Minería y Geología / v.42 /2026/ e004 ISSN 1993 8012

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Tecnologías en Minería subterránea: Una revisión bibliométrica

Technologies in Underground Mining: A Bibliometric Review

Pedro Alejandro Vásquez-Maldonado[1]*, Wagner Enoc Vicente-Ramos[1]

[1]Universidad Nacional de Cañete, Peru

*Autor para la correspondencia: 48300029@undc.edu.pe

Resumen

Este estudio presenta una revisión bibliométrica global de tecnologías aplicadas a la minería subterránea basada en registros Scopus publicados entre 2016 y 2025. Se analizaron un total de 739 documentos utilizando Bibliometrix/BiblioShiny a través de análisis de desempeño y mapeo científico. La revisión examinó las tendencias de publicación, las principales fuentes, los autores, los países, los patrones de colaboración, la dinámica de las palabras clave y la estructura temática. Los resultados muestran un crecimiento sostenido en el campo, con un marcado aumento después de 2019 y una fase de alta producción en los últimos años. La producción científica está liderada por China e India, seguidas de Estados Unidos y Australia, dentro de un panorama geográficamente concentrado pero conectado internacionalmente. Los canales de publicación son amplios y no hegemónicos, mientras que la autoría permanece descentralizada. La estructura temática revela un núcleo consolidado en torno a la minería subterránea, la minería, el Internet de las cosas y la automatización, junto con la rápida expansión de temas relacionados con la inteligencia artificial, especialmente el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo. En general, la evidencia sugiere una transición de aplicaciones tecnológicas aisladas hacia sistemas digitales más integrados para monitoreo, predicción, control, logística y seguridad. Este estudio proporciona una base estructurada para comprender la evolución del campo, y describe una agenda futura centrada en la estandarización de datos, la validación de múltiples minas, la ciberseguridad en entornos 5G/edge y los gemelos digitales para operaciones subterráneas más seguras y eficientes.

Palabras clave: bibliometría, minería subterránea, automatización, internet de las cosas, aprendizaje automático, gemelo digital

Abstract

This study presents a global bibliometric review of technologies applied to underground mining based on Scopus records published between 2016

and 2025. A total of 739 documents were analyzed using Bibliometrix/BiblioShiny through performance analysis and science mapping. The review examined publication trends, leading sources, authors, countries, collaboration patterns, keyword dynamics, and thematic structure. The results show sustained growth in the field, with a marked rise after 2019 and a high-output phase in recent years. Scientific production is led by China and India, followed by the United States and Australia, within a geographically concentrated but internationally connected landscape. Publication channels are broad and non-hegemonic, while authorship remains decentralized. The thematic structure reveals a consolidated core around underground mining, mining, the Internet of Things, and automation, together with the rapid expansion of artificial intelligence-related topics, especially machine learning and deep learning. Overall, the evidence suggests a transition from isolated technological applications toward more integrated digital systems for monitoring, prediction, control, logistics, and safety. This study provides a structured baseline for understanding the evolution of the field and outlines a future agenda centered on data standardization, multi-mine validation, cybersecurity in 5G/edge environments, and digital twins for safer and more efficient underground operations.

Keywords: bibliometrics, underground mining, automation, internet of things, machine learning, digital twin

1. INTRODUCCIÓN

La minería subterránea sustenta cadenas industriales estratégicas que abarcan desde los metales necesarios para la transición energética hasta fertilizantes y materiales críticos. Sin embargo, opera en entornos que ejercen una presión considerable sobre la seguridad, la productividad y los costos: geometrías complejas, visibilidad reducida, ausencia de posicionamiento GNSS, altas exigencias de conectividad y restricciones geomecánicas. En este contexto, varias tecnologías han transitado desde proyectos piloto hacia plataformas operativas de base, entre ellas la automatización de carguío y acarreo, la percepción y cartografía tridimensional, la conectividad IoT/5G y las herramientas analíticas, como la inteligencia artificial aplicada al control y la predicción (Xiao *et al*., 2022; Yu *et al*., 2025).

El estado actual del arte puede organizarse en tres áreas. La primera corresponde a la automatización del acarreo mediante equipos LHD inteligentes. Las revisiones técnicas e industriales describen la transición desde LHD teleoperados hacia esquemas de autonomía funcional, incorporando arquitecturas de percepción multisensorial (LiDAR/visión/ RGB-D), planificación de trayectorias, diagnóstico y supervisión humana.

Asimismo, documentan mejoras en la utilización de los equipos y en la seguridad al retirar al operador de la primera línea de exposición. Además, en ambientes de baja visibilidad, el empleo de visión estereoscópica y algoritmos topológicos permite detectar y segmentar pilas de material estéril para determinar puntos óptimos de ataque y ejecutar ciclos de carguío completamente automáticos, como se ha demostrado en minas reales (Hennen *et al*., 2025). La segunda área comprende la percepción, localización y cartografía en entornos sin GNSS. Se consolidan soluciones SLAM 2D/3D que integran LiDAR-IMU, registro de nubes de puntos scan-to-map y filtros bayesianos para la localización global en galerías repetitivas, validadas en minas en operación (Baek *et al*., 2022). De forma paralela, los sistemas RTLS basados en UWB/LoRa/BLE y las redes 5G/edge mejoran el seguimiento de flotas y personal. También se exploran sensores hápticos bioinspirados (bigotes artificiales) para mantener la conciencia situacional en presencia de polvo o niebla, complementando la fusión sensorial óptica y de radar (Gomez *et al*., 2024; P. Zhang & Zhao, 2025). Finalmente, la tercera área se relaciona con la analítica y la inteligencia artificial para el control de procesos y la geotecnia. Los modelos de aprendizaje automático y los ensambles híbridos permiten predecir la velocidad pico de partícula (PPV) en voladuras subterráneas, separar componentes direccionales y reducir daños al personal y a la infraestructura (Tao *et al*., 2024). En términos de costos y cumplimiento geométrico, la predicción de sobreexcavación y subexcavación, junto con la optimización de los parámetros de perforación y voladura, disminuye la dilución y los retrabajos; la literatura reciente amplía estos enfoques a pilares de carbón y a la deformación del macizo rocoso mediante marcos de aprendizaje supervisado (Anticona-Cueva *et al*., 2024).

Este tríptico se amplía con líneas que escalan la "fábrica subterránea": 5G/IoT, enjambres robóticos en frentes carboníferos y gemelos digitales para la coordinación, acompañados por una agenda de estandarización y control cooperativo (Huang *et al*., 2024); computación de borde, que aproxima la percepción y la toma de decisiones a la fuente de datos (He *et al*., 2025); y estandarización de bases de datos de transporte para diseñar monorrieles suspendidos y evaluar sistemáticamente la capacidad de tracción (Pääkkönen *et al*., 2024). En seguridad operacional se reportan inspecciones y monitoreo de gases mediante robots de campo y plataformas autónomas para ambientes explosivos (Nordström *et al*., 2025), así como sistemas de información basados en sensores para identificar ineficiencias y comportamientos de riesgo durante la operación (Brodny & Tutak, 2022). La evidencia convergente apunta a cuatro beneficios: seguridad, al reducir la exposición humana y fortalecer la conciencia situacional; productividad, mediante menores tiempos improductivos en el ciclo LHD y rutas

optimizadas; energía, mediante ventilación bajo demanda y control de cargas; y costos, mediante menor dilución, menos reprocesos y menor daño a la infraestructura (Anticona-Cueva *et al*., 2024; Hennen *et al*., 2025; Tao *et al*., 2024; Xiao *et al*., 2022).(Huang *et al*., 2024)

No obstante, esta transición tecnológica enfrenta brechas que la bibliometría permite visibilizar. En el plano técnico, persisten cuellos de botella en la interoperabilidad semántica, la ciberseguridad derivada de la expansión de la superficie de ataque en entornos 5G/edge y la robustez de la percepción bajo polvo o agua, donde los sensores alternativos, el radar y la háptica aún requieren validación en múltiples minas (Gomez *et al*., 2024; Zhang & Zhao, 2025). En el plano organizacional, existen déficits de datos etiquetados, sesgos de evaluación por sitio único y desafíos de gestión del cambio, como capacidades digitales, rediseño de procesos y roles de supervisión. A ello se suman asimetrías entre países líderes tecnológicos, como Australia o la Unión Europea, y contextos de adopción acelerada observados principalmente en América Latina o Asia, con trayectorias distintas de estandarización. Además, los estudios sobre comunicaciones subterráneas muestran que la selección de portadoras como UWB/LoRa/BLE/5G y su arquitectura de despliegue determinan la precisión, la latencia y el consumo, afectando directamente la viabilidad de la autonomía y de los sistemas RTLS de alta fidelidad (Han *et al*., 2025; Ikeda *et al*., 2022; Nguyen *et al*., 2023; Pakkala *et al*., 2025; Stefaniak *et al*., 2023).

Las preguntas de investigación son las siguientes:

1. ¿Cuántos estudios se han publicado a lo largo de los años?
2. ¿Quiénes son los autores más activos en el campo?
3. ¿Qué revistas científicas han publicado más sobre este tema?
4. ¿Qué niveles de colaboración se han establecido entre autores, instituciones, países, entre otros?
5. ¿Cuáles son los documentos más citados a escala mundial?
6. ¿Desde qué áreas del conocimiento se ha desarrollado la investigación?

Sobre la base de lo anterior, el objetivo principal de este estudio es realizar un análisis bibliométrico del estado actual de la investigación sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea. De este modo, la revisión busca orientar a ingenieros y responsables de operaciones en el diseño de portafolios tecnológicos que maximicen la seguridad y la productividad, y que consoliden una minería subterránea más predecible, eficiente y segura.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estrategia de búsqueda

Esta revisión bibliométrica se realizó utilizando Scopus como única fuente de datos, debido a que ofrece una amplia cobertura multidisciplinaria y metadatos bibliográficos estandarizados en ingeniería de minas, automatización, sensado, robótica e informática aplicada. Esto mejora la consistencia durante el procesamiento bibliométrico y, al mismo tiempo, evita el solapamiento que con frecuencia se produce al combinar registros procedentes de diferentes bases de datos. La búsqueda se efectuó el 25 de octubre de 2025, y la ventana temporal se restringió al período 2016-2025. Dado que la extracción se realizó antes de finalizar 2025, los registros indexados para ese año se consideraron parciales y se interpretaron con cautela.

La búsqueda se aplicó en los campos TITLE-ABS-KEY, combinando el contexto de la minería subterránea con descriptores asociados a tecnologías digitales y de automatización. La ecuación utilizada fue TITLE-ABS-KEY ("underground mining" OR "underground mine") AND TITLE-ABS-KEY ("artificial intelligence" OR digitalization OR automation OR tele-remote OR robotics OR "Internet of Things" OR "digital twin" OR "machine learning" OR "deep learning" OR "Industry 4.0" OR "Mining 4.0" OR "smart mining" OR "IoT") AND NOT TITLE-ABS-KEY ("open-pit" OR "civil tunnels"). Además, la búsqueda se restringió a PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2026, PUBSTAGE = final, idioma inglés y los tipos documentales artículo, revisión, comunicación en congreso y capítulo de libro. Se conservaron descriptores amplios como "digitalization", "Industry 4.0", "Mining 4.0" y "smart mining", porque se emplean con frecuencia en la literatura como términos paraguas que capturan procesos integrados de transformación digital en minería, incluidos automatización, conectividad, sensado y sistemas ciberfísicos; no obstante, su combinación con el bloque de minería subterránea preservó la especificidad temática.

La búsqueda inicial recuperó 1 165 registros. Tras aplicar los filtros predefinidos, se excluyeron 426 registros correspondientes a años de publicación fuera del período objetivo, etapa de publicación distinta de final, idioma diferente del inglés y tipos documentales no incluidos en los criterios de selección. El conjunto final estuvo compuesto por 739 registros incorporados al análisis bibliométrico (Figura 1). Debido a que el estudio se basó en una única búsqueda realizada exclusivamente en Scopus y exportada una sola vez, no se identificaron registros duplicados.

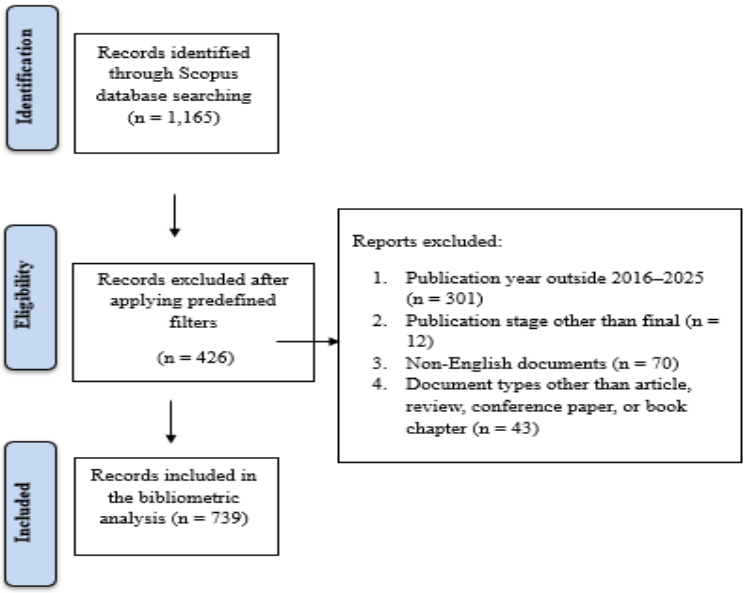


Figura 1. Diagrama de flujo que muestra el proceso de obtención de los registros finales según el modelo PRISMA.

2.2. Análisis de datos

Los registros se exportaron desde Scopus en formato CSV y se procesaron en Bibliometrix mediante la interfaz BiblioShiny. El análisis combinó indicadores de desempeño con mapeo científico, lo que permitió describir la evolución del campo y, al mismo tiempo, examinar sus patrones de colaboración y su estructura temática. El análisis de desempeño se centró en la producción científica anual, las fuentes más relevantes, los autores más productivos, los documentos más citados y las principales áreas de publicación representadas en el conjunto de datos.

El mapeo científico se utilizó para examinar redes de coautoría a nivel de autores, instituciones y países, junto con patrones de coocurrencia de palabras clave, con el fin de identificar temas dominantes, estructuras relacionales y líneas emergentes de investigación dentro de las tecnologías aplicadas a la minería subterránea. La evolución temática se evaluó en tres períodos comparables: 2016-2019, 2020-2022 y 2023-2025, lo que permitió interpretar el campo en términos de adopción temprana, aceleración y consolidación posterior. Para preservar la claridad interpretativa y evitar visualizaciones fragmentadas, se aplicaron umbrales conservadores en los análisis de redes; asimismo, se utilizó conteo completo y la normalización se realizó mediante fuerza de asociación, garantizando una lectura consistente de los vínculos en los mapas y estructuras temáticas.

La decisión de trabajar con Scopus como fuente única respondió no solo a su amplitud de cobertura, sino también a la necesidad de asegurar consistencia de metadatos, comparabilidad entre registros y un flujo de trabajo bibliométrico más limpio. Aun así, esta elección pudo excluir estudios relevantes indexados exclusivamente en otras bases de datos, como Web of Science, lo cual debe reconocerse como una limitación del estudio.

3. RESULTADOS

3.1. Evolución de la producción científica

La investigación sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea mostró una trayectoria claramente ascendente durante el período de estudio, al pasar de una etapa inicial de producción limitada a una expansión sostenida en los años recientes. El fuerte incremento posterior a 2019 sugiere que el campo ganó visibilidad a medida que los enfoques digitales y orientados a la automatización se integraron con mayor firmeza en la investigación sobre minería subterránea. Aunque en 2025 se observa una ligera disminución, el patrón general continúa indicando una etapa consolidada de alta producción, más que una contracción, especialmente si se considera que los registros del último año estaban solo parcialmente indexados en el momento de la extracción de los datos. En conjunto, la tendencia anual refleja un campo que ha transitado desde un desarrollo gradual hacia un crecimiento científico acelerado y sostenido (Figura 2).

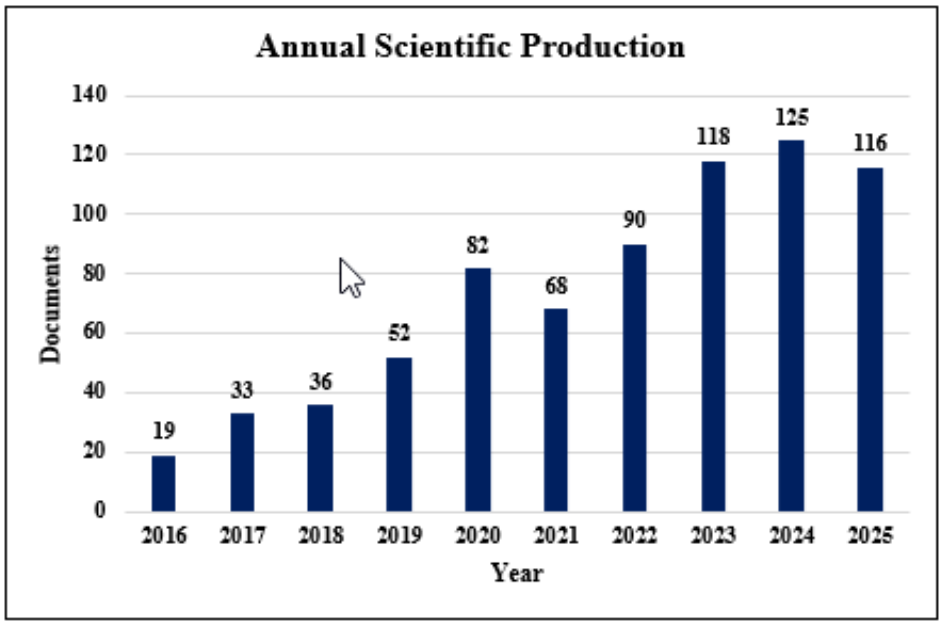


Figura 2. Producción científica anual sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea en Scopus entre 2016 y 2025, que muestra un aumento marcado después de 2019 y una fase sostenida de alta producción en los años más recientes.

3.2. Revistas más productivas

El panorama de publicación es amplio y solo moderadamente concentrado, lo que sugiere que la investigación sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea se difunde a través de un conjunto diverso de canales, y no mediante una única revista dominante. Aunque Applied Sciences (Switzerland) y Sensors ocupan las primeras posiciones, su participación sigue siendo limitada en relación con el corpus total, mientras que el resto de la producción se distribuye entre revistas y memorias de congresos vinculadas con ingeniería de minas, automatización, robótica, sensado e inteligencia artificial aplicada. Este patrón es coherente con un campo que aún se expande a través de fronteras disciplinares, donde el desarrollo tecnológico se conecta no solo con publicaciones específicas de minería, sino también con plataformas más amplias de ingeniería e innovación digital (Figura 3).

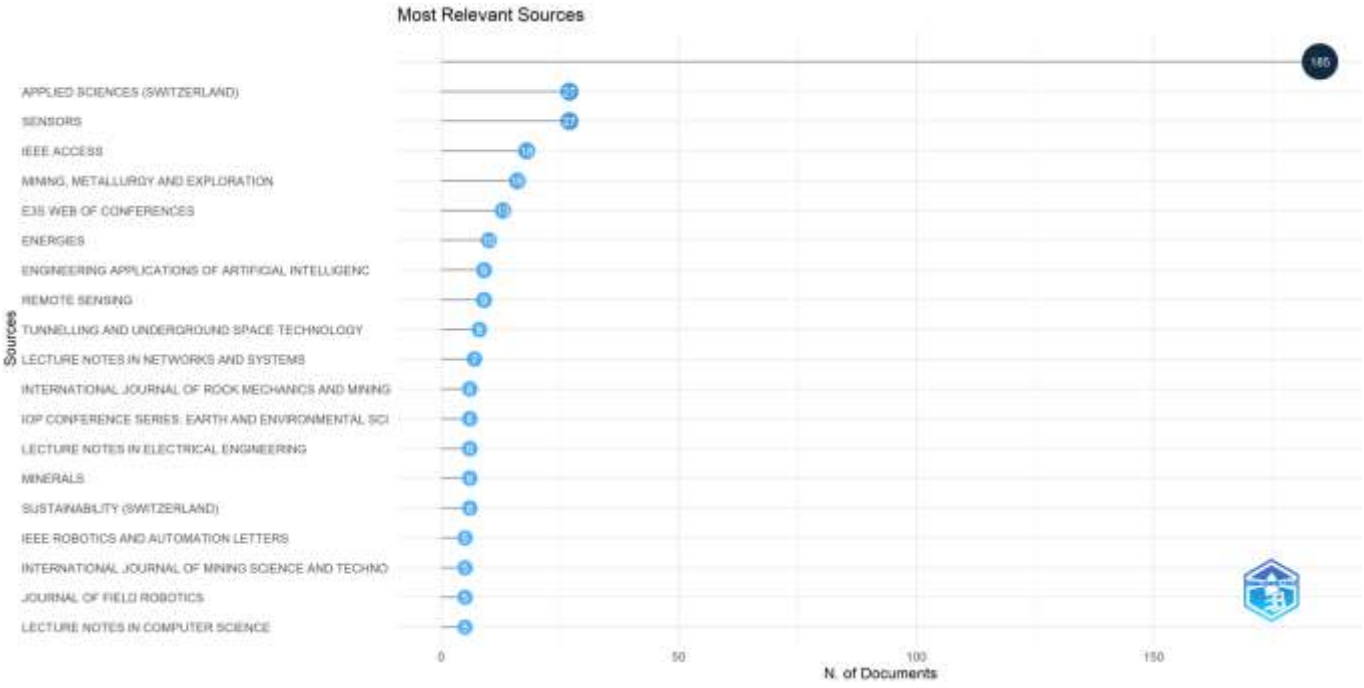


Figura 3. Fuentes de publicación más relevantes en el corpus de Scopus sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea, que muestran un patrón de difusión disperso liderado por Applied Sciences (Switzerland) y Sensors, con contribuciones adicionales de revistas y eventos vinculados con minería, automatización, sensado y congresos.

3.3. Autores más relevantes

La autoría en este campo aparece descentralizada, en lugar de estar dominada por un pequeño núcleo de investigadores altamente prolíficos.

Aunque algunos autores destacan en las primeras posiciones, la diferencia entre ellos y el resto es relativamente pequeña, lo que sugiere que la producción científica se distribuye entre varios contribuyentes activos, y no se concentra en un único grupo líder. Este patrón es coherente con la naturaleza interdisciplinaria de las tecnologías aplicadas a la minería subterránea, donde los avances emergen de la convergencia entre ingeniería de minas, automatización, robótica, sensado e inteligencia artificial, favoreciendo así una estructura de autoría amplia y diversificada (Figura 4).

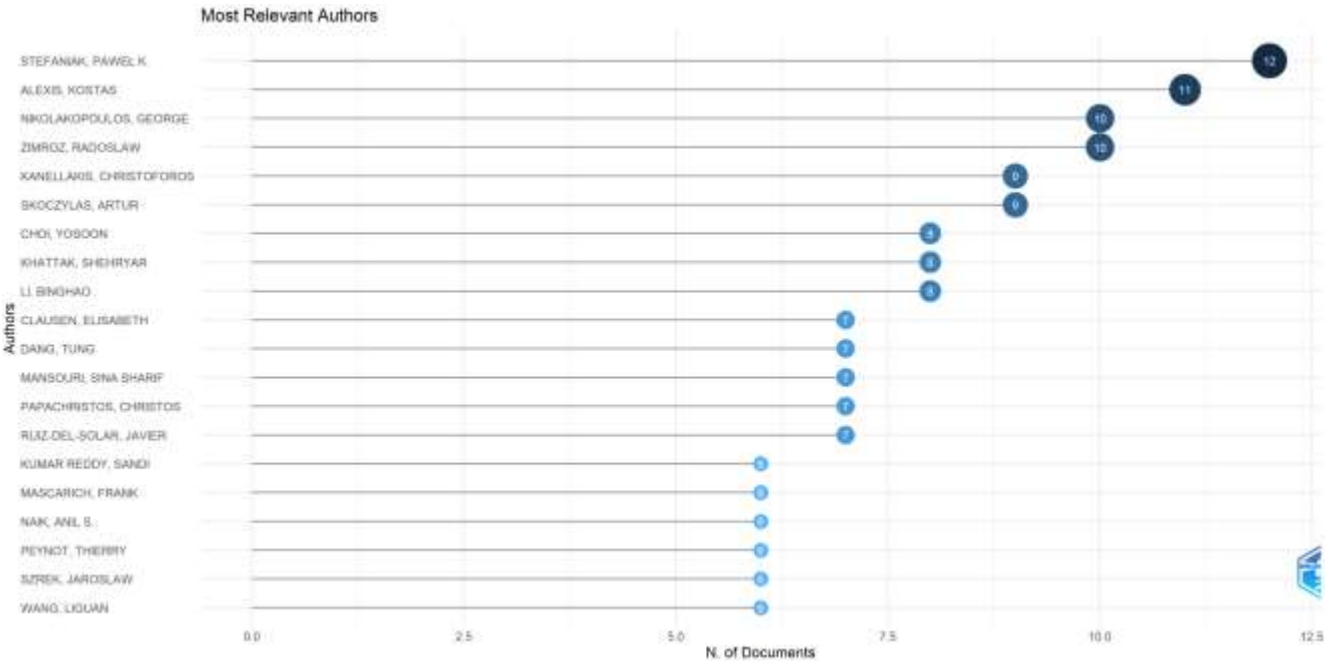


Figura 4. Autores más relevantes en el corpus de Scopus sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea, que muestran un patrón de productividad descentralizado, con varios autores que contribuyen activamente.

3.4. Producción científica por país

La colaboración internacional en tecnologías aplicadas a la minería subterránea muestra una estructura claramente conectada, aunque no uniforme. Los vínculos más fuertes se concentran alrededor de un conjunto limitado de países que actúan como nodos de articulación, especialmente en el ámbito Asia-Pacífico, mientras que otras naciones participan con menor intensidad. Más que un panorama fragmentado, el mapa sugiere un campo organizado mediante corredores interregionales que conectan Asia con Norteamérica, Europa y Oceanía. Este patrón indica que la producción de conocimiento en el área no solo está geográficamente dispersa, sino que también se encuentra cada vez más moldeada por asociaciones

internacionales estratégicas en torno a la automatización, el sensado, la infraestructura digital y las tecnologías mineras aplicadas (Figura 5).

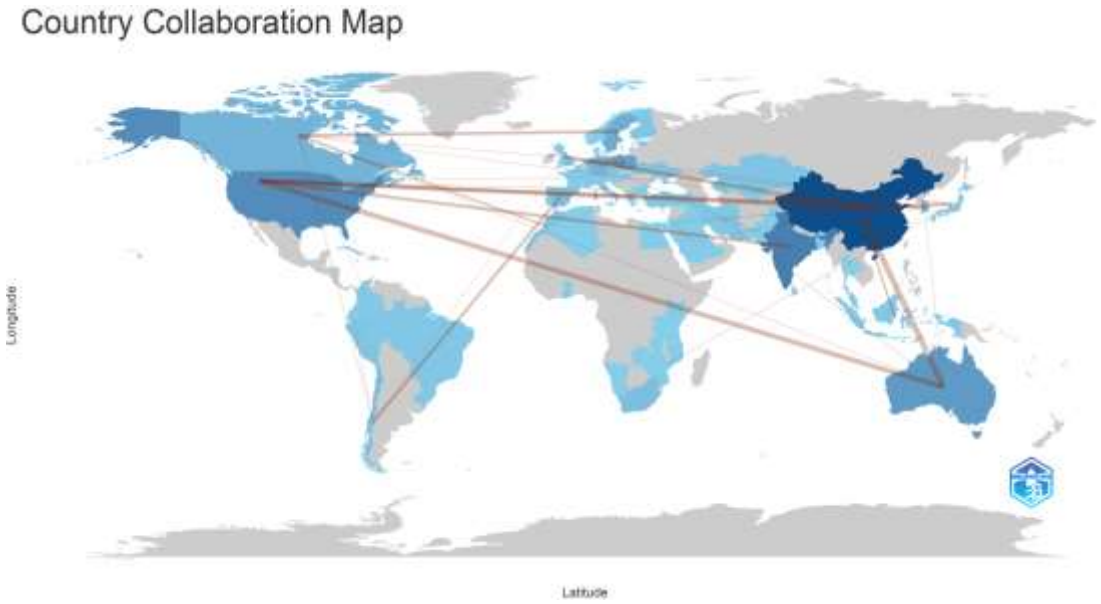


Figura 5. Mapa de colaboración por países del corpus de Scopus sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea, que muestra una red internacionalmente conectada, estructurada alrededor de un número limitado de vínculos interregionales de alta intensidad.

3.5. Documentos más citados a escala mundial

La estructura de citación muestra que las contribuciones más influyentes en este campo no se restringen a canales específicos de minería, sino que se distribuyen entre revistas de ingeniería, robótica, sensado, comunicaciones, seguridad y tecnología aplicada. Este patrón sugiere que las tecnologías aplicadas a la minería subterránea se han desarrollado mediante un intercambio interdisciplinario intenso, en el que los trabajos altamente citados proceden a menudo de dominios adyacentes que aportan métodos, sistemas o enfoques analíticos posteriormente adaptados a los entornos mineros. Al mismo tiempo, las tasas de citación por año indican que la influencia no se limita a publicaciones más antiguas; varios artículos recientes han alcanzado un impacto rápido, lo que refleja la incorporación acelerada de soluciones digitales, automatizadas y basadas en datos en la investigación sobre minería subterránea (Tabla 1).

Tabla 1. Veinte documentos más citados a escala mundial en el corpus de Scopus sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea, destacando contribuciones influyentes procedentes de la ingeniería, la robótica, el sensado y las comunicaciones.

Documento	DOI	Citas totales	Citas por año
RANJTIH, 2017, ENGINEERING	10.1016/J.ENG.2017.04.024	486	54.00
BEHERA, 2021, CONSTR. BUILD. MATER.	10.1016/j.conbuildmat.2021.125120	252	50.40
DANG, 2020, J. FIELD ROBOT.	10.1002/rob.21993	194	32.33
MODARRES, 2018, STRUCT. CONTROL. HEALTH MONIT.	10.1002/stc.2230	178	22.25
PU, 2019, INT. J. MIN. SCI. TECHNOL.	10.1016/j.ijmst.2019.06.009	170	24.29
HUANG, 2018, TUNN. UNDERGR. SPACE TECHNOL.	10.1016/j.tust.2018.07.006	159	19.88
BARNEWOLD, 2020, INT. J. MIN. SCI. TECHNOL.	10.1016/j.ijmst.2020.07.003	156	26.00
DANG, 2019, IEEE INT. CONF. INTELL. ROBOT. SYST.	10.1109/IROS40897.2019.8968151	153	21.86
DHARMADHIKARI, 2020, PROC. - IEEE INT. CONF. ROBOT. AUTOM.	10.1109/ICRA40945.2020.9196964	150	25.00
REN, 2019, SENSORS	10.3390/s19132915	110	15.71
DONG, 2020, IEEE TRANS. VEH. TECHNOL.	10.1109/TVT.2020.2970842	95	15.83
DEY, 2021, PROCESS. SAF. ENVIRON. PROT.	10.1016/j.psep.2021.06.005	93	18.60
WU, 2019, SAF. SCI.	10.1016/j.ssci.2018.11.003	91	13.00
SINGH, 2018, AD HOC NETWORKS	10.1016/j.adhoc.2018.06.008	86	10.75
JO, 2018, SENSORS	10.3390/s18040930	86	10.75

SZREK, 2020, APPL. SCI.	10.3390/app10144984	84	14.00
KUMAR SINGH, 2023, INT. J. MIN. SCI. TECHNOL.	10.1016/j.ijmst.2022.09.022	83	27.67
MANSOURI, 2020, ROBOT. AUTON. SYST.	10.1016/j.robot.2020.103472	78	13.00
MITTAL, 2018, PROC. - GREAT LAKES SYMPOSIUM ON VLSI	10.1145/3194554.3194594	77	9.63
ZHANG, 2023, DIGIT. COMMUN. NETWORKS	10.1016/j.dcan.2022.08.002	75	25.00

3.6. Análisis de palabras clave

El crecimiento de las palabras clave confirma que el campo no solo se ha expandido en volumen, sino que también ha sido configurado de manera más explícita por tecnologías digitales e inteligentes a lo largo del tiempo. La trayectoria dominante permanece anclada en los descriptores centrales del dominio, especialmente underground mine, underground mining y mining, lo que indica continuidad conceptual durante el período. Al mismo tiempo, el movimiento ascendente más intenso se observa en términos vinculados con la transformación tecnológica, particularmente machine learning, Internet of Things, deep learning y automation. Esto sugiere que la evolución reciente de la literatura está cada vez más impulsada por el monitoreo basado en datos, los modelos predictivos, la conectividad y los sistemas operacionales autónomos o semiautónomos. En conjunto, la figura refleja una transición desde un vocabulario predominantemente operacional hacia un perfil de investigación más digital y analítico (Figura 6).

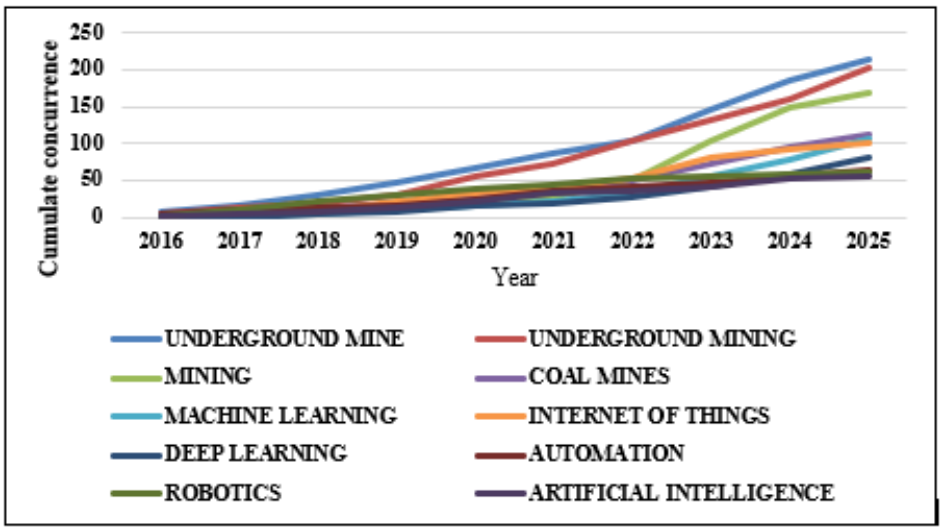


Figura 6. Crecimiento de las palabras clave más frecuentes en el corpus de Scopus sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea entre 2016 y 2025,

que muestra la persistencia de descriptores mineros centrales y el aumento acelerado de términos relacionados con la digitalización, como machine learning, IoT, deep learning y automation.

3.7. Análisis temático

El mapa temático de co-palabras resume la estructura conceptual del campo y el nivel de madurez alcanzado. Los clústeres se disponen según dos ejes: centralidad (X), que indica cuántas conexiones externas poseen con el resto de la red, es decir, su relevancia estructural; y densidad (Y), que refleja el grado de desarrollo interno, cohesión y especialización. Al combinar ambos indicadores, la Figura 7 distingue cuatro funciones: temas motores (alta centralidad y alta densidad), que actúan como fuerza impulsora; temas básicos (alta centralidad y baja densidad), pilares transversales aún en consolidación; nichos temáticos (baja centralidad y alta densidad), líneas especializadas sólidas pero poco conectadas; y temas emergentes o en declive (baja centralidad y baja densidad), correspondientes a tópicos incipientes o en retroceso.

El cuadrante superior derecho contiene los temas motores del campo, porque combina alta centralidad y alta densidad. En él, underground mining, mining, coal mines, Internet of Things y automation conforman el clúster más cohesionado y conectado del mapa. Esta posición indica que dichos temas no solo se encuentran bien desarrollados internamente, sino que también están fuertemente vinculados con la estructura conceptual general de la literatura. En términos prácticos, el campo ya no trata la digitalización como un complemento secundario de las operaciones mineras; por el contrario, la conectividad, el monitoreo y el control operacional aparecen como parte del núcleo investigativo. La presencia de coal mines también sugiere que muchas aplicaciones tecnológicas continúan probándose y consolidándose en ambientes subterráneos asociados al carbón.

El cuadrante inferior derecho agrupa los temas básicos, es decir, aquellos con alta centralidad pero menor densidad interna. En este mapa, machine learning, artificial intelligence, forecasting, learning systems y la variante machine-learning ocupan esa posición. Su ubicación muestra que estos conceptos ya son centrales para el campo, aunque todavía exhiben una estructura interna más heterogénea que los temas motores. Esto sugiere que los enfoques relacionados con inteligencia artificial se aplican a numerosos problemas de la minería subterránea, incluidos la predicción, el monitoreo y el apoyo a la toma de decisiones, pero con frecuencia mediante terminologías y marcos analíticos diversos. En consecuencia, su relevancia es clara, aunque su consolidación conceptual permanece incompleta. Este cuadrante refleja,

por tanto, un área de transición en la que los métodos de IA son esenciales, pero aún maduran como bloque temático coherente.

El cuadrante superior izquierdo representa los nichos temáticos, que combinan alta densidad con menor centralidad. En este mapa se ubican robotics, mapping, optical radar, robots y antennas. Su posición sugiere subcampos especializados con fuerte desarrollo interno, pero todavía con integración limitada a la red conceptual más amplia de las tecnologías aplicadas a la minería subterránea. Este resultado indica que algunas de las líneas técnicamente más avanzadas progresan en comunidades focalizadas, especialmente alrededor de la percepción, la navegación, las comunicaciones subterráneas y las plataformas autónomas. Estos temas son maduros dentro de su propia lógica técnica, lo que explica su densidad. Sin embargo, su menor centralidad muestra que aún no están plenamente conectados con el discurso operacional dominante del campo. Este cuadrante apunta, por consiguiente, a conocimiento especializado con claro potencial futuro de integración más amplia.

El cuadrante inferior izquierdo agrupa los temas emergentes o en declive, caracterizados por baja centralidad y baja densidad. En la figura, underground mine, deep learning, underground mine transportation, convolutional neural networks y condition aparecen en esta zona. Su posición sugiere temas que todavía se están consolidando o que permanecen fragmentados dentro de la red general. En este caso, la interpretación se inclina más hacia la emergencia que hacia el declive, especialmente para deep learning y convolutional neural networks, dado que estos enfoques han ganado visibilidad más recientemente que descriptores más amplios como machine learning o automation. Una situación similar puede aplicarse a underground mine transportation, que todavía aparece como una línea de investigación más estrecha. En conjunto, este cuadrante captura la frontera menos consolidada del campo, donde se desarrollan temas prometedores pero aún débilmente integrados.

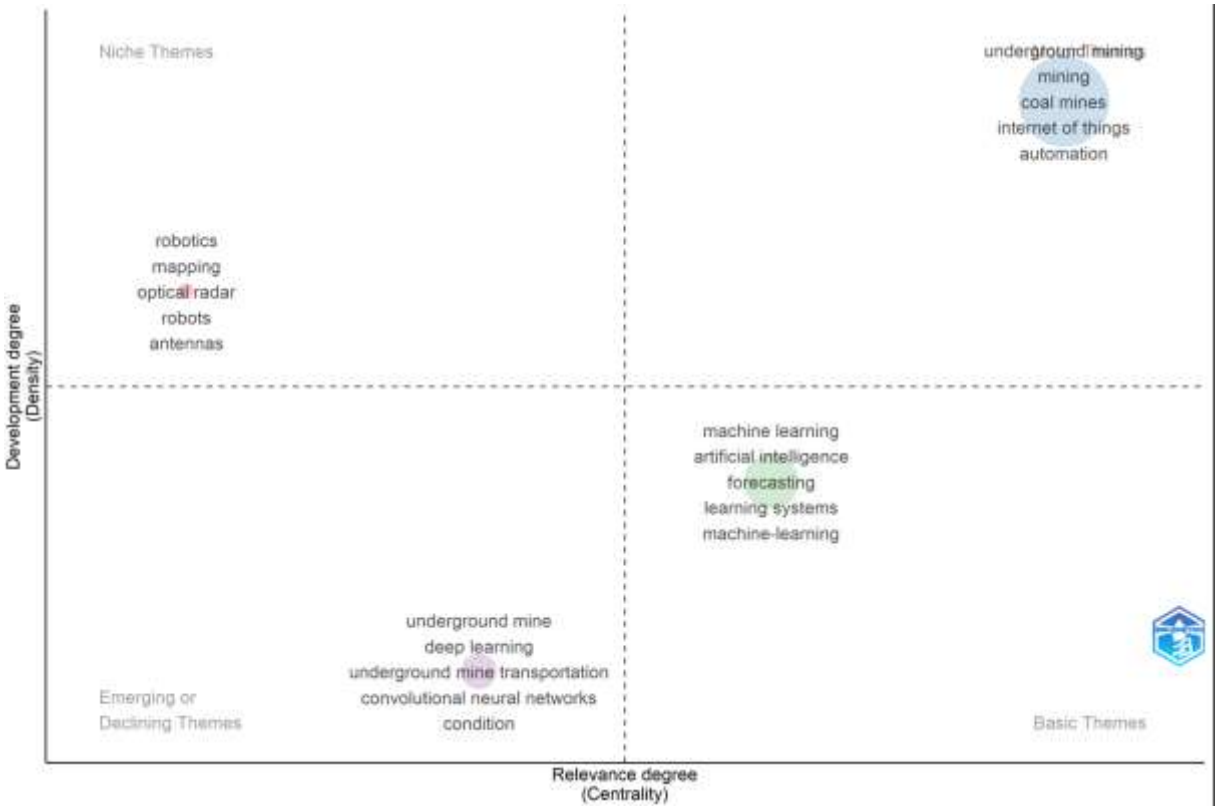


Figura 7. Mapa temático del corpus de Scopus sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea, organizado por centralidad y densidad, que muestra un núcleo consolidado alrededor de underground mining, mining, IoT y automation, junto con temas relacionados con IA que son centrales pero todavía se encuentran en desarrollo, y tópicos de nicho más especializados.

El mapa temático organiza los descriptores del corpus 2016-2025 en función de dos ejes: centralidad —relevancia estructural en la red de co-palabras— y densidad, entendida como grado de desarrollo interno. Esta lectura permite identificar qué temas conforman la columna vertebral del campo, cuáles son maduros pero periféricos y cuáles permanecen en etapas tempranas o fragmentadas dentro de la minería subterránea orientada a tecnologías.

En los temas motores (alta centralidad y alta densidad) se reconoce un clúster compacto que reúne underground mining, mining, coal mines, internet of things y automation. Su ubicación apunta a temas altamente conectados y robustos, que operan como plataforma de integración entre la operación subterránea y la digitalización: instrumentación IoT para ventilación y condiciones ambientales, trazabilidad de equipos y personal, control del acarreo y monitoreo de seguridad en tiempo real. La concurrencia de coal mines sugiere que una parte sustancial de la experimentación y validación tecnológica se apoya en minas de carbón, donde existen trayectorias previas de sensado y protocolos operacionales estandarizados.

Los temas básicos (alta centralidad y baja densidad) agrupan machine learning, artificial intelligence, forecasting, learning systems y la variante machine-learning. Son conceptos clave para el dominio, pero aún heterogéneos: aplicaciones de visión, mantenimiento predictivo y planificación coexisten con problemas de sinonimia, calidad de datos y estandarización de tareas. Si se consolidan taxonomías y conjuntos de datos en IoT, ventilación, estabilidad y productividad, este bloque tenderá a migrar hacia la zona de temas motores.

Los nichos temáticos (baja centralidad y alta densidad) incluyen robotics/robots, mapping, optical radar y antennas: comunidades especializadas y maduras vinculadas con percepción, navegación y comunicaciones, aún periféricas respecto a la red global, pero críticas para la teleoperación y la autonomía subterránea. Finalmente, en el cuadrante emergente/en declive (baja centralidad y baja densidad) se ubican underground mine, deep learning, underground mine transportation, convolutional neural networks y condition; su posición indica actualidad y fragmentación asociada con problemas de sinonimia.

4. DISCUSIÓN

La evidencia bibliométrica indica que la investigación sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea ha pasado de un desarrollo gradual a una fase de expansión más consolidada. El aumento de la producción científica después de 2019, junto con el volumen elevado y sostenido observado entre 2023 y 2025, sugiere que el campo ya no está dominado por experiencias piloto aisladas, sino por una transición más amplia hacia sistemas operacionales integrados. Esta interpretación también se apoya en la dispersión de las fuentes de publicación, que muestra que el tema se desarrolla en canales de minería, sensado, robótica, automatización e ingeniería aplicada, y no dentro de una sola revista dominante; así como en el patrón descentralizado de autoría, que apunta a un campo construido mediante múltiples contribuyentes activos, más que por un núcleo estrecho de especialistas. En términos temáticos, la prominencia de automation, Internet of Things y descriptores relacionados con minería, junto con la creciente visibilidad de machine learning y deep learning, refleja una agenda de investigación cada vez más configurada por la integración digital, las capacidades predictivas y el control operacional. Sobre esta base, la discusión puede leerse como la expresión cualitativa de los principales patrones cuantitativos identificados en el corpus.

Una primera implicación se relaciona con la automatización del carguío y el acarreo. Su relevancia en la discusión es coherente con la estructura temática del corpus, donde automation aparece dentro de los clústeres más centrales, y con el incremento marcado de publicaciones registrado después de 2019,

período fuertemente asociado con la aceleración digital en operaciones subterráneas. En este contexto, la literatura muestra que los sistemas LHD han evolucionado desde la operación tele-remota hacia la autonomía funcional, integrando percepción multisensorial, planificación y capas de diagnóstico que mejoran la utilización y reducen la exposición humana directa en áreas críticas (Xiao *et al*., 2022). La percepción del material sigue siendo decisiva en esta transición, pues la detección robusta de pilas, su segmentación y la selección del punto de ataque afectan directamente la estabilidad del ciclo de carguío (Hennen *et al*., 2025). Contribuciones recientes conectan, además, estos desarrollos con análisis de productividad y seguridad, reforzando la lógica operacional de alejar al operador de zonas de alto riesgo (Correa *et al*., 2022; Mariz *et al*., 2025; Vallejo-Molina *et al*., 2024). Aun así, persisten cuellos de botella relacionados con la transferencia humano-máquina, la calibración bajo geometrías de pila rápidamente cambiantes y la necesidad de validación multijornada bajo la variabilidad real de la mina.

Una segunda área corresponde a la localización y el mapeo en entornos sin GNSS, lo cual también resulta coherente con la estructura bibliométrica observada en el estudio. El patrón de colaboración por países y la presencia de nichos temáticos especializados asociados con robótica, mapeo, sensado y comunicaciones sugieren que esta línea es técnicamente activa y está conectada internacionalmente. En el plano empírico, el SLAM 2D/3D combinado con fusión LiDAR-IMU ya permite la localización global y el mapeo coherente en ambientes de túneles repetitivos (Baek *et al*., 2022), mientras que las arquitecturas RTLS basadas en UWB, LoRa o BLE, desplegadas sobre entornos 5G/edge, mejoran el seguimiento de personal y flotas bajo requisitos cercanos al tiempo real. Paralelamente, la redundancia no óptica mediante sensado háptico bioinspirado amplía la conciencia situacional en condiciones de polvo y niebla (Gomez *et al*., 2024), y los trabajos complementarios con visión estereoscópica, radar y mapeo lumínico abren soluciones más sensibles al costo para operaciones de escala media (Fahle *et al*., 2022; Kirsch *et al*., 2023; Ziegler *et al*., 2023). Sin embargo, la literatura todavía muestra fragmentación en la interoperabilidad semántica, robustez variable frente al agua, la reflectividad y los efectos multitrayectoria, así como ausencia de bancos de prueba intermina compartidos que permitan comparar con mayor equidad el desempeño de los sistemas.

La inteligencia artificial aplicada a la voladura y al control geotécnico representa otra área en la que el vínculo entre resultados y discusión se vuelve especialmente claro. El crecimiento de palabras clave como machine learning y deep learning, junto con la posición central pero aún en desarrollo de los temas relacionados con IA en el mapa temático, sugiere que estos

métodos ya no son periféricos, aunque continúan siendo internamente heterogéneos. En términos aplicados, los modelos de aprendizaje automático para la predicción de la velocidad pico de partícula ayudan a optimizar cargas y retardos, reduciendo así los impactos vibratorios sobre labores e infraestructura cercana; en este contexto, el modelo GWO-GBR ha mostrado un desempeño sólido para la predicción direccional de PPV (Tao *et al*., 2024). De forma paralela, la predicción de sobreexcavación y subexcavación, así como la evaluación de estabilidad de cámaras mediante enfoques basados en ensambles, respaldan cada vez más el diseño de perforación-voladura y las decisiones de sostenimiento, con implicaciones directas en la dilución y el retrabajo (Anticona-Cueva *et al*., 2024). Otros estudios amplían esta línea hacia la optimización de parámetros, el monitoreo y los entornos de aprendizaje explicable (Naik *et al*., 2024; Pattnaik *et al*., 2022; Tripathi *et al*., 2023). Aun así, la misma debilidad aparece de manera reiterada: muchos modelos permanecen validados en contextos de mina única, con calidad desigual de datos históricos y transferibilidad externa limitada. Por ello, el campo se beneficiaría de conjuntos de datos multisede, protocolos de medición trazables y métricas de evaluación comparables, tales como R^2, tasa de dilución, PPV e indicadores energéticos.

El transporte y la logística también pueden interpretarse de manera más directa a partir de los hallazgos bibliométricos. La centralidad de mining, IoT y automation, junto con el cambio más amplio desde un vocabulario operacional hacia otro más digital, sugiere que la logística subterránea se aborda crecientemente mediante sistemas coordinados y apoyados en datos, y no mediante soluciones de ingeniería aisladas. En este sentido, el tránsito desde soluciones ad hoc hacia diseños soportados por bases de datos estandarizadas, como los sistemas de monorriel suspendido con evaluación sistemática de la capacidad de tracción, permite decisiones más reproducibles y una mejor evaluación de la demanda energética en rampas extensas (Pääkkönen *et al*., 2024). En el nivel operacional, los estudios de ruteo y programación incorporan conocimiento de flota y lógicas de prioridad en intersecciones, reduciendo tiempos improductivos y mejorando la gestión del tráfico subterráneo (Clero *et al*., 2025; Thanh & Bun, 2022; Zhang *et al*., 2024). Cuando se articulan con gemelos digitales, estos desarrollos también generan un entorno más seguro para el análisis de escenarios sin interrumpir la producción, lo que otorga a la logística un papel más sólido dentro de arquitecturas integradas de decisión subterránea (Huang *et al*., 2024).

Finalmente, la seguridad, las comunicaciones y el monitoreo emergen como un eje transversal de discusión, lo cual es consistente con el clúster de temas motores identificado en el mapa, donde mining, IoT, coal mines y automation

aparecen estrechamente conectados. La implicación es clara: la seguridad no se trata como una línea separada, sino como una dimensión cada vez más integrada en las operaciones subterráneas digitales. La literatura muestra que las infraestructuras 5G/edge proporcionan la latencia y el ancho de banda necesarios para la autonomía, el seguimiento y la visión de máquinas, aunque también incrementan la superficie de ataque ciberfísico y revelan niveles desiguales de madurez defensiva entre operaciones (Kim & Choi, 2025; Nguyen *et al*., 2023). Al mismo tiempo, la robótica para inspección posterior a voladuras y monitoreo de gases avanza hacia plataformas aptas para condiciones peligrosas y explosivas (Nordström *et al*., 2025), mientras que el monitoreo basado en sensores y la analítica conductual se emplean para identificar tiempos muertos, condiciones inseguras e ineficiencias operacionales (Brodny & Tutak, 2022; Hasan *et al*., 2025; Ichpas *et al*., 2025; Jasmine *et al*., 2024). En conjunto, estas líneas sugieren que la mayor convergencia del campo no reside en dispositivos aislados, sino en sistemas combinados donde el carguío autónomo, SLAM o RTLS, las comunicaciones robustas y el monitoreo asistido por IA contribuyen simultáneamente a la seguridad, la productividad, la eficiencia energética y la reducción de pérdidas operacionales.

5. CONCLUSIONES

- Con base en el corpus de Scopus correspondiente al período 2016-2025, esta revisión bibliométrica muestra que la investigación sobre tecnologías aplicadas a la minería subterránea ha pasado de una etapa de desarrollo gradual a otra de expansión acelerada y sostenida. El marcado incremento de la producción científica después de 2019, seguido por una meseta de alta producción en los años recientes, indica que el campo se organiza cada vez más alrededor de soluciones tecnológicas integradas, y no de iniciativas piloto aisladas. Este patrón es coherente con la transición más amplia de la minería subterránea hacia entornos operacionales digitalizados, conectados y orientados por datos.

- Los resultados también muestran que el campo está geográficamente concentrado, pero internacionalmente conectado. Asia, liderada por China e India, ocupa la posición más fuerte en la producción científica, mientras que Estados Unidos, Australia y varios países europeos actúan como nodos importantes de contribución y colaboración científica. Al mismo tiempo, la autoría permanece descentralizada, con múltiples contribuyentes activos y sin un predominio absoluto de un único grupo de investigación. Esto confirma que las tecnologías aplicadas a la minería subterránea constituyen un campo transversal construido mediante la convergencia de la ingeniería de minas, la

automatización, el sensado, la robótica, las comunicaciones y la inteligencia artificial aplicada.

- Desde una perspectiva temática, el estudio identifica un núcleo conceptual consolidado estructurado alrededor de underground mining, mining, Internet of Things y automation, junto con una capa de rápida expansión de temas relacionados con la inteligencia artificial, particularmente machine learning y deep learning. Esta configuración sugiere que la transformación tecnológica de la minería subterránea no está impulsada únicamente por herramientas digitales aisladas, sino por su integración creciente en sistemas de monitoreo, control, predicción, logística y seguridad. En este sentido, la evidencia bibliométrica respalda la visión de que el campo evoluciona hacia ambientes mineros más conectados, predecibles y coordinados operacionalmente.

- Estos hallazgos también apuntan a una agenda prospectiva. El avance futuro de las tecnologías aplicadas a la minería subterránea dependerá probablemente de una estandarización más sólida de datos y semántica, de una validación más amplia en múltiples minas, de una ciberseguridad más robusta para entornos 5G/edge y del desarrollo de gemelos digitales capaces de integrar carguío, acarreo, monitoreo, ventilación e inspección en sistemas unificados de apoyo a la toma de decisiones. En tal sentido, la contribución principal de esta revisión radica en ofrecer una línea base estructurada para comprender cómo se ha expandido el campo, dónde se localiza su núcleo temático actual y qué frentes tecnológicos parecen más prometedores para el desarrollo futuro.

- Este estudio presenta varias limitaciones que deben reconocerse. En primer lugar, el análisis se basó exclusivamente en Scopus, que, aunque es una base amplia y consistente para el procesamiento bibliométrico, pudo haber excluido estudios relevantes indexados solo en otras bases de datos. En segundo lugar, la revisión se limitó a documentos en idioma inglés, lo cual pudo reducir la visibilidad de contribuciones publicadas en otras lenguas. En tercer lugar, aunque la ecuación de búsqueda se diseñó para capturar los principales descriptores tecnológicos asociados con la minería subterránea, es posible que no haya recuperado todos los registros potencialmente relevantes, en especial aquellos que emplean terminología alternativa. Finalmente, la inclusión de 2025 introduce un sesgo temporal, dado que el último año estaba solo parcialmente indexado en el momento

de la extracción de los datos y, por tanto, debe interpretarse con cautela.

6. REFERENCIAS

Anticona-Cueva, J. Y., Noriega-Vidal, E. M., Cotrina-Teatino, M. A., & Arango-Retamozo, M. S. M. (2024). Evaluation of Predictive Models for the Optimization of the Cost of Unit Operations in Artisanal Underground Mining. *Mathematical Modelling of Engineering Problems, 11*(11), 2901–2911. https://doi.org/10.18280/mmep.111103.

Baek, J., Park, J., Cho, S., & Lee, C. (2022). 3D Global Localization in the Underground Mine Environment Using Mobile LiDAR Mapping and Point Cloud Registration. *Sensors*, *22*(8). https://doi.org/10.3390/s22082873.

Brodny, J., & Tutak, M. (2022). Applying Sensor‐Based Information Systems to Identify Unplanned Downtime in Mining Machinery Operation. *Sensors*, *22*(6). https://doi.org/10.3390/s22062127.

Clero, K., Ed-Diny, S., Achalhi, M., Cherkaoui, M., El-Harraki, I., El-Fkihi, S., Benzakour, I., Soror, T., Rziki, S., Abdelali, H. A., Tagemouati, H., & Bourzeix, F. (2025). Loosening rocks detection at Draa Sfar deep underground mine in Morocco using infrared thermal imaging and image segmentation models. *Artificial Intelligence in Geosciences, 6*(1). https://doi.org/10.1016/j.aiig.2025.100106.

Correa, M., Cárdenas, D., Carvajal, D., & Ruiz‐del‐solar, J. (2022). Haptic Teleoperation of Impact Hammers in Underground Mining. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/app12031428.

Fahle, L., Holley, E. A., Walton, G., Petruska, A. J., & Brune, J. F. (2022). Analysis of SLAM-Based Lidar Data Quality Metrics for Geotechnical Underground Monitoring. *Mining, Metallurgy and Exploration, 39*(5), 1939–1960. https://doi.org/10.1007/s42461-022-00664-3.

Gomez, V., Remmas, W., Hernando, M., Ristolainen, A., & Rossi, C. (2024). Bioinspired Whisker Sensor for 3D Mapping of Underground Mining Environments. *Biomimetics*, *9*(2). https://doi.org/10.3390/biomimetics9020083.

Han, Z., Li, Q., Wang, X., & Li, D. (2025). A physics-guided hierarchical deep learning framework for underground rock reinforcement compliance check based on 4D point cloud data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *164*. https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106829.

Hasan, S., Sjoberg, K., & Wallin, P. (2025). Wireless Communication in Underground Mining Teleoperation: A Systematic Review. *IEEE Access, 13*, 72577–72602. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3563138.

He, P., Wang, Y., Zheng, G., & Zhou, H. (2025). Design and Implementation of an Edge Computing-Based Underground IoT Monitoring System. *Mining*, *5*(3). https://doi.org/10.3390/mining5030054.

Hennen, E., Pekarski, A., Storoschewich, V., & Clausen, E. (2025). Stereo Vision-Based Underground Muck Pile Detection for Autonomous LHD Bucket Loading. *Sensors*, *25*(17). https://doi.org/10.3390/s25175241.

Huang, Z., Ge, S., He, Y., Wang, D., & Zhang, S. (2024). Research on the Intelligent System Architecture and Control Strategy of Mining Robot Crowds. *Energies*, *17*(8). https://doi.org/10.3390/en17081834.

Ichpas, W. H., Fierro, D. J. R., & Rojas, J. J. H. (2025). Implementation of an Intelligent Ground Fault Protection System for Pump Chambers Using Artificial Intelligence Networks. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *12*(6), 187–194. https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V12I6P116.

Ikeda, H., Malgazhdar, D., Shionoiri, T., Sinaice, B. B., Adachi, T., & Kawamura, Y. (2022). Development of a Communication System for Underground Mining Informatization Leading to Smart Mining: A Comparison of Wi-Fi Ad Hoc and Wi-Fi Direct. *Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour*, *25*, 2.

Jasmine, K., Sanjith-Krishna, S., Subashini, B., Swethaa-Shree, V., & Rajavarma, R. (2024). Smart Wearable Device for Enhancing Safety and Efficiency of Coal Miners. *Journal of Innovative Image Processing*, *6*(3), 235–243. https://doi.org/10.36548/jiip.2024.3.002.

Kim, H., & Choi, Y. (2025). 3D location estimation and tunnel mapping of autonomous driving robots through 3D point cloud registration on underground mine rampways. *Underground Space (New)*, *22*, 1–20. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.10.003.

Kirsch, M., Mavroudi, M., Thiele, S., Lorenz, S., Tusa, L., Booysen, R., Herrmann, E., Fatihi, A., Möckel, R., Dittrich, T., & Gloaguen, R. (2023). Underground hyperspectral outcrop scanning for automated mine-face mapping: The lithium deposit of Zinnwald/Cínovec. *Photogrammetric Record, 38*(183), 408–429. https://doi.org/10.1111/phor.12457.

Mariz, J. L. V., Ferraz, T. S. G., Lima, M. P., Silva, R. M. A., & Jang, H. (2025). Predicting Dilution in Underground Mines with Stacking Artificial Intelligence Models and Genetic Algorithms. *Applied Sciences (Switzerland), 15*(11). https://doi.org/10.3390/app15115996.

Naik, A. S., Reddy, S. K., & Raj, M. G. (2024). RTEPMS: Real-Time Environmental Parameters Monitoring System Using IoT-Based LoRa 868-MHz Wireless Communication Technology in Underground Mines. *IEEE Access, 12*, 7430–7455. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3350429.

Nguyen, L. Q., Le, T. T. T., Nguyen, T. G., & Tran, D. T. (2023). Prediction of underground mining-induced subsidence: Artificial neural network based approach. *Mining of Mineral Deposits, 17*(4), 45–52. https://doi.org/10.33271/mining17.04.045.

Nordström, S., Stathoulopoulos, N., Dahlquist, N., Lindqvist, B., Tevetzidis, I., Kanellakis, C., & Nikolakopoulos, G. (2025). Safety Inspections and Gas Monitoring in Hazardous Mining Areas Shortly After Blasting Using Autonomous UAVs. *Journal of Field Robotics, 42*(5), 2076–2094. https://doi.org/10.1002/rob.22500.

Pääkkönen, P., Horsmanheimo, S., Pakkala, D., Tuomimäki, L., & Backman, J. (2024). Reference architecture design and evaluation for digitalization of underground mining. *Internet of Things (Netherlands), 26*. https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101238.

Pakkala, D., Känsäkoski, N., Heikkilä, T., Backman, J., & Pääkkönen, P. (2025). On design of cognitive situation-adaptive autonomous mobile robotic applications. *Computers in Industry, 167*. https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104263.

Pattnaik, S. K., Samal, S. R., Bandopadhaya, S., Swain, K., Choudhury, S., Das, J. K., Mihovska, A., & Poulkov, V. (2022). Future Wireless Communication Technology towards 6G IoT: An Application-Based Analysis of IoT in Real-Time Location Monitoring of Employees Inside Underground Mines by Using BLE. *Sensors*, *22*(9). https://doi.org/10.3390/s22093438.

Stefaniak, P., Koperska, W., Skoczylas, A., Witulska, J., & Sliwinski, P. (2023). Methods of Optimization of Mining Operations in a Deep Mine - Tracking the Dynamic Overloads Using IoT Sensor. *IEEE Access*, *11*, 79384–79396. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291080.

Tao, Y., Chen, Q., Xiao, C., Zhu, M., & Qiu, J. (2024). Artificial Intelligence Models for Predicting Ground Vibrations in Deep Underground Mines to Ensure the Safety of Their Surroundings. *Applied Sciences (Switzerland), 14*(11). https://doi.org/10.3390/app14114771.

Thanh, L. X., & Bun, H. V. (2022). A New approach on AI application for grounding resistor prediction in underground mines of Vietnam. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 158–163. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/158.

Tripathi, A. K., Aruna, M., Prasad, S., Pavan, J., Kant, R., & Choubey, C. K. (2023). New Approach for Monitoring the Underground Coal Mines Atmosphere Using IoT Technology. *Instrumentation Mesure Metrologie*, *22*(1), 29–34. https://doi.org/10.18280/i2m.220104.

Vallejo-Molina, L., Blandon-Montes, A., Lopez, S., Molina-Escobar, J., Ortiz, A., Soto, D., Torero, J., Toro, A., & Molina, A. (2024). Application of Artificial Intelligence to the Alert of Explosions in Colombian Underground Mines.

Mining, Metallurgy and Exploration, *41*(4), 2129–2142. https://doi.org/10.1007/s42461-024-01008-z.

Xiao, W., Liu, M., & Chen, X. (2022). Research Status and Development Trend of Underground Intelligent Load-Haul-Dump Vehicle—A Comprehensive Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*, 18. MDPI. https://doi.org/10.3390/app12189290.

Yu, M., Du, Y., Zhang, X., Ma, Z., & Wang, Z. (2025). Efficient Navigable Area Computation for Underground Autonomous Vehicles via Ground Feature and Boundary Processing. *Sensors*, *25*(17). https://doi.org/10.3390/s25175355.

Zhang, D., Wang, Y., Yang, J., Gao, D., & Chai, J. (2024). Research on Section Coal Pillar Deformation Prediction Based on Fiber Optic Sensing Monitoring and Machine Learning Algorithms. *Applied Sciences (Switzerland), 14*(20). https://doi.org/10.3390/app14209347.

Zhang, P., & Zhao, B. (2025). Gesture Recognition Achieved by Utilizing LoRa Signals and Deep Learning. *Sensors*, *25*(5). https://doi.org/10.3390/s25051446.

Ziegler, M., Kianfar, A. E., Hartmann, T., & Clausen, E. (2023). Development and Evaluation of a UWB-Based Indoor Positioning System for Underground Mine Environments. *Mining, Metallurgy and Exploration, 40*(4), 1021–1040. https://doi.org/10.1007/s42461-023-00797-z.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Ambos autores contribuyeron de manera equitativa.

ORCID

PAVM, https://orcid.org/0000-0002-0712-8424

WEVR, https://orcid.org/0000-0001-6322-3525

Recibido: 24/01/2026
Aceptado: 21/04/2026