

Revisión sistemática acerca de la integración de IOT en la gestión sostenible de agua en la minería

Systematic review on the integration of IOT in sustainable water management in mining

Recibido: 22/04/2025 - Aceptado: 21/07/2025

Jesús Kliver Anchiraico Alderete

<https://orcid.org/0009-0003-6434-0151>

janchiraico@uncp.edu.pe

Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

Eugenio Emilio Orellana Mendoza

<https://orcid.org/0000-0002-8302-378X>

eeorellana@uncp.edu.pe

Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

Vilma Ayre Balbin

<https://orcid.org/0009-0005-1580-3935>

vayre@uncp.edu.pe

Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

Emilio David Orellana Ayre

<https://orcid.org/0009-0007-0271-1729>

e_2006200286D@uncp.edu.pe

Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

Henry Héctor Peceros Oscco

<https://orcid.org/0009-0004-0337-3942>

hpeceros@uncp.edu.pe

Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú

Resumen

El presente artículo desarrolla una revisión sistemática en el contexto de la sostenibilidad ambiental y la minería 4.0 en la industria extractiva, con el objetivo de analizar la efectividad del uso del Internet de las Cosas (IoT) en la gestión sostenible del agua. A partir de la revisión de 63 artículos científicos, se seleccionaron 20 investigaciones relevantes para un análisis más exhaustivo. Se identificaron tecnologías clave como sensores inteligentes, microcontroladores y plataformas en la nube, las cuales resultan fundamentales para el monitoreo en tiempo real y el control eficiente del recurso hídrico. Los resultados evidencian que el uso del IoT incrementa significativamente la eficiencia en la gestión y el tratamiento del agua, principalmente mediante la detección temprana de fugas. No obstante, se identificaron barreras para su implementación, especialmente en contextos rurales y operaciones de pequeña minería, tales como la limitada conectividad y la carencia de capacidades técnicas en las comunidades. La conclusión destaca el valor de integrar tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y blockchain, para fortalecer la toma de decisiones en materia ambiental, considerando no solo el agua, sino también la calidad del aire. Se recomienda promover estudios de campo en minas reales y avanzar en la adopción de soluciones tecnológicas adaptadas a diversos entornos, especialmente en América Latina. Este análisis constituye una base sólida para futuras investigaciones sobre el uso del IoT en la gestión hídrica en el sector minero.

Palabras clave: Internet de las Cosas, gestión del agua, minería 4.0.

Abstract

This article presents a systematic review in the context of environmental sustainability and mining 4.0 in the extractive industry, with the aim of analyzing the effectiveness of the Internet of Things (IoT) in sustainable water

management. Based on a review of 63 scientific articles, 20 relevant studies were selected for a more exhaustive analysis. Key technologies such as smart sensors, microcontrollers, and cloud platforms were identified as fundamental for real-time monitoring and efficient control of water resources. The results show that the use of IoT significantly increases efficiency in water management and treatment, mainly through early detection of leaks. However, barriers to its implementation were identified, especially in rural contexts and small-scale mining operations, such as limited connectivity and a lack of technical capabilities in communities. The conclusion highlights the value of integrating emerging technologies, such as artificial intelligence and blockchain, to strengthen environmental decision-making, considering not only water but also air quality. It is recommended to promote field studies in real mines and advance the adoption of technological solutions adapted to diverse environments, especially in Latin America. This analysis provides a solid foundation for future research on the use of IoT in water management in the mining sector.

Keywords: Internet of Things, water management, mining 4.0.

Introducción

La minería representa más del 10 % del Producto Bruto Interno (PBI) del Perú y constituye una fuente clave de divisas para el país. Sin embargo, esta industria demanda elevados volúmenes de agua y conlleva riesgos significativos de contaminación hídrica (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2023). En este contexto, se evidencia la creciente relevancia de la tecnología para mejorar la gestión ambiental, el planeamiento y la seguridad en las operaciones mineras.

Entre las tecnologías emergentes, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ha surgido como una herramienta innovadora para optimizar el uso de los recursos naturales, especialmente el agua, mediante soluciones que integran sensores, monitoreo remoto y análisis de datos en tiempo real. En el ámbito minero, la revista *Tecnología Minera* (2024) destaca estudios recientes que evidencian la capacidad del IoT para monitorear parámetros críticos del agua —como caudal, calidad y distribución— a través de redes de sensores integradas en plataformas de análisis de datos. En sectores como la agricultura inteligente, el IoT ya ha demostrado su eficacia al permitir una reducción significativa del consumo hídrico mediante sistemas automatizados (Andrade & Aguilar, 2021).

Pese al creciente interés por el uso del IoT en la gestión del agua en la minería, la literatura científica sobre el tema presenta importantes vacíos. En primer lugar, escasean estudios que evalúen el impacto de estas tecnologías sobre la calidad del agua, especialmente en el contexto de la minería latinoamericana. En segundo lugar, aún faltan evidencias cuantitativas que permitan establecer una relación clara entre los costos de implementación del IoT y sus beneficios económicos y ambientales (Quispe, 2024). Por último, aunque los factores sociales y culturales son determinantes para el éxito de cualquier innovación tecnológica, se ha prestado poca atención a las barreras institucionales, sociales y técnicas que limitan su adopción (Basso, 2024). Por lo tanto, es fundamental comprender no solo las capacidades técnicas del IoT, sino también los factores contextuales que influyen en su implementación efectiva en distintos tipos de operaciones mineras.

El problema central que aborda esta revisión es determinar cómo la integración de tecnologías IoT contribuye a una gestión sostenible del agua en la industria minera peruana. De forma más específica, se busca responder las siguientes preguntas: ¿Qué tecnologías IoT resultan más efectivas para optimizar el consumo hídrico? (Casavilca & Antonio, 2024); ¿Cuál es el retorno económico y ambiental de implementar sistemas de monitoreo continuo basados en IoT en operaciones de distinta escala?; y ¿Cuáles son las principales barreras técnicas, sociales y regulatorias que dificultan la adopción de soluciones IoT para la gestión del agua en contextos mineros rurales? (Yong, 2021).

A partir de ello, el objetivo general de este artículo es analizar el papel del Internet de las Cosas en la gestión sostenible del agua en el sector minero, considerando su impacto en la eficiencia del consumo hídrico, el control de calidad y la mitigación de impactos ambientales. Específicamente, se plantean tres objetivos: (1) identificar y comparar las tecnologías IoT empleadas en la optimización del consumo de agua en distintos niveles de operación minera; (2) evaluar los beneficios económicos y ambientales derivados de su implementación; y (3) reconocer las principales barreras técnicas, sociales y regulatorias que condicionan su adopción en comunidades mineras rurales.

En función de lo anterior, se propone la siguiente hipótesis general: la implementación de tecnologías IoT en la gestión del agua en minería mejora significativamente la eficiencia en el uso del recurso y contribuye a la reducción de impactos ambientales. De manera específica, se plantean las siguientes hipótesis: (a) el uso de sensores inteligentes IoT mejora significativamente la capacidad de monitoreo en tiempo real; (b) los sistemas IoT aplicados en operaciones mineras permiten reducir el desperdicio hídrico mediante la automatización de

procesos (Basso, 2024); y (c) las barreras regulatorias y de capacitación explican más del 50 % de los obstáculos en la adopción del IoT en comunidades mineras rurales (Andrade & Aguilar, 2024).

Esta revisión sistemática se desarrollará bajo los lineamientos del método PRISMA, el cual orienta las etapas de identificación, selección, elegibilidad e inclusión de estudios científicos publicados entre enero de 2020 y abril de 2025. Para ello, se consultarán bases de datos como PubMed, Scopus, ProQuest, Google Académico y ScienceDirect, empleando los términos “IoT” AND “water management” AND “mining” en los títulos y resúmenes. Los criterios de inclusión abarcarán investigaciones empíricas con datos cuantitativos sobre consumo o calidad del agua en contextos mineros del Perú o en países comparables (Chile, México), publicadas en español o inglés. Se excluirán trabajos sin metodología clara, documentos sin DOI, sin datos cuantitativos o anteriores a 2020. Luego de eliminar duplicados y revisar títulos y resúmenes, se realizará la lectura completa de los artículos elegibles para extraer las variables clave.

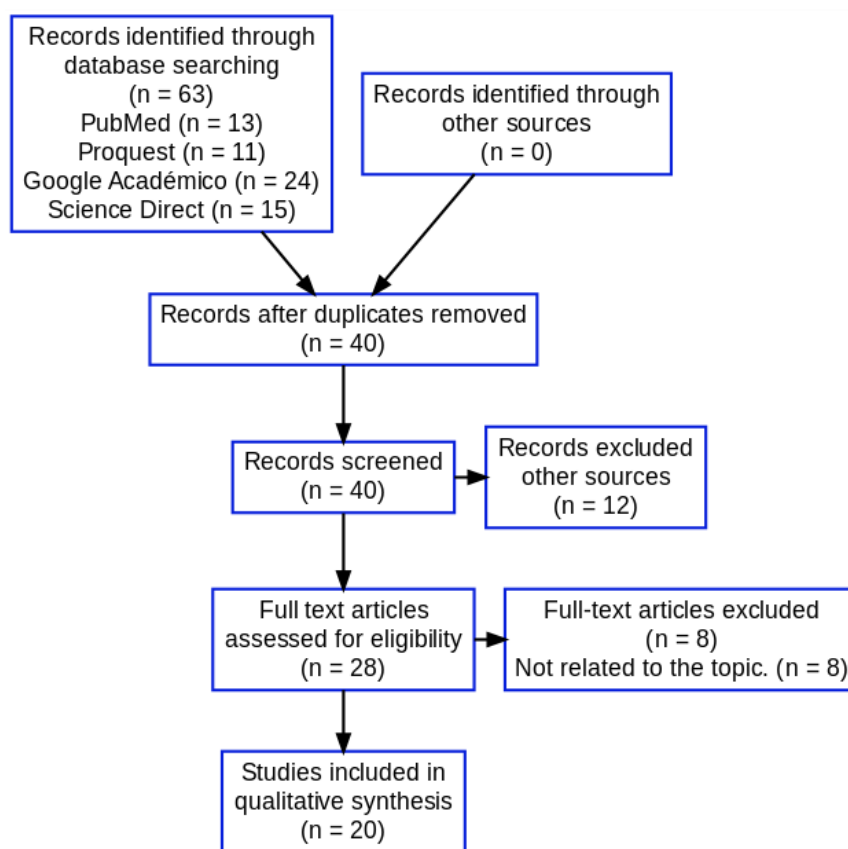
Metodología

Para llevar a cabo esta investigación de revisión sistemática, se aplicó el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el objetivo de garantizar la transparencia y una adecuada selección de los estudios relacionados.

El proceso de revisión se desarrolló siguiendo las directrices establecidas por PRISMA, comenzando con la elaboración de un protocolo detallado que abarcó la identificación de la pregunta de investigación, la estrategia de búsqueda, los criterios de inclusión y exclusión, la extracción de datos y la síntesis de resultados. Este enfoque sistemático permitió asegurar la precisión y coherencia en cada etapa del proceso.

Figura 1

Flujograma del proceso de selección de los estudios según PRISMA



Nota: Creación propia.

La búsqueda de estudios relevantes se realizó en bases de datos académicas como PubMed, Scopus, ProQuest, Google Académico y ScienceDirect, utilizando una estrategia que combinó palabras clave como: “IoT”, “Internet of Things”, “Water management” OR “Gestión del agua”, “Mining” OR “Minería” y “Sustainability” OR “Sostenibilidad”. Se incluyeron estudios publicados en los últimos ocho años que abordaran la integración de IoT y su impacto en la gestión sostenible del agua.

Los criterios de inclusión consideraron estudios publicados en los últimos ocho años que investigaran la aplicación del IoT en la gestión sostenible del agua en la industria minera. Asimismo, se seleccionaron únicamente aquellos estudios que mostraron resultados claros sobre el impacto de esta tecnología en dicho sector.

En cuanto a los criterios de exclusión, se descartaron estudios que no estuvieran directamente relacionados con la integración del IoT en el contexto minero, así como aquellos que no presentaban resultados concretos o no cumplían con estándares metodológicos adecuados para una revisión sistemática.

La revisión se estructuró en cuatro etapas conforme al protocolo PRISMA:

- **Identificación:** Se realizó una búsqueda sistemática en las bases de datos mencionadas, identificando 63 documentos mediante el uso de los términos clave en títulos, resúmenes y palabras clave.
- **Cribado:** Se eliminaron 16 artículos duplicados y otros 7 que no se encontraban dentro del rango temporal establecido (últimos cinco años), quedando 40 estudios relevantes.
- **Elegibilidad:** Se revisaron títulos, resúmenes y resultados, excluyéndose 12 artículos que no se ajustaban a los objetivos de la investigación, reduciendo el conjunto a 28 documentos.
- **Inclusión definitiva:** Se descartaron 8 artículos adicionales por no estar directamente relacionados con el tema, el problema o los objetivos de estudio, o por no contar con un DOI válido, resultando en un total de 20 artículos incluidos en el análisis final.

Tabla 1

Artículos relacionados con los ejes temáticos

Eje temático	Descripción	Estudios relacionados
1. Tecnologías y metodologías IoT	Aplicaciones de sensores, microcontroladores, plataformas en la nube y sistemas de monitoreo para el control hídrico.	Alshami (2024), Bo (2022, 2023), Choubey (2022), Fang (2022), Puneeth (2024), Vallejo (2024), Nguyen (2022), Shaikh (2023)
2. Impacto en la gestión sostenible del agua	Evaluación de los beneficios ambientales y operativos del IoT: eficiencia en consumo de agua, detección de fugas y reciclaje hídrico.	Monteiro (2022), Shafaei (2021), Bothe (2023), Huang (2023), Leuenberger (2021), Kagiso (2020), Zhenguo (2020)
3. Integración con tecnologías emergentes	Uso combinado del IoT con IA, blockchain, big data y sistemas predictivos para optimizar la toma de decisiones ambientales.	Miller (2025), Humnabadkar (2024), Alshami (2024), Monteiro (2022), Molaei (2020), Kagiso (2020)
4. Barreras y desafíos para la adopción	Limitaciones técnicas (conectividad), económicas (costos) y sociales (falta de capacidades técnicas, resistencia al cambio).	Leuenberger (2021), Maseeh (2021), Nguyen (2022), Vallejo (2024), Miller (2025), Humnabadkar (2024), Shaikh (2023)
5. Experiencias y casos de aplicación	Casos reales de implementación de IoT en minería a nivel global, mostrando lecciones aprendidas y replicabilidad.	Fang (2022), Bo (2022, 2023), Huang (2023), Choubey (2022), Puneeth (2024), Zhenguo (2020), Nguyen (2022)

Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la evaluación crítica de los veinte estudios seleccionados en la revisión sistemática, correspondientes al periodo 2020–2025. La muestra incluye diversos enfoques metodológicos, entre ellos revisiones sistemáticas y bibliométricas, estudios experimentales, desarrollos de prototipos basados en IoT, modelos de simulación, estudios de caso y metodologías mixtas.

Tabla 2
Resultados de la evaluación de la calidad de los estudios

Autor (año)	Diseño del estudio	Validez interna	Validez externa	Riesgo de sesgo
Miller (2025)	Revisión sistemática IoT-IA ambiental	Sí	No	Moderado
Alshami (2024)	Revisión sistemática + bibliometría	Sí	Sí	Moderado
Puneeth (2024)	Prototipo IoT con sensores y nube	Sí	No	Moderado
Vallejo (2024)	Prototipo IoT open source	Sí	No	Moderado
Humnabadkar (2024)	Revisión tecnologías avanzadas	Sí	No	Moderado
Bothe (2023)	Revisión cualitativa (ciclo vida agua)	Sí	No	Moderado
Huang (2023)	Estudio de caso geofísico	Sí	No	Moderado
Shaikh (2023)	Revisión de WMS basados en IoT	Sí	No	Moderado
Bo (2023)	Modelo IoT en nube con sensores	Sí	No	Moderado
Monteiro (2022)	Modelo de simulación hídrica	Sí	No	Moderado
Fang (2022)	Experimento de fermentación anaerobia	Sí	No	Baja
Choubey (2022)	Desarrollo de sistema IoT (prototipo)	Sí	No	Moderado
Bo (2022)	Sistema IoT multisensor	Sí	No	Moderado
Nguyen (2022)	Sistema IoT para polvo y agua	Sí	No	Moderado
Leuenberger (2021)	Métodos mixtos geoespaciales	Sí	No	Moderado
Maseeh (2021)	Revisión IoT y TIC en agua	Sí	No	Moderado
Shafaei (2021)	Ensayo experimental (EDW relaves)	Sí	No	Bajo
Kagiso (2020)	Revisión de tecnologías IoT/WSN	Sí	No	Moderado
Molaei (2020)	Revisión bibliográfica IoT en minería	Sí	No	Moderado
Zhenguo (2020)	IoT + regresión múltiple	Sí	No	Moderado

La **Tabla 3** sintetiza las principales características metodológicas, los hallazgos más relevantes y las conclusiones de los veinte estudios incluidos en la revisión sistemática. Los trabajos abarcan una amplia variedad de enfoques, que van desde revisiones bibliográficas y sistemáticas, hasta estudios experimentales, desarrollos de prototipos IoT, estudios de caso y modelos de simulación. En los resultados se observa un consenso general respecto al impacto positivo del Internet de las Cosas en la optimización del uso del recurso hídrico, destacándose mejoras en el monitoreo en tiempo real, la automatización de procesos y la detección temprana de fugas o fallos. Las conclusiones, en su mayoría, subrayan la necesidad de ampliar la validación de estas tecnologías en escenarios reales, fortalecer la conectividad en entornos mineros remotos y promover la integración con otras tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y blockchain para incrementar la sostenibilidad de la gestión hídrica en el sector minero.

Tabla 3
Características de los estudios seleccionados

Autor (año)	Metodología	Resultados	Conclusiones
Miller (2025)	Revisión sistemática de literatura sobre IoT-IA en monitoreo ambiental	Identificó que la IA potencia el IoT en modelado predictivo y análisis en tiempo real	Es esencial integrar IA, blockchain y nube para sistemas sostenibles de monitoreo
Alshami (2024)	Revisión sistemática y bibliometría sobre IoT en gestión hídrica	Identificó sensores y tecnologías de comunicación más usadas (Zigbee, Sigfox)	Requiere optimización en eficiencia energética, interoperabilidad y protocolos estándar

Puneeth (2024)	Desarrollo de prototipo IoT con sensores y nube	Permite monitoreo remoto de calidad de agua y detección temprana de contaminación	Mejora la gestión ambiental, pero necesita validación en escenarios reales
Vallejo (2024)	Prototipo IoT open source con Arduino/ESP32	Monitoreo en tiempo real de temperatura y humedad en entornos mineros	Escalable para minería pequeña y mediana con bajo costo
Humnabadkar (2024)	Revisión de tecnologías IoT, IA y blockchain en gestión de agua	Evidenció capacidades de predicción y trazabilidad de datos	Requiere marcos regulatorios y reducción de costos para adopción masiva
Bothe (2023)	Revisión cualitativa del ciclo de vida del agua en minería	Resalta la necesidad de monitoreo continuo en todas las fases	La gestión debe ser integral y circular, priorizando reciclaje y tratamiento
Huang (2023)	Estudio de caso geofísico con IoT y resistividad eléctrica 3D	Detectó zonas de riesgo de ingreso de agua en minas subterráneas	Permite diseñar pilares de protección más seguros y económicos
Shaikh (2023)	Revisión de sistemas de monitoreo de agua (WMS) basados en IoT	Sistemas reducen intervención manual y mejoran eficiencia de monitoreo	Fomentar WMS inteligentes y económicos en contextos con recursos limitados
Bo (2023)	Modelo IoT en nube con sensores para optimización hídrica	Elevó la tasa de reutilización de agua mediante análisis en tiempo real	Facilita la toma de decisiones en gestión integral del agua en minas
Monteiro (2022)	Modelo de simulación dinámica de planificación hídrica	Predicciones de demanda de agua con error <5%	Mejora el manejo integral del agua en minas profundas a largo plazo
Fang (2022)	Experimento de fermentación anaerobia con residuos	Incrementó microorganismos y eficiencia de producción de ácidos grasos volátiles	Propuesta sostenible para tratamiento y recuperación en aguas residuales
Choubey (2022)	Prototipo IoT con sensores ultrasónicos y control automático	Monitoreo en tiempo real y activación de bombas de agua	Reduce desperdicio hídrico, requiere validación a gran escala
Bo (2022)	Desarrollo de red IoT multisensor para agua en minas	Monitoreo continuo y detección de datos atípicos	Confiable para decisiones operativas en gestión hídrica subterránea
Nguyen (2022)	Sistema IoT para monitoreo de polvo y supresión de agua	Detectó polvo y activó sistemas de aspersión automáticamente	Redució uso de agua y mejoró seguridad en plantas de carbón
Leuenberger (2021)	Métodos mixtos geoespaciales sobre agua y salud en minería	Mejoró la infraestructura hídrica, pero persistieron problemas de calidad	Necesario fortalecer políticas de salud y calidad de agua en zonas mineras

Maseeh (2021)	Revisión de IoT y TIC en gestión inteligente de agua	IoT permite control automático y reducción de desperdicios	Necesidad de sistemas más integrados y adaptados a distintos contextos
Shafaei (2021)	Ensayo experimental de deshidratación de relaves (EDW)	Aumentó la recuperación de agua al incrementar voltaje aplicado	Técnica prometedora para economía circular en minería
Kagiso (2020)	Revisión de tecnologías digitales (IoT, IA, WSN, drones)	Resaltó redes de sensores inalámbricos para monitoreo	Adopción de tecnologías emergentes mejorará seguridad y eficiencia
Molaei (2020)	Revisión de aplicaciones IoT en procesos mineros	Mejóro monitoreo de maquinaria y seguridad	Necesario desarrollar modelos IoT más integrados y flexibles
Zhenguo (2020)	IoT + regresión múltiple para predecir zonas de agua	Mejóro precisión en la estimación de altura de zonas de conducción de agua	Herramienta útil para prevenir ingreso de agua en minas de carbón

La discusión de los resultados se organiza en torno a cinco ejes temáticos que estructuran esta investigación:

1. Tecnologías y metodologías IoT

Los estudios analizados evidencian un notable avance en el desarrollo de tecnologías y metodologías basadas en IoT para la gestión hídrica en el sector minero. Investigaciones como las de Alshami (2024), Bo (2022, 2023), Choubey (2022), Fang (2022), Puneeth (2024), Vallejo (2024), Nguyen (2022) y Shaikh (2023) destacan el diseño de prototipos y redes de sensores inteligentes que permiten monitorear en tiempo real parámetros críticos como el nivel, pH, turbidez y conductividad del agua. Estos sistemas, integrados con microcontroladores como Arduino y ESP32, y módulos de comunicación LoRa conectados a plataformas en la nube, han demostrado ser eficaces en la recolección y procesamiento de datos. No obstante, la mayoría de las pruebas se han realizado en entornos controlados, lo que limita su validez externa en contextos mineros reales.

2. Impacto en la gestión sostenible del agua

Con respecto al impacto ambiental y operativo del IoT en la gestión del recurso hídrico, estudios como los de Monteiro (2022), Shafaei (2021), Bothe (2023), Huang (2023), Leuenberger (2021), Kagiso (2020) y Zhenguo (2020) reportan mejoras significativas en la eficiencia del consumo de agua, la detección temprana de fugas y la optimización de procesos de tratamiento y reciclaje. Monteiro (2022) y Shafaei (2021) demuestran que la integración de sensores con modelos predictivos puede reducir significativamente las pérdidas hídricas y optimizar su uso a lo largo de las operaciones mineras. Sin embargo, el éxito de estos sistemas depende en gran medida de una implementación adecuada, del mantenimiento constante y de su capacidad de adaptación a distintos entornos.

3. Integración con tecnologías emergentes

Diversos autores destacan el potencial de integrar el IoT con tecnologías emergentes para fortalecer la toma de decisiones ambientales. Investigaciones como las de Miller (2025), Humnabadkar (2024), Alshami (2024), Monteiro (2022), Molaei (2020) y Kagiso (2020) subrayan los beneficios de combinar el IoT con inteligencia artificial, blockchain, big data y algoritmos predictivos. Estas sinergias permiten mejorar la precisión del monitoreo y aumentar la trazabilidad de la información, facilitando la evolución hacia minas inteligentes. A pesar de estos avances, persisten desafíos vinculados con los altos costos, la interoperabilidad de los sistemas y la ausencia de marcos regulatorios que promuevan su adopción a gran escala.

4. Barreras y desafíos para la adopción

Las barreras en la implementación del IoT fueron recurrentes en estudios como los de Leuenberger (2021), Maseeh (2021), Nguyen (2022), Vallejo (2024), Miller (2025), Humnabadkar (2024) y Shaikh (2023). Las principales limitaciones identificadas incluyen la conectividad deficiente en zonas mineras remotas, los elevados

costos de instalación y mantenimiento, y la resistencia al cambio por parte de las organizaciones y comunidades. Adicionalmente, los sensores enfrentan desafíos técnicos para operar en condiciones extremas, características del entorno minero, lo cual afecta su durabilidad. Superar estas barreras requerirá inversiones en infraestructura digital, formación técnica especializada y el desarrollo de tecnologías más robustas, adaptadas a contextos geográficos específicos.

5. Experiencias y casos de aplicación

Finalmente, la revisión identificó diversas experiencias exitosas de implementación del IoT en la minería en países como China, India y Sudáfrica. Estudios de Fang (2022), Bo (2022, 2023), Huang (2023), Choubey (2022), Puneeth (2024), Zhenguo (2020) y Nguyen (2022) reportan mejoras en la gestión del agua a través de la centralización de datos en plataformas gráficas, la reducción de los tiempos de respuesta ante fallas hidráulicas y el cumplimiento más eficiente de normativas ambientales. No obstante, para replicar estos casos en América Latina, será indispensable adaptar las soluciones tecnológicas a la realidad local, fortalecer las capacidades técnicas y promover la participación comunitaria en los procesos de adopción tecnológica.

Síntesis general

Los cinco ejes temáticos analizados permiten concluir que el IoT representa una herramienta clave para transformar la gestión hídrica en la minería. Se han identificado avances importantes en el desarrollo de soluciones tecnológicas, mejoras en la eficiencia operativa y ejemplos concretos de implementación exitosa. Sin embargo, persisten desafíos significativos relacionados con la validación en escenarios reales, la superación de barreras técnicas, sociales y económicas, así como la necesidad de integrar el IoT con otras tecnologías emergentes para lograr una adopción sostenible y escalable en contextos mineros diversos.

Conclusiones

El análisis realizado confirma que la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) en la minería posee un alto potencial para optimizar el uso del recurso hídrico y reducir el impacto ambiental de las actividades extractivas. Las soluciones evaluadas han demostrado ser efectivas en aspectos clave como el monitoreo en tiempo real, la automatización de procesos y la detección temprana de fallos en los sistemas de abastecimiento y tratamiento de agua. Además, la flexibilidad de estas tecnologías permite su adaptación a diferentes escalas operativas, lo que genera oportunidades para mejorar la sostenibilidad hídrica tanto en grandes como en pequeñas explotaciones mineras.

No obstante, los hallazgos también evidencian la necesidad de superar limitaciones significativas para lograr una adopción plena de estas tecnologías. Entre los principales desafíos se identifican las dificultades de conectividad en zonas remotas, los elevados costos de implementación, la escasa capacitación técnica en las comunidades mineras y la limitada integración con otras tecnologías emergentes.

Por ello, se recomienda priorizar investigaciones aplicadas en minas reales, fortalecer la infraestructura digital y promover políticas públicas que impulsen la inversión en innovación tecnológica. De esta manera, el IoT podrá consolidarse como un pilar estratégico en la gestión sostenible del agua en el sector minero.

Referencias

- Alshami, A., Ali, E., Elsayed, M., Eltoukhy, A. E. E., & Zayed, T. (2024). IoT innovations in sustainable water and wastewater management and water quality monitoring: A comprehensive review of advancements, implications, and future directions. *IEEE Access*, 12, 58427–58453. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3392573>
- Andrade, P., & Aguilar, J. (2021). *Sistema de detección y predicción de la calidad del aire y del agua para el monitoreo y control ambiental en explotación minera usando componentes IoT* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/657615>
- Basso Araya, C. E. (2024). *Propuesta de implementación de un gemelo digital para la minería subterránea mediante la metodología BIM* [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio UChile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/203801>
- Bo, L., Liu, Y., Zhang, Z., Zhu, D., & Wang, Y. (2022). Research on an online monitoring system for efficient and accurate monitoring of mine water. *IEEE Access*, 10, 18743–18756. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3151244>
- Bothe-Fiekert, M., Binder, A., Nowosad, S. P., Apollo, F., & Langefeld, O. (2024). Lifecycle of mine water. En W.

- Frenz & A. Preuße (Eds.), *Yearbook of sustainable smart mining and energy 2022. Technical, economic and legal framework* (Vol. 2, pp. 67–92). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41873-0_4
- Casavilca, R., & Antonio, R. (2024). *Prototipo de monitoreo remoto para el control del sistema de retorno de agua de infiltración de relave del sumidero en la Unidad Minera San Rafael* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio UNH. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/0c16f234-5891-4368-a63d-f52c77d7b71c>
- Choubey, S., William, P., Pawar, A. B., Jawale, M. A., Gupta, K., & Parganiha, V. (2022). Intelligent water level monitoring and water pump controlling system using IoT. En *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)* (pp. 423–427). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICESC54411.2022.9885358>
- Fang, S., Cao, W., Shao, Q., Huang, W., Wang, F., Cheng, X., Cao, J., Luo, J., & Wu, Y. (2022). Reutilization of waste crawfish shell and sludge for efficient volatile fatty acids production by synchronously regulating the bioavailable substrates and microbial metabolic traits. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131456>
- Huang, W., Sui, L., Wang, Y., Zhang, C., Jiang, D., Cai, X., & Yang, Z. (2023). Study of the mining and aquifer interactions in complex geological conditions and its management. *Scientific Reports*, 13(1), 9462. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34947-6>
- Humnabadkar, A., Karve, A., Shivbhakta, B., & Kokate, A. A. (2024). Advanced technologies for sustainable water management: A comprehensive review. *International Journal for Future Multidisciplinary Research*, 6(5), 382–388. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i05.27573>
- Kagiso, M., 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, 100136. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2020.100136>
- Leuenberger, A., Dietler, D., Lyatuu, I., Farnham, A., Kihwele, F., Brugger, F., & Winkler, M. S. (2021). Water and health in mining settings in sub-Saharan Africa: A mixed methods geospatial visualization. *Geospatial Health*, 16(1), 965. <https://doi.org/10.4081/gh.2021.965>
- Maseeh, H. M., Zeebaree, S. R. M., Sadeeq, M. A. M., Ameen, S. Y., Ibrahim, I. M., Zebari, R. R., Ibrahim, R. K., & Sallow, A. B. (2021). IoT and ICT based smart water management, monitoring and controlling system: A review. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 8(2), 42–56. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2021/v8i230198>
- Miller, T., Durlik, I., KostECKa, E., Kozłowska, P., Łobodzińska, A., Sokołowska, S., & Nowy, A. (2025). Integrating artificial intelligence agents with the Internet of Things for enhanced environmental monitoring: Applications in water quality and climate data. *Electronics*, 14(4), 696. <https://doi.org/10.3390/electronics14040696>
- Molaei, F., Rahimi, E., Siavoshi, H., Afrouz, S. G., & Tenorio, V. (2020). A comprehensive review on Internet of Things (IoT) and its implications in the mining industry. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(3), 499–515. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2020.499.515>
- Monteiro, C., Van, J., & Schutte, C. (2022). A simulation-based water management strategy for life-of-mine water planning. *South African Journal of Industrial Engineering*, 33(3), 151–164. <https://doi.org/10.7166/33-3-2787>
- Nguyen, D., Khong, C., & Nguyen, V. (2022). IoT-based automatic dust monitoring and suppression system for coal warehouses and processing areas with a reduction in water consumption. *International Journal of Next-Generation Computing*, 13(3), 487–497. <https://doi.org/10.47164/ijngc.v13i3.658>
- Puneeth, G. J., Shashank, T., Vinit, P., Muzammil, S. D., & Karthikeya, N. R. (2024). Smart water pollution management: IoT for automatic detection and prevention. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 4(5), 532–541. <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-18484>
- Quispe, W. (2024). *Diseño y elaboración de un sistema de envío de datos inalámbrico de sensores para barcasas de relaves mineros utilizando tecnología IoT* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c4d11c83-5310-429e-b1fa-04729ae7511f/content>
- Shafaei, F., Doulati Ardejani, F., Bahroudi, A., Hoseini, M., & Khakpour, M. (2022). Mechanical-electrical dewatering (EDW) of mine tailings: Influence of voltage level on water recovery and moisture reduction. *Minerals Engineering*, 175, 107303. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107303>
- Shaikh, M., Ali, A., Ahmed, R., & Shaikh, B. A. (2023). A review on Internet of Things (IoT) based water monitoring system. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(6), 1273–1278. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35\(6\)-01](https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(6)-01)
- Vallejo-Sanchez, D., Muñoz-García, A., Chaverra-Zuleta, E., Correa-Casas, J., Londoño, L. F., & Bustamante-

- Rúa, O. (2024). Desarrollo de una arquitectura IoT para monitoreo ambiental: Integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. *DYNA*, 91(231), 163–168. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n231.112093>
- Yong García, G. E. (2021). *Desarrollo de un sistema de monitoreo y control automático en apoyo a las operaciones de la empresa Sitech Perú S.A., distrito de Santiago de Surco, provincia y departamento de Lima-Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/5031>
- Zhenguo, Y., Xintan, C., & Yanping, W. (2020). The prediction of water conducted zone in coal mining by Internet of Things perception. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(21), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05833-6>