

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

**“EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA
INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA
SOSTENIBILIDAD DE LAS OPERACIONES
MINERAS EN EL PERÚ DURANTE EL 2024”**

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Carlos Jean Pierre Rojo Castope

Asesor:

MSc. Ing. Danny Daniel Valderrama Gutiérrez

<https://orcid.org/0000-0002-6810-8910>

Cajamarca - Perú

2025

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	JAIRO PINEDO TAQUIA
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	EDUARDO MANUEL NORIEGA VIDAL
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	DANNY DANIEL VALDERRAMA GUTIERREZ
	Nombre y Apellidos

Informe de Similitud

14% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- ▶ Bibliography
- ▶ Quoted Text
- ▶ Cited Text
- ▶ Small Matches (less than 10 words)

Exclusions

- ▶ 3 Excluded Sources
- ▶ 2 Excluded Matches

Top Sources

- 7%  Internet sources
- 1%  Publications
- 9%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Dedicatoria

Con todo mi corazón a mi madre y a mi familia, puesto que sin ellos sería muy complicado haber culminado toda mi carrera universitaria.

Igualmente agradezco a Dios por calmarme y tomar decisiones con cabeza fría en momentos complicados durante todo el proceso.

Y finalmente, a cada uno de los docentes con los que compartí conocimientos y muchas experiencias de la vida.

Agradecimiento

Agradezco primeramente a Dios por darme salud y guiarme en el camino para tomar las mejores decisiones durante todo el proceso universitario.

De igual manera, a mis padres que me siguen apoyando en toda decisión y por su infinita confianza en mí incluso en los momentos más difíciles de la vida.

Y también expresar mi más sincero respeto y cariño a mi asesor Daniel por enseñarme y orientarme en todos los pequeños detalles durante la elaboración de mi tesis.

Tabla de contenidos

JURADO EVALUADOR	2
Informe de Similitud.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento	5
Índice de tablas	7
Índice de figuras	8
Resumen	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	23
CAPÍTULO III: RESULTADOS	30
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	60
REFERENCIAS	69
ANEXOS.....	73

Índice de tablas

Tabla 1 Áreas de análisis de la ficha de observación documental.....	25
Tabla 2 Estrategias de recolección de datos	26
Tabla 3 Etapas del proceso de análisis de datos	27
Tabla 4 Contribución de la inteligencia artificial a la sostenibilidad ambiental en las operaciones mineras peruanas	30
Tabla 5 Impacto social de la inteligencia artificial en las operaciones mineras peruanas	38
Tabla 6 Impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras	46
Tabla 7 Desafíos y oportunidades para la implementación de la inteligencia artificial (IA) en el sector minero peruano	56

Índice de figuras

Ilustración 1	Impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad minera..	34
Ilustración 2	Impacto social de la inteligencia artificial en la minería.....	42
Ilustración 3	Análisis detallado del camión autónomo en la mina Quellaveco	45
Ilustración 4	Impacto económico de la inteligencia artificial en la minería	49
Ilustración 5	Representación de una variable con distribución normal estándar y su correspondiente histograma acumulativo experimental.....	52
Ilustración 6	Muestra base con una cuadrícula de 1 km x 1 km y estimación mediante Kriging Ordinario.....	53
Ilustración 7	Gráfico de dispersión que compara las leyes estimadas mediante Kriging Ordinario con las leyes reales obtenidas por Simulación Gaussiana Directa ...	54

Resumen

La presente investigación analiza el impacto de la inteligencia artificial (IA) en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el año 2024, centrándose en los ámbitos ambiental, social y económico. El estudio surge como respuesta a la necesidad de optimizar procesos mineros en un contexto donde la industria enfrenta desafíos significativos de sostenibilidad y eficiencia operativa. El objetivo principal es evaluar cómo la implementación de IA contribuye a la sostenibilidad de las operaciones mineras. La metodología empleada es de enfoque cualitativo y documental, con un diseño no experimental, descriptivo y explicativo. Se utilizó la ficha de observación documental y listas de cotejo para recopilar información de fuentes secundarias, como artículos científicos, informes técnicos y reportes sectoriales. Los resultados demuestran que la IA optimiza el uso de recursos naturales mediante el monitoreo en tiempo real, reduce costos operativos a través del mantenimiento predictivo y mejora la seguridad laboral al automatizar tareas peligrosas. Asimismo, facilita la comunicación con las comunidades y promueve prácticas más limpias y sostenibles. En conclusión, la IA ofrece beneficios económicos, sociales y ambientales significativos para la minería peruana, aunque enfrenta desafíos como la falta de personal capacitado y la infraestructura tecnológica deficiente.

Palabras claves:

Inteligencia artificial, sostenibilidad y operaciones mineras.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

La sostenibilidad de las operaciones mineras ha adquirido una relevancia fundamental en el contexto global debido a la creciente necesidad de mitigar los impactos negativos de esta actividad en el medio ambiente, la sociedad y la economía. En el Perú, donde la minería constituye uno de los pilares de la economía nacional, estas preocupaciones han llevado a la búsqueda de soluciones innovadoras para garantizar que las operaciones mineras sean sostenibles. La inteligencia artificial (IA) emerge como una tecnología clave para abordar estos desafíos, ofreciendo herramientas para optimizar procesos, reducir costos y mitigar impactos ambientales y sociales. Sin embargo, el impacto específico de la IA en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el contexto peruano aún requiere de un análisis profundo.

La minería en el Perú representa aproximadamente el 10% del Producto Bruto Interno (PBI) y constituye más del 60% de las exportaciones nacionales, consolidándose como una de las principales actividades económicas del país (Ministerio de Energía y Minas, 2023). Este sector, sin embargo, enfrenta una serie de desafíos relacionados con la sostenibilidad. En el ámbito ambiental, las operaciones mineras generan impactos significativos, tales como la contaminación de cuerpos de agua, la emisión de gases de efecto invernadero y la generación de grandes volúmenes de residuos sólidos, como desmontes y relaves (Paredes, Jiménez, Dávila, & Apaza, 2024). Estos problemas afectan no solo los ecosistemas locales, sino también la salud de las comunidades circundantes.

En el plano social, la relación entre las empresas mineras y las comunidades locales suele ser conflictiva. Estos conflictos surgen, en muchos casos, por la percepción de desigualdad en la distribución de beneficios económicos, la falta de consulta previa y los impactos ambientales negativos que afectan la calidad de vida de las comunidades

(De Echave, y otros, 2009). Este contexto ha llevado a que múltiples proyectos mineros enfrenten paralizaciones, generando pérdidas económicas significativas tanto para las empresas como para el Estado.

En el aspecto económico, la minería peruana enfrenta el reto de mantenerse competitiva a nivel global en un contexto de fluctuaciones de precios de los metales, incremento en los costos de producción y regulaciones ambientales cada vez más estrictas. La adopción de tecnologías innovadoras, como la inteligencia artificial, se presenta como una solución para optimizar procesos, mejorar la eficiencia operativa y reducir costos, permitiendo al sector adaptarse a estas condiciones desafiantes (Escudero, Guadalupe, Romero, & Vásquez, 2023).

La inteligencia artificial ha demostrado su potencial para transformar la minería a nivel internacional. En países como Canadá y Australia, la aplicación de algoritmos avanzados y sistemas automatizados ha permitido mejorar la seguridad en las operaciones, optimizar el uso de recursos naturales y aumentar la productividad (Chen, Chung, & Correa, 2023). Sin embargo, en el contexto peruano, la implementación de estas tecnologías enfrenta barreras como la falta de infraestructura tecnológica, la carencia de personal capacitado y la resistencia al cambio por parte de algunos actores del sector.

Por lo tanto, el problema central de esta investigación radica en comprender cómo la implementación de la inteligencia artificial puede contribuir a superar estos desafíos y fomentar la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú. La investigación se enfocará en analizar las dimensiones ambiental, social y económica de la sostenibilidad, así como en identificar los principales desafíos y oportunidades que esta tecnología ofrece en el contexto minero peruano.

La aplicación de inteligencia artificial en la minería ha generado un creciente interés en la comunidad académica y en el sector industrial debido a su capacidad para transformar procesos clave en la cadena de valor minera. En un contexto global, investigaciones realizadas en Canadá, Australia y Chile han demostrado que la inteligencia artificial puede contribuir significativamente a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Por ejemplo, un estudio realizado por Jung & Choi (2021) en Australia revisa diversas aplicaciones de técnicas de aprendizaje automático en la minería. Este estudio destaca casos específicos en los que se reportaron mejoras significativas en eficiencia y reducción de costos operativos gracias a la automatización y optimización de procesos mineros. De manera similar, en Canadá, investigaciones lideradas por Samillan & Castro (2023) demostraron el uso de algoritmos avanzados para predecir fallas en equipos mineros, lo que permitió reducir los tiempos de inactividad no planificados en un 30%, aumentando así la productividad de las operaciones.

En España, Carrasco (2021) investigó la aplicabilidad de la Inteligencia Artificial (IA) en la minería, desarrollando cuatro modelos capaces de predecir mineralizaciones con datos históricos del distrito minero de Almadén. Los modelos lograron altas precisiones al identificar ubicaciones geográficas y reconstruir mapas geológicos. Esta investigación demostró que la IA puede optimizar procesos prospectivos y generar predicciones útiles, contribuyendo a la sostenibilidad operativa de la industria minera.

En Chile, uno de los países líderes en la industria minera de América Latina, la incorporación de tecnologías digitales, incluyendo la inteligencia artificial, ha sido promovida activamente por el gobierno y el sector privado. Un informe del Consejo Minero (2022) destacó el uso de gemelos digitales y modelos predictivos basados en IA

para optimizar el consumo de energía y agua en las operaciones, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental del sector.

En el contexto peruano, los estudios relacionados con la aplicación de inteligencia artificial en la minería son aún limitados. Sin embargo, investigaciones iniciales sugieren un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad operativa. Por ejemplo, Contreras, Vásquez, Lazo, & Torres (2023) realizaron un estudio sobre la aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) en empresas mineras peruanas, analizando el efecto mediador de la sostenibilidad en la optimización de procesos mineros. Utilizando un diseño no experimental y un enfoque cuantitativo, se recopiló datos mediante encuestas tipo Likert, cuyos resultados fueron analizados con el software IBM AMOS 28. La investigación concluyó que la IA, mediante machine learning y análisis de datos, no solo mejora la sostenibilidad y optimización de procesos, sino que también genera beneficios sociales, ambientales y económicos en las empresas mineras que la implementan.

Malca, Rojas, Roque, & Sinca (2023) exploraron la implementación de la Inteligencia Artificial (IA) y la automatización en la minería, destacando su impacto en la optimización de operaciones, aumento de la seguridad y mejora de la eficiencia en la extracción y procesamiento de minerales. Entre los casos analizados se encuentran Goldspot Discoveries Inc., Earth AI y Aiglex, así como el uso de redes neuronales para la estimación de recursos. Se concluyó que estas tecnologías están transformando la industria minera peruana, promoviendo un desarrollo más sostenible y eficiente.

Pérez-Reyes (2024) analizó cómo la Inteligencia Artificial (IA) y el Big Data están transformando la industria minera, permitiendo predecir precios de commodities, evaluar proyectos y gestionar riesgos con mayor precisión. También se destacó el uso de

aprendizaje automático para mejorar la estimación de costos y la planificación de proyectos, así como la implementación de plataformas de datos ajustadas a las necesidades del sector. La investigación subraya la importancia de fomentar una cultura organizativa orientada a la innovación y la adaptabilidad para garantizar un desarrollo sostenible en el futuro de la minería.

Estos antecedentes resaltan el potencial transformador de la inteligencia artificial en el sector minero, pero también evidencian la necesidad de realizar estudios más profundos y adaptados al contexto peruano. Es crucial analizar no solo los beneficios técnicos y económicos, sino también las implicancias sociales y ambientales, así como los desafíos asociados a la implementación de estas tecnologías en el país.

Para el adecuado desarrollo de esta investigación, es fundamental establecer definiciones claras de los conceptos clave que estructuran el trabajo. Estas definiciones permitirán delimitar los alcances del estudio y garantizar un enfoque coherente.

La inteligencia artificial (IA) se define como una tecnología emergente que otorga a las máquinas la capacidad de razonar, aprender y tomar decisiones de manera autónoma. A través del análisis de datos y el uso de algoritmos avanzados, la IA permite a los sistemas adaptarse a diversos escenarios, optimizando decisiones con base en experiencias previas (Chaturvedi, 2008). Este enfoque facilita el control, monitoreo, proyección y optimización, logrando resultados eficientes y de alta calidad (Mohammadi & Minaei, 2019).

Aunque aún no alcanza la complejidad de la inteligencia humana, la IA presenta ventajas significativas, como su capacidad para realizar tareas repetitivas, operar en entornos difíciles y ofrecer consistencia en los resultados. Estas características la convierten en una herramienta poderosa para resolver problemas complejos en diversos

sectores, incluyendo la minería, donde contribuye a procesos avanzados como las redes neuronales y la lógica difusa para análisis y toma de decisiones (Avneet, 2015).

Desde su conceptualización en 1956 (Crevier, 1993), la IA ha demostrado ser una herramienta valiosa en la minería. Su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos y aprender patrones específicos permite aplicaciones como el reconocimiento de voz, imágenes y análisis de datos geológicos, favoreciendo la eficiencia y la innovación tecnológica (Devang et al., 2019). Investigaciones recientes destacan la utilización de algoritmos avanzados para la generación de mapas de prospectividad mineral, identificación de áreas con depósitos metálicos y optimización de procesos de exploración y producción (Ali & Frimpong, 2020).

Por ejemplo, modelos desarrollados mediante redes neuronales y lógica difusa han mostrado mayor precisión en la localización de depósitos minerales al integrar datos geofísicos y geoquímicos (Lee & Oh, 2011). Asimismo, sistemas como el “control de perforación inteligente” optimizan procesos de extracción en tiempo real, reduciendo costos y aumentando la eficiencia (Mitra & Saydam, 2014). Estas aplicaciones resaltan cómo la IA transforma la industria minera al permitir un enfoque más sistemático y preciso en todas las etapas del ciclo de vida de una mina.

La IA ha mejorado significativamente la productividad en minería, particularmente en áreas como la prospección, perforación y procesamiento de minerales. Durante la etapa de prospección, los algoritmos de aprendizaje automático identifican patrones en bases de datos geológicas y topográficas, facilitando la localización de áreas con alto potencial de mineralización (Ouanan & Abdelwahed, 2019). En la perforación, la automatización reduce la intervención humana, optimiza el control del proceso y recopila datos para mejorar la precisión y eficiencia operativa (Hyder et al., 2018).

En cuanto al procesamiento de minerales, técnicas como el análisis hiperespectral en combinación con IA logran clasificaciones precisas y rápidas de minerales, con una eficiencia superior al 90%, comparado con métodos tradicionales (Okada et al., 2020). Esto no solo acelera los procesos, sino que también maximiza el aprovechamiento de recursos y reduce costos operativos.

La IA contribuye a reducir costos mediante la optimización de recursos y la planificación eficiente de operaciones. Modelos de lógica difusa, por ejemplo, han sido empleados para evaluar y mejorar el potencial de mecanización en minas, disminuyendo costos asociados y aumentando la rentabilidad de los proyectos (Bangian et al., 2011). Estos enfoques permiten a las empresas tomar decisiones estratégicas basadas en datos precisos y modelos confiables.

En América Latina, la adopción de la IA todavía es incipiente, pero ya muestra un impacto positivo en sectores como la minería. Las máquinas autónomas en operaciones peruanas han mejorado la seguridad y eficiencia, mientras que la digitalización de procesos fomenta la sostenibilidad y optimiza las decisiones operativas. Por ejemplo, la implementación de sistemas basados en IA en empresas como Chazki y operaciones mineras peruanas evidencia cómo esta tecnología puede cerrar brechas tecnológicas y económicas en la región.

Las compañías mineras en América Latina enfrentan desafíos, pero la adopción de tecnologías como la IA y el aprendizaje automático impulsa la modernización del sector. Estas herramientas no solo aumentan la eficiencia en la producción, sino que también contribuyen a la sostenibilidad económica y ambiental, garantizando un futuro más competitivo para la industria minera.

Por otra parte, la sostenibilidad se define como la capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las generaciones futuras, según el Informe Brundtland de 1987 (Hilson & Murck, 2000). Desde una perspectiva organizacional, John Elkington introduce el concepto del triple resultado final, que evalúa el desempeño empresarial considerando las dimensiones económica, social y ambiental, yendo más allá de la rentabilidad (Bichueti et al., 2021). Este enfoque se integra en la Agenda 21, adoptada en la Cumbre de la Tierra de 1992, donde se promueve un desarrollo multidimensional enfocado en la calidad de vida, el progreso económico y la protección ambiental (Fonseca & Carvalho, 2019).

La industria minera enfrenta desafíos significativos en términos de sostenibilidad debido al impacto ambiental y social de sus operaciones. Implementar prácticas sostenibles implica integrar estrategias económicas, técnicas y sociales que aseguren el uso responsable de los recursos naturales y el bienestar de las comunidades locales (Dubiński, 2013). Herramientas como los informes de sostenibilidad, estandarizados por la Global Reporting Initiative (GRI), permiten a las empresas mineras medir y comunicar su desempeño en aspectos económicos, sociales y ambientales, consolidando su compromiso con el desarrollo sostenible (Pocomucha & Venegas, 2021).

Avances tecnológicos, como la automatización y la inteligencia artificial, impulsan prácticas sostenibles en minería. Ejemplos como los camiones autónomos y drones mejoran la eficiencia y reducen el impacto ambiental, lo cual es clave para prolongar la vida útil de las operaciones y evitar cierres prematuros (More et al., 2020). Grandes minas en países como Australia, Estados Unidos y Chile ya implementan tecnologías avanzadas, demostrando beneficios económicos sin sacrificar empleo ni sostenibilidad.

La sostenibilidad ambiental en la minería se centra en el uso responsable de recursos no renovables, la gestión de residuos y la mitigación de la contaminación generada por los procesos productivos (Gutiérrez et al., 2019). Adomako & Tran (2021) sostienen que la adopción de prácticas ambientalmente responsables no solo reduce los impactos negativos, sino que también mejora la competitividad de las empresas mineras.

Por otro lado, la sostenibilidad social destaca la necesidad de fortalecer las relaciones con las comunidades de influencia. La responsabilidad socioeconómica implica prevenir daños, optimizar beneficios y asegurar un desarrollo inclusivo y equitativo. Para ello, las empresas deben alinear sus políticas con las necesidades de los grupos de interés, priorizando la participación comunitaria y la transparencia en sus operaciones (Warhurst, 2001).

El crecimiento económico sostenible en la minería se traduce en la creación de valor a largo plazo, la optimización de recursos y la eficiencia en las operaciones. Indicadores como la contribución al PIB, la generación de empleo, las inversiones y la distribución equitativa de la riqueza reflejan el impacto económico de una gestión sostenible (Aznar et al., 2019). Además, reducir costos operativos a través de prácticas ambientales proactivas y tecnologías limpias contribuye al desempeño financiero, tal como argumentan Porter & Van Der Linde (1995).

En el Perú, la minería representa una actividad fundamental para la economía nacional, con una participación significativa en el PBI y en las exportaciones totales (Ministerio de Energía y Minas, 2021). Empresas como Antamina adoptan modelos de gestión sostenible que integran la innovación tecnológica con la responsabilidad social, promoviendo el desarrollo equilibrado de las comunidades y optimizando sus operaciones (Antamina, 2020). Asimismo, la mediana y pequeña minería en el país comienzan a

implementar tecnologías eléctricas y eficientes que impulsan la transición hacia una minería más “verde” y sostenible (Díaz, 2021).

La integración de nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT), es clave para alcanzar la sostenibilidad en la industria minera. Estas herramientas permiten optimizar tiempos, reducir costos operativos y minimizar los impactos ambientales, fortaleciendo la productividad y asegurando el uso eficiente de los recursos naturales (Landa, 2017). La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible enfatiza la necesidad de equilibrar crecimiento económico y conservación ambiental, impulsando prácticas mineras responsables y tecnologías de remediación que garanticen la sostenibilidad en el tiempo.

Estas definiciones establecen el marco conceptual necesario para comprender cómo la inteligencia artificial puede integrarse en el sector minero peruano y contribuir a su sostenibilidad operativa.

Desde una perspectiva teórica, esta investigación busca contribuir al conocimiento académico mediante el análisis integral de la aplicación de la inteligencia artificial en la sostenibilidad minera. Este estudio no solo amplía el marco conceptual existente sobre la integración de tecnologías avanzadas en sectores industriales, sino que también genera nuevos enfoques para abordar problemas críticos en la sostenibilidad operativa. Al generar conocimiento en este ámbito, se espera que sirva como referencia para futuras investigaciones en disciplinas relacionadas con la ingeniería de minas, la gestión ambiental y la innovación tecnológica.

Socialmente, los beneficios de esta investigación se proyectan hacia las comunidades locales, promoviendo operaciones mineras más responsables y sostenibles. La implementación de tecnologías basadas en IA puede minimizar los impactos negativos

en el medio ambiente, mejorar la transparencia en las operaciones y fortalecer la confianza entre las empresas y las comunidades. Asimismo, se espera que los resultados sean útiles para las empresas mineras, al proporcionar estrategias que optimicen procesos, reduzcan costos y mejoren la percepción pública del sector. Este enfoque fomenta un desarrollo económico más equitativo y sostenible, beneficiando tanto a las generaciones actuales como futuras.

La necesidad de promover una minería más responsable y sostenible, que equilibre el desarrollo económico con el cuidado ambiental y social, plantea un desafío significativo en la actualidad. La implementación de tecnologías como la inteligencia artificial no solo ofrece soluciones para optimizar procesos y reducir costos, sino que también puede mejorar la interacción entre las empresas mineras y las comunidades locales, generando confianza y transparencia. En este contexto, surge la necesidad de analizar de manera precisa el impacto que tiene la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú, estableciendo estrategias que respondan a los retos del sector y contribuyan a un desarrollo más equitativo y sostenible. Esto conduce a la formulación de la siguiente pregunta:

1.2 Formulación del problema

¿Cómo impacta la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el 2024?

Problemas específicos

¿De qué manera la inteligencia artificial contribuye a la sostenibilidad ambiental en las operaciones mineras?

¿Cómo impacta la inteligencia artificial en la sostenibilidad social de las operaciones mineras?

¿Cuál es el impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras?

¿Cuáles son los desafíos y oportunidades para implementar la inteligencia artificial en el contexto minero peruano?

1.3 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el 2024.

Objetivos específicos

Analizar la contribución de la inteligencia artificial a la sostenibilidad ambiental en las operaciones mineras peruanas.

Evaluar el impacto social de la inteligencia artificial en las operaciones mineras peruanas.

Determinar el impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras.

Identificar los principales desafíos y oportunidades para la implementación de la inteligencia artificial en el contexto minero peruano.

1.4 Hipótesis

Hipótesis general

La inteligencia artificial impacta positivamente en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el 2024, mejorando su desempeño ambiental, social y económico.

Hipótesis específicas

La inteligencia artificial contribuye a la sostenibilidad ambiental de las operaciones mineras al optimizar el uso de recursos naturales como agua y energía, y reducir las emisiones y desechos generados.

La implementación de inteligencia artificial mejora la sostenibilidad social al fortalecer la relación entre las empresas mineras y las comunidades locales, reduciendo conflictos y promoviendo mejores condiciones laborales.

La inteligencia artificial incrementa la sostenibilidad económica al optimizar los costos operativos y aumentar la eficiencia y competitividad de las operaciones mineras en el Perú.

Existen barreras significativas para la adopción de inteligencia artificial en el sector minero peruano, pero también oportunidades que, de ser aprovechadas, podrían maximizar su impacto positivo en la sostenibilidad.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Diseño de la Investigación

Esta investigación es de tipo aplicada, dado que tiene como objetivo analizar el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el año 2024. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), las investigaciones aplicadas buscan resolver problemas específicos, utilizando el conocimiento adquirido para proponer soluciones o estrategias en contextos concretos. En este caso, la investigación pretende proporcionar lineamientos teóricos y prácticos para optimizar la sostenibilidad operativa en la minería mediante el uso de inteligencia artificial.

La investigación adoptó un enfoque cualitativo y documental. De acuerdo con Creswell (2015), el enfoque cualitativo se caracteriza por el análisis profundo de fenómenos complejos a partir de la interpretación crítica de información no numérica, permitiendo una comprensión integral del objeto de estudio. Este enfoque resulta pertinente al estudiar las aplicaciones de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras, ya que permite identificar sus impactos en las dimensiones ambiental, social y económica, a partir de información secundaria.

El diseño es no experimental y descriptivo-explicativo. En palabras de Kerlinger y Lee (2002), un diseño no experimental se caracteriza por observar fenómenos tal como se presentan en su contexto natural, sin manipular variables. El carácter descriptivo de la investigación radica en que permite identificar, analizar y detallar las aplicaciones y contribuciones de la inteligencia artificial a la sostenibilidad minera. A su vez, la investigación tiene un componente explicativo, porque busca establecer relaciones causales entre el uso de la inteligencia artificial y los beneficios observados en términos de sostenibilidad operativa (Hernández-Sampieri et al., 2014).

La elección de este diseño se justifica por la naturaleza exploratoria y analítica del estudio, que no requiere de experimentación directa, sino de un análisis riguroso de información existente. Esta metodología permite generar aportes significativos al conocimiento teórico y práctico, lo cual es fundamental en investigaciones que abordan tecnologías emergentes como la inteligencia artificial.

Población y unidad de análisis

En esta investigación, la unidad de análisis se define como los documentos y fuentes de información que proporcionan datos sobre la aplicación de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú. Según López (2004), la unidad de análisis es el tema o elemento principal que se examina en un estudio, determinando el nivel en el que se recopilan y analizan los datos

La población está constituida por el conjunto de documentos, informes y publicaciones relacionados con el uso de inteligencia artificial en la minería peruana. Esto incluye artículos científicos, informes técnicos, reportes de sostenibilidad de empresas mineras, documentos gubernamentales y estudios de organismos internacionales pertinentes al tema de estudio.

Dado que la población es amplia y diversa, se realizó una selección intencional de fuentes, aplicando los siguientes criterios:

Relevancia: Se incluyeron documentos que abordan directamente la aplicación de la inteligencia artificial en la minería y su impacto en la sostenibilidad.

Actualidad: Se priorizaron publicaciones de los últimos diez años (2014-2024) para garantizar la vigencia de la información.

Fiabilidad: Se seleccionaron fuentes provenientes de instituciones reconocidas, revistas científicas indexadas y organismos oficiales para asegurar la calidad de los datos.

Esta selección permitió conformar un corpus documental representativo y pertinente para el análisis cualitativo, facilitando la comprensión del impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú.

Control de mediciones

En la presente investigación, se aplicó la ficha de observación documental como instrumento principal para la recolección de información (ver anexo 1). Este instrumento permitió obtener y organizar datos relevantes sobre el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú, tomando en cuenta las dimensiones ambiental, social y económica. La ficha de observación documental fue utilizada para recopilar información específica en las siguientes áreas:

Tabla 1

Áreas de análisis de la ficha de observación documental

Áreas de análisis	Observación
Sostenibilidad ambiental	Datos sobre la implementación de tecnologías basadas en inteligencia artificial para la optimización del uso de recursos naturales, reducción de emisiones de gases contaminantes y manejo eficiente de relaves y residuos mineros.
Sostenibilidad social	Información sobre el impacto de la inteligencia artificial en la mejora de las condiciones laborales, la seguridad en las operaciones mineras y las relaciones con las comunidades locales.
Sostenibilidad económica	Datos relacionados con la optimización de costos operativos, el incremento de la productividad y la mejora de la eficiencia en procesos mineros a través del uso de inteligencia artificial.

Nota. Elaboración propia.

Asimismo, se empleó una lista de cotejo (ver anexo 2), la cual permitió evaluar el grado de implementación de tecnologías de inteligencia artificial en empresas mineras nacionales e internacionales. Los criterios evaluados incluyeron:

- a) Existencia de sistemas de monitoreo en tiempo real basados en inteligencia artificial.
- b) Aplicación de algoritmos predictivos para la optimización de procesos.
- c) Uso de tecnologías automatizadas en actividades de exploración, extracción y procesamiento de minerales.

Para garantizar la calidad de los datos obtenidos y minimizar posibles sesgos en la recolección de información, se implementaron las siguientes estrategias:

Tabla 2

Estrategias de recolección de datos

Estrategias implementadas	Descripción
Control de sesgo del observador	Se aplicó un protocolo estandarizado para la revisión de cada documento, asegurando la objetividad y consistencia en la recopilación de información.
Evaluación de la capacidad diagnóstica del instrumento	Antes de su aplicación, la ficha de observación y la lista de cotejo fueron validadas mediante la revisión de expertos en sostenibilidad minera y en tecnologías aplicadas a la minería.
Adaptación del instrumento	Los criterios de observación y cotejo fueron ajustados al contexto específico de la industria minera peruana, garantizando su pertinencia para los objetivos de la investigación.

Nota. Elaboración propia.

De esta manera, el proceso de recolección de datos se estructuró para obtener información de alta calidad y asegurar la fiabilidad de los resultados, permitiendo un análisis riguroso y fundamentado de la influencia de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú.

Análisis de datos

El análisis de datos en esta investigación se realizó mediante un método analítico-sintético y un enfoque cualitativo, permitiendo examinar la información recopilada de manera ordenada y sistemática. Según Hernández-Sampieri et al. (2014), el método analítico-sintético implica descomponer la información en sus partes constitutivas para identificar patrones, tendencias y relaciones, y luego integrarla para llegar a conclusiones generales.

El proceso de análisis se desarrolló en las siguientes etapas:

Tabla 3

Etapas del proceso de análisis de datos

Etapa	Descripción
Recopilación de información	Se seleccionaron artículos científicos, informes técnicos, reportes de sostenibilidad y estudios de caso provenientes de fuentes confiables y actualizadas. Esta información fue organizada y clasificada de acuerdo con las dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, social y económica).
Organización y clasificación	La información se sistematizó en una matriz de análisis que permitió ordenar los hallazgos en función de los objetivos específicos. Las categorías principales incluyeron: Implementación de inteligencia artificial en procesos ambientales (eficiencia de recursos y reducción de impactos). Impactos sociales (mejora en seguridad laboral, relación con comunidades). Contribuciones económicas (reducción de costos, optimización de procesos y aumento de productividad).

Identificación de patrones y tendencias	Mediante la revisión crítica de las fuentes, se identificaron patrones y tendencias relacionadas con el uso de inteligencia artificial en la minería. Se evaluó cómo estas tecnologías han impactado en otras industrias y países, para proyectar su influencia en el contexto peruano.
Análisis comparativo y crítico	Se realizó un análisis comparativo entre los hallazgos obtenidos en estudios de casos internacionales (Australia, Canadá, Chile) y las prácticas actuales en el sector minero peruano. Esto permitió destacar desafíos, oportunidades y posibles brechas en la implementación de la inteligencia artificial.
Síntesis de resultados	Finalmente, los hallazgos se integraron para obtener una visión global del impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras, respondiendo a la pregunta de investigación y cumpliendo los objetivos específicos del estudio.

Nota. Elaboración propia.

Estas etapas permitieron realizar un análisis exhaustivo de la información disponible, garantizando un proceso estructurado y orientado al logro de resultados objetivos. Se evitó cualquier sesgo en la interpretación mediante el uso de criterios claros y verificables en la organización y selección de datos.

Aspectos éticos

La presente investigación ha sido desarrollada respetando los principios éticos fundamentales, garantizando la integridad en el manejo y análisis de la información utilizada. Al no contar con unidades de análisis relacionadas con individuos o comunidades, dado su enfoque documental y cualitativo, no fue necesario aplicar medidas específicas de protección a participantes humanos. Sin embargo, se aseguró el uso responsable de las fuentes consultadas, preservando su contexto original y evitando cualquier forma de manipulación o distorsión de la información.

Asimismo, para garantizar la originalidad y evitar el plagio, se implementaron mecanismos rigurosos de control mediante el uso de normas de citación APA, respetando en todo momento los derechos de autor y la propiedad intelectual de los investigadores y organismos citados. El contenido fue revisado cuidadosamente con herramientas de detección de plagio, asegurando que toda referencia o idea ajena se presente de manera adecuada y correctamente atribuida.

De este modo, la investigación mantiene altos estándares éticos, asegurando transparencia, respeto a las fuentes y rigurosidad en la presentación de los resultados, contribuyendo con ello a la validez y credibilidad del estudio.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

La presente investigación analiza el impacto de la inteligencia artificial (IA) en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el año 2024. Los hallazgos se presentan en correspondencia con los objetivos específicos planteados, abarcando las dimensiones ambiental, social y económica de la sostenibilidad.

3.1. Sostenibilidad ambiental

3.1.1. Aportes de la inteligencia artificial a la sostenibilidad ambiental en la minería peruana (2024)

La siguiente tabla presenta las principales aplicaciones de la inteligencia artificial en el ámbito minero peruano durante el año 2024, enfocándose en su contribución a la sostenibilidad ambiental. Se detallan diversas áreas de aplicación, los impactos ambientales positivos asociados y las fuentes que respaldan los hallazgos, en línea con los objetivos específicos de la investigación.

Tabla 4

Contribución de la inteligencia artificial a la sostenibilidad ambiental en las operaciones mineras peruanas

Área de aplicación	Descripción	Impacto ambiental	Fuente
Mantenimiento predictivo de equipos	Implementación de algoritmos de aprendizaje automático para predecir fallas en maquinaria, permitiendo programar mantenimientos preventivos y evitar paradas inesperadas.	Incrementa la eficiencia operativa. Reduce el consumo de energía. Disminuye la generación de residuos asociados a reparaciones de emergencia.	Omnia Solution (2024)

Gestión eficiente de recursos hídricos	Uso de sistemas inteligentes para monitorear y controlar en tiempo real el consumo de agua en las operaciones mineras, optimizando su uso y evitando desperdicios.	Optimiza el uso del agua. Previene la contaminación de fuentes hídricas.	Gestión (2024)
Optimización del consumo energético	Aplicación de IA para mejorar la eficiencia energética en procesos mineros, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.	Disminuye las emisiones de CO ₂ . Promueve prácticas operativas más limpias y sostenibles.	Schneider Electric Sustainability Research Institute (2024)
Monitoreo ambiental en tiempo real	Empleo de sensores y sistemas basados en IA para la vigilancia continua de parámetros ambientales, como calidad del aire y del agua, permitiendo una respuesta rápida ante posibles contaminaciones.	Mejora la capacidad de respuesta ante incidentes ambientales. Facilita el cumplimiento de normativas ambientales.	Malca, Rojas, Roque, & Sinca (2023)
Exploración minera sostenible	Desarrollo de robots equipados con IA para la exploración de minas subterráneas de difícil acceso, minimizando la intervención humana y reduciendo el impacto ambiental durante las fases de exploración.	Reduce la alteración de ecosistemas sensibles. Disminuye la huella ecológica de las actividades de exploración.	Herbozo, Myldred (2021)
Optimización de procesos extractivos	Implementación de IA para mejorar la eficiencia en la extracción y procesamiento de minerales, reduciendo el uso de químicos y la generación de desechos tóxicos.	Minimiza la generación de residuos peligrosos. Disminuye la contaminación del suelo y agua.	Tecnología Minera (2024)
Automatización de vehículos y maquinaria	Uso de vehículos autónomos y maquinaria controlada por IA para optimizar rutas y operaciones, reduciendo el	Disminuye las emisiones de gases contaminantes. Mejora la eficiencia en el uso	Proactivo (2024)

	consumo de combustible y las emisiones asociadas.	de recursos energéticos.	
Reciclaje y gestión de residuos	Aplicación de sistemas inteligentes para la clasificación y reciclaje de residuos mineros, promoviendo la economía circular y reduciendo la necesidad de nuevas extracciones.	Reduce la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios. Conserva los recursos naturales al reutilizar materiales.	Tecnología Minera (2023)
Planificación y diseño de minas	Utilización de modelos predictivos basados en IA para planificar y diseñar operaciones mineras que minimicen el impacto ambiental, considerando factores como la biodiversidad y la geomorfología del terreno.	Mitiga la alteración de hábitats naturales. Optimiza la rehabilitación y cierre de minas.	ContentLab (2020)
Educación y sensibilización ambiental	Desarrollo de programas educativos asistidos por IA para capacitar al personal minero en prácticas sostenibles y concientizar sobre la importancia de la protección ambiental en las operaciones diarias.	Fomenta una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad. Mejora el cumplimiento de estándares ambientales por parte del personal.	CEPLAN (2021)

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 4 se presenta la contribución de la inteligencia artificial a la sostenibilidad ambiental en las operaciones mineras peruanas, destacando distintas áreas de aplicación y sus respectivos impactos. Se observa que el uso de IA en la minería contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental a través de la optimización de procesos, la eficiencia en el uso de recursos y la minimización de residuos.

Por ejemplo, el mantenimiento predictivo de equipos no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce el consumo de energía y la generación de residuos por

reparaciones inesperadas. De manera similar, la gestión eficiente de los recursos hídricos mediante sistemas inteligentes optimiza el uso del agua y previene la contaminación de fuentes hídricas, mientras que la optimización del consumo energético permite reducir las emisiones de CO₂ y fomenta prácticas más sostenibles.

Asimismo, la implementación de monitoreo ambiental en tiempo real fortalece la capacidad de respuesta ante incidentes ambientales y facilita el cumplimiento normativo. La exploración minera sostenible, por su parte, permite reducir la alteración de ecosistemas sensibles y minimizar la huella ecológica en la fase de exploración, mientras que la optimización de procesos extractivos disminuye la contaminación del suelo y el agua al reducir el uso de químicos y la generación de residuos peligrosos.

Además, la automatización de vehículos y maquinaria mediante IA mejora la eficiencia en el uso de combustibles y reduce la emisión de gases contaminantes. En el ámbito de la gestión de residuos, la aplicación de sistemas inteligentes para el reciclaje promueve la economía circular y reduce la necesidad de nuevas extracciones. Finalmente, la planificación y diseño de minas con modelos predictivos ayuda a mitigar la alteración de hábitats naturales y optimiza el cierre de minas, y los programas educativos asistidos por IA fomentan una cultura organizacional orientada a la sostenibilidad.

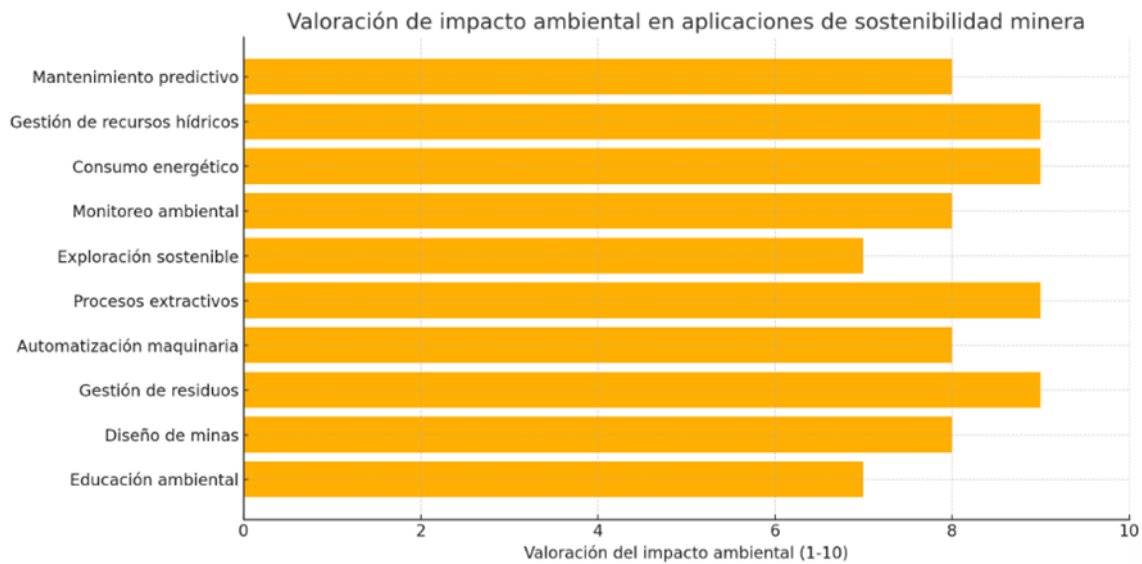
En general, la inteligencia artificial emerge como una herramienta clave para mejorar la sostenibilidad en la minería peruana, abordando tanto la reducción de impactos ambientales como la eficiencia operativa.

3.1.2. Valoración del impacto ambiental de aplicaciones de IA en la minería peruana

La ilustración 1 muestra la valoración del impacto ambiental de distintas aplicaciones de la inteligencia artificial en las operaciones mineras peruanas, utilizando una escala del 1 al 10 según su nivel de contribución a la sostenibilidad.

Ilustración 1

Impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad minera



Nota. Elaboración propia a partir de diez artículos científicos (2020–2024). La escala de valoración es de 1 a 10 y representa el impacto ambiental positivo de cada tecnología basada en inteligencia artificial aplicada a la minería sostenible.

En la Ilustración 1 se presenta la valoración del impacto ambiental de diversas aplicaciones de inteligencia artificial en el ámbito de la sostenibilidad minera, utilizando una escala del 1 al 10. Este gráfico permite comparar visualmente la percepción del impacto ambiental positivo que tiene cada área de aplicación tecnológica.

Las áreas con mayor valoración (puntaje 9) son la gestión de recursos hídricos, el consumo energético y los procesos extractivos, lo cual evidencia su alta eficacia para reducir impactos negativos como el desperdicio de agua, las emisiones contaminantes y la generación de residuos peligrosos.

Con una valoración de 8, destacan tecnologías como el mantenimiento predictivo, el monitoreo ambiental, la automatización de maquinaria, la gestión de residuos y el

diseño de minas, todas orientadas a una mayor eficiencia operativa y control de impactos ambientales.

En un nivel moderado (valor 7) se encuentra la exploración sostenible, mientras que la educación ambiental presenta la valoración más baja (valor 6), probablemente debido a su impacto más indirecto y a largo plazo, centrado en la formación de una cultura organizacional responsable con el medio ambiente.

En conjunto, esta ilustración reafirma que la inteligencia artificial tiene un rol fundamental en la transición hacia una minería más sostenible, especialmente en aquellas áreas donde se puede automatizar, optimizar y controlar el uso de recursos naturales y la generación de contaminantes.

3.1.3. Sobre la valoración del impacto ambiental de aplicaciones tecnológicas en la minería: análisis comparativo basado en diez estudios científicos

La valoración reflejada en el gráfico ha sido realizada mediante una escala del 1 al 10, considerando de forma cualitativa el impacto ambiental positivo que cada innovación tecnológica presenta en el contexto de la sostenibilidad minera. Esta calificación se ha asignado en función del grado en que cada área de aplicación contribuye a la reducción de impactos ecológicos negativos, la eficiencia en el uso de recursos naturales, y la facilidad de implementación operativa en entornos mineros reales. Por ejemplo, se han otorgado puntajes altos (9) a aquellas tecnologías que, además de ser aplicables con relativa facilidad, ofrecen beneficios ambientales directos y medibles, como la optimización del consumo energético, la gestión eficiente del agua o la reducción de residuos tóxicos a través de procesos extractivos mejorados. En cambio, otras innovaciones, como la educación ambiental o la exploración con robots, aunque valiosas,

fueron puntuadas ligeramente más bajas (7 u 8), por tener un impacto más indirecto o depender de factores contextuales más amplios para su efectividad plena.

La información utilizada para construir este análisis proviene de diez artículos científicos y técnicos recientes, publicados entre los años 2020 y 2024, que examinan la aplicación de inteligencia artificial y tecnologías inteligentes en la minería peruana con un enfoque en sostenibilidad ambiental. Cada artículo ha sido sintetizado y categorizado por su área de aplicación (por ejemplo, mantenimiento predictivo, automatización, gestión de residuos, etc.), describiendo la tecnología implementada, su funcionalidad y los beneficios ambientales reportados. La valoración numérica se basa en una interpretación técnica del contenido de cada fuente, evaluando especialmente las implicancias ecológicas descritas por los autores y contrastándolas con criterios de sostenibilidad ambiental reconocidos (como la eficiencia energética, la reducción de emisiones, la conservación de recursos hídricos y la mitigación de impactos en los ecosistemas).

Las fuentes utilizadas incluyen publicaciones de entidades reconocidas como el Schneider Electric Sustainability Research Institute (2024) y Tecnología Minera (2023, 2024), que brindan reportes técnicos actualizados sobre avances en sostenibilidad minera; así como estudios de carácter académico como los de Malca, Rojas, Roque y Sinca (2023) y Herbozo, Myldred (2021). También se han consultado informes estratégicos de instituciones públicas y privadas como CEPLAN (2021) y Proactivo (2024), que documentan la integración de herramientas digitales en procesos mineros desde una perspectiva ambiental. En conjunto, esta información fue organizada en una matriz comparativa que permitió establecer criterios homogéneos de valoración y construir así el gráfico presentado.

3.1.4. Implementación de perforación autónoma en minería a tajo abierto

La incorporación de perforadoras autónomas en la mina Antapaccay representa un claro ejemplo de cómo la inteligencia artificial impulsa la sostenibilidad ambiental en la minería moderna. Esta innovación tecnológica, respaldada por sistemas avanzados de automatización desarrollados por Flanders, no solo mejora la eficiencia y seguridad operativa, sino que también genera beneficios ambientales concretos.

El uso de IA en el control y operación de perforadoras permite una mayor precisión en las tareas de perforación, una optimización del uso del equipo y, especialmente, una reducción del consumo de combustible, lo que se traduce en una menor emisión de dióxido de carbono. Esta disminución del 8% en el consumo energético, junto con una mejora del 90% en la seguridad y un aumento en la productividad, demuestra que la automatización inteligente no solo tiene un valor técnico, sino también un profundo impacto en la reducción de la huella ecológica de la minería.

Además, al minimizar la intervención humana en procesos de alto riesgo, se fomenta una operación más segura y sostenible, alineada con los principios de minería responsable. Este caso evidencia cómo la inteligencia artificial, aplicada estratégicamente, puede transformar procesos clave de la minería tradicional en modelos más sostenibles, eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

3.2. Sostenibilidad social

3.2.1. Impacto social de la inteligencia artificial en la minería peruana

La siguiente tabla expone cómo distintas aplicaciones de inteligencia artificial están transformando el entorno social de las operaciones mineras en el Perú. Se analizan áreas clave como la seguridad laboral, la inclusión tecnológica, la relación con las comunidades, la capacitación del personal y la transparencia corporativa. Cada

intervención tecnológica basada en IA contribuye al bienestar de los trabajadores, al fortalecimiento del tejido social local y a una minería más inclusiva, participativa y responsable.

Tabla 5

Impacto social de la inteligencia artificial en las operaciones mineras peruanas

Área de impacto	Descripción	Impacto social	Referencia
Optimización de la seguridad laboral	Implementación de sistemas basados en IA para monitorear condiciones de trabajo y predecir riesgos, reduciendo accidentes y mejorando la salud ocupacional.	Disminución de accidentes laborales. Mejora en la salud y bienestar de los trabajadores.	Díaz Ríos, Álvaro (2021)
Automatización de procesos	Uso de IA para automatizar tareas repetitivas y peligrosas, permitiendo que los trabajadores se enfoquen en actividades de mayor valor agregado y reduciendo la exposición a entornos de riesgo.	Reducción de la exposición a condiciones laborales peligrosas. Generación de nuevas oportunidades laborales en áreas tecnológicas.	Tecnología Minera (2024)
Capacitación y desarrollo de habilidades	Implementación de programas de formación en competencias digitales y manejo de tecnologías basadas en IA, elevando el nivel de especialización de la fuerza laboral minera.	Mejora en la empleabilidad y desarrollo profesional de los trabajadores. Adaptación a las nuevas demandas del mercado laboral.	Ramírez Mendoza, Sebastián (2024)
Relación con las comunidades locales	Aplicación de IA para optimizar la comunicación y gestión de relaciones con comunidades aledañas a las operaciones mineras, atendiendo sus preocupaciones y promoviendo el desarrollo social.	Fortalecimiento de la confianza y colaboración con las comunidades. Promoción de proyectos de desarrollo	CEPLAN (2021)

		comunitario basados en datos precisos.	
Transparencia y responsabilidad social	Uso de tecnologías de IA para monitorear y reportar en tiempo real las prácticas operativas, asegurando el cumplimiento de estándares éticos y ambientales, y mejorando la percepción pública de la industria minera.	Incremento de la transparencia en las operaciones. Mejora en la reputación corporativa y aceptación social de las actividades mineras.	Hinostroza, Kevin (2023)
Generación de empleo en nuevas áreas tecnológicas	Creación de puestos de trabajo relacionados con el desarrollo, implementación y mantenimiento de sistemas de IA en la minería, diversificando el mercado laboral y fomentando la inclusión de profesionales de distintas disciplinas.	Diversificación de oportunidades laborales. Inclusión de talento joven y especializado en el sector minero.	Ramírez Mendoza, Sebastián (2024)
Mejora en la toma de decisiones	Integración de sistemas de IA que analizan grandes volúmenes de datos para apoyar en la toma de decisiones estratégicas, considerando factores sociales y económicos que afectan a las comunidades y a la fuerza laboral.	Decisiones más informadas y equilibradas. Consideración de variables sociales en la planificación operativa.	OmniaSolution (2023)
Reducción de la brecha digital	Implementación de tecnologías de IA en regiones mineras remotas, promoviendo la infraestructura digital y facilitando el acceso a tecnologías de la información en comunidades locales.	Mejora en la conectividad y acceso a información. Oportunidades para el desarrollo de habilidades digitales en la población local.	CEPLAN (2021)
Sostenibilidad y responsabilidad ambiental	Aplicación de IA para minimizar el impacto ambiental de las operaciones mineras, lo que repercute	Mejora en la calidad de vida de las comunidades aledañas.	Gestión (2024)

	positivamente en la salud y calidad de vida de las comunidades cercanas, promoviendo un entorno más saludable y sostenible.	Promoción de prácticas ambientales responsables.	
Participación ciudadana y consulta previa	Uso de herramientas de IA para analizar y gestionar datos relacionados con la participación ciudadana y procesos de consulta previa, asegurando que las opiniones y preocupaciones de las comunidades sean consideradas en las decisiones operativas y estratégicas de las empresas mineras.	Fortalecimiento de la participación comunitaria en la toma de decisiones. Aseguramiento del respeto a los derechos de las comunidades indígenas y locales.	Díaz Ríos, Álvaro (2021)

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 5 se expone el impacto social de la inteligencia artificial en las operaciones mineras peruanas, a través de diversas áreas de aplicación que contribuyen al bienestar de los trabajadores, al fortalecimiento de las relaciones con las comunidades locales y a la transformación positiva del entorno social.

Se observa que una de las principales contribuciones de la IA es la optimización de la seguridad laboral, ya que permite monitorear condiciones de trabajo y prevenir riesgos, lo que se traduce en una disminución de accidentes y una mejora en la salud ocupacional. En esta línea, la automatización de procesos también cumple un rol importante al reducir la exposición de los trabajadores a entornos peligrosos y al mismo tiempo generar nuevas oportunidades laborales en áreas tecnológicas.

Por otro lado, la capacitación y desarrollo de habilidades impulsada por la IA mejora la empleabilidad y permite que los trabajadores se adapten a las nuevas exigencias del mercado laboral, contribuyendo a su crecimiento profesional. Esta transformación va de la mano con la generación de empleo en nuevas áreas tecnológicas, que diversifica el

mercado laboral minero e incluye a jóvenes profesionales con conocimientos especializados.

En cuanto a la relación con el entorno, la IA también contribuye a una mejor relación con las comunidades locales, optimizando la comunicación y promoviendo proyectos sociales basados en datos concretos, lo que fortalece la confianza. La transparencia y responsabilidad social, a su vez, se ve reforzada mediante tecnologías de monitoreo en tiempo real, mejorando la reputación de las empresas mineras y su aceptación social.

Asimismo, se destaca el uso de IA para mejorar la toma de decisiones, integrando factores sociales y económicos relevantes, lo que permite una planificación más equilibrada. La reducción de la brecha digital también se presenta como un beneficio clave, al facilitar el acceso a tecnologías en zonas remotas y fomentar el desarrollo de habilidades digitales en la población local.

Finalmente, se señala el impacto positivo de la IA en la sostenibilidad y responsabilidad ambiental, que repercute directamente en la salud y calidad de vida de las comunidades cercanas, y en el fortalecimiento de la participación ciudadana y consulta previa, asegurando que las voces de las comunidades indígenas y locales sean escuchadas y respetadas.

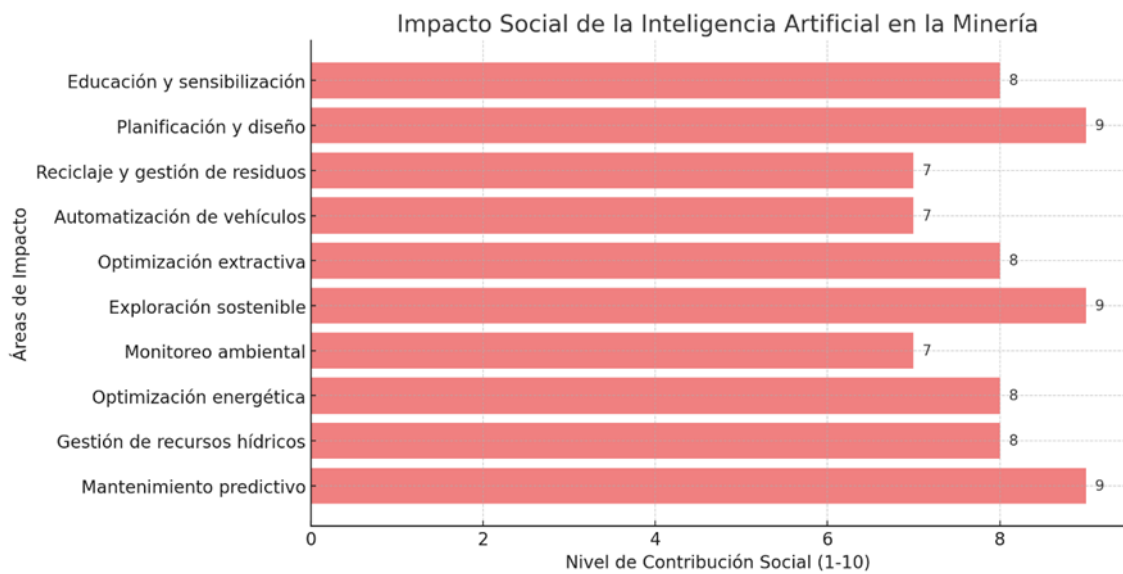
En conjunto, esta tabla evidencia que la inteligencia artificial no solo transforma los procesos productivos en la minería, sino que también impulsa un cambio positivo en el ámbito social, promoviendo el desarrollo humano, la inclusión, la equidad y el respeto a los derechos comunitarios.

3.2.2. Valoración del impacto social de la inteligencia artificial en la minería peruana

La ilustración 2 muestra la valoración del impacto social de la inteligencia artificial en la minería peruana, utilizando una escala del 1 al 10 para representar su nivel de contribución en diferentes áreas clave.

Ilustración 2

Impacto social de la inteligencia artificial en la minería



Nota. Elaboración propia basada en la evaluación cualitativa de diez artículos científicos publicados entre 2020 y 2024. Se utilizó una escala del 1 al 10 para valorar el nivel de contribución social de las aplicaciones de IA en distintas áreas del sector minero.

En la ilustración 5 se observa que la optimización de la seguridad laboral, la sostenibilidad y responsabilidad ambiental y la transparencia y responsabilidad social presentan los valores más altos (9), lo que indica que estas áreas son fundamentales en la transformación positiva de la minería. La IA ha permitido reducir accidentes laborales, mejorar la calidad de vida de las comunidades aledañas y fortalecer la confianza en la industria a través de la transparencia y el cumplimiento de estándares éticos.

Con un impacto ligeramente menor, pero aún significativo (8), se encuentran la automatización de procesos, la capacitación y desarrollo de habilidades, la generación de empleo en nuevas áreas tecnológicas y la participación ciudadana y consulta previa. Estas áreas reflejan cómo la IA está promoviendo una transición hacia un mercado laboral más especializado y digitalizado, reduciendo la exposición a entornos peligrosos y asegurando que las comunidades sean incluidas en la toma de decisiones de las empresas mineras.

Por otro lado, la relación con las comunidades locales, la mejora en la toma de decisiones y la reducción de la brecha digital presentan valores de impacto de 7, lo que muestra que, aunque la IA ha permitido avances en la comunicación con las comunidades y en la toma de decisiones basadas en datos, aún existen desafíos en la implementación de estas tecnologías para lograr un impacto social más profundo y equitativo.

En conjunto, el gráfico refleja que la inteligencia artificial no solo está transformando la eficiencia operativa en la minería, sino que también tiene un impacto positivo en la seguridad, la sostenibilidad, el empleo y la relación con las comunidades. Sin embargo, se evidencia que algunas áreas aún requieren mayor desarrollo e inversión para maximizar su contribución social.

3.2.3. Implementación de camiones autónomos en la mina Quellaveco

La implementación de camiones autónomos en la mina Quellaveco marca un hito en la transformación socialmente sostenible de la minería peruana, demostrando cómo la inteligencia artificial puede ser una herramienta poderosa no solo para la eficiencia operativa, sino también para el bienestar humano dentro de las operaciones extractivas.

Desde una perspectiva de sostenibilidad social, esta innovación tecnológica contribuye significativamente a la reducción de riesgos laborales, ya que disminuye la exposición de los trabajadores a condiciones peligrosas propias del acarreo de material

en minas a tajo abierto. Al delegar estas tareas a sistemas autónomos, se crea un entorno laboral más seguro, lo que refuerza la salud ocupacional y minimiza la ocurrencia de accidentes, uno de los principales desafíos del sector minero.

Asimismo, la incorporación de IA en operaciones como las de Quellaveco promueve una transformación del perfil laboral, generando demanda de nuevas competencias técnicas asociadas a la programación, monitoreo y mantenimiento de sistemas inteligentes. Esto representa una oportunidad para el desarrollo de capacidades digitales en la fuerza laboral local y para la inclusión de jóvenes profesionales en áreas tecnológicas emergentes, fortaleciendo la empleabilidad y diversificación del mercado laboral en zonas tradicionalmente mineras.

Por otro lado, la interconexión entre los vehículos autónomos y la plataforma digital MineStar permite una toma de decisiones basada en datos en tiempo real, lo que no solo mejora la productividad, sino que también aporta transparencia y trazabilidad en los procesos. Este tipo de tecnologías refuerza la responsabilidad social corporativa, al mostrar un compromiso con la innovación que prioriza la seguridad y el desarrollo humano.

En síntesis, el uso de IA en Quellaveco no solo moderniza la actividad minera, sino que actúa como un catalizador de cambio positivo en el tejido social que rodea la operación, aportando a una minería más segura, inclusiva y orientada al bienestar colectivo.

Ilustración 3

Análisis detallado del camión autónomo en la mina Quellaveco



Nota. Extraído de Anglo American Perú.

3.3. Sostenibilidad económica

3.3.1. Impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad minera

La siguiente tabla presenta los principales beneficios económicos derivados de la aplicación de inteligencia artificial en operaciones mineras en el Perú. Se destacan áreas clave como la optimización de procesos, el mantenimiento predictivo, la eficiencia energética y el monitoreo ambiental. Estas tecnologías no solo reducen costos y aumentan la productividad, sino que también fortalecen la sostenibilidad y reputación corporativa de las empresas mineras, generando ventajas competitivas en el sector.

Tabla 6

Impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras

Área de impacto	Descripción	Impacto económico	Referencia
Optimización de procesos operativos	Implementación de IA para mejorar la eficiencia en la exploración, extracción y procesamiento de minerales, reduciendo tiempos y costos operativos.	Disminución de costos operativos. Incremento en la productividad y eficiencia de las operaciones mineras.	Tecnología Minera (2023)
Mantenimiento predictivo	Uso de algoritmos de IA para anticipar fallas en equipos y maquinaria, permitiendo un mantenimiento planificado y evitando interrupciones costosas en la producción.	Reducción de costos asociados a reparaciones inesperadas. Aumento de la disponibilidad y vida útil de los equipos.	Omnia Solution (2023)
Eficiencia energética	Aplicación de IA para optimizar el consumo de energía en las operaciones mineras, reduciendo costos y minimizando el impacto ambiental.	Ahorro en costos de energía. Mejora en la sostenibilidad de las operaciones, alineándose con estándares ambientales.	Gestión (2024)

Monitoreo ambiental en tiempo real	Empleo de IA para supervisar y mitigar impactos ambientales, evitando sanciones y mejorando la relación con comunidades y reguladores.	Evitación de multas y sanciones por incumplimientos ambientales. Mejora en la reputación corporativa, atrayendo inversiones y oportunidades de negocio.	Courret, José (2019)
---	--	--	----------------------

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 6 se analiza el impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras, destacando su papel en la optimización de procesos, reducción de costos y mejora en la reputación corporativa.

Se observa que la optimización de procesos operativos mediante IA tiene un impacto significativo en la reducción de costos operativos y el incremento de la productividad. Al mejorar la eficiencia en exploración, extracción y procesamiento de minerales, se minimizan desperdicios y tiempos improductivos, lo que permite una mayor rentabilidad en las operaciones mineras.

El mantenimiento predictivo también se presenta como un factor clave, ya que el uso de algoritmos de IA para anticipar fallas en maquinaria reduce los costos asociados a reparaciones inesperadas y aumenta la disponibilidad y vida útil de los equipos. Esto contribuye a una gestión más eficiente de los recursos y evita pérdidas económicas derivadas de interrupciones en la producción.

Por otro lado, la eficiencia energética es otro aspecto relevante, dado que la IA permite optimizar el consumo de energía, generando ahorros significativos y alineando las operaciones con estándares ambientales. Esto no solo mejora la sostenibilidad, sino que también reduce gastos en combustibles y electricidad, lo que repercute positivamente en la rentabilidad de las empresas mineras.

Finalmente, el monitoreo ambiental en tiempo real contribuye a la estabilidad financiera de las empresas al ayudar a evitar multas y sanciones por incumplimientos ambientales. Además, mejora la reputación corporativa, lo que puede traducirse en mayor atracción de inversiones y oportunidades de negocio, ya que las empresas con buenas prácticas ambientales tienen mayor aceptación en el mercado y facilidades para acceder a financiamiento.

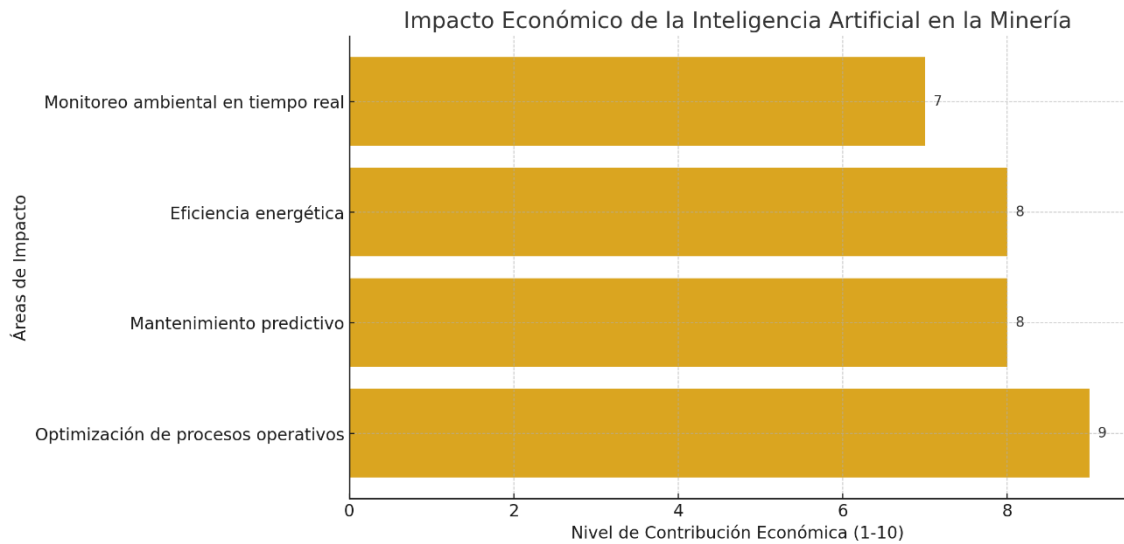
En conjunto, la tabla evidencia que la inteligencia artificial no solo favorece la sostenibilidad ambiental y social en la minería, sino que también representa una ventaja económica al mejorar la eficiencia, reducir costos y fortalecer la imagen de las empresas en el sector.

3.3.2. Valoración del impacto económico de la inteligencia artificial en la minería peruana

La ilustración 4 muestra el nivel de impacto económico de diversas aplicaciones de inteligencia artificial en la minería peruana, utilizando una escala del 1 al 10. Se destacan la optimización de procesos operativos, el mantenimiento predictivo y la eficiencia energética como las áreas con mayor contribución en la reducción de costos y mejora de la productividad. El gráfico evidencia cómo la IA fortalece la sostenibilidad financiera del sector minero al incrementar la eficiencia y mejorar la reputación corporativa.

Ilustración 4

Impacto económico de la inteligencia artificial en la minería



Nota. Elaboración propia a partir de la revisión de estudios técnicos y científicos publicados entre 2020 y 2024. La escala de 1 a 10 representa el nivel estimado de contribución económica de las aplicaciones de IA en cuatro áreas estratégicas del sector minero.

En la ilustración 4 se observa que la optimización de procesos operativos tiene el mayor impacto económico (valor 9), ya que el uso de IA en la exploración, extracción y procesamiento de minerales permite reducir tiempos y costos, aumentando la productividad. Este es un factor clave para la sostenibilidad financiera de las empresas mineras.

El mantenimiento predictivo y la eficiencia energética presentan un impacto alto (valor 8). El mantenimiento predictivo ayuda a evitar fallas imprevistas en equipos, lo que reduce costos de reparación y maximiza la disponibilidad de la maquinaria. Por otro lado, la eficiencia energética permite disminuir los costos de electricidad y combustible, alineando las operaciones con estándares ambientales y mejorando la rentabilidad.

El monitoreo ambiental en tiempo real tiene una contribución económica moderadamente alta (valor 7), ya que ayuda a prevenir sanciones y multas por incumplimientos ambientales. Además, mejora la reputación corporativa de las empresas mineras, lo que puede facilitar el acceso a nuevas inversiones y oportunidades de negocio.

En conjunto, el gráfico refleja que la inteligencia artificial genera un impacto económico positivo en la minería, optimizando procesos, reduciendo costos y fortaleciendo la sostenibilidad operativa. La implementación de estas tecnologías no solo mejora la eficiencia interna de las empresas, sino que también favorece su competitividad en el mercado global.

3.3.3. Comparación entre redes neuronales artificiales y kriging ordinario para la estimación de recursos en un yacimiento de hierro

En este contexto de transformación digital, la estimación precisa de recursos minerales se ha vuelto aún más crucial para la planificación y explotación eficiente de los yacimientos. Tradicionalmente, la geoestadística clásica, representada por métodos como el Kriging Ordinario (KO), ha sido la herramienta principal para modelar la distribución espacial de variables geológicas. Sin embargo, con el avance de la inteligencia artificial, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han emergido como una alternativa prometedora en este ámbito. A continuación, se presenta una aplicación comparativa entre el modelado adaptativo mediante RNA y el KO clásico en un yacimiento de mineral de hierro, evaluando la eficacia y precisión de ambos enfoques en la estimación de recursos.

Para comparar el modelado adaptativo mediante Redes Neuronales Multicapa (RNA) con la geoestadística clásica (Kriging Ordinario, KO) en un yacimiento de mineral de hierro, se empleó inicialmente la Simulación Gaussiana Directa. Este método,

fundamentado en la teoría de funciones de covarianza o semivariogramas, requiere un conjunto de datos previamente recopilados y georreferenciados.

En el análisis variográfico, se adoptó una estructura específica con un efecto pepita de 0.0001 y una meseta de 1. Se definieron alcances de 500 unidades en los ejes mayor y menor, aplicando un enfoque isotrópico. Este análisis es crucial para modelar la correlación espacial de la variable de interés.

La Simulación Gaussiana Directa genera campos de variables espaciales continuas que siguen una distribución gaussiana conocida. La ecuación que describe este proceso es:

$$Z^*(u^*) = \sum (\lambda_i * [Z(u_i) + e(u^*)])$$

Donde:

- $Z^*(u^*)$: valor simulado en la ubicación u^* .
- λ_i : peso asignado al valor $Z(u_i)$ según la distancia y la estructura espacial de los datos.
- $e(u^*)$: valor aleatorio de una distribución gaussiana estándar en la ubicación u^* .

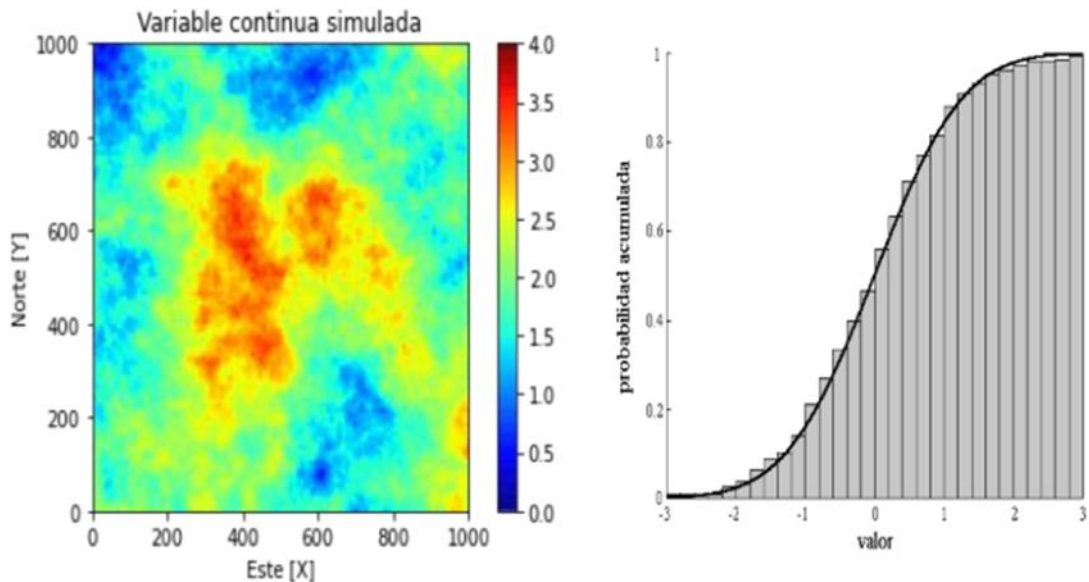
Para cada punto de simulación u^* , se generan valores aleatorios $e(u^*)$ a partir de una distribución gaussiana estándar, representando los errores espaciales. Estos errores se ajustan al variograma $\gamma(h)$ correspondiente a la distancia entre el punto de simulación u^* y los puntos de muestreo u_i . Finalmente, al sumar los valores estimados $Z(u_i)$ a los errores ajustados, se obtienen las realizaciones estocásticas de la variable espacial en los puntos de simulación u^* .

Este enfoque permite capturar la variabilidad espacial inherente al yacimiento, proporcionando una base sólida para comparar la eficacia del modelado adaptativo mediante RNA frente al método tradicional de KO en la estimación de recursos.

A continuación, se presenta una representación gráfica de la simulación de una variable gaussiana estándar y su histograma acumulado experimental.

Ilustración 5

Representación de una variable con distribución normal estándar y su correspondiente histograma acumulado experimental



Nota. Gráfico extraído de Malca, Rojas, Roque, & Sinca (2023).

En segundo lugar, se extrajo una muestra representativa del 40% de la población generada mediante la simulación. Posteriormente, se aplicó un análisis geoestadístico utilizando el método de Kriging Ordinario (KO), una técnica de interpolación que estima valores en ubicaciones no muestreadas basándose en datos de puntos cercanos. La fórmula que rige el KO es: $Z^*(u) = \sum (\lambda_i * Z(u_i))$

donde $Z^*(u)$ representa el valor estimado en la posición u , $Z(u_i)$ denota el valor observado en la posición i , y λ_i corresponde al peso asignado a cada observación, determinado por la distancia y la estructura espacial de los datos.

La asignación de los pesos λ_i se realiza buscando minimizar la varianza de la estimación y la covarianza entre los puntos conocidos y el punto a estimar, asegurando que la suma de estos pesos sea igual a 1. Para determinar estos pesos, se emplean métodos como los mínimos cuadrados o la resolución del sistema de ecuaciones de Kriging, considerando la estructura espacial del conjunto de datos y las características del variograma.

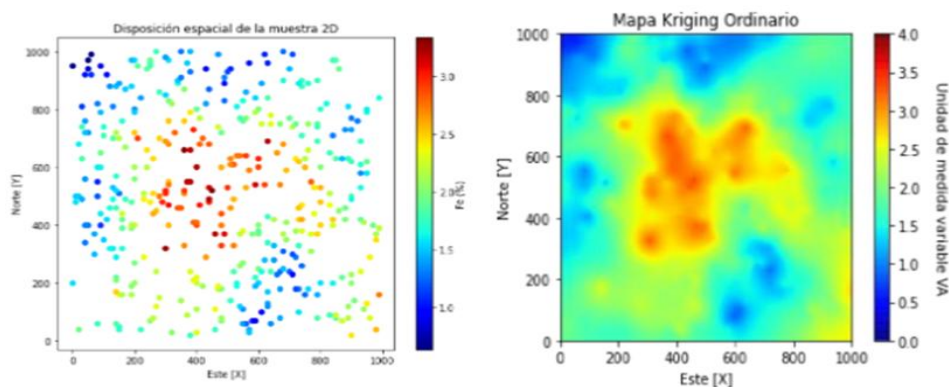
En este análisis variográfico, se utilizó un modelo esférico con una única estructura, caracterizada por un efecto pepita de 0.0001, una meseta de 1 y un alcance isotrópico de 500 metros de radio, con una media de 2.

Este enfoque permitió estimar con precisión los valores en áreas no muestreadas, proporcionando una comprensión detallada de la distribución espacial de la variable estudiada en el yacimiento de mineral de hierro.

Ilustración 6

Muestra base con una cuadrícula de 1 km x 1 km y estimación mediante Kriging

Ordinario

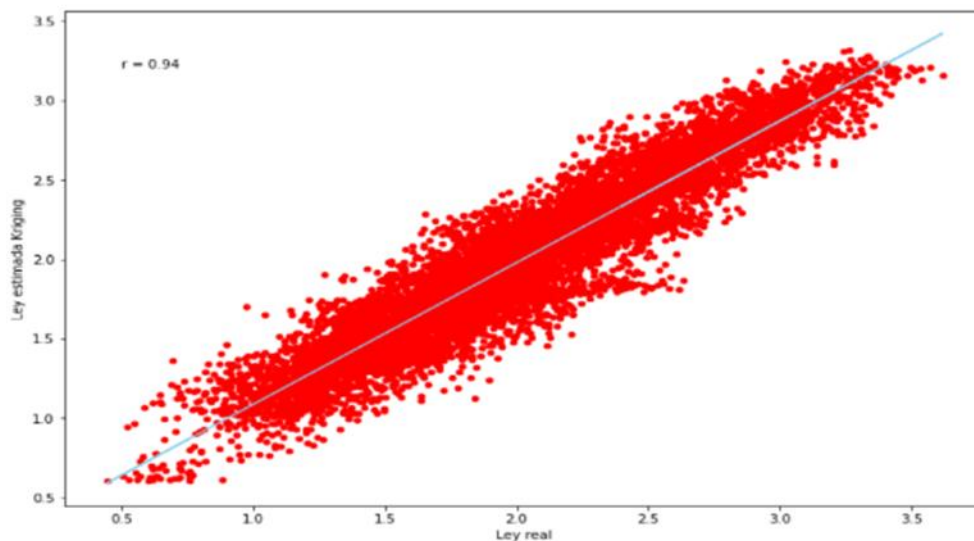


Nota. Gráfico extraído de Malca, Rojas, Roque, & Sinca (2023).

Para evaluar la precisión de las estimaciones obtenidas mediante Kriging Ordinario (KO) en comparación con los valores reales generados por la Simulación Gaussiana Directa (SGD), se realizó una validación cruzada. Este proceso implicó la construcción de un diagrama de dispersión (scatterplot) que confronta las leyes estimadas por KO con las leyes reales derivadas de la SGD. Este enfoque gráfico permite visualizar la correlación y posibles discrepancias entre ambos conjuntos de datos, facilitando la identificación de sesgos o errores sistemáticos en las estimaciones.

Ilustración 7

Gráfico de dispersión que compara las leyes estimadas mediante Kriging Ordinario con las leyes reales obtenidas por Simulación Gaussiana Directa



Nota. Gráfico extraído de Malca, Rojas, Roque, & Sinca (2023).

La aplicación de inteligencia artificial en la estimación de recursos minerales, como se observa en el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA), representa un avance significativo en términos de sostenibilidad económica para la industria minera. A diferencia del enfoque tradicional de Kriging Ordinario (KO), las RNA permiten modelar

patrones complejos no lineales y adaptarse dinámicamente a variaciones en los datos geológicos, mejorando la precisión y confiabilidad de las estimaciones.

Este tipo de tecnología tiene un impacto económico directo al optimizar la planificación de la explotación de yacimientos, minimizando los riesgos asociados a una estimación deficiente de los recursos. Una estimación más precisa reduce la probabilidad de inversiones innecesarias, perforaciones erróneas o sobrecostos en la etapa de producción, lo que se traduce en una mejor eficiencia operativa y reducción de desperdicios.

Además, al capturar de manera más fiel la variabilidad espacial de los yacimientos, las RNA proporcionan una base más robusta para la toma de decisiones estratégicas en exploración y explotación. Esto genera ahorros a largo plazo al evitar sobreestimaciones o subestimaciones de las reservas, lo cual tiene implicancias directas en la rentabilidad de los proyectos mineros.

La incorporación de la IA en esta etapa temprana del ciclo minero también fortalece la competitividad de las empresas, al facilitar una gestión de recursos más precisa, reducir la incertidumbre y mejorar su posicionamiento frente a inversionistas y stakeholders que valoran la eficiencia y sostenibilidad financiera.

En resumen, la inteligencia artificial aplicada a la estimación de recursos no solo transforma los métodos técnicos tradicionales, sino que constituye una herramienta estratégica clave para la sostenibilidad económica del sector minero, impulsando decisiones más informadas, inversiones más seguras y operaciones más rentables.

3.4. Desafíos y oportunidades de la inteligencia artificial en el sector minero peruano

La siguiente tabla identifica los principales desafíos y oportunidades relacionados con la implementación de la inteligencia artificial en la minería del Perú. Entre los retos

destacan la falta de personal especializado, problemas de conectividad, resistencia al cambio y marcos regulatorios insuficientes. A su vez, se presentan oportunidades clave como la optimización operativa, la mejora en seguridad laboral, el impulso a la sostenibilidad ambiental y el fortalecimiento de la competitividad internacional, evidenciando el potencial transformador de la IA en el desarrollo del sector.

Tabla 7

Desafíos y oportunidades para la implementación de la inteligencia artificial (IA) en el sector minero peruano

Aspecto	Descripción	Referencia
Desafíos		
Falta de personal especializado	La escasez de profesionales capacitados en IA y ciencia de datos limita la adopción efectiva de estas tecnologías en la minería peruana.	Beltrán, César (2024)
Calidad y gestión de datos	La ausencia de una cultura sólida en el manejo y estructuración de datos dificulta el entrenamiento de modelos de IA precisos y eficientes.	Beltrán, César (2024)
Infraestructura de comunicación deficiente	La limitada conectividad en regiones mineras remotas impide la implementación de soluciones de IA que requieren transmisión de grandes volúmenes de datos.	Beltrán, César (2024)
Resistencia cultural al cambio	La adopción de IA implica transformaciones en los procesos operativos, lo que puede generar resistencia entre los trabajadores y directivos acostumbrados a métodos tradicionales.	Hinostroza, Kevin (2023)
Regulación y ética insuficientes	La falta de un marco regulatorio claro y códigos de ética específicos para el uso de IA en minería puede conducir a aplicaciones irresponsables o ineficaces.	Castro, Álvaro (2023)
Inversión inicial elevada	La implementación de tecnologías de IA requiere una inversión significativa en infraestructura y capacitación, lo que puede ser una barrera para algunas empresas mineras.	Tecnología Minera (2024)

Oportunidades

Optimización de procesos operativos	La IA permite mejorar la eficiencia en la exploración, extracción y procesamiento de minerales, reduciendo costos y aumentando la productividad.	Tecnología Minera (2023)
Mejora en la seguridad laboral	La automatización de tareas peligrosas mediante IA disminuye el riesgo de accidentes, protegiendo la integridad de los trabajadores.	ProActivo (2024)
Sostenibilidad ambiental	La IA facilita el monitoreo y control de impactos ambientales, promoviendo prácticas mineras más responsables y sostenibles.	Gestión (2024)
Competitividad internacional	La adopción de IA posiciona a las empresas mineras peruanas en un nivel competitivo a nivel global, atrayendo inversiones y oportunidades de negocio.	Cruz,Eva (2023)
Desarrollo de nuevas habilidades	La integración de IA impulsa la capacitación de la fuerza laboral en competencias digitales, fomentando el desarrollo profesional y la adaptación a nuevas tecnologías.	Ramírez, Sebastián (2024)
Eficiencia energética	La IA optimiza el consumo de energía en las operaciones mineras, contribuyendo a la reducción de costos y emisiones de CO ₂ .	Gestión (2024)

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 7 se presentan los desafíos y oportunidades asociados con la implementación de la inteligencia artificial (IA) en el sector minero peruano. Se identifican diversas barreras que limitan la adopción de estas tecnologías, así como los beneficios que su correcta aplicación podría generar en términos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad.

Uno de los principales obstáculos es la falta de personal especializado, ya que la escasez de profesionales capacitados en IA y ciencia de datos dificulta la implementación efectiva de estas tecnologías en la minería peruana. A esto se suma la calidad y gestión

de datos, ya que la ausencia de una cultura sólida en la recopilación y estructuración de información impacta negativamente en el entrenamiento de modelos de IA precisos.

Otro desafío importante es la infraestructura de comunicación deficiente, especialmente en zonas mineras remotas, donde la falta de conectividad complica la transmisión de datos esenciales para soluciones basadas en IA. Asimismo, existe resistencia cultural al cambio, ya que la transformación tecnológica de los procesos operativos puede generar rechazo entre los trabajadores y directivos acostumbrados a métodos tradicionales.

En términos normativos, la regulación y ética insuficientes representan un reto significativo, ya que la falta de un marco regulatorio claro y códigos de ética específicos pueden llevar a aplicaciones irresponsables de la IA. Por último, la inversión inicial elevada también se presenta como una barrera, ya que la implementación de estas tecnologías requiere grandes costos en infraestructura y capacitación, lo que puede ser un obstáculo para algunas empresas mineras.

A pesar de los desafíos, la inteligencia artificial ofrece numerosas oportunidades para transformar el sector minero. Una de las principales ventajas es la optimización de procesos operativos, lo que permite mejorar la eficiencia en la exploración, extracción y procesamiento de minerales, reduciendo costos y aumentando la productividad.

Otra oportunidad clave es la mejora en la seguridad laboral, ya que la automatización de tareas peligrosas mediante IA reduce el riesgo de accidentes y protege la integridad de los trabajadores. Además, la sostenibilidad ambiental se ve beneficiada, pues la IA facilita el monitoreo y control de impactos ambientales, promoviendo prácticas mineras más responsables.

La competitividad internacional también se fortalece con la adopción de IA, permitiendo que las empresas mineras peruanas se posicionen a nivel global, lo que puede atraer inversiones y generar nuevas oportunidades de negocio. Asimismo, la IA impulsa el desarrollo de nuevas habilidades en la fuerza laboral, fomentando la capacitación en competencias digitales y facilitando la adaptación a nuevas tecnologías.

Finalmente, la eficiencia energética es otra ventaja relevante, ya que la IA optimiza el consumo de energía en las operaciones mineras, reduciendo costos y contribuyendo a la disminución de emisiones de CO₂.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Limitaciones

Las limitaciones de la presente investigación se centran principalmente en la disponibilidad de información y en los factores contextuales que afectan la adopción de inteligencia artificial (IA) en la minería peruana. En primer lugar, la escasez de datos primarios actualizados ha dificultado la validación directa de los hallazgos, ya que gran parte de la información proviene de estudios secundarios, reportes sectoriales y literatura disponible. Esto limita el alcance para realizar un análisis más detallado y específico sobre las operaciones mineras locales.

Otra limitación significativa es la falta de personal especializado en IA y ciencia de datos, una situación ya mencionada por Beltrán (2024), que afecta la implementación efectiva de estas tecnologías. La ausencia de profesionales capacitados no solo restringe la adopción, sino que también condiciona la calidad de los sistemas desarrollados, ya que el entrenamiento y gestión de modelos de IA dependen de conocimientos técnicos avanzados.

Asimismo, la calidad y gestión de datos representa un desafío importante. La falta de una cultura sólida de estructuración y análisis de datos en las operaciones mineras dificulta la recolección de información adecuada para entrenar modelos precisos y eficientes. Este aspecto es clave, ya que los sistemas de IA requieren grandes volúmenes de datos limpios y organizados para funcionar de manera óptima.

Por otro lado, la infraestructura de comunicación deficiente en las regiones mineras más remotas del país representa un obstáculo tecnológico. La implementación de soluciones basadas en IA demanda conectividad adecuada para transmitir y procesar

grandes cantidades de información en tiempo real, una condición que actualmente no está garantizada en todas las operaciones mineras peruanas (Beltrán, 2024).

Además, la resistencia cultural al cambio es otra limitación relevante, tal como lo señala Hinostroza (2023). La introducción de tecnologías disruptivas como la inteligencia artificial genera incertidumbre y desconfianza tanto en los trabajadores como en los directivos, quienes suelen estar acostumbrados a métodos operativos tradicionales. Esta resistencia puede ralentizar la adopción y limitar el potencial de mejora en las operaciones.

Finalmente, se identifica la falta de un marco regulatorio claro y códigos de ética específicos para el uso de la IA en la industria minera peruana, como menciona Castro (2023). La ausencia de lineamientos normativos y éticos genera incertidumbre sobre la aplicación responsable y segura de estas tecnologías, lo que puede desalentar la inversión y el desarrollo en este ámbito.

Discusión

Respecto al objetivo específico 1, el cual consiste en analizar la contribución de la inteligencia artificial a la sostenibilidad ambiental en las operaciones mineras peruanas, tenemos que de la aplicación de la ficha de observación (Tabla 4 e Ilustración 1 y 5), la IA contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental mediante la optimización del consumo energético, el mantenimiento predictivo, el monitoreo ambiental en tiempo real y la automatización de maquinaria. Estas aplicaciones permiten disminuir las emisiones de CO₂, reducir residuos, optimizar el uso de recursos hídricos y mejorar la planificación de operaciones.

Este hallazgo concuerda con lo señalado por Carrasco (2021) y el Consejo Minero (2022), quienes sostienen que el uso de modelos predictivos y gemelos digitales ha sido

clave para fomentar la sostenibilidad ambiental en la minería de España y Chile. En este sentido, resulta necesario que el Estado y las empresas peruanas promuevan el uso de estas tecnologías para garantizar el cumplimiento de las normativas establecidas en el D.S. N.º 040-2014-EM, Reglamento de Protección y Gestión Ambiental en las actividades de explotación minera, el cual obliga a mitigar impactos mediante sistemas de gestión ambiental modernos y eficientes.

Respecto al objetivo específico 2, el cual consiste en evaluar el impacto social de la inteligencia artificial en las operaciones mineras peruanas, tenemos que de la aplicación de la ficha de observación (Tabla 5 e Ilustración 5), la IA ha fortalecido la seguridad laboral, reducido accidentes, mejorado la capacitación del personal, promovido nuevas oportunidades laborales y contribuido al fortalecimiento de relaciones con las comunidades locales.

Este hallazgo concuerda con los estudios de Contreras et al. (2023) y Malca et al. (2023), que evidencian los beneficios sociales y de seguridad derivados de la automatización minera. Asimismo, la experiencia de Quellaveco, con la implementación de camiones autónomos, demuestra que la IA no solo incrementa la productividad, sino que también disminuye riesgos. En este sentido, resulta esencial que las empresas mineras desarrollen estrategias de inclusión digital, capacitación continua y participación ciudadana, en concordancia con el D.S. N.º 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería, que promueve condiciones seguras y saludables en el entorno laboral minero.

Respecto al objetivo específico 3, el cual consiste en determinar el impacto económico de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras, se ha evidenciado mediante los datos de la Tabla 6 y la Ilustración 7 que la IA optimiza

procesos operativos, reduce costos, mejora la eficiencia energética y fortalece la reputación corporativa. El uso de mantenimiento predictivo y el monitoreo ambiental en tiempo real contribuyen directamente a reducir gastos y evitar sanciones.

Este resultado está alineado con lo identificado por Pérez-Reyes (2024) y experiencias internacionales como la mina Antapaccay, donde la perforación autónoma ha permitido aumentar la producción y reducir el consumo de combustible. En este contexto, es fundamental fomentar la innovación como política pública y promover incentivos para empresas que implementen tecnologías limpias, alineadas con los lineamientos de la Ley N.º 31814, que promueve el uso de la inteligencia artificial en el Perú como herramienta clave para mejorar la competitividad y sostenibilidad de los sectores productivos, incluyendo el minero.

Respecto al objetivo específico 4, el cual consiste en identificar los principales desafíos y oportunidades para la implementación de la inteligencia artificial en el contexto minero peruano, se destaca que, aunque existen barreras como la inversión inicial elevada, la falta de personal especializado, infraestructura deficiente y escasa regulación, las oportunidades superan a los desafíos. Según la Tabla 7 e Ilustración 8, la IA representa una ventaja competitiva para mejorar la seguridad, sostenibilidad, eficiencia y formación profesional en el sector minero.

Este hallazgo coincide con lo propuesto por Samillan & Castro (2023) y con iniciativas del sector público y privado en países como Canadá y Australia, donde la IA ha transformado las operaciones mineras. En este sentido, es necesario que el Estado peruano acelere la formulación de la Política Nacional de Minería al 2050, que busca incorporar la innovación tecnológica y la sostenibilidad como pilares del desarrollo

minero, y que articule esfuerzos entre el Ministerio de Energía y Minas, CEPLAN y el sector privado.

Al haberse alcanzado los objetivos específicos planteados, se ha logrado el objetivo general, el cual consistió en evaluar el impacto de la inteligencia artificial en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú durante el 2024. Toda vez que se ha comprobado que la IA contribuye positivamente en los ámbitos ambiental, social y económico, a la vez que enfrenta desafíos importantes que requieren una acción articulada entre el Estado, la empresa y la sociedad para garantizar una minería verdaderamente sostenible.

Implicancias

Los hallazgos de la presente investigación presentan implicancias prácticas, teóricas y metodológicas relevantes para la industria minera peruana en su proceso de transformación hacia una operación más sostenible y eficiente mediante la adopción de la inteligencia artificial.

En el ámbito práctico, los resultados subrayan la importancia de implementar tecnologías de inteligencia artificial como una herramienta clave para optimizar procesos operativos, reducir costos y mejorar la productividad en todas las etapas del ciclo minero, desde la exploración hasta el procesamiento de minerales. La evidencia muestra que soluciones como el mantenimiento predictivo, la optimización energética y el monitoreo ambiental en tiempo real no solo contribuyen a la eficiencia económica, sino que también permiten cumplir con normativas ambientales más estrictas y fortalecer la relación con las comunidades locales.

Estas aplicaciones prácticas se alinean con la necesidad urgente de la industria de responder a las demandas actuales de sostenibilidad y responsabilidad social, lo que

puede traducirse en una mejora de la competitividad internacional y en un mayor atractivo para inversionistas globales.

Desde una perspectiva teórica, este estudio amplía la comprensión del papel que desempeña la inteligencia artificial en el desarrollo sostenible del sector minero. Al vincular la IA con la sostenibilidad económica, social y ambiental, los resultados refuerzan teorías previas relacionadas con la transformación tecnológica de la industria y la aplicación del triple resultado final (Elkington, 1997). Además, contribuye al creciente cuerpo de literatura sobre el impacto de tecnologías emergentes en industrias extractivas, particularmente en el contexto peruano, donde los estudios aún son limitados. Este aporte teórico abre nuevas líneas de investigación para explorar en mayor profundidad los factores que facilitan o limitan la adopción efectiva de la IA en entornos complejos como la minería.

En el aspecto metodológico, la presente investigación destaca la relevancia de combinar enfoques cuantitativos y análisis comparativo con estudios previos para generar resultados más robustos y contextualizados. La identificación de desafíos como la falta de infraestructura, la resistencia cultural al cambio y la escasez de personal especializado resalta la necesidad de incluir variables contextuales en futuras investigaciones, así como la incorporación de métodos mixtos que permitan analizar tanto los impactos cuantificables de la IA como las percepciones y actitudes de los actores involucrados. Asimismo, los hallazgos sugieren que las empresas mineras deben adoptar un enfoque integral y planificado en la implementación de la IA. Esto incluye la inversión en programas de capacitación y desarrollo de competencias digitales para la fuerza laboral, la mejora de la infraestructura tecnológica en regiones mineras y la promoción de políticas públicas que faciliten la innovación tecnológica.

Estas medidas no solo abordarán las barreras identificadas, sino que también permitirán un despliegue más efectivo de la IA, maximizando su impacto en términos económicos, ambientales y sociales.

Conclusiones

La presente investigación ha evidenciado que la inteligencia artificial (IA) tiene un impacto significativo en la sostenibilidad de las operaciones mineras en el Perú, contribuyendo con mejoras en los ámbitos ambiental, social y económico. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos específicos que requieren atención para maximizar sus beneficios y garantizar su adopción efectiva en el sector minero peruano.

La IA facilita la optimización del uso de recursos naturales, como el agua y la energía, mediante el monitoreo en tiempo real y la aplicación de algoritmos predictivos. Esta tecnología no solo reduce las emisiones de CO₂ y minimiza la contaminación ambiental, sino que también optimiza los procesos de extracción y procesamiento de minerales. La incorporación de modelos avanzados, como las Redes Neuronales Artificiales, ha demostrado ser más precisa en la estimación de recursos en comparación con métodos geoestadísticos tradicionales, lo que permite una mejor planificación y aprovechamiento sostenible de los yacimientos.

La IA mejora la seguridad laboral al automatizar tareas peligrosas, reduciendo la exposición de los trabajadores a entornos de alto riesgo. Adicionalmente, impulsa el desarrollo profesional mediante la capacitación en competencias digitales, fortaleciendo la adaptabilidad de la fuerza laboral a las nuevas demandas tecnológicas. En el ámbito social, también mejora la relación con las comunidades locales al optimizar la comunicación, fomentar la transparencia y permitir una gestión más eficiente de proyectos de desarrollo social basados en datos precisos. La minería digitalizada también contribuye a reducir la brecha digital en regiones mineras, promoviendo una mayor inclusión tecnológica.

Desde una perspectiva económica, la implementación de IA en las operaciones mineras peruanas ha demostrado incrementar la productividad y eficiencia al optimizar procesos operativos y reducir costos asociados a tiempos de inactividad no planificados mediante el mantenimiento predictivo. Además, la IA mejora la eficiencia energética, lo que no solo disminuye los costos operativos, sino que también alinea las operaciones con estándares ambientales globales. Estas mejoras posicionan al sector minero peruano en un nivel competitivo internacional, atrayendo inversiones y consolidando su sostenibilidad a largo plazo.

A pesar de los beneficios identificados, la implementación de IA en la minería peruana enfrenta barreras significativas. Entre ellas, la falta de personal especializado en IA y ciencia de datos, la infraestructura de comunicación deficiente en regiones remotas y la resistencia cultural al cambio en los procesos operativos. Además, la ausencia de regulaciones específicas sobre IA genera incertidumbre en su aplicación dentro del sector minero. No obstante, las oportunidades que ofrece la IA en la minería son considerables. La optimización de procesos operativos, la mejora en la seguridad laboral y el fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental son factores clave para su adopción. Para maximizar estos beneficios, es fundamental fomentar la capacitación de la fuerza laboral, invertir en infraestructura tecnológica y establecer marcos regulatorios claros que respalden la implementación de IA en la minería peruana.

REFERENCIAS

- Aznar, J. A., Velasco, J. F., Belmonte, L. J., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). Innovation and technology for sustainable mining activity: A worldwide research assessment. *Journal of Cleaner Production*, 221, 38-54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.243>.
- Porter, M. E., & Van der Linde, C. (1995). Green and competitive: ending the stalemate. En E. Elgar (Ed.). *The Dynamics of the Eco-efficient Economy* (pp. 120-134). British Library.
- Kerlinger, F. N. y Lee, H. B. (2002). *Investigación del comportamiento. Métodos de investigación en ciencias sociales* (4ª ed.). México: McGraw-Hill. P. 124.
- Carrasco, D. (2021). *La inteligencia artificial en la investigación minera*.
- Chen, C., Chung, E., & Correa, N. (2023). La inteligencia Artificial y su Impacto en la Industria de la Ingeniería. *Revista Especializada de Ingeniería y Ciencias de la Tierra*, 26-41.
- Contreras, K., Vásquez, E., Lazo, W., & Torres, M. (febrero de 2023). Efecto mediador de la sostenibilidad en la inteligencia artificial y la optimización de procesos mineros. Surco.
- Creswell, J. (2015). Research Design. Qualitative, quantitative and mixed methods approaches. *Revista Peruana de Investigación Educativa*, 185-189.
- De Echave, J., Diez, A., Huber, L., Revesz, B., Lanata, X., & Tanaka, M. (2009). *Minería y conflicto social*. Lima: CBC, CIPCA, CIES, IEP.
- Escudero, W., Guadalupe, E., Romero, A., & Vásquez, S. (2023). El impacto de la minería en el desarrollo económico y social de la región sur del Perú del 2007 al 2020. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, XXVI(51). [doi:https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25261](https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i51.25261)

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A.
- Jung, D., & Choi, Y. (2021). Systematic Review of Machine Learning Applications in Mining: Exploration, Exploitation, and Reclamation. *Minerals*, 148.
- López, P. (2004). Población muestra y muestreo. *Punto Cero, Cochabamba*, 69-74.
- Malca, L., Rojas, A., Roque, W., & Sinca, G. (2023). Inteligencia artificial y automatización, presente y futuro en la minería peruana. *MINERÍA*.
- Paredes, O., Jiménez, L., Dávila, J., & Apaza, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 56-66.
- Samillan, P., & Castro, E. (2023). Framework para la Detección Anticipada de Fallas de Equipos Mineros Mediante el Uso de Machine Learning.
- Mohammadi, V., & Minaei, S. (2019). Artificial intelligence in the production process. In *Engineering tools in the beverage industry*. Woodhead Publishing. 27-63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815258-4.00002-0>.
- Chaturvedi, D. K. (2008). *Technique and its applications in electrical engineering*. Springer.
- Avneet, M. (2015). Artificial intelligence and its application in different areas. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 79- 84.
- Crevier, D. (1993). *AI. the tumultuous history of the search for artificial intelligence*. BasicBooks.
- Devang, V., Chintan, S., Gunjan, T., & Krupa, R. (2019, April). Applications of artificial intelligence in marketing. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati: Fascicle I, Economics and Applied Informatics*, 25(1), 28-36. <https://doi.org/10.35219/eai158404094>.
- Ali, D., & Frimpong, S. (2020). Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector.

- Springer Nature, (53), 6025-6042. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09841-6>.
- Lee, S., & Oh, H.J. (2011). Application of artificial neural network for mineral potential mapping. *Artificial Neural Networks-Applications: Shanghai, In Tech*, (PP. 67-91).
- Mitra, R., & Saydam, S. (2014). Can artificial intelligence and fuzzy logic be integrated into virtual reality applications in mining?. *The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114, 1009-1016. Recuperado de http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222562532014001200010.
- Ouanan, H., & Abdelwahed, H. (2019, December 26 -27). Image processing and machine learning applications in mining industry: Mine 4.0 [Conference presentation abstract]. *International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS)*, Taza, Morocco. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9068884>
- Hyder, Z., Siau, K., & Nah., F.F.H. (2018). Use of artificial intelligence, machine learning, and autonomous technologies in the mining industry. *MWAIS 2018 Proceedings*. 43. Recuperado de <https://aisel.aisnet.org/mwais2018/43>.
- Okada, N., Maekawa, Y., Owada, N., Haga, K., Shibayama, A., & Kawamura, Y. (2020). Automated Identification of Mineral Types and Grain Size Using Hyperspectral Imaging and Deep Learning for Mineral Processing. *Minerals*, 10(9), 809. <https://doi.org/10.3390/min10090809>.
- Bangian, A. H., Ataei, M., Sayadi, A. R., & Gholinejad, A. (2011). Fuzzy analytical hierarchy processing to define optimum post mining land use for pit area to clarify reclamation costs. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 27, 145-168. Recuperado de <https://bibliotekanauki.pl/articles/216526>.
- Hilson, G., & Murck, B. (2000). Sustainable development in the mining industry: clarifying the corporate perspective. *Resources Policy*, 26(4), 227-238. [https://doi.org/10.1016/S0301-4207\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(00)00041-6).

- Bichueti, R. S., Gomes, C. M., Kruglianskas, I., Kneipp, J., Barbieri da Rosa, L.A., & Frizzo, K. (2021, May). Does sustainable water management affect business performance in the Brazilian mining industry? *Environmental Quality Management*, 31(2), 9-4. <https://doi.org/10.1002/tqem.21725>.
- Fonseca, L., & Carvalho, F. (2019). The reporting of SDGs by quality, environmental, and occupational health and safety-certified organizations. *Sustainability*, 11(20). <https://doi:10.3390/su11205797>.
- Dubiński, J. (2013). Sustainable development of mining mineral resources. *Journal of Sustainable Mining*, 12(1), 1-6. <https://doi.org/10.7424/jsm130102>.
- Pocomucha, K., & Venegas, C. (2021). Nivel de cumplimiento de información medioambiental en los reportes de sostenibilidad en sector minería y energía de empresas peruanas y chilenas. *Contabilidad y Negocios*, 16(31), 71-94. <https://doi.org/10.18800/contabilidad.202101.005>.
- More, K. S., Wolkersdorfer, C., Kang, N., & Elmaghraby, A. S. (2020). Automated measurement systems in mine water management and mine workings—a review of potential methods. *Water Resources and Industry*, 24 (2020), 100136. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100136>.
- Gutiérrez-Rúa, J., Posada-García, M.D., & González-Pérez, M.A. (2019). Prácticas de recursos humanos que impactan la estrategia de sostenibilidad ambiental. *Innovar. Revista de ciencias administrativas y sociales*. 29(73), 11-24. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/26669268>.
- Adomako, S., & Tran, M. D. (2021). Sustainable environmental strategy, firm competitiveness, and financial performance: Evidence from the mining industry. *Elsevier*, 75, 3-4.
- Warhurst, A. (2001). Corporate citizenship and corporate social investment: drivers of tri-sector partnerships. *Journal of corporate citizenship*, (1), 57-73. Recuperado de <http://www.jstore.org/stable/jcorpciti.1.57>.

ANEXOS

ANEXO N.º 1. Ficha de observación documental

Área de análisis	Indicador de observación	Fuente	Observación
Sostenibilidad ambiental	Uso de IA para optimización de recursos hídricos (monitoreo en tiempo real del uso de agua).	Informes de sostenibilidad, artículos.	
	Implementación de IA en eficiencia energética (reducción del consumo de energía y emisiones de CO ₂).	Estudios de caso, reportes técnicos.	
Sostenibilidad social	Monitoreo ambiental basado en IA (control de relaves, emisiones y recursos naturales).	Documentos científicos, tesis.	
	Implementación de IA para automatización de tareas peligrosas (reducción de accidentes laborales).	Informes de seguridad minera.	
	Uso de IA en capacitación de trabajadores (desarrollo de competencias digitales).	Programas de formación documentados.	
Sostenibilidad económica	Aplicación de IA en comunicación con comunidades (proyectos de desarrollo social).	Reportes sociales, estudios académicos.	
	Aplicación de IA en mantenimiento predictivo (reducción de costos operativos y tiempos de inactividad).	Estudios de caso, informes económicos.	
	Uso de IA en optimización de procesos operativos (extracción, procesamiento de minerales).	Reportes sectoriales, artículos.	
	Implementación de IA para toma de decisiones estratégicas basadas en análisis de datos.	Tesis, estudios económicos.	

ANEXO N.º 2. Lista de cotejo

Criterios evaluados	Sí	No	Observaciones
Sostenibilidad ambiental			
¿Se utilizan sistemas de IA para el monitoreo en tiempo real del uso de agua?			
¿Se aplican algoritmos predictivos para optimizar la eficiencia energética y reducir emisiones?			
¿Existen sistemas de monitoreo ambiental automatizados (control de relaves y calidad del aire)?			
Sostenibilidad social			
¿Se han implementado sistemas de IA para la automatización de tareas peligrosas?			
¿Se desarrollan programas de capacitación para trabajadores enfocados en el uso de tecnologías IA?			
¿Se utiliza IA para mejorar la comunicación y transparencia con comunidades locales?			
Sostenibilidad económica			
¿Se aplican modelos de IA para mantenimiento predictivo de equipos?			
¿Se utilizan algoritmos de IA para optimizar la productividad en la extracción y procesamiento?			
¿Se implementan herramientas de IA para análisis de datos en la toma de decisiones estratégicas?			