad en las operaciones mineras. Este desarrollo responde a la necesidad de reducir los accidentes laborales y los peligros inherentes a la actividad minera, caracterizada por su alta exposición a condiciones adversas y a maquinaria pesada. La literatura reciente destaca cómo la implementación de tecnologías autónomas y automatizadas aborda directamente estos desafíos.

Un punto clave que se observa en múltiples estudios es la capacidad de la automatización para disminuir la exposición humana a áreas de alto riesgo. Según Moniri-Morad et al. (2023), los camiones autónomos no solo reducen la interacción entre el personal y las maquinarias, sino que también permiten la eliminación de peligros asociados al manejo humano, como errores operativos y fatiga. Esto está en línea con la idea de “minería sin entrada humana” o “zero entry mining”, que promueve operaciones completamente autónomas en áreas de riesgo elevado, mejorando tanto la seguridad como la eficiencia de la extracción.

Además, el desarrollo de tecnologías de asistencia como sistemas anti-colisión y sensores inteligentes ha permitido avances significativos en la prevención de accidentes. Los sistemas basados en visión por computadora y aprendizaje profundo han demostrado ser

efectivos para detectar y alertar sobre la presencia de peatones y otros vehículos en entornos mineros subterráneos y superficiales. Imam et al. (2023) subrayan que, aunque las condiciones de visibilidad y la colocación de sensores pueden afectar su desempeño, estos sistemas han reducido sustancialmente las colisiones y los incidentes en operaciones automatizadas.

La seguridad también se ha beneficiado del desarrollo de simuladores y programas de entrenamiento gamificados para los operadores de camiones, que han mostrado una mejora significativa en la preparación de los trabajadores para situaciones de riesgo. Según Vos (2023), la capacitación mediante simulación no solo aumenta la conciencia de los peligros, sino que también proporciona un entorno controlado donde los operadores pueden practicar respuestas seguras a eventos peligrosos, reduciendo así la probabilidad de accidentes en situaciones reales.

En términos de reducción de riesgos en el transporte de materiales, los camiones autónomos representan un avance sustancial. Onifade et al. (2023) destacan que la introducción de tecnologías como los vehículos autónomos y los sensores avanzados ha reducido la incidencia de accidentes asociados a fallos mecánicos y errores humanos en las operaciones de carga y transporte. Estas tecnologías no solo mejoran la seguridad, sino que también contribuyen a optimizar la productividad al reducir interrupciones operativas causadas por accidentes.

Sin embargo, existen desafíos técnicos y operativos que limitan la adopción plena de estas tecnologías. Algunos autores, como Al-Masri (2022), advierten sobre la necesidad de calibrar las tecnologías autónomas para adaptarse a las condiciones específicas de cada mina,

como las características del terreno y las propiedades del material transportado. Además, los costos iniciales de implementación y el mantenimiento de estos sistemas representan barreras significativas para su adopción, especialmente en operaciones mineras de menor escala.

En contraste, otros estudios han señalado los beneficios a largo plazo en términos de costo y seguridad. Según Rudakov et al. (2021), la implementación de un enfoque basado en el análisis de riesgos en las operaciones autónomas permite no solo reducir los accidentes, sino también identificar oportunidades para optimizar los recursos y minimizar las interrupciones operativas. Estos hallazgos subrayan la importancia de integrar la gestión de riesgos en la planificación y operación de camiones autónomos.

Otra perspectiva interesante es el impacto de estas tecnologías en la sostenibilidad de las operaciones mineras. Osses Aguayo et al. (2021) argumentan que la reducción de incidentes y accidentes no solo mejora la seguridad de los trabajadores, sino que también tiene implicaciones positivas para la sostenibilidad ambiental y social de las operaciones mineras, al minimizar los impactos negativos en las comunidades cercanas y en el entorno natural.

En términos de avances tecnológicos, la integración de sistemas de comunicación avanzados y tecnologías de monitoreo en tiempo real ha revolucionado la capacidad de supervisar y gestionar los riesgos en operaciones con camiones autónomos. Por ejemplo, Knights y Yeates (2021) discuten cómo la interoperabilidad entre diferentes sistemas de automatización ha permitido un control más preciso y eficiente de las operaciones mineras, reduciendo aún más los riesgos asociados.

A pesar de estos avances, la literatura también resalta discrepancias en la

implementación y efectividad de estas tecnologías. Por ejemplo, mientras que algunos estudios destacan la efectividad de los sistemas anti-colisión en entornos controlados, otros señalan que su desempeño puede verse comprometido en condiciones extremas, como climas severos o terrenos accidentados. Estas diferencias subrayan la necesidad de continuar investigando y desarrollando soluciones que sean robustas y adaptables a diversas condiciones operativas.

En resumen, la automatización de camiones en minería a cielo abierto ha demostrado ser una herramienta poderosa para mitigar riesgos y mejorar la seguridad. Aunque persisten desafíos técnicos y operativos, los avances en tecnologías autónomas, sistemas de monitoreo y estrategias de capacitación han contribuido significativamente a crear entornos de trabajo más seguros y eficientes. Este enfoque no solo mejora la seguridad de los trabajadores, sino que también promueve una minería más sostenible y responsable, alineada con las expectativas sociales y ambientales actuales.”

### **Sostenibilidad en la Minería Automatizada**

“La automatización de camiones en minería a cielo abierto ha ganado un papel preponderante en la transformación operativa del sector, representando una respuesta a los desafíos de sostenibilidad operativa en términos ambientales, económicos y sociales. La incorporación de tecnologías avanzadas y enfoques automatizados permite a las empresas mineras mejorar la eficiencia de sus procesos, reducir costos operativos y, simultáneamente, contribuir a la mitigación de impactos ambientales negativos. Esta dimensión de la investigación explora cómo los avances en automatización contribuyen a la sostenibilidad operativa de las operaciones mineras a cielo abierto.

La transición hacia sistemas de transporte autónomos y electrificados es una de las iniciativas más destacadas en términos de sostenibilidad. Según Bao et al. (2023), la combinación de tecnologías de automatización con electrificación, como los sistemas de Trolley Assist (TA) y los camiones totalmente eléctricos, ha mostrado un potencial significativo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de combustibles fósiles. Esta transición no solo aborda el problema de la contaminación atmosférica, sino que también mitiga los costos asociados al mantenimiento y la operación de equipos tradicionales que dependen de combustibles fósiles. Adicionalmente, el uso de sistemas automatizados en minería puede optimizar las rutas de transporte, minimizando el consumo de energía y maximizando la eficiencia operativa, como lo destaca Aguirre-Jofré et al. (2021), quienes exploraron cómo el monitoreo en tiempo real basado en IoT puede reducir tiempos de carga y transporte, mejorando la productividad sin incrementar los costos.

Los avances tecnológicos también han impulsado mejoras significativas en la gestión de flotas, contribuyendo directamente a la sostenibilidad operativa. Wang et al. (2023) identifican que los sistemas de gestión de flotas inteligentes optimizan la asignación de recursos, asegurando que los camiones operen en su máxima capacidad, lo cual reduce la necesidad de equipos adicionales y, por ende, disminuye el consumo de recursos energéticos y materiales. Estos sistemas, integrados con inteligencia artificial, son capaces de analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real para ajustar dinámicamente las operaciones, lo que resulta en una operación más eficiente y menos dependiente de recursos intensivos.

Desde una perspectiva ambiental, la automatización también facilita la integración de prácticas más sostenibles, como la disminución de las emisiones y la mejora en la calidad del aire en las operaciones mineras. Según Moreau et al. (2021), la introducción de sistemas

automatizados en minas subterráneas de cobre resultó en una reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros impactos ambientales negativos, como la acidificación y la eutrofización, lo que subraya el papel crucial de la tecnología en la mitigación de impactos ambientales. Aunque este estudio se centra en minas subterráneas, las lecciones aprendidas son extrapolables a las operaciones a cielo abierto, donde los sistemas automatizados pueden disminuir las emisiones en una proporción similar.

En términos de sostenibilidad económica, los sistemas automatizados también mejoran la rentabilidad a largo plazo de las operaciones mineras. La literatura sugiere que, aunque la implementación inicial de estas tecnologías conlleva altos costos, los beneficios a largo plazo en términos de reducción de costos operativos y aumento de la eficiencia justifican la inversión inicial. Long et al. (2024) destacan que los camiones autónomos eliminan factores como la fatiga del operador y optimizan la utilización del equipo, lo que reduce los costos asociados a interrupciones operativas y accidentes. Asimismo, los sistemas autónomos permiten una operación continua, eliminando tiempos muertos y maximizando la producción, un aspecto que ha sido reiterado por múltiples estudios en la literatura.

Sin embargo, la sostenibilidad operativa no se limita únicamente a las dimensiones económicas y ambientales; también incluye la dimensión social, especialmente en términos de seguridad y salud ocupacional. Los camiones automatizados contribuyen a crear entornos de trabajo más seguros al reducir la exposición de los trabajadores a condiciones peligrosas. Según Sánchez y Hartlieb (2020), la digitalización y la automatización tienen el potencial de transformar las operaciones mineras en espacios más seguros mediante la minimización de la interacción humana directa con maquinaria pesada y entornos riesgosos. Esto no solo mejora la sostenibilidad social de las operaciones, sino que también refuerza la aceptación

comunitaria y regulatoria de las actividades mineras.

Una crítica recurrente en la literatura es la necesidad de equilibrar la adopción de tecnologías automatizadas con la creación de empleos sostenibles. Velikanov et al. (2021) destacan que, aunque la automatización reduce la dependencia de operadores humanos, también presenta desafíos en términos de reentrenamiento y redistribución laboral, lo que implica una necesidad de estrategias integrales que consideren el impacto social de estas transformaciones. Este aspecto destaca la importancia de integrar enfoques holísticos en la planificación y ejecución de proyectos de automatización en minería.

En cuanto a las concordancias y diferencias entre los autores, es evidente que existe un consenso general sobre el potencial de la automatización para mejorar la sostenibilidad operativa en términos económicos, ambientales y sociales. Sin embargo, las diferencias surgen en la implementación práctica y los desafíos asociados. Por ejemplo, Bao et al. (2023) y Moreau et al. (2021) enfatizan las ventajas ambientales de los sistemas electrificados y automatizados, mientras que Long et al. (2024) y Velikanov et al. (2021) abordan más detalladamente los desafíos económicos y sociales asociados a su adopción.

Adicionalmente, los estudios sobre sistemas de gestión de flotas, como los de Wang et al. (2023) y Aguirre-Jofré et al. (2021), presentan perspectivas complementarias sobre cómo estas tecnologías pueden contribuir a la sostenibilidad operativa mediante la optimización de recursos y la mejora de la eficiencia. Sin embargo, existe una necesidad destacada en la literatura para abordar las brechas en la integración de estas tecnologías con prácticas de minería sostenible y su impacto en comunidades locales y economías regionales.

En conclusión, la automatización de camiones en minería a cielo abierto ofrece

soluciones significativas para abordar los desafíos de sostenibilidad operativa, incluyendo la reducción de emisiones, la mejora en la eficiencia energética, y la creación de entornos de trabajo más seguros. Los avances tecnológicos y las estrategias de gestión de flotas contribuyen a una operación más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, para maximizar los beneficios, es fundamental considerar un enfoque holístico que integre las dimensiones económicas, ambientales y sociales, equilibrando la innovación tecnológica con la sostenibilidad a largo plazo. Las contribuciones y perspectivas presentadas en la literatura subrayan tanto las oportunidades como los desafíos asociados a la adopción de estas tecnologías en el sector minero.”

### **Desafíos Futuro de la Implementación**

“En el contexto de la minería a cielo abierto, la implementación de camiones autónomos representa un paradigma transformador que busca optimizar la eficiencia operativa, mejorar la seguridad y reducir costos. Sin embargo, la transición hacia estas tecnologías enfrenta numerosos desafíos y plantea importantes oportunidades para la industria minera. Uno de los avances clave es el desarrollo de sistemas autónomos que integran modelos predictivos y tecnologías avanzadas de sensores. La incorporación de gemelos digitales y sistemas de inteligencia paralela, como se evidencia en el sistema YuGong desarrollado en China, ha permitido optimizar las operaciones de transporte y garantizar una mayor seguridad en entornos de trabajo complejos (Chen et al., 2021; Wang et al., 2024).

A pesar de los avances tecnológicos, uno de los mayores desafíos sigue siendo la adaptación de la infraestructura y la compatibilidad de las operaciones autónomas con

sistemas manuales existentes. Según Benlaajili et al. (2021), la implementación exitosa de camiones autónomos requiere rutas diseñadas específicamente, mantenimiento riguroso y separación efectiva entre flotas autónomas y manuales. Este enfoque reduce los riesgos de interacción y mejora la eficiencia, pero también exige inversiones significativas y un cambio organizacional profundo. La seguridad es otro aspecto crítico, particularmente en condiciones dinámicas y ambientes extremos, donde la tecnología autónoma aún enfrenta limitaciones significativas en términos de fiabilidad técnica y robustez (Stenin, 2021).

En cuanto a los beneficios potenciales, los camiones autónomos ofrecen mejoras significativas en términos de reducción de costos operativos y riesgos humanos. La literatura muestra consenso en que estas tecnologías pueden minimizar los accidentes laborales y optimizar el uso de recursos al reducir tiempos de inactividad y errores humanos (Codoceo-Contreras et al., 2024). Sin embargo, autores como Moezzi Nasab y Salmani (2024) destacan que, para maximizar estos beneficios, es esencial implementar tecnologías complementarias como sistemas de monitoreo remoto y análisis de datos en tiempo real. Estas herramientas no solo mejoran la toma de decisiones, sino que también contribuyen a la sostenibilidad ambiental al optimizar el consumo de energía y reducir las emisiones.

A nivel tecnológico, se han desarrollado modelos de control predictivo y algoritmos de optimización para mejorar la precisión y la estabilidad de los sistemas de conducción autónoma. Fu et al. (2023) presentan un enfoque basado en métodos de información semántica para coordinar el tráfico en intersecciones, lo que permite una gestión más eficiente de las flotas de transporte en minas abiertas. Por otro lado, el uso de modelos avanzados como el iMAPeM integra la inteligencia humana en sistemas autónomos, permitiendo una mayor adaptabilidad y respuesta a situaciones de emergencia (Ai et al.,

2024).

No obstante, la integración de estas tecnologías no está exenta de retos sociales y organizacionales. La automatización plantea preguntas sobre la aceptación cultural y el impacto en el empleo, especialmente en comunidades mineras tradicionales. Según Codoceo-Contreras et al. (2024), la interacción entre sistemas automatizados y trabajadores humanos debe gestionarse cuidadosamente para evitar problemas de confianza y aceptación. Este desafío se ve exacerbado por la necesidad de capacitar a la fuerza laboral en nuevas habilidades, lo que requiere un enfoque colaborativo entre gobiernos, empresas y comunidades locales.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la transición hacia la minería inteligente ofrece una oportunidad única para minimizar los impactos ambientales. La tecnología de vehículos autónomos puede contribuir a una minería más sostenible mediante la optimización de rutas y la reducción del consumo de combustible (Chen et al., 2024). Además, la incorporación de gemelos digitales y sistemas de IoT facilita el monitoreo continuo de las operaciones, permitiendo una gestión más proactiva de los recursos y la mitigación de riesgos ambientales.

En términos de oportunidades futuras, la convergencia de tecnologías como la inteligencia artificial, los modelos de lenguaje avanzado y los sistemas de realidad aumentada promete revolucionar aún más el sector minero. Por ejemplo, los modelos de gemelos digitales permiten simular escenarios complejos y prever fallas, mientras que los sistemas de aprendizaje profundo mejoran la capacidad de los camiones autónomos para adaptarse a terrenos cambiantes y condiciones climáticas adversas (Chen et al., 2024; Stenin, 2021).

Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también posicionan a la minería como un sector clave en la era de la digitalización industrial.

En conclusión, la automatización de camiones en minería a cielo abierto representa tanto desafíos significativos como oportunidades transformadoras. Si bien los avances tecnológicos ofrecen soluciones prometedoras para mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad, su implementación exitosa depende de superar barreras organizacionales, técnicas y sociales. Un enfoque holístico, que combine innovación tecnológica con estrategias inclusivas y sostenibles, será crucial para asegurar que estos sistemas beneficien a todas las partes interesadas y contribuyan a un futuro más seguro y eficiente para la industria minera.”

#### **4.2.2. Principales Hallazgos Revisión**

En base a la revisión sistemática realizada por inteligencia artificial, se pueden destacar los siguientes hallazgos clave, organizados por las dimensiones del estudio.

#### **Automatización y Tecnologías Autónomas**

La automatización de camiones autónomos ha sido un desarrollo crucial en la minería a cielo abierto. País Cerna (2023) comparó las operaciones autónomas con las manuales y concluyó que las primeras incrementan el OEE (eficiencia global de los equipos) en un 14.4%, lo que demuestra cómo estas tecnologías no solo reducen tiempos muertos, sino que también maximizan la productividad y la eficiencia operativa.

La literatura resalta la importancia de que los sistemas autónomos operen de manera robusta en condiciones adversas, como temperaturas extremas y climas impredecibles, condiciones comunes en las minas de cielo abierto. Estas tecnologías deben ser capaces de

operar de manera eficiente bajo estos desafíos, lo cual es crucial para su implementación exitosa en este tipo de entornos.

Además, en cuanto a la coordinación entre vehículos autónomos y equipos auxiliares, se destacó el uso de plataformas y gemelos digitales como herramientas clave para garantizar una integración eficiente. Ge (2022) resalta que estas tecnologías no solo son importantes para la integración individual de los camiones, sino también para crear un ecosistema minero más eficiente al conectar estas tecnologías con sistemas operativos más grandes.

### **Seguridad y Mitigación de Riesgos**

La automatización de camiones ha tenido un impacto significativo en la seguridad minera. Según Moniri-Morad (2023), la automatización ha reducido considerablemente los riesgos laborales al eliminar la interacción humana en áreas peligrosas, lo que previene errores operativos y fatiga humana en entornos de trabajo peligrosos.

En cuanto a los avances en la prevención de colisiones, se ha logrado mejorar la detección y prevención mediante sistemas anti-colisión basados en visión por computadora y sensores avanzados como cámaras y LiDAR. Sin embargo, Imam (2023) menciona que estos sistemas funcionan mejor en entornos controlados que en condiciones climáticas extremas, lo que subraya la necesidad de mejorar la adaptabilidad de estos sistemas en condiciones más desafiantes.

La capacitación de operadores también ha mejorado gracias al uso de simuladores y programas de entrenamiento gamificados. Según Vos (2023), estos enfoques han aumentado la preparación de los trabajadores para responder ante situaciones de riesgo, reduciendo los incidentes durante las operaciones reales.

## **Sostenibilidad Operativa y Ambiental**

La automatización de camiones autónomos ha tenido un impacto ambiental positivo. La implementación de camiones eléctricos y tecnologías como el Trolley Assist ha demostrado reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la dependencia de combustibles fósiles. Según Bao et al. (2023), la combinación de tecnologías de automatización con electrificación ha mostrado un potencial significativo para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de combustible fósil. Además, la optimización de rutas, facilitada por tecnologías autónomas, ha mejorado la eficiencia energética, contribuyendo a los objetivos globales de sostenibilidad, como lo señala Aguirre-Jofré et al. (2021).

## **Desafíos Futuros**

Aunque se han logrado avances significativos, la adopción de tecnologías autónomas sigue enfrentando varios desafíos importantes. Según Benlaajili y Stenin (2023), una barrera clave es la necesidad de diseñar rutas específicas para los vehículos autónomos, lo que requiere una inversión significativa en infraestructura. Además, la falta de estándares globales dificulta la interoperabilidad tecnológica, lo que subraya la necesidad de crear regulaciones internacionales que faciliten la implementación de estas tecnologías.

El alto costo inicial de la tecnología, junto con la infraestructura limitada, son barreras clave, especialmente para operaciones de menor escala o en economías emergentes. Además, la adaptación a terrenos dinámicos y condiciones climáticas adversas sigue siendo un desafío crítico, como lo mencionan Stenin (2021) y Codoceo-Contreras et al. (2024).

#### 4.2.3. Análisis de Palabras Clave (Keywords)

Como parte del análisis adicional realizado con inteligencia artificial, también se llevó a cabo un análisis de palabras clave basado en la frecuencia de aparición de términos relevantes en los textos, agrupados por dimensión. Esta estrategia permitió identificar con mayor claridad las temáticas dominantes en cada área de estudio. Para ilustrar gráficamente los resultados, se generaron diagramas de nube de palabras que representan con mayor tamaño los términos más recurrentes.

Estos diagramas están disponibles en el **Anexo 8.5**.

#### **Tecnologías Autónomas**

Las palabras clave más frecuentes en esta dimensión fueron “Autónomo”, “Automatización”, “Sensores”, “Inteligencia Artificial” y “Sostenibilidad”. El diagrama de nube de palabras refleja que los términos “Autónomo” y “Automatización” son los más destacados, lo que indica el enfoque principal de los estudios en tecnologías autónomas y su relación con la automatización en minería.

Esta información puede servir de referencia para futuras investigaciones, ya que permite identificar áreas con mayor desarrollo temático dentro de la literatura actual, facilitando así la búsqueda de estudios relevantes en torno a estas tecnologías.

#### **Seguridad y Riesgos Mitigados**

En esta dimensión, los términos clave más recurrentes fueron “Riesgo”, “Accidentes”, “Prevención”, “Seguridad” y “Automatización”. El diagrama de nube de palabras subraya la predominancia de la seguridad y la prevención de riesgos, aunque

también resalta la automatización como un elemento clave para mitigar riesgos y mejorar la seguridad operativa.

Este tipo de análisis permite identificar que la literatura relacionada con esta dimensión aborda con mayor profundidad aspectos vinculados a la gestión del riesgo operativo, estrategias de prevención de accidentes y el rol de la automatización como herramienta para reducir la exposición a condiciones peligrosas, lo que puede servir de guía para futuras investigaciones en torno a la seguridad minera y tecnologías asociadas.

### **Sostenibilidad Operativa y Ambiental**

Las palabras clave más relevantes en los estudios asignados a esta dimensión fueron “Sostenibilidad”, “Seguridad”, “Emisiones”, “Eficiencia” y “Ambiental”. El diagrama de nube de palabras refleja que la sostenibilidad y la eficiencia energética son los conceptos más destacados, subrayando la importancia de estos aspectos en la literatura sobre la automatización y su impacto ambiental. Estos resultados permiten delimitar áreas temáticas clave como la reducción de emisiones, el diseño de operaciones más eficientes y la integración de criterios ambientales, proporcionando una base útil para futuras investigaciones que busquen explorar el vínculo entre automatización, sostenibilidad y desempeño ambiental en minería

### **Desafíos Futuros**

Para esta dimensión, las palabras clave más mencionadas fueron “Sostenibilidad”, “Social”, “Organizacional”, “Resistencia” y “Gemelos digitales”. El diagrama de nube de palabras resalta estos términos, indicando que los estudios en esta área se centran en los desafíos sociales, organizacionales y técnicos relacionados con la implementación de



tecnologías autónomas, así como en la importancia de los gemelos digitales para la optimización de procesos.

La identificación de estos términos permite a futuros investigadores reconocer que los estudios actuales abordan principalmente barreras organizacionales, aceptación social de la tecnología y oportunidades emergentes como el uso de gemelos digitales, lo cual delimita un campo de exploración relevante para quienes deseen profundizar en la proyección de estas tecnologías en el mediano y largo plazo.

## **5. Evaluación de calidad**

### **5.1. Criterios de evaluación**

Con el objetivo de evaluar el rigor metodológico de la revisión sistemática, se aplicó y adaptó la herramienta AMSTAR, asignando un puntaje binario a cada uno de los 11 criterios establecidos. A continuación, se presenta la evaluación de cada criterio aplicado a este estudio:

#### **1. Búsqueda exhaustiva de literatura**

Se realizó una búsqueda sistemática en Google Scholar, utilizando combinaciones de palabras clave definidas previamente. Si bien se utilizó una única plataforma, su amplia cobertura permitió acceder a estudios relevantes y alineados con los objetivos del estudio.

#### **2. Criterios de inclusión/exclusión**

Los criterios de inclusión y exclusión fueron establecidos de manera clara, permitiendo una selección adecuada de los estudios que cumplen con los requisitos de la investigación y asegurando que los estudios no relevantes fueran descartados de manera justificada.

#### **3. Protocolo definido previamente**

Se estableció un protocolo metodológico antes de iniciar la revisión sistemática, lo que permitió mantener una estructura coherente en las etapas de búsqueda, selección, análisis y síntesis de los estudios.

#### **4. Extracción de datos por duplicado**

No se presentaron duplicados en la extracción de datos, lo cual evita la inclusión de

datos repetidos que podrían distorsionar las conclusiones.

## 5. **Evaluación de calidad de estudios**

Se aplicó AMSTAR para evaluar la calidad metodológica del estudio en general. Sin embargo, esta herramienta no fue aplicada a cada estudio individualmente, lo cual limita la evaluación a un nivel general del estudio completo.

## 6. **Caracterización de los estudios incluidos**

La información clave de los estudios fue extraída con apoyo de herramientas de inteligencia artificial, permitiendo sistematizar datos como año, autor, país, tecnología y dimensión asignada. Esta caracterización se organizó en una tabla estructurada para facilitar su análisis.

## 7. **Sesgo de publicación**

El sesgo de publicación no fue abordado en el estudio, lo cual es un aspecto importante que debería ser considerado en futuras investigaciones para asegurar que no se omitan estudios relevantes debido a sesgos en la selección

## 8. **Conflictos de interés**

Los conflictos de interés no fueron abordados, lo que podría ser considerado una limitación en cuanto a la transparencia del estudio. Este criterio debería ser incluido en futuras revisiones para garantizar la objetividad y la confianza en los resultados presentados.

## 9. **Listas de estudios incluidos/excluidos**

Se incluye una lista detallada de los estudios incluidos y excluidos en los anexos del

informe, lo que permite una completa trazabilidad del proceso de selección de estudios.

#### **10. Métodos estadísticos apropiados**

No se utilizaron métodos estadísticos apropiados en este estudio, dado que la revisión se centró en una síntesis cualitativa de los estudios. Este es un aspecto a considerar si se requiere un análisis más cuantitativo en futuras investigaciones.

#### **11. Discusión de limitaciones**

Las limitaciones del estudio fueron claramente establecidas, lo que proporciona un contexto adecuado para la interpretación de los resultados y resalta los aspectos que podrían haberse mejorado o ampliado en el futuro.

### **5.2. Resultados evaluación de calidad**

De los 11 criterios de AMSTAR, este estudio cumplió con 8, presentando una evaluación favorable en los aspectos clave de la revisión sistemática.

### **5.3. Nivel de calidad asignado**

Según los resultados obtenidos, el estudio se considera de calidad moderada-alta. Se cumplieron 8 de los 11 criterios evaluados mediante la herramienta AMSTAR, incluyendo aspectos clave como la definición del protocolo, la búsqueda exhaustiva y la inclusión de listas de estudios. No obstante, se observaron algunas limitaciones en la evaluación de los métodos estadísticos y en la consideración de elementos como el sesgo de publicación y los conflictos de interés. A pesar de estas observaciones, se concluye que el estudio mantiene un nivel metodológico moderado-alta y una fiabilidad adecuada para los fines de la investigación.

## 6. Recomendaciones generales

### 6.1. Recomendaciones para mejorar la calidad

En base a los resultados obtenidos de la evaluación de calidad realizada con la herramienta AMSTAR, se identificaron varias áreas de mejora que pueden ser abordadas en futuras investigaciones. A continuación, se detallan las recomendaciones específicas para cada uno de los aspectos evaluados que presentaron observaciones o no fueron completamente cumplidos:

#### **Sesgo de publicación**

La falta de consideración del sesgo de publicación fue una de las áreas que no cumplió con los estándares de AMSTAR. Para mejorar la validez y transparencia en futuras revisiones, se recomienda:

- **Aplicar pruebas estadísticas para evaluar el sesgo de publicación:** Herramientas como el Test de Egger pueden ser útiles para identificar y cuantificar el sesgo en las revisiones sistemáticas. Estas pruebas permiten detectar si los estudios pequeños o con resultados negativos han sido omitidos, lo cual podría alterar los resultados finales.
- **Generar una discusión sobre el sesgo de los estudios:** Se debe incluir un análisis detallado sobre la posible influencia del sesgo de publicación en los resultados de la revisión, considerando aspectos como la calidad y la cantidad de los estudios publicados en relación con los no publicados.

#### **Conflictos de interés**

No se abordaron los conflictos de interés en este estudio, lo que podría afectar la

objetividad y la credibilidad de los resultados. Para mejorar la integridad en futuras revisiones, se recomienda:

- **Realizar una revisión exhaustiva en busca de conflictos de interés:**

Es fundamental que los estudios incluidos en la revisión tengan una evaluación clara de los conflictos de interés de los autores. Esto puede incluir la revisión de las declaraciones de los autores o el examen de la financiación de los estudios.

- **Crear una sección en el análisis crítico para discutir posibles conflictos de interés:**

Para garantizar la transparencia, debe incluirse una sección específica en la que se analicen los posibles conflictos de interés que puedan haber afectado los estudios revisados. Esto ayuda a aumentar la confianza en la imparcialidad de los resultados.

### **Evaluación de calidad de los estudios**

La herramienta AMSTAR se utilizó para evaluar la calidad del estudio principal, pero no se aplicó a los estudios individuales incluidos en la revisión. Para aumentar la robustez y precisión de futuras revisiones, se recomienda:

Utilizar herramientas adicionales como GRADE o CASP para evaluar la calidad individual de los estudios:

El uso de herramientas como GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development, and Evaluation) o CASP (Critical Appraisal Skills Programme) permitirá una evaluación más detallada de la calidad metodológica de cada estudio incluido. Estas herramientas proporcionan una valoración más precisa de los estudios basándose en su

validez y relevancia.

- **Clasificar los estudios por niveles de calidad:**

Para dar un panorama más claro de la calidad de la evidencia utilizada, se debe clasificar cada estudio según su nivel de calidad, como alta, moderada o baja. Esto proporcionará una visión más completa de la fiabilidad de los resultados obtenidos.

## **6.2. Recomendaciones para el Uso de Inteligencia Artificial**

El uso de inteligencia artificial en la realización de revisiones sistemáticas presenta oportunidades para optimizar procesos y mejorar la eficiencia en la recopilación y análisis de datos. Sin embargo, para garantizar que los resultados sean de alta calidad y que el uso de la IA sea adecuado, es necesario seguir ciertas recomendaciones. A continuación, se presentan algunas pautas clave para el trabajo con IA en este tipo de investigaciones:

1. **Instrucciones claras y contexto adecuado** Antes de iniciar una tarea compleja, es fundamental asegurar que la IA comprenda con claridad lo que se espera de ella. Esto implica proporcionar instrucciones claras y detalladas, y asegurarse de que no haya dudas sobre los objetivos del proyecto. Además, es recomendable ofrecer el contexto necesario para que la IA pueda abordar la tarea de manera eficiente. Un conjunto bien definido de instrucciones y contexto adecuado mejora significativamente la calidad y precisión de los resultados obtenidos.

2. **Elección del tipo de IA según la tarea** Para cada fase del proyecto, es importante seleccionar el modelo de IA más adecuado según la tarea específica. Por ejemplo, para el análisis de datos, se debe usar IA especializada en procesamiento de datos; para

redacción, IA con capacidades avanzadas en procesamiento de lenguaje natural puede ser más adecuada. La elección del modelo correcto optimiza el rendimiento y la calidad de los resultados, garantizando que la IA pueda cumplir con las expectativas de manera eficiente.

3. **Entrega gradual de textos** Para asegurar un análisis más detallado y organizado, es recomendable dividir los documentos en lotes para que la IA los procese de manera más efectiva. Este enfoque gradual permite que la IA se concentre en fragmentos manejables de información y evita la sobrecarga de datos que podría afectar la calidad del análisis. Además, al procesar los documentos en bloques más pequeños, se mejora la capacidad de la IA para manejar el volumen de información de manera eficiente.

4. **Cuidado con el sesgo hacia textos iniciales** Un desafío al trabajar con IA es que, en ocasiones, puede haber un sesgo hacia los textos entregados al principio del proceso. Esto puede llevar a que los primeros documentos reciban un análisis más exhaustivo en comparación con los textos posteriores. Para evitar este sesgo, es recomendable distribuir los documentos equilibradamente a lo largo del proyecto, asegurando que todos los textos reciban la misma atención y evaluación rigurosa. Esto garantiza una revisión justa y completa de todo el material.

5. **Proporcionalidad en la extracción de información** Es esencial ajustar la extracción de información según la longitud y complejidad de los textos. Para evitar que los textos más largos sean resumidos de manera excesiva o que los textos cortos reciban un análisis desproporcionado, se debe asegurar una consistencia y relevancia en los datos extraídos. Un análisis equitativo de todos los textos es crucial para mantener la calidad y la integridad de la revisión.

6. **Aprovechamiento de ventajas en redacción y análisis** La IA destaca por su rapidez, precisión y eficiencia, especialmente en tareas de redacción y síntesis de datos. Aprovechar estas ventajas puede ser crucial, especialmente en proyectos que manejan grandes volúmenes de información. Usar la IA para sintetizar datos y redactar resúmenes o conclusiones puede acelerar significativamente el proceso de revisión, mejorando la eficiencia sin comprometer la calidad del trabajo.

### 6.3. Recomendaciones Bibliográficas para el Campo de Estudio

#### Automatización y Tecnologías Autónomas

**Artículo:** Leung, R., Hill, A. J., & Melkumyan, A. (2023). *Automation and Artificial Intelligence Technology in Surface Mining: A Brief Introduction to Open-Pit Operations in the Pilbara.*

**Fuente:** *IEEE Robotics & Automation Magazine.*

#### Resumen:

Este artículo explora los avances en automatización e inteligencia artificial en minería a cielo abierto, con un enfoque en la región de Pilbara, Australia. Destaca tecnologías como vehículos autónomos, sensores avanzados y herramientas de análisis de datos. También aborda desafíos técnicos y oportunidades de colaboración interdisciplinaria en el sector, proporcionando una visión integral del impacto de la automatización en la minería moderna.

#### Seguridad y Mitigación de Riesgos

**Artículo:** Onifade, M., Said, K. O., & Shivute, A. P. (2023). *Safe Mining Operations through Technological Advancement.*

**Fuente:** *Process Safety and Environmental Protection*.

**Resumen:**

El artículo analiza cómo los avances tecnológicos, desde la automatización hasta la digitalización, han mejorado significativamente la seguridad en la minería. Aborda casos específicos como el monitoreo en tiempo real de elementos geotécnicos, el uso de sensores inteligentes y sistemas de comunicación mejorados. También destaca cómo estas tecnologías han reducido riesgos como caídas de rocas, vibraciones y accidentes en minas subterráneas y a cielo abierto.

**Sostenibilidad Operativa y Ambiental**

**Artículo:** Long, M., Schafrik, S., Kolapo, P., Agioutantis, Z., & Sottile, J. (2024). *Equipment and Operations Automation in Mining: A Review*.

**Fuente:** *Machines*.

**Resumen:**

Este artículo revisa el impacto de la automatización en la sostenibilidad operativa y ambiental de la minería. Analiza casos exitosos de implementación de sistemas autónomos, destacando beneficios como la reducción de emisiones, el uso eficiente de energía y la optimización de procesos. También identifica barreras como los altos costos iniciales y la necesidad de capacitación especializada<sup>3</sup>.

**Desafíos Futuros**

**Artículo:** Benlaajili, S., Moutaouakkil, F., & Chebak, A. (2021). *Infrastructural*



*Requirements for the Implementation of Autonomous Trucks in Open-Pit Mines.*

**Fuente:** *E3S Web of Conferences.*

**Resumen:**

Este artículo analiza los requisitos de infraestructura necesarios para implementar camiones autónomos en minas a cielo abierto. Examina aspectos críticos como el diseño de rutas de transporte, sistemas de control de acceso y criterios de seguridad. También evalúa diferentes enfoques de implementación (lenta, por fases y rápida) y su impacto en la productividad y la seguridad

## 7. Referencias

- Aguirre-Jofré, H., Eyre, M., Valerio, S., & Vogt, D. (2021). Low-cost internet of things (IoT) for monitoring and optimizing mining small-scale trucks and surface mining shovels. *Automation in Construction*, 131, 103918. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103918>
- Ai, Y., Li, Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2024). iMAPeM: A new paradigm for implementing intelligent mining with humans in the loop. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 54(5), 1050–1061. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2024.3396139>
- Ai, Y., Liu, Y., Gao, Y., Zhao, C., Cheng, X., Han, J., Tian, B., Chen, L., & Wang, F. (2024). PMWorld: A parallel testing platform for autonomous driving in mines. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 1402-1411. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3332739>
- Alaboudi, A. A. (2021). Designing a vehicles for open-pit mining with optimized scheduling based on 5G and IoT. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 21(3), 145-152. <https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2021.21.3.20>
- Ali, D., & Frimpong, S. (2020). Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector. *Artificial Intelligence Review*, 53(6025-6042). <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09841-6>.
- Ali, D., & Ur Rehman, A. (2020). Adoption of autonomous mining system in Pakistan – Policy, skillset, awareness, and preparedness of stakeholders. *Resources Policy*, 68, 101796. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101796>

- Al-Masri, M. (2022). An approach for evaluating the full truck and full bucket loading strategies in open-pit mining using a discrete event simulation and machine learning (Master's thesis, University of Alberta). University of Alberta Digital Repository. <https://doi.org/10.7939/r3-1dcb-rx31>
- Androulakis, V. (2021). Development of an Autonomous Navigation System for the Shuttle Car in Underground Room & Pillar Coal Mines. University of Kentucky. <https://doi.org/10.13023/etd.2021.130>
- Androulakis, V., Schafrik, S., Sottile, J., & Agioutantis, Z. (2021). Data Management System for a Semiautonomous Shuttle Car for Underground Room and Pillar Coal Mines. *Automation*, 2(3), 153-172. <https://doi.org/10.3390/automation2030010>.
- Araujo, C. de H. (2024). Automation and skill evolution: Examining the impact on workforce skillsets in the mining industry (Master's thesis, The University of British Columbia). The University of British Columbia Digital Commons. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0440685>.
- Atianashie, M. A., & Opoku, M. (2021). A vehicles for open-pit mining with smart scheduling system for transportation based on 5G. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, 7(1), 231–238. <https://www.researchgate.net/publication/350878964>
- Badiozamani, M. M., Pourrahimian, Y., Ben-Awuah, E., Moradi Afrapoli, A., & Askari Nasab, H. (2022). Mining Optimization Laboratory (MOL) – Report Ten. University of Alberta, School of Mining and Petroleum Engineering, Department of Civil & Environmental Engineering. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20530.99521>

- Bao, H., Knights, P., Kizil, M., & Nehring, M. (2023). Electrification alternatives for open pit mine haulage. *Mining*. <https://doi.org/10.3390/mining3010001>
- Benlaajili, S., Moutaouakkil, F., & Chebak, A. (2021). Infrastructural requirements for the implementation of autonomous trucks in open-pit mines. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131503009>
- Bnouachir, H., Chergui, M., & Medromi, H. (2023). Smart truck distribution in an open-pit mine. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 15(1), 164-170 <https://www.researchgate.net/publication/375423684>
- Bnouachir, H., Semmar, A., Medromi, H., Chergui, M., Chakir, A., Machkour, N., Zegrari, M., & Deshayes, L. (2020). Intelligent fleet management system for open-pit mine. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(5), 327–332. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110524>
- Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., Atencio, E., Komarizadehasl, S., & Lozano-Galant, J. A. (2023). Low-cost sensors technologies for monitoring sustainability and safety issues in mining activities: Advances, gaps, and future directions in the digitalization for smart mining. *Sensors*, 23(15), 6846. <https://doi.org/10.3390/s23156846>
- Cai, M. (2024). Rockburst risk control and mitigation in deep mining. *Deep Resources Engineering*, 1, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.deepre.2024.100019>
- Cerna, G. E. P., Hernández, J. R. C., Mojica, J. C. H., & Castillo, A. P. (2023). Evaluation of the overall effectiveness (OEE) of autonomous transportation system (AHS) equipment and its impact on mine design: Open-pit mine case study. *Procedia Computer Science*, 224, 468-473. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.09.066>

- Chen, L., Ge, S., Wang, F. Y., & Li, Y. (2024). Smart mining with autonomous driving in Industry 5.0: Architectures, platforms, operating systems, foundation models, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(3), 4383-4393. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3365997>
- Chen, L., Hu, X., Wang, G., Cao, D., Li, L., & Wang, F. Y. (2021). Parallel mining operating systems: From digital twins to mining intelligence. *IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence*, 469-473. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9540195>
- Chen, L., Li, Y., Li, L., Qi, S., Zhou, J., Tang, Y., Yang, J., & Xin, J. (2024). High-precision positioning, perception, and safe navigation for automated heavy-duty mining trucks. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(4), 4644-4655. <https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3375273>
- Chen, L., Xie, Y., He, Y., Ai, Y., Tian, B., Li, L., Ge, S., & Wang, F.-Y. (2024). Autonomous mining through cooperative driving and operations enabled by parallel intelligence. *Communications Engineering*, 3, 75. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00220-5>
- Chen, Z., Yu, G., Zhang, C., Ding, N., Zhou, B., Li, Z., & Ouyang, D. (2023). Driving risk assessment and prevention strategies for autonomous vehicles in open-pits. *Journal of China Coal Society*, 48(4), 1782–1797. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2022.0209>
- Chirgwin, P. (2021). Skills development and training of future workers in mining automation control rooms. *Computers in Human Behavior Reports*, 4, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2021.100115>

- Clarkson, M. A. (2022). Fully automated drill and blast for mining. Doctor of Professional Engineering Thesis, University of Southern Queensland.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21352.96008>
- Codoceo-Contreras L, Rybak N, Hassall M. Exploring the impacts of automation in the mining industry: A systematic review using natural language processing. *Mining Technology*. 2024;0(0). Doi:10.1177/25726668241270486
- Doyle, K. (2022). The safety and sustainability of mining at diverse scales: Placing health and safety at the core of responsibility [Doctoral dissertation, University of Exeter]. University of Exeter Repository. Disponible en <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/134716>
- Duarte, J.; Rodrigues, F.; Castelo Branco, J. Sensing Technology Applications in the Mining Industry—A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 2334.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph19042334>
- Ertugrul, N., Sbarbaro, D., Pourmousavi Kani, A., & Morán, L. (2020). Status of mine electrification and future potentials. 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), 20-31.  
<https://doi.org/10.1109/SGES51519.2020.00034>
- Espinoza, J. P., Mascaró, M., Morales, N., & Ruiz-del-Solar, J. (2022). Improving productivity in block/panel caving through dynamic confinement of semi-autonomous Load-Haul-Dump machines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*.  
<https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2077046>.

- Fiscor, S. (2023, diciembre). Autonomous operations reshape open-pit mining. Engineering & Mining Journal. <http://www.e-mj.com>
- Fredin, A., & Pogén, M. (2024). Designing simulation model for open-pit mining charging infrastructure (Master's thesis, Blekinge Institute of Technology). Blekinge Institute of Technology Repository. <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1863408>
- Fu, L., Zhang, Q., Lin, L., & Reyes, R. (2023). Unmanned driving technology in coal mine based on semantic information method. IEEE Access, 11, 28330-28342. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3257574>
- Gaokgorwe, T. (2023). The application of robotics in deep level mining in South Africa and its influence on health and safety [Tesis de maestría, Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo]. WireDSpace. <https://hdl.handle.net/10539/38954>
- Ge, S., Wang, F.-Y., Yang, J., Ding, Z., Wang, X., Li, Y., Teng, S., Liu, Z., Ai, Y., & Chen, L. (2022). Making standards for smart mining operations: Intelligent vehicles for autonomous mining transportation. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 7(3), 413-416. <https://doi.org/10.1109/TIV.2022.3197820>
- Ghahramanieisalou, M., & Sattarvand, J. (2024). Digital twins and the mining industry. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1005162>
- Ghosh, R. (2023). Applications, promises and challenges of artificial intelligence in mining industry: A review. TechRxiv. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.21493761.v1>
- Haight, J., & Burgess-Limerick, R. (2023). Automation experience with a global perspective – An assessment of the automation impact on worker safety and health. Pittsburgh,

- PA, United States: University of Pittsburgh and University of Queensland.  
<https://stacks.cdc.gov/view/cdc/148735>
- Han, L., & Liu, P. (2024). Design of unmanned road widths in open-pit mines based on offset reaction times. *Applied Sciences*, 14(7), 2995. <https://doi.org/10.3390/app14072995>
- Hasiri, A., & Kermanshah, A. (2024). Exploring the role of autonomous trucks in addressing challenges within the trucking industry: A comprehensive review. *Systems*, 12(9), 320. <https://doi.org/10.3390/systems12090320>
- Hazrathosseini, A., & Moradi Afrapoli, A. (2024). Maximizing mining operations: Unlocking the crucial role of intelligent fleet management systems in surface mining's value chain. *Mining*, 4(1), 7–20. <https://doi.org/10.3390/mining4010002>
- Hrica, J. K., Bellanca, J. L., Benbourenane, I., Carr, J. L., Homer, J., & Stabryla, K. M. (2022). A Rapid Review of Collision Avoidance and Warning Technologies for Mining Haul Trucks. *Minerals & Metallurgical Processing*, 39(4), 1357-1389. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00633-w>
- Imam, M., Bařna, K., Tabii, Y., Ressami, E. M., Adlaoui, Y., Benzakour, I., & Abdelwahed, E. H. (2023). The future of mine safety: A comprehensive review of anti-collision systems based on computer vision in underground mines. *Sensors*, 23(9), 4294. <https://doi.org/10.3390/s23094294>
- Iravani, A., Halim, A., Johansson, Ö., & Lööw, J. (2023). Modern Mining Associated Challenges in a Holistic Picture – MACHP. Technical Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17196.44167>
- Jang, H. D., & Topal, E. (2020). Transformation of the Australian mining industry and future prospects. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A*:

Mining Technology, 129(3), 150-160.

<https://doi.org/10.1080/25726668.2020.1786298>

Jwaid, M. F., & Juboori, H. K. S. (2021). Vehicles for open-pit mining with smart scheduling system for transportation based on 5G. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(5), 827-835. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i5.1490>

Knights, P., & Yeates, G. (2021). Progress toward zero entry mining: Automation enabling safer, more efficient mining. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(1), 32-38. <https://doi.org/10.1109/MIE.2021.3070684>

Leonida, C. (2022, December). Introducing autonomy 2.0: E&MJ looks at the trends, technologies and projects which are redefining the future of autonomous open-pit mining. *Engineering & Mining Journal*, 26-27. <http://www.e-mj.com>

Leung, R., Hill, A. J., & Melkumyan, A. (2023). Automation and AI Technology in Surface Mining. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MRA.2023.3328457>

Leung, R., Hill, A. J., & Melkumyan, A. (2023). Automation and artificial intelligence technology in surface mining: A brief introduction to open-pit operations in the Pilbara. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MRA.2023.3328457>

Li, H., Chen, P., Yu, G., Zhou, B., Han, Z., & Liao, Y. (2024). Collaborative trajectory planning for autonomous mining trucks: A grouping and prioritized optimization based approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 73(5), 6283-6297. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.10365395>

- Li, Y., Li, Z., Teng, S., Zhang, Y., Zhou, Y., Zhu, Y., Cao, D., Tian, B., Ai, Y., Xuanyuan, Z., & Chen, L. (2022). AutoMine: An Unmanned Mine Dataset. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 21308-21317). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.02062>
- Liu, K., Mei, B., Li, Q., Sun, S., & Zhang, Q. (2024). Collaborative production planning based on an intelligent unmanned mining system for open-pit mines in the Industry 4.0 era. *Machines*, 12(419). <https://doi.org/10.3390/machines12060419>
- Liu, S. Q., Liu, L., Kozan, E., Corry, P., Masoud, M., & Li, X. (2023). Machine learning for open-pit mining: A systematic review. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4540535>
- Liu, X., Zhang, X., Wang, L., Qu, F., Shao, A., Zhao, L., Wang, H., Yue, X., Li, Y., Yan, W., & He, J. (2024). Research progress and prospects of intelligent technology in underground mining of hard rock mines. *Green and Smart Mining Engineering*, 1, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.03.007>
- Long, M., Schafrik, S., Kolapo, P., Agioutantis, Z., & Sottile, J. (2024). Equipment and operations automation in mining: A review. *Machines*, 12, 713. <https://doi.org/10.3390/machines12100713>
- Longton, A., Mensa, G., and Rodriguez, A., “Mobility in mining: Issues for road safety improvement,” SAE Technical Paper 2020-36-0125, 2021, <https://doi.org/10.4271/2020-36-0125>.
- Mascaró, M., Parra-Tsunekawa, I., Tampier, C., & Ruiz-del-Solar, J. (2021). Topological navigation and localization in tunnels—Application to autonomous load-haul-dump

- vehicles operating in underground mines. *Applied Sciences*, 11(14), 6547.  
<https://doi.org/10.3390/app11146547>
- Mendes, J., Boese, C., & Silva, J. (2019). In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: A literature review and research agenda. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33(1), 35-51.  
<https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1565054>
- Miller, B. H. (2020). Functional safety fault tree analysis of a model autonomous haulage system (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines). Colorado School of Mines Repository. <https://repository.mines.edu/handle/11124/175346>
- Moezzi Nasab, R., & Salmani, A. (2024). Sustainable development of mining by utilizing innovative global methods to reduce mining hazards. *Journal of Environment and Sustainable Mining*, 2(1), 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.052>
- Moniri-Morad, A., Shishvan, M. S., Aguilar, M., Goli, M., & Sattarvand, J. (2023). Powered haulage safety, challenges, analysis, and solutions in the mining industry; a comprehensive review. *Results in Engineering*, 21, 101684.  
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101684>
- Moreau, K. S. (2020). The effects of automation on the environmental impact of deep underground metal ore mining operations (Doctoral dissertation, Laurentian University). <https://doi.org/10.1590/123456789/1234>
- Moreau, K., Laamanen, C., Bose, R., Shang, H., & Scott, J. A. (2021). Environmental impact improvements due to introducing automation into underground copper mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(5), 1159-1167.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.11.009>

- Nguyen, H. A. D., & Ha, Q. P. (2023). Robotic Autonomous Systems for Earthmoving Equipment Operating in Volatile Conditions and Teaming Capacity: A Survey. *Robotica*, 41, 486–510. <https://doi.org/10.1017/S0263574722000339>.
- Nong, S. (2021). Use of artificial intelligence, machine learning, and autonomous technologies in the mining industry, South Africa (Tesis de maestría, University of the Witwatersrand). University of the Witwatersrand Digital Commons. Disponible en <https://wiredspace.wits.ac.za/items/66fea0af-97a2-4068-a6db-1fc8241214c9/full>
- Noriega, R. (2023). Data-driven and artificial intelligence approach to dynamic truck fleet dispatching and shovel allocation planning in open-pit mines (Tesis doctoral, University of Alberta). <https://doi.org/10.7939/r3-03sh-0w11>
- Noriega, R., & Pourrahimian, Y. (2022). A systematic review of artificial intelligence and data-driven approaches in strategic open-pit mine planning. *Resources Policy*, 77, 102727. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420722001751>
- Onifade, M., Adebisi, J. A., Shivute, A. P., & Genc, B. (2023). Challenges and applications of digital technology in the mineral industry. *Resources Policy*, 85, 103978. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103978>
- Onifade, M., Said, K. O., & Shivute, A. P. (2023). Safe mining operations through technological advancement. *Process Safety and Environmental Protection*, 175, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.05.052>
- Osses Aguayo, I. A., Nehring, M., & Ullah, G. M. W. (2021). Optimising productivity and safety of the open pit loading and haulage system with a surge loader. *Mining*, 1(2),

167-179.

<https://doi.org/10.3390/mining1020011>

Owens, R. B. (2021). Adapting open pit mine design fundamentals to leverage the advantages of autonomous haulage systems (Master's thesis, Montana Technological University). Montana Technological University Digital Commons. Disponible en [https://digitalcommons.mtech.edu/grad\\_rschr/277](https://digitalcommons.mtech.edu/grad_rschr/277)

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *PLOS Medicine*, 18(3), e1003583. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583>

Popkova, E. G., & Sergi, B. S. (2021). *Industry 4.0: Exploring the Consequences of Climate Change*. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75405-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75405-1_21)

Rudakov, M., Gridina, E., & Kretschmann, J. (2021). Risk-based thinking as a basis for efficient occupational safety management in the mining industry. *Sustainability*, 13(2), 470. <https://doi.org/10.3390/su13020470>

Sánchez, F., & Hartlieb, P. (2020). Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(1385–1399).

<https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>.

- Shea, B. J., Reeves, B. C., Wells, G., Thuku, M., Hamel, C., Moran, J., ... & Henry, D. A. (2017). AMSTAR 2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomized or non-randomized studies of healthcare interventions, or both. *BMJ*, 358, j4008. <https://doi.org/10.1136/bmj.j4008>
- Singh, G., Singh, S. K., Chaurasia, R. C., & Jain, A. K. (2024). THE PRESENT AND FUTURE PROSPECT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE MINING INDUSTRY. *Machine Learning*, 53(4).
- Soofastaei, A. (Ed.). (2022). *Advanced Analytics in Mining Engineering: Leverage Advanced Analytics in Mining Industry to Make Better Business Decisions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91589-6>
- Stenin, D. (2021). On possible changes in the calculation of parameters of transport technology of open pit mining with the use of autonomous heavy platforms. *E3S Web of Conferences*, 315, 03015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131503015>
- Sushynskyi, O. (2023). Using a microservices approach in large-scale data web scraping for websites with dynamic content. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 327(5(2)), 243–248. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-327-5-243-248>
- Temkin, I., Myaskov, A., Deryabin, S., Konov, I., & Ivannikov, A. (2021). Design of a digital 3D model of transport–technological environment of open-pit mines based on the common use of telemetric and geospatial information. *Sensors*, 21(18), 6277. <https://doi.org/10.3390/s21186277>

- Teng, S., Li, L., Ai, Y., Chen, L., Hu, X., & Li, Y. (2024). FusionPlanner: A multi-task motion planner for mining trucks via multi-sensor fusion. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208, 111051.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.111051>
- Teng, S., Li, X., Li, Y., Xuanyuan, Z., & Chen, L. (2024). Scenario engineering for autonomous transportation: A new stage in open-pit mines. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(3), 4394-4407.  
<https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3373495>
- Tian, B., Wang, J., Xie, Y., Li, Y., Zhu, Y., & Chen, L. (2024). High-definition mapping for autonomous driving in surface mines. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.  
<https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3422325>
- Tian, B., Yang, J., Zhang, C., Hao, X., Meng, S., Wang, S., ... & Ge, S. (2024). Autonomous driving in underground mines via parallel driving operation systems: Challenges, frameworks, and case studies. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.  
<https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3450609>
- Topal, E. (Ed.). (2020). *Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2019)*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-33954-8>
- Velikanov, V. S., Dyorina, N. V., Korotkova, A. N., & Dyorina, K. S. (2021). The challenges of Industry 4.0 and the need for new answers in the mining industry. *Известия Уральского государственного горного университета*, (62), 154–166.  
<https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-154-166>

- Vos, L. G. (2023). Preventing haul truck-related fatalities in open pit mining using gamified training simulation (Master's thesis). European Mining, Minerals and Environmental Program, TU Delft, Aalto University, RWTH Aachen. Retrieved from <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202402042329>
- Wang, Q., Gu, Q., Li, X., & Xiong, N. (2024). Comprehensive overview: Fleet management drives green and climate-smart open pit mine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113942. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113942>
- Wang, W., Li, Y., & Wu, J. (2024). Real-time monitoring of trucks used in open pit based on aerial video of UAV. *Proceedings of the 2024 3<sup>rd</sup> International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC)*, 130-138. <https://doi.org/10.1109/RAIIC61787.2024.10671199>
- Wang, X., Li, H., Hu, M., Dou, Q., Ouyang, W., Ma, G., Li, Y., & Qin, H. (2023). HD map construction and update system for autonomous driving in open-pit mines. *IEEE Systems Journal*, 17(4), 6202-6213. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2023.3317288>
- Xu, X., Wang, Z., Huang, P., Tian, S., & Bi, L. (2023). Open-Pit Map: An HD Map Data Model for Open-Pit Mines. *Applied Sciences*, 13(12681). <https://doi.org/10.3390/app132312681>
- Y. Zhang, Y. Wang, M. Wu, Z. Li and R. Li, "Two-Stage Dichotomy Hybrid A\* for Path Planning of Unmanned Mining Trucks in Large-Scale Open-Pit Mine," 2024 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Boston, MA, USA, 2024, pp. 296-301, doi: 10.1109/AIM55361.2024.10637142.

- Yaghini, A., Hall, R., & Apel, D. (2022). Autonomous and operator-assisted electric rope shovel performance study. *Mining*, 2(4), 699–711.  
<https://doi.org/10.3390/mining2040038>
- Yang, J., Gui, T., Tong, Y., Zhang, Y., Huang, Q., & Zhao, G. (2024). Autonomous mining transportation systems: Integrating 4D mmWave radar for enhanced detection of obstructed static objects. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*.  
<https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3463968>
- Yang, J., Gui, T., Zhang, Y., Ge, S., Huang, Q., & Zhao, G. (2024). Enhancement technology for perception in smart mining vehicles: 4D millimeter-wave radar and multi-sensor fusion. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(6), 5009-5013.  
<https://doi.org/10.1109/TIV.2024.3427718>
- Zhao, X., Li, B., Li, Z., & Yang, J. (2023). Conflict resolution of connected trucks at intersection in open-pit mine. *U.P.B. Scientific Bulletin, Series D*, 85(2), 135-146.  
<https://doi.org/10.12345/upb.sci.bull.d.2023.135146>
- Zhironkin, S., & Ezdina, N. (2023). Review of Transition from Mining 4.0 to Mining 5.0: Innovative Technologies. *Applied Sciences*, 13(4917).  
<https://doi.org/10.3390/app13084917>

## 8. Anexos

### 8.1. Textos descartados bajo metodología PRISMA

#### 8.1.1. Estudios descartados luego de revisión de título y abstract

| Título                                                                                                                                                              | Año  | Autor(es)                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------|
| Applications, Promises and Challenges of Artificial Intelligence in Mining Industry                                                                                 | 2023 | Ritwick Ghosh                                   |
| Autonomous and operator-assisted electric rope shovel performance study                                                                                             | 2022 | Yaghini, A.                                     |
| Data-Driven and Artificial Intelligence Approach to Dynamic Truck Fleet Dispatching and Shovel Allocation Planning in Open-Pit Mines                                | 2023 | Noriega, R.                                     |
| Driving risk assessment and prevention strategies for autonomous vehicle in open-pits                                                                               | 2023 | Chen, Z.; Yu, G.; Zhang, C.; Ding, N.; Zhou, B. |
| Low-cost sensors technologies for monitoring sustainability and safety issues in mining activities: Advances, gaps, and future directions in the digitalization for | 2023 | Cacciuttolo, C.                                 |
| Machine Learning for Open-Pit Mining: A Systematic Review                                                                                                           | 2023 | Shi Qiang Liu, Lizhu Liu, et al.                |
| Mining Optimization Laboratory                                                                                                                                      | 2022 | Mohammad Mahdi Badiozamani, Yashar              |
| Preventing haul truck-related fatalities in open pit mining using gamified training                                                                                 | 2023 | Vos, L. G.                                      |
| Real-time monitoring of trucks used in open pit based on aerial video of UAV                                                                                        | 2024 | Wang, W.                                        |
| Risk-Based Thinking as a Basis for Efficient Occupational Safety Management in the Mining Industry                                                                  | 2021 | Rudakov, M.; Gridina, E.; Kretschmann, J.       |
| Rockburst risk control and mitigation in deep mining                                                                                                                | 2024 | Ming Cai                                        |
| The effects of automation on the environmental impact of deep underground metal ore mining operations                                                               | 2020 | Moreau, K.                                      |
| The future of mine safety: A comprehensive review of anti-collision systems based on computer vision in underground mines                                           | 2023 | Imam, M.                                        |
| THE PRESENT AND FUTURE PROSPECT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE MINING INDUSTRY                                                                                   | 2024 | Gopal Singh, Ram Chandra Chaurasia              |
| Topological Navigation and Localization in Tunnels—Application to Autonomous Load-Haul-Dump Vehicles                                                                | 2021 | Mauricio Mascaró, Isao Parra-Tsunekawa, et al.  |
| Using a Microservices Approach in Large-Scale Data Web Scraping for Websites with Dynamic Content                                                                   | 2023 | Sushynskyi, O.                                  |

### 8.1.2. Estudios descartados luego de revisión de resumen

| Título                                                                                                                          | Año  | Autor(es)                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------|
| Fully automated drill and blast for mining                                                                                      | 2022 | Clarkson, M. A.                                                 |
| Modern Mining Associated Challenges in a Holistic Picture –MACHP                                                                | 2023 | Iravani, A., Halim, A., Johansson, Ö., & Lööw, J.               |
| Review of Transition from Mining 4.0 to Mining 5.0: Innovative Technologies                                                     | 2023 | Zhironkin, S., & Ezdina, N.                                     |
| Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector | 2020 | Ali, D., & Frimpong, S.                                         |
| Data Management System for a Semiautonomous Shuttle Car for Underground Room and Pillar Coal Mines                              | 2021 | Androulakis, V., Schafrik, S., Sottile, J., & Agioutantis, Z.   |
| Improving productivity in block/panel caving through dynamic confinement of semi-autonomous Load-Haul-Dump machines             | 2022 | Espinoza, J. P., Mascaró, M., Morales, N., & Ruiz-del-Solar, J. |
| Industry 4.0: Exploring the Consequences of Climate Change                                                                      | 2021 | Popkova, E. G., & Sergi, B. S.                                  |
| In-pit crushing and conveying technology in open-pit mining operations: A literature review and research agenda                 | 2019 | Mendes, J., Boese, C., & Silva, J.                              |
| Introducing autonomy 2.0: Trends, technologies, and projects redefining the future of autonomous open-pit mining                | 2022 | Leonida, C.                                                     |
| Research progress and prospects of intelligent technology in underground mining of hard rock mines                              | 2024 | Liu, X., Zhang, X., Wang, L., et al.                            |
| Development of an Autonomous Navigation System for the Shuttle Car in Underground Room & Pillar Coal Mines                      | 2021 | Androulakis, V.                                                 |
| Exploring the role of autonomous trucks in addressing challenges within the trucking industry: A comprehensive review           | 2024 | Hasiri, A., & Kermanshah, A.                                    |
| AutoMine: An Unmanned Mine Dataset                                                                                              | 2022 | Li, Y., Li, Z., Teng, S., et al.                                |
| Improving productivity in block/panel caving through dynamic confinement of semi-autonomous Load-Haul-Dump machines             | 2022 | Espinoza, J. P., Mascaró, M., Morales, N., & Ruiz-del-Solar, J. |

## 8.2. Distribución de artículos por año

### Automatización y Tecnologías Autónomas



*\*Elaboración propia*

### Seguridad y Mitigación de Riesgos



*\*Elaboración propia*

## Sostenibilidad Operativa y ambiental



*\*Elaboración propia*

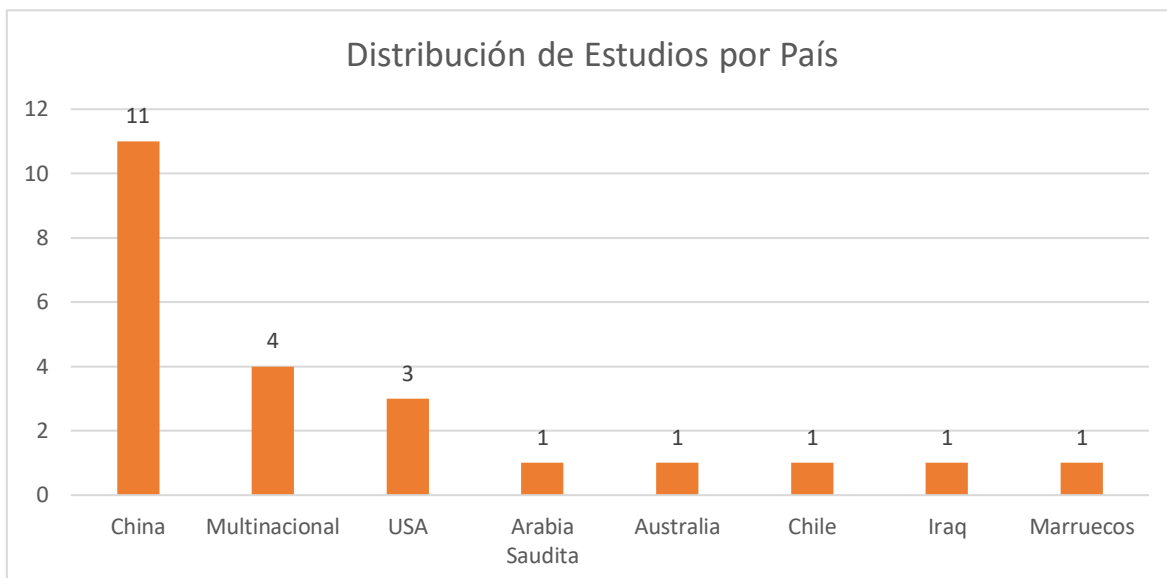
## Desafíos Futuros



*\*Elaboración Propia*

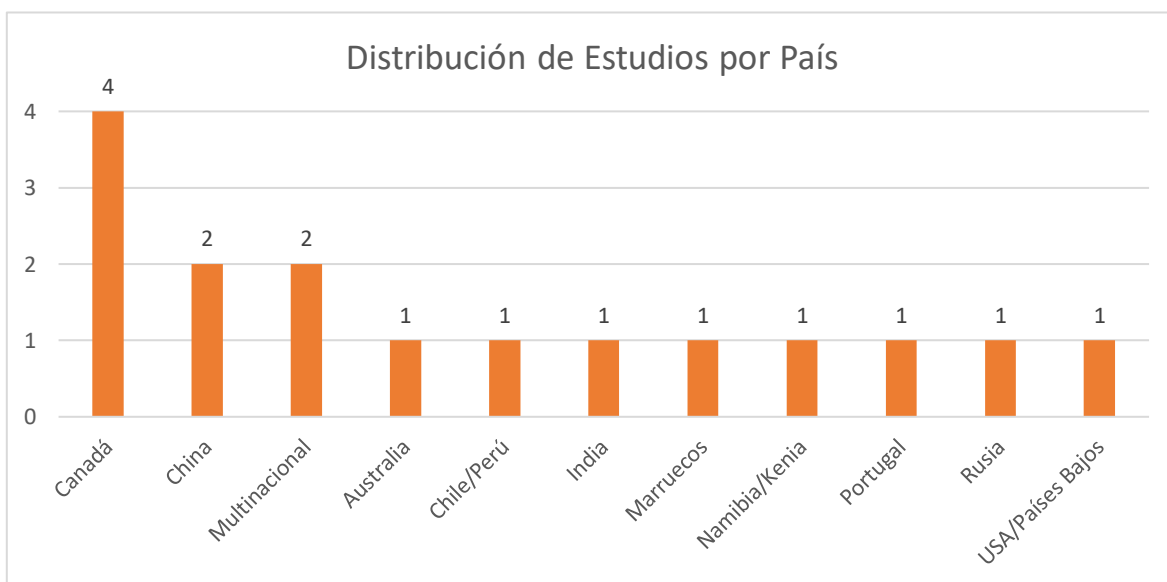
### 8.3. Distribución por país

#### Automatización y Tecnologías Autónomas



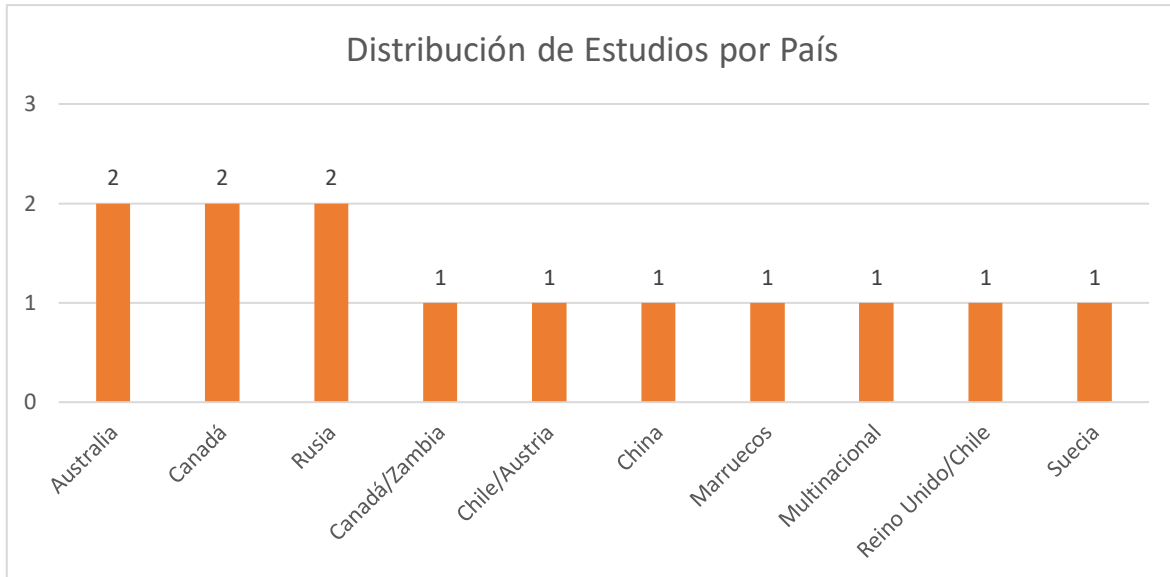
*\*Elaboración propia*

#### Seguridad y Mitigación de Riesgos



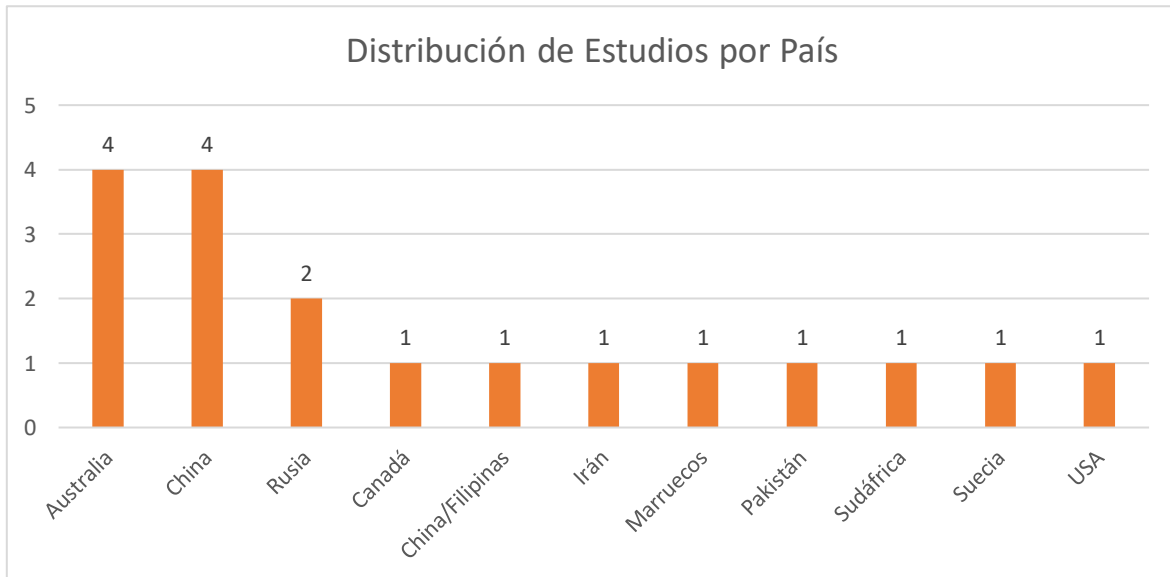
*\*Elaboración propia*

## Sostenibilidad Operativa y ambiental



*\*Elaboración propia*

## Desafíos Futuros



*\*Elaboración propia*

## 8.4. Tabla de información extraída Tecnologías de Automatización

| Nombre del artículo                                                                | Año  | Autor                      | País           | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal                 | Keywords                                                                                                                        | Fuente                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Adapting Mine Design for Autonomous Haulage                                        | 2021 | Race Owens                 | USA            | 3                                 | 2                             | 2                                    | 2                | Diseño de minas                      | minería, diseño, autonomía, optimización, rutas, eficiencia, economía, operaciones, transporte, adaptación                      | Montana Technological University                                      |
| Automation and Artificial Intelligence Technology in Surface Mining                | 2023 | Raymond Leung              | Australia      | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Inteligencia Artificial              | minería, inteligencia artificial, sensores, transporte, automatización, planificación, innovación, eficiencia, sostenibilidad   | IEEE Robotics & Automation Magazine                                   |
| AutoMine: An Unmanned Mine Dataset                                                 | 2023 | Yuchen Li                  | Multinacional  | 3                                 | 2                             | 2                                    | 2                | Dataset de minería autónoma          | dataset, minería, autonomía, percepción, sensores, anotaciones, vehículos, clima, simulación, entorno                           | Unspecified (Autonomous Driving Dataset)                              |
| Autonomous Mining Transportation Systems                                           | 2024 | Janjian Yang               | China          | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Radar mmWave 4D                      | minería, radar, obstáculos, sensores, autonomía, percepción, seguridad, detección, transporte, dumping                          | IEEE Transactions on Intelligent Vehicles                             |
| Autonomous Operations Reshape Open-pit Mining                                      | 2023 | Steve Fisor                | Multinacional  | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Sistemas de transporte autónomos     | minería, autonomía, operación, eficiencia, reducción de costos, seguridad, sostenibilidad, sistemas, transporte, innovación     | E&MJ(Engineering & Mining Journal)                                    |
| Collaborative Trajectory Planning                                                  | 2024 | Han Li                     | China          | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Planeación colaborativa              | trayectorias, minería, colaboración, camiones, algoritmos, planificación, conflictos, seguridad, optimización, transporte       | IEEE Transactions on Vehicular Technology                             |
| Data Management System for a Semiautonomous Shuttle Car                            | 2021 | Vasilis Androulakis        | USA            | 3                                 | 3                             | 2                                    | 2                | Sistemas de gestión de datos         | autonomía, sensores, datos, minería, SQL, seguridad, productividad, navegación, gestión, integración                            | Automation                                                            |
| Design of Unmanned Road Widths in Open-Pit Mines                                   | 2024 | Liu Han                    | China          | 3                                 | 3                             | 2                                    | 2                | Optimización de carreteras           | caminos, minería, vehículos autónomos, optimización, seguridad, diseño vial, rendimiento, ancho de carril, economía, percepción | Applied Sciences                                                      |
| Designing Vehicles for Open-Pit Mining with 5G and IoT                             | 2021 | Abdullah A. Alaboudi       | Arabia Saudita | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | 5G e IoT                             | IoT, minería, transporte, sensores, conectividad, inteligencia artificial, planificación, programación, eficiencia, datos       | IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security |
| Evaluation of the Overall Effectiveness (OEE) of Autonomous Transportation Systems | 2023 | Gabriel Eugenio País Cerna | Chile          | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Sistema de Transporte Autónomo (AHS) | minería, autonomía, simulación, eficiencia, seguridad, productividad, diseño, evaluación, riesgos, operación                    | Procedia Computer Science                                             |



| Nombre del artículo                                                                | Año  | Autor              | País          | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal                    | Keywords                                                                                                                 | Fuente                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Functional Safety Fault Tree Analysis of Autonomous Haulage                        | 2020 | Benjamin H. Miller | USA           | 3                                 | 3                             | 2                                    | 2                | Análisis de fallos                      | minería, autonomía, seguridad, análisis de riesgos, fallas, transporte, modelos, integridad, diseño, mitigación          | Colorado School of Mines (Thesis)                                                                      |
| FusionPlanner: Multi-task motion planner                                           | 2024 | Syu Teng           | Multinacional | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Fusión multisensor                      | minería, planificación, sensores, transporte, simulación, robustez, validación, tareas múltiples, navegación, eficiencia | Mechanical Systems and Signal Processing                                                               |
| HD Map Construction and Update System                                              | 2023 | Xiaowei Wang       | China         | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Mapas HD                                | mapas, minería, autonomía, percepción, planeación, ruta, construcción, actualización, infraestructura, transporte        | IEEE Systems Journal                                                                                   |
| High-Precision Positioning for Mining Trucks                                       | 2024 | Long Chen          | China         | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | GNSSe INS                               | posicionamiento, minería, sensores, navegación, transporte, seguridad, algoritmos, precisión, eficiencia, entorno        | IEEE Transactions on Intelligent Vehicles                                                              |
| Making Standards for Smart Mining Operations                                       | 2022 | Shirong Ge         | China         | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Sistemas de Minería Inteligente         | minería, estándares, automatización, infraestructura, transporte, 5G, sensores, planificación, seguridad, innovación     | IEEE Transactions on Intelligent Vehicles                                                              |
| On the impact of Industrial Internet of Things (IIoT) - mining sector perspectives | 2024 | Tawanda Zvarivadza | Multinacional | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Internet Industrial de las Cosas (IIoT) | IIoT, minería, sensores, conectividad, seguridad, digitalización, sostenibilidad, redes, productividad, control          | International Journal of Mining, Reclamation and Environment                                           |
| Open-Pit Map: HD Map Data Model                                                    | 2023 | Xingliang Xu       | China         | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Mapas HD                                | mapas, minería, planificación, transporte, HD, datos, seguridad, autonomía, operación, actualización                     | Applied Sciences                                                                                       |
| PMWorld: A Parallel Testing Platform                                               | 2024 | Yunfeng Ai         | China         | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Digital Twin                            | simulación, prueba, digital twin, autonomía, minería, sensores, validación, software, optimización, ciberespacio         | IEEE Transactions on Intelligent Vehicles                                                              |
| Real-time monitoring of trucks used in open pit mines                              | 2024 | Weizheng Wang      | China         | 2                                 | 3                             | 2                                    | 1                | Detección basada en UAV                 | minería, seguridad, UAV, detección, monitoreo, visión, inteligencia artificial, real-time, transporte, accidentes        | 2024 3rd International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control (RAIIC) |
| Scenario Engineering for Autonomous Transportation                                 | 2024 | Syu Teng           | China         | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Ingeniería de escenarios                | minería, autonomía, transporte, validación, robustez, confianza, simulación, inteligencia, eficiencia, diseño            | IEEE Transactions on Intelligent Vehicles                                                              |
| SMART TRUCK DISTRIBUTION IN AN OPEN-PIT MINE                                       | 2023 | Hajar Bnouachir    | Marruecos     | 3                                 | 2                             | 2                                    | 3                | Distribución inteligente                | camiones, minería, transporte, planificación, eficiencia, logística, optimización, costos, gestión, minería abierta      | IJTPE (International Journal of Technical and Physical Environment)                                    |
| Two-Stage Dichotomy Hybrid A* for Path Planning                                    | 2024 | Yichen Zhang       | China         | 3                                 | 2                             | 2                                    | 3                | Planeación de trayectorias híbrida      | minería, trayectoria, planeación, obstáculos, nodos, algoritmo, carga, seguridad, eficiencia, minería abierta            | IEEE/ASME International Conference                                                                     |
| Vehicles for Open-Pit Mining with Smart Scheduling System                          | 2021 | Mohamad F. Jwaid   | Iraq          | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Programación inteligente basada en 5G   | minería, 5G, sensores, vehículos, programación, big data, optimización, rutas, eficiencia, transporte                    | Turkish Journal of Computer and Mathematics Education                                                  |

## Mitigación de riesgos y seguridad

| Nombre del artículo                                                                                                                  | Año  | Autor                       | País       | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal                     | Fuente                                                | Keywords                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------|------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Autonomous and Operator-Assisted Electric Rope Shovel Performance Study                                                              | 2022 | Ali Yaghini                 | Canadá     | 3                                 | 2                             | 3                                    |                  | 2 Automación de equipos                  | Mining                                                | minería, rendimiento, automatización, seguridad, simulación, planificación, maquinaria, sostenibilidad, eficiencia, productividad |
| Conflict Resolution of Connected Trucks at Intersections                                                                             | 2023 | Xinxin Zhao                 | China      | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | 2 Resolución de conflictos mediante MPC  | U.P.B. Scientific Bulletin, Series D                  | minería, camiones conectados, seguridad, optimización, planificación, transporte, colaboración, IA, rutas, monitoreo              |
| Data-Driven and Artificial Intelligence Approach to Dynamic Truck Fleet Dispatching and Shovel Allocation Planning in Open-Pit Mines | 2023 | Roberto Noriega             | Canadá     | 3                                 | 2                             | 3                                    |                  | 2 Despacho dinámico basado en IA         | Thesis, University of Alberta                         | minería, camiones, despacho, optimización, IA, simulación, operaciones, planificación, costos, sostenibilidad                     |
| Evaluating Full Truck and Bucket Loading Strategies in Open-Pit Mining                                                               | 2022 | Mohammad Al-Masri           | Canadá     | 3                                 | 2                             | 3                                    |                  | 2 Modelos de Simulación                  | Thesis, University of Alberta                         | simulación, optimización, carga, seguridad, costos, producción, IA, transporte, planificación, operaciones                        |
| Intelligent Unmanned Mining System in Industry 4.0                                                                                   | 2024 | Erkan Topal                 | China      | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | 2 Sistemas de minería autónoma           | Springer Series in Geomechanics                       | minería, industria 4.0, IA, seguridad, IoT, planificación, producción, sostenibilidad, colaboración, optimización                 |
| Literature Review of AI Applications in Open-Pit Strategic Mine Planning                                                             | 2022 | Mohammad Mahdi Badiozamani  | Canadá     | 3                                 | 2                             | 3                                    |                  | 2 Planificación estratégica basada en IA | Mining Optimization Laboratory, University of Alberta | IA, minería, planificación, optimización, minería abierta, datos, algoritmos, operaciones, sostenibilidad, innovación             |
| Optimising Productivity and Safety with Surge Loader                                                                                 | 2021 | Ignacio Andrés Osses Aguayo | Chile/Perú | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | 2 Surge Loader                           | Mining                                                | minería, seguridad, productividad, transporte, cargadores, minería abierta, innovación, diseño, optimización, operaciones         |



| Nombre del artículo                                                           | Año  | Autor              | País             | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal               | Fuente                                                            | Keywords                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Powered Haulage Safety and Risk Management                                    | 2024 | Amin Moniri-Morad  | USA/Países Bajos | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | Gestión Integral de Riesgos        | Results in Engineering                                            | minería, transporte, seguridad, análisis de riesgos, mitigación, tecnología, automatización, flotas, evaluación, operaciones     |
| Preventing Haul Truck-Related Fatalities with Gamified Simulation             | 2023 | Lennart Gerrit Vos | Multinacional    | 3                                 | 3                             | 2                                    |                  | Simulación Gamificada              | Master's Thesis, TU Delft, Aalto University, RWTH Aachen          | minería, camiones, seguridad, simulación, gamificación, entrenamiento, riesgos, accidentes, prevención, manejo                   |
| Progress Toward Zero Entry Mining                                             | 2021 | Peter Knights      | Australia        | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | Minería Autónoma                   | IEEE Industrial Electronics Magazine                              | minería, autonomía, seguridad, cero entrada, innovación, sostenibilidad, optimización, diseño, equipos, digitalización           |
| Risk-Based Thinking in Occupational Safety Management                         | 2021 | Marat Rudakov      | Rusia            | 2                                 | 3                             | 2                                    |                  | Pensamiento basado en riesgos      | Sustainability                                                    | minería, seguridad ocupacional, riesgos, planificación, gestión, salud, mitigación, oportunidades, sostenibilidad, planificación |
| Rockburst Risk Control and Mitigation in Deep Mining                          | 2024 | Ming Cai           | Multinacional    | 2                                 | 3                             | 2                                    |                  | Evaluación de riesgos de Rockburst | Deep Resources Engineering                                        | minería, seguridad, mitigación, riesgos, geología, evaluación, prevención, soporte, secuenciación, diseño                        |
| Safe Mining Operations Through Technological Advancement                      | 2023 | Moshood Onifade    | Namibia/Kenia    | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | Automatización y Digitalización    | Process Safety and Environmental Protection                       | minería, seguridad, comunicación, automatización, innovación, sostenibilidad, perforación, estabilidad, operación, monitoreo     |
| Sensing Technology Applications in Mining Industry                            | 2022 | Joana Duarte       | Portugal         | 3                                 | 3                             | 3                                    |                  | Sensores avanzados                 | International Journal of Environmental Research and Public Health | sensores, minería, digitalización, monitorización, seguridad, eficiencia, optimización, IoT, sostenibilidad, industria 4.0       |
| The Future of Mine Safety: Anti-Collision Systems Based on Computer Vision    | 2023 | Mohamed Imam       | Marruecos        | 3                                 | 3                             | 2                                    |                  | Sistemas de Visión Computarizada   | Sensors                                                           | minería, anti-colisión, IA, seguridad, visión, sensores, LIDAR, innovación, sistemas, prevención                                 |
| The Present and Future Prospect of Artificial Intelligence in Mining Industry | 2024 | Gopal Singh        | India            | 3                                 | 3                             | 2                                    |                  | Inteligencia Artificial            | Industrial Engineering Journal                                    | minería, inteligencia artificial, seguridad, sostenibilidad, digitalización, riesgos, automatización, innovación, planificación  |

## Sostenibilidad operativa y ambiental

| Nombre del artículo                                                                           | Año  | Autor           | País          | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal           | Fuente                                                 | Keywords                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A Systematic Review of AI and Data-Driven Approaches in Strategic Open-Pit Mine Planning      | 2022 | Roberto Noriega | Canadá        | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Inteligencia Artificial        | Resources Policy                                       | minería, planificación, IA, optimización, datos, sostenibilidad, digitalización, modelado, innovación, minería abierta        |
| Advanced Analytics in Mining Engineering                                                      | 2022 | Ali Soofastaei  | Australia     | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Analítica avanzada             | Springer                                               | minería, digitalización, datos, optimización, sostenibilidad, decisiones, energía, eficiencia, predicción, modelado           |
| Comprehensive Overview: Fleet Management Drives Green Mining                                  | 2024 | Qian Wang       | China         | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Gestión de flotas inteligentes | Renewable and Sustainable Energy Reviews               | minería, sostenibilidad, gestión de carbono, optimización, digitalización, planificación, emisiones, energía limpia, flotas   |
| Designing Simulation Model for Open-Pit Mining Charging Infrastructure                        | 2024 | Alex Fredin     | Suecia        | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Electrificación de flotas      | Thesis, Blekinge Institute of Technology               | minería, infraestructura, simulación, autonomía, electrificación, diseño, optimización, sostenibilidad, emisiones, costos     |
| Electrification Alternatives for Open-Pit Mine Haulage                                        | 2023 | Haiming Bao     | Australia     | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Electrificación de Transporte  | Mining                                                 | minería, electrificación, alternativas, sostenibilidad, IPCC, reducción de emisiones, vehículos autónomos, baterías           |
| Environmental Impact Improvements Due to Introducing Automation into Underground Copper Mines | 2021 | Kyle Moreau     | Canadá        | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Automatización                 | International Journal of Mining Science and Technology | minería, cobre, impacto ambiental, LCA, optimización, CO2, sustentabilidad, eficiencia energética, emisiones, tecnología      |
| Equipment and Operations Automation in Mining: A Review                                       | 2024 | Michael Long    | Multinacional | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Automatización                 | Machines                                               | minería, automatización, seguridad, sostenibilidad, digitalización, productividad, eficiencia, tecnología, flotas             |
| Innovation in the Mining Industry: Technological Trends                                       | 2020 | Felipe Sánchez  | Chile/Austria | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Innovación disruptiva          | Mining, Metallurgy & Exploration                       | minería, innovación, sostenibilidad, transformación digital, eficiencia, minería abierta, tecnología, procesos, modernización |

| Nombre del artículo                                          | Año  | Autor              | País              | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal          | Fuente                                                              | Keywords                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------|------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Innovation in the Mining Industry: Technological Trends      | 2020 | Felipe Sánchez     | Chile/Austria     | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Innovación disruptiva         | Mining, Metallurgy & Exploration                                    | minería, innovación, sostenibilidad, transformación digital, eficiencia, minería abierta, tecnología, procesos, modernización    |
| Intelligent Fleet Management System for Open Pit Mine        | 2020 | Hajar Bnouachir    | Marruecos         | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Sistemas de gestión de flotas | International Journal of Advanced Computer Science and Applications | minería, gestión de flotas, optimización, inteligencia artificial, IoT, sostenibilidad, productividad, autonomía, digitalización |
| Low-Cost IoT for Monitoring and Optimising Mining Operations | 2021 | H. Aguirre-Jofré   | Reino Unido/Chile | 3                                 | 3                             | 2                                    | 2                | IoT                           | Automation in Construction                                          | minería, IoT, optimización, sensores, digitalización, eficiencia, sostenibilidad, minería de pequeña escala, productividad       |
| Technological and Intellectual Transition to Mining 4.0      | 2023 | Olga Zhironkina    | Rusia             | 3                                 | 2                             | 3                                    | 2                | Minería 4.0                   | Energies                                                            | minería, industria 4.0, digitalización, tecnologías convergentes, ESG, sostenibilidad, automatización, gemelos digitales         |
| The Challenges of Industry 4.0 in Mining                     | 2021 | Vladimir Velikanov | Rusia             | 3                                 | 3                             | 3                                    | 2                | Industria 4.0                 | Ural State Mining University Journal                                | minería, automatización, tecnología, sostenibilidad, eficiencia, industria 4.0, innovación, geoinformación, digitalización       |

## Desafíos Futuros

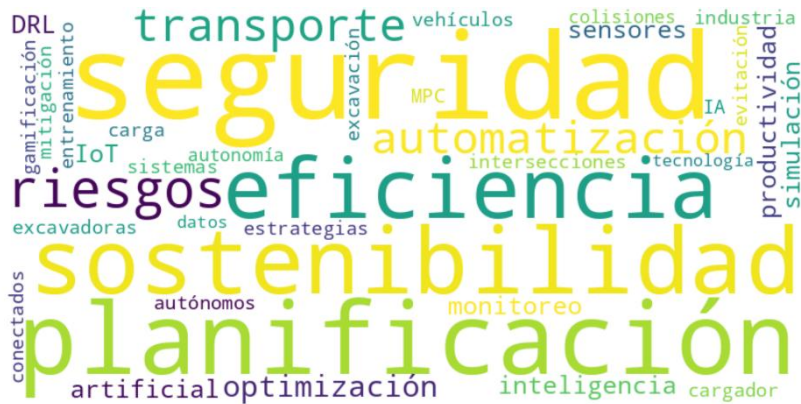
| Nombre del artículo                                                        | Año  | Autor                    | País      | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal                | Fuente                                             | Keywords                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------|-----------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Adoption of Autonomous Mining Systems in Pakistan                          | 2020 | Danish Ali               | Pakistán  | 2                                 | 3                             | 3                                    | 3                | IA y automatización                 | Resources Policy                                   | minería, Pakistán, automatización, planificación, habilidades, impacto social, digitalización, sostenibilidad, tecnología    |
| AI, Machine Learning, and Process Automation for Mining                    | 2020 | Danish Ali               | USA       | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Inteligencia Artificial             | Artificial Intelligence Review                     | minería, IA, machine learning, automatización, sostenibilidad, planificación, procesos, digitalización, eficiencia           |
| Autonomous Mining Enabled by Parallel Intelligence                         | 2024 | Clara de Holanda Araujo  | China     | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Inteligencia Paralela               | Thesis, University of British Columbia             | minería, automatización, IA, digital twins, colaboración, minería autónoma, sensores, simulación, sostenibilidad, eficiencia |
| Challenges and Applications of Digital Technology in Mineral Industry      | 2023 | Long Chen                | Sudáfrica | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Tecnología Digital                  | Communications Engineering                         | minería, digitalización, automatización, sostenibilidad, industria 4.0, planificación, eficiencia, innovación, datos         |
| Changes in Transport Technology Parameters with Autonomous Heavy Platforms | 2021 | Moshood Onifade          | Rusia     | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Plataformas Pesadas Autónomas       | Resources Policy                                   | minería, plataformas autónomas, transporte, planificación, eficiencia, sostenibilidad, automatización, seguridad             |
| Exploring the Impacts of Automation in Mining                              | 2024 | Loreto Codoceo-Contreras | Australia | 3                                 | 3                             | 2                                    | 3                | Análisis NLP                        | Mining Technology                                  | minería, automatización, impacto social, comunidad, empleo, digitalización, sostenibilidad, planificación, eficiencia        |
| Fully Automated Drill and Blast in Mining                                  | 2022 | Mark Alfred Clarkson     | Australia | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Perforación y voladura automatizada | Thesis, University of Southern Queensland          | minería, perforación, voladura, automatización, seguridad, eficiencia, robótica, sostenibilidad, planificación, riesgos      |
| iMAPeM: Intelligent Mining With Humans in the Loop                         | 2024 | Yunfeng Ai               | China     | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Minería Inteligente y Colaborativa  | IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics | minería, automatización, colaboración humana, sistemas paralelos, sostenibilidad, robótica, seguridad, planificación         |

| Nombre del artículo                                                     | Año  | Autor             | País            | Progreso en Tecnologías Autónomas | Seguridad y Riesgos Mitigados | Sostenibilidad operativa y ambiental | Desafíos Futuros | Tecnología Principal                    | Fuente                                        | Keywords                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------|------|-------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Impact of Automation on Workforce Skillsets in the Mining Industry      | 2024 | Sanaa Benlaajili  | Canadá          | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | Automatización y formación laboral      | E3SWeb of Conference                          | minería, automatización, formación, habilidades, impacto laboral, sostenibilidad, eficiencia, tecnología, industria 4.0           |
| Infrastructural Requirements for Autonomous Trucks                      | 2021 | Armin Iravani     | Marruecos       | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Infraestructura para Camiones Autónomos | Technical Report (ResearchGate)               | minería, camiones autónomos, infraestructura, seguridad, digitalización, sostenibilidad, planificación, innovación                |
| Modern Mining Challenges in a Holistic Perspective                      | 2023 | Dmitry Stenin     | Suecia          | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Enfoque holístico                       | E3SWeb of Conferences                         | minería, desafíos, sostenibilidad, innovación, tecnología, digitalización, exploración, datos, futuro, planificación              |
| Parallel Mining Operating Systems                                       | 2021 | Long Chen         | China           | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Sistemas Operativos Paralelos           | IEEE Digital Twins Conference                 | minería, sistemas paralelos, digital twins, inteligencia artificial, automatización, eficiencia, minería autónoma, sostenibilidad |
| Robotic Autonomous Systems for Earthmoving Equipment                    | 2023 | Sergey Zhironkin  | Australia       | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Sistemas Robóticos Autónomos            | Applied Sciences                              | minería, robótica, automatización, colaboración, condiciones extremas, sensores, navegación, movilidad, eficiencia                |
| Robotic Autonomous Systems for Earthmoving Equipment                    | 2023 | Huynh A.D. Nguyen | China/Filipinas | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Sistemas Autónomos                      | Robotica                                      | minería, automatización, GNSS, INS, tráfico, eficiencia, planificación, algoritmos, semántica, seguridad                          |
| Skills Development and Training for Future Workers in Mining Automation | 2021 | Peta Chirgwin     | Australia       | 3                                 | 2                             | 3                                    | 3                | HMI y formación profesional             | Computers in Human Behavior Reports           | minería, control, habilidades, formación, automatización, industria 4.0, capacitación, HMI, diseño, tecnología                    |
| Smart Mining With Autonomous Driving in Industry 5.0                    | 2024 | Long Chen         | China           | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Minería 5.0                             | IEEE Transactions on Intelligent Vehicles     | minería, industria 5.0, automatización, digital twins, inteligencia artificial, sostenibilidad, planificación, eficiencia         |
| Sustainable Development of Mining Using Innovative Global Methods       | 2024 | Reza Moezzi Nasab | Irán            | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Métodos Innovadores Globales            | Journal of Environment and Sustainable Mining | minería, sostenibilidad, automatización, riesgos, medio ambiente, IoT, robótica, innovación, digitalización                       |
| Transition from Mining 4.0 to Mining 5.0                                | 2023 | Longtian Fu       | Rusia           | 3                                 | 3                             | 3                                    | 3                | Minería 5.0                             | IEEE Access                                   | minería, transición, automatización, minería verde, robótica colaborativa, industria 5.0, ESG, IA, big data, sostenibilidad       |

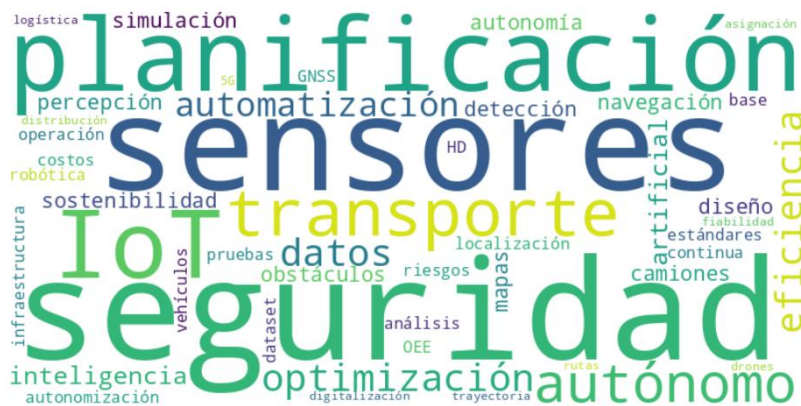
## 8.5. Nubes de Palabras

### 8.5.1. Extracción Asistida por Inteligencia Artificial

# Tecnologías de Automatización



## Mitigación de riesgos y seguridad



## Sostenibilidad operativa y ambiental



## Desafíos Futuros



### 8.5.2. Revisión sistemática generada por inteligencia artificial

## Tecnologías de Automatización



## Mitigación de riesgos y seguridad



## Sostenibilidad operativa y ambiental



## Sostenibilidad operativa y ambiental

