

## Inteligencia Artificial para la Gestión Predictiva de Riesgos ESG en Relaves Mineros

**Autor:** Edgar Ricardo Quiroz Villón **Afiliación:** Ingeniero Civil, Doctor en Recursos Hídricos, Consultor en Operaciones y Proyectos Mineros

**Resumen** La gestión de relaves mineros es una preocupación crítica en la industria global, impulsada por los recientes desastres y la creciente demanda de prácticas mineras sostenibles. Este artículo técnico presenta una arquitectura avanzada de datos e Inteligencia Artificial (IA) diseñada para la gestión predictiva de riesgos ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) en depósitos de relaves. La solución integra **información multifuente** de sensores IoT, series climáticas, imágenes satelitales, auditorías ambientales, registros comunitarios y cumplimiento normativo. Mediante la aplicación de modelos de aprendizaje automático supervisado y no supervisado, se identifican patrones y correlaciones complejos, permitiendo **anticipar eventos críticos** como fallas físicas en la estructura del depósito, riesgos de afectación ambiental por filtraciones o eventos extremos, puntos de presión social en territorios vulnerables, y riesgos de no conformidad con estándares internacionales como el GISTM (Global Industry Standard on Tailings Management).

Se propone el desarrollo de un **sistema de alertas basado en indicadores clave de desempeño ESG**, complementado con herramientas de visualización y paneles de control, para facilitar la toma de decisiones estratégicas y proactivas. Esta aproximación no solo busca **reducir riesgos reputacionales y operacionales**, sino también **mejorar la toma de decisiones basada en datos y fortalecer la licencia social** y el cumplimiento normativo. La metodología es escalable y replicable, con un enfoque particular en su aplicabilidad a operaciones mineras en países como Perú y Chile.

**Palabras Clave:** Inteligencia Artificial, Gestión de Riesgos, ESG, Relaves Mineros, Minería 4.0, Gestión Predictiva.

**1. Introducción** La industria minera enfrenta desafíos crecientes relacionados con la sostenibilidad y la gestión de riesgos, especialmente en lo que respecta a los relaves mineros, los subproductos de las operaciones de extracción que almacenan residuos tóxicos. Incidentes catastróficos, como los ocurridos en Brumadinho y Mariana, Brasil, han puesto de manifiesto la urgente necesidad de sistemas de gestión de riesgos más robustos y predictivos. En respuesta, se han desarrollado estándares globales, como el GISTM, que enfatizan la monitorización apropiada de las instalaciones de relaves a lo largo de su ciclo de vida.

La **digitalización y la adopción de tecnologías avanzadas** son cruciales para superar estos desafíos. La Inteligencia Artificial (IA), junto con el aprendizaje automático (ML) y el Internet

de las Cosas (IoT), se presenta como una herramienta prometedora para transformar la gestión de relaves, permitiendo una transición hacia una minería más segura, eficiente y sostenible. Si bien la IA tiene un potencial significativo para mejorar las prácticas ESG, también implica riesgos si no se implementa con una perspectiva ética y holística.

Este artículo técnico propone una **arquitectura innovadora de IA para la gestión predictiva de riesgos ESG** en relaves mineros. La solución busca integrar diversas fuentes de datos para proporcionar una visión integral de las condiciones del depósito, anticipar eventos críticos y apoyar la toma de decisiones estratégicas en tiempo real.

**2. El Desafío de la Gestión de Relaves y los Riesgos ESG** Los depósitos de relaves son algunas de las estructuras artificiales más grandes del planeta, diseñadas para la contención permanente de subproductos mineros, a menudo tóxicos y potencialmente radiactivos. Su falla puede tener consecuencias catastróficas, resultando en pérdidas de vidas, daños extensos a la propiedad y graves impactos ambientales. La industria minera está bajo una presión creciente para minimizar su impacto ambiental, incluida la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), el uso intensivo de energía y la generación de residuos.

Los desafíos en la gestión de relaves se clasifican en tres dimensiones clave de ESG:

- **Ambientales:** Incluyen contaminación del aire y el agua, impacto en la biodiversidad, gestión de residuos y escasez de agua. Se estima que la minería es responsable del 4% al 7% de las emisiones globales de GEI. Los relaves pueden causar degradación del paisaje, erosión y contaminación del suelo y agua subterránea y superficial.
- **Sociales:** La gestión de relaves puede generar controversias sociales debido a su proximidad a las áreas residenciales, las emisiones (toxicidad, ruido, polvo) y la percepción de riesgos asociados con la sismicidad inducida. También se plantean preocupaciones sobre la pérdida de empleos debido a la automatización y la equidad en la distribución de los beneficios de la tecnología.
- **Gobernanza:** La falta de datos exhaustivos y la dificultad de la supervisión manual representan desafíos significativos en la gestión de relaves. La ausencia de una supervisión rigurosa por parte de las agencias reguladoras y la dependencia de la autoevaluación de las empresas mineras aumentan los riesgos. Además, la **fragmentación de los datos** y la falta de una "fuente única de verdad" son obstáculos comunes para la adopción de tecnologías avanzadas.

Los estándares internacionales, como el GISTM, buscan establecer requisitos de gestión de relaves con el objetivo de "cero daños a las personas y al medio ambiente".

### 3. Arquitectura de Datos e Inteligencia Artificial para la Gestión Predictiva de Relaves

Para abordar la complejidad de la gestión de riesgos en relaves, se propone una arquitectura que integra datos de múltiples fuentes y aplica capacidades avanzadas de IA.

**3.1. Integración de Información Multifuente** La eficacia de un sistema predictivo de riesgos radica en la **calidad y diversidad de los datos** que lo alimentan. La arquitectura propuesta fusiona las siguientes categorías de datos:

- **Datos de Sensores (IoT):** Una red extensa de sensores desplegados en toda la infraestructura minera, incluyendo equipos y áreas operativas, recolecta datos en tiempo real sobre parámetros como la **humedad del suelo, temperatura, niveles de agua, precipitación y actividad sísmica**. Estos datos son cruciales para detectar anomalías y predecir fallas. VROC, una compañía de IAoT, ya utiliza datos de minas y clima para predecir niveles de agua en presas de relaves, drenaje, integridad estructural, estabilidad, polvo y actividad sísmica.
- **Series Climáticas:** Datos históricos y en tiempo real de condiciones meteorológicas (lluvia, temperatura, viento) son esenciales para predecir el impacto de eventos extremos en la estabilidad de los relaves y el riesgo de filtraciones.
- **Imágenes Satelitales:** Imágenes de alta resolución de satélites como Sentinel-2 y Landsat-8 son fundamentales para el mapeo topográfico, la identificación de cambios en el uso del suelo, la detección de presas de relaves (registradas o no) y el monitoreo de su evolución a lo largo del tiempo. También pueden usarse para evaluar el impacto ambiental potencial, como la detección de la extensión de la minería, los cambios en la cubierta terrestre, o identificar la minería ilegal. La identificación de precursores de fallas catastróficas en presas de relaves ha demostrado ser posible utilizando Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) basado en satélites.
- **Auditorías Ambientales y Registros de Desempeño:** Información contenida en informes ESG, estados financieros y reportes de auditoría ambiental. Estos datos no estructurados pueden ser procesados mediante Procesamiento de Lenguaje Natural (NLP) para identificar patrones y tendencias relacionadas con el desempeño ambiental de la empresa.
- **Registros Comunitarios y Datos Sociales:** Información de encuestas, redes sociales, registros de quejas y otras fuentes de datos relacionadas con la comunidad local. Esto permite monitorear el sentimiento social, identificar puntos de presión y evaluar el impacto de las operaciones en el bienestar de la población.

- **Cumplimiento Normativo:** Datos sobre licencias, permisos, informes de cumplimiento y estándares regulatorios aplicables (ej., GISTM). Estos datos ayudan a identificar desviaciones del cumplimiento y los riesgos asociados.

**3.2. Modelos de Inteligencia Artificial para la Predicción de Riesgos** La IA y el aprendizaje automático permiten analizar estos vastos y complejos conjuntos de datos, superando las capacidades humanas.

- **Aprendizaje Supervisado:**
  - **Clasificación y Regresión:** Modelos como las Redes Neuronales Convolucionales (CNNs) han demostrado ser altamente efectivos para tareas de clasificación de imágenes, como la **clasificación de presas de relaves, tipos de minerales y categorías de riesgo** (ej. bajo, medio, alto). Modelos híbridos como CNN-LSTM (redes convolucionales-memoria a largo corto plazo) son utilizados para la **predicción de series temporales**, como la línea de saturación en los relaves, que es un factor clave para cuantificar la seguridad.
  - **Mantenimiento Predictivo:** Algoritmos de ML pueden predecir fallas de equipos, optimizar procesos de producción y descubrir nuevas perspectivas para impulsar mejoras operativas, incluyendo el monitoreo de la fatiga de los operadores y la detección de incidentes.
- **Aprendizaje No Supervisado:**
  - **Detección de Anomalías y Agrupamiento (Clustering):** Útil para identificar patrones inusuales en grandes conjuntos de datos que podrían indicar riesgos emergentes o incidentes no registrados. Permite la identificación de minas y presas no registradas.
  - **Minería de Patrones Visuales (VPM):** Puede aplicarse para identificar partes de presas o minas en imágenes satelitales, escalando a grandes áreas de interés.
- **Optimización Multi-Objetivo (MOO):** Permite evaluar y optimizar las actividades mineras considerando la multiplicidad de objetivos: **financieros, ambientales y sociales**. Las IA pueden capturar las interconexiones entre las decisiones de inversión y los resultados, calculando las combinaciones óptimas que forman una "frontera de Pareto" que muestra las compensaciones entre objetivos. Un enfoque interactivo (iMOO) facilita que los tomadores de decisiones, en conjunto con los

*stakeholders*, elijan rutas y estrategias que equilibren ganancias económicas con impactos no económicos.

### **3.3. Anticipación de Eventos Críticos** La integración de datos y modelos de IA permite la **anticipación proactiva de una gama de eventos críticos**:

- **Posibles fallas físicas en la estructura del depósito:** La predicción de la línea de saturación en los relaves con modelos CNN-LSTM y el monitoreo de vibraciones y movimientos del suelo con datos sísmicos pueden proporcionar advertencias tempranas de inestabilidad estructural. Los modelos de IA pueden evaluar la integridad estructural y la estabilidad de las presas de relaves.
- **Riesgos de afectación ambiental por filtraciones o eventos extremos:** La IA puede predecir la contaminación del agua y el suelo, optimizar la gestión de residuos y el uso de productos tóxicos, y monitorear la calidad del agua y las emisiones.
- **Puntos de presión social en territorios vulnerables:** Los sistemas de IA pueden identificar patrones en los datos de la comunidad que sugieren descontento o riesgo de conflicto, ayudando a las empresas a gestionar las relaciones con los *stakeholders*. La vigilancia y el monitoreo facial diseñados para seguridad también pueden ayudar a detectar intrusos o aspectos perimetrales, aunque esto plantea consideraciones éticas sobre la privacidad.
- **Riesgos de no conformidad con estándares como el GISTM:** La IA facilita el cumplimiento de los estándares de seguridad y sostenibilidad de los relaves. Puede mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, la recopilación de datos de cumplimiento y la automatización de informes.

### **3.4. Sistema de Alertas y Paneles de Control** La información generada por los modelos de IA se traduce en un **sistema de alertas y paneles de control intuitivos**. Estos sistemas permiten una **visibilidad completa y consciente** de las operaciones.

- **Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) ESG:** Los paneles mostrarían métricas en tiempo real sobre la estabilidad de los relaves, la calidad del agua, las emisiones, la relación con la comunidad y el estado de cumplimiento.
- **Visualización y Dashboards:** Interfaz gráfica para operadores y gerentes, con capacidad de acceso remoto, proporcionando información clara y accionable para la toma de decisiones informadas y rápidas. Se pueden diseñar **tableros simples y legibles** para dar a los operadores la información que necesitan para actuar.
- **Toma de Decisiones Estratégicas:** La IA conecta los datos de una manera que un individuo no podría, permitiendo identificar áreas donde han ocurrido cambios, leer

niveles de agua y realizar simulaciones para predecir olas de inundación para mejorar los planes de evacuación. Esto permite una gestión proactiva y **mejora la agilidad para responder a los cambios** en la oferta y la demanda.

**4. Objetivos y Resultados Esperados** Esta propuesta se alinea con la visión de una minería del siglo XXI que integra humanos y máquinas de manera efectiva, con un sesgo hacia máquinas que apoyan en gran medida las capacidades humanas.

**4.1. Objetivos** Los objetivos principales de la implementación de esta arquitectura son:

- **Integrar tecnologías de IA en la gestión de riesgos ESG en relaves:** A través de la unificación de diversas fuentes de datos y la aplicación de modelos avanzados de IA.
- **Aumentar la predictibilidad y prevención de incidentes críticos:** Pasar de un enfoque reactivo a uno predictivo, anticipando y mitigando proactivamente los riesgos de fallas de relaves, contaminación ambiental y conflictos sociales.
- **Alinear el monitoreo operativo con marcos internacionales (GISTM, ICMM):** Asegurar que las prácticas de gestión de relaves cumplan y superen los estándares globales y las mejores prácticas de la industria.
- **Proponer una solución replicable y escalable para operaciones en Perú y Chile:** Desarrollar un marco adaptable que pueda implementarse en diversas operaciones mineras en la región, dada su relevancia económica y los desafíos compartidos en la gestión de recursos.

**4.2. Resultados Esperados** La implementación exitosa de esta solución generará los siguientes beneficios tangibles:

- **Reducción de riesgos reputacionales y operacionales:** Al prevenir incidentes críticos, se minimizan los impactos negativos en la seguridad, el medio ambiente y la reputación de la empresa, lo que se traduce en ahorro de costos y mantenimiento de la continuidad operativa.
- **Mejora en la toma de decisiones con base en datos:** Los gerentes y operadores tendrán acceso a información en tiempo real y análisis predictivos, lo que les permitirá tomar decisiones más informadas, optimizadas y ágiles.
- **Fortalecimiento de la licencia social y el cumplimiento normativo:** La transparencia, la proactividad en la gestión de riesgos y el cumplimiento riguroso de los estándares mejorarán la confianza de la comunidad y las autoridades reguladoras, facilitando la obtención y el mantenimiento de la licencia social para operar.

**5. Conclusión** La Inteligencia Artificial representa una herramienta transformadora para la gestión de relaves mineros, ofreciendo la capacidad de prever y mitigar riesgos ESG complejos de manera sin precedentes. La **integración de datos multifuente** con **modelos avanzados de IA** no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fomenta la seguridad, la sostenibilidad ambiental y la aceptación social.

Al anticipar fallas físicas, impactos ambientales y presiones sociales, la minería puede operar de manera más responsable, fortaleciendo sus relaciones con las comunidades y cumpliendo con los estándares internacionales. La aplicación de IA en la gestión de relaves es un paso fundamental hacia una **minería más inteligente, segura y sostenible**, con el potencial de ser un modelo de referencia para la industria global. Es crucial que la implementación de estas tecnologías se realice con una **perspectiva ética**, involucrando a los *stakeholders* locales y asegurando la transparencia para construir confianza y aceptación. A pesar de los beneficios económicos, es fundamental que el diseño y empleo de la IA contribuyan a **objetivos de sostenibilidad más amplios** y no exacerben patrones de consumo insostenibles o desigualdades. La IA debe ser vista como una herramienta más en un conjunto más amplio de instrumentos ESG.

---

## Referencias Bibliográficas

- Alghamdi, N. A., & Al-Baity, H. H. (2022). Augmented analytics driven by AI: A digital transformation beyond business intelligence. *Sensors*, 22(20), 8071.
- Ali, D., & Frimpong, S. (2020). Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector. *Artificial Intelligence Review*, 53, 6025–6042.
- Balaniuk, R., Isupova, O., & Reece, S. (2020). Mining and Tailings Dam Detection In Satellite Imagery Using Deep Learning. *Preprint submitted to Remote Sensing of Environment*.
- Biehl, J., Köppel, J., Neugebauer, J., & Geißler, G. (2025). Digging Deep – Governing subsurface uses for the German energy transition. *Cleaner Production Letters*, 8, 100099.
- Corrigan, C. C., & Ikonnikova, S. A. (2024). A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*, 17, 101440.
- Deberdt, R., Le Billon, P., Makinde, O., Dauvergne, P., Solwati, T., Razmi, S., Kumar, G., & Belhabib, D. (2025). Artificial intelligence and ESG in resources-intensive industries:

Reviewing the use of AI in fisheries, mining, plastics, and forestry. *The Extractive Industries and Society*, 23, 101690.

- Deloitte. (2022). *Future of mining with AI: building the first steps towards an insight-driven organization*.
- Dillon, T., Wu, C., & Chang, E. (2010). Cloud Computing: Issues and Challenges. *2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 27–33.
- Ferreira, E., Brito, M., Balaniuk, R., Alvim, M. S., & dos Santos, J. A. (2020). BRAZILDAM: A BENCHMARK DATASET FOR TAILINGS DAM DETECTION. *Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference 2020*.
- Haenlein, M., & Kaplan, A. (2019). A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence. *California Management Review*, 61(4), 5–14.
- Hyder, Z., Siau, K., & Nah, F. (2019). Artificial Intelligence, machine learning, and autonomous technologies in mining industry. *Journal of Database Management*, 30(2), 67–79.
- Jang, H., & Topal, E. (2020). Transformation of the Australian mining industry and future prospects. *Mining Technology*, 129(3), 120–134.
- Kaplan, A., & Haenlein, M. (2019). Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. *Business Horizons*, 62(1), 15–25.
- McCoy, J. T., & Auret, L. (2019). Machine learning applications in minerals processing: A review. *Minerals Engineering*, 132, 95–109.
- Mulundumina Shimaponda-Nawa, & Glen T. Nwaila. (2024). Integrated and intelligent remote operation centres (I2ROCs): Assessing the human–machine requirements for 21st century mining operations. *Minerals Engineering*, 207, 108565.
- Murphy, P. (2019). How AI technology can make mining more productive. IBM.
- Nwaila, G. T., Zhang, S. E., Bourdeau, J. E., & Ghorbani, Y. (2022). Data-driven predictive modeling of lithofacies and Fe in-situ grade in the Assen Fe ore deposit of the transvaal supergroup (South Africa) and implications on the genesis of banded iron formations. *Natural Resources Research*, 31(5), 2369–2395.



- OECD. (2023). Recommendation of the council on artificial intelligence. OECD/LEGAL/0449.
- PwC. (2021). Ten insights into 4IR. PwC.
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*.
- SAP. (n.d.). *Tailings Storage Facility Management*. Recuperado de <https://www.sap.com/mena/documents/2021/08/96d004fc-927d-0010-b286-cd60bfe4dc94.html>
- Shimaponda-Nawa, M., Nwaila, G. T., Zhang, S. E., & Bourdeau, J. E. (2023). A framework for measuring the maturity of real-time information management systems (RTIMS) in the mining industry. *The Extractive Industries and Society*, 16, 101368.
- Soofastaei, A., Aminossadati, S. M., Kizil, M. S., & Knights, P. (2016). Reducing fuel consumption of haul trucks in surface mines using artificial intelligence models. *Proceedings of the 16th Coal Operators' Conference, Mining Engineering*, 477–489.
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). *Energy and policy considerations for deep learning in NLP*. arXiv.
- VROC. (n.d.). *Artificial intelligence for tailings management*. Recuperado de <https://vroc.ai/artificial-intelligence-for-tailings-management/>
- Wang, W., Li, L., Wang, X., Li, Q., Jia, S., Tong, R., & Jun, Y. (2020). Saturation Line Forecasting via a Channel and Temporal Attention-based Network. *IEEE Access*, 8, 206491-206502.
- Xu, Y., Liu, X., Cao, X., Huang, C., Liu, E., Qian, S., Liu, X., Wu, Y., Dong, F., Qiu, C.-W., Qiu, J., Hua, K., Su, W., Wu, J., Xu, H., Han, Y., & Fu, C. (2021). Artificial intelligence: a powerful paradigm for scientific research. *Innovation*, 2(4).
- Young, A., & Rogers, P. (2019). A review of digital transformation in mining. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(4), 683–699.