

Inteligencia Artificial y Machine Learning en la Gestión Predictiva de Relaves: Hacia una Minería 5.0 Segura y Sostenible

Autor: PhD(c) Edgar R. Quiroz Villón, Especialista en Operaciones y Proyectos mineros: edgar.quiroz@frame.pe

Resumen

La minería peruana enfrenta un reto histórico: garantizar la seguridad y sostenibilidad de sus depósitos de relaves (TSF) en un escenario de mayor fiscalización social, climática y regulatoria. La transformación digital, basada en el uso de **Inteligencia Artificial (IA)** y **Machine Learning (ML)**, abre un nuevo paradigma para pasar de una gestión reactiva a una gestión predictiva de riesgos. Este artículo presenta el marco conceptual de *Tailings 5.0*, casos de aplicación en el Perú y en el mundo, un modelo predictivo para evaluar la estabilidad física de depósitos de relaves, y una hoja de ruta para implementar estas tecnologías con enfoque ESG. Se discuten beneficios, limitaciones y oportunidades estratégicas para que el país lidere una minería más segura, sostenible y competitiva a nivel global.

Abstract

Peruvian mining faces a historic challenge: ensuring the safety and sustainability of tailings storage facilities (TSFs) in a context of growing social, climatic, and regulatory scrutiny. Digital transformation, based on **Artificial Intelligence (AI)** and **Machine Learning (ML)**, opens a new paradigm to shift from reactive to predictive risk management. This paper introduces the *Tailings 5.0* framework, presents use cases in Peru and abroad, outlines a predictive model to evaluate TSF physical stability, and proposes a roadmap for ESG-focused implementation. Benefits, limitations, and strategic opportunities are discussed to position Peru as a global leader in safe, sustainable, and competitive mining.

Palabras clave

Relaves, IA, Machine Learning, minería 5.0, GISTM, ESG, monitoreo predictivo, gemelos digitales.

1. Introducción

Los depósitos de relaves constituyen una de las infraestructuras más críticas de la minería peruana. Solo en 2024, las operaciones de cobre generaron alrededor de **462 millones de toneladas** de relaves. Estas cifras evidencian el enorme desafío de manejar grandes volúmenes de residuos de manera segura, sostenible y eficiente.

La historia reciente ha mostrado el costo humano, ambiental y reputacional de las fallas de presas de relaves. Los casos de Brumadinho (Brasil, 2019) y Siana (Filipinas, 2024) confirman que la gestión tradicional, basada en inspecciones manuales y análisis retrospectivos, ya no es suficiente. La **Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM, 2020)** exige ahora monitoreo continuo, gobernanza robusta y transparencia frente a stakeholders.

En este contexto, la **transformación digital** emerge como un cambio disruptivo. El uso de **IA y ML** permite procesar millones de datos en tiempo real, identificar patrones invisibles al ojo humano y anticipar comportamientos críticos de los depósitos de relaves. De esta forma, la minería puede pasar de un enfoque reactivo a un **modelo predictivo**, reduciendo riesgos, optimizando costos y fortaleciendo la sostenibilidad.

Este artículo desarrolla el concepto de *Tailings 5.0*, presenta un caso práctico de aplicación en el Perú, expone los beneficios y desafíos de adoptar IA y ML en la gestión de relaves, y propone un roadmap de implementación con enfoque ESG.

2. Tailings 5.0: Marco conceptual de la transformación digital

2.1 Evolución histórica

- **Tailings 1.0 – 3.0:** gestión reactiva, construcción masiva, poca instrumentación, control por inspección visual.
- **Tailings 4.0:** digitalización inicial; sensores IoT, SCADA, reportes en línea; sistemas fragmentados y analítica limitada.
- **Tailings 5.0:** integración total de tecnologías digitales con IA, gemelos digitales, analítica predictiva, blockchain y gobernanza ESG.

2.2 Pilares de Tailings 5.0

1. **Sensórica IoT avanzada:** piezómetros, inclinómetros, radares, drones y satélites.
2. **Data lakes:** integración de grandes volúmenes de datos en la nube.
3. **IA y ML:** modelos predictivos de estabilidad, series temporales y clasificación de imágenes.
4. **Blockchain:** trazabilidad y transparencia para stakeholders.
5. **Gobernanza digital:** cumplimiento GISTM y reportes en línea.

[Mina/Planta]



[Sensores IoT en Relaves/ESG] → [Plataforma de Datos en Tiempo Real]



[Modelos IA/ML Predictivos]



[Gemelo Digital del Depósito de Relaves]



[Dashboard + Alertas + SCADA]



[Toma de Decisiones / Automatización]

Figura 1: Esquema de arquitectura digital de Tailings 5.0 – elaboración propia.

3. Modelo predictivo aplicado a depósitos de relaves

3.1 Variables críticas

- **Cuantitativas:** nivel de agua, caudal de filtración, volumen de poza, desplazamientos medidos por prismas.
- **Cualitativas:** presencia de grietas, estado del coronamiento, granulometría del material.

3.2 Algoritmos utilizados

- Regresión múltiple y Random Forest ($R^2 = 0.91$, $MAE = 0.007$).
- Árboles de decisión para escenarios de falla.
- LSTM (Long Short-Term Memory) para series temporales de presión de poros.

3.3 Índice de Estabilidad Operativa (IEO)

Se diseñó un índice de 0.00 a 1.00 para clasificar condiciones:

- ≥ 0.80 : IDEAL.
- 0.60–0.79: NORMAL.
- 0.40–0.59: OBSERVABLE.
- 0.20–0.39: REACTIVO.
- < 0.20 : ANÓMALO (acción inmediata).

Resultados preliminares mostraron **91% de precisión predictiva**.

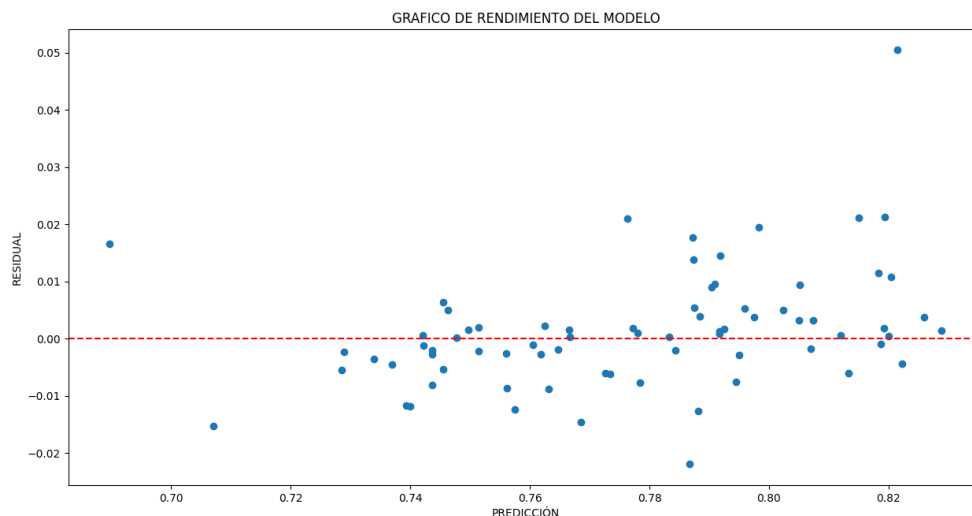


Figura 2: rendimiento del modelo predictivo – elaboración propia.

4. Beneficios estratégicos de la IA y ML en relaves

4.1 Seguridad estructural

- Reducción del riesgo de fallas catastróficas entre -60% y -80%.
- Detección temprana de deformaciones críticas.

4.2 Continuidad operativa

- Aumento del tiempo medio entre fallas (MTBF) en +50% a +70%.
- Optimización de la vida útil del TSF.

4.3 Sostenibilidad ambiental

- Reducción del consumo de agua en 10% a 30% por tonelada procesada.
- Mejora en el cumplimiento ambiental $\geq 95\%$.
- Transparencia y confianza con stakeholders a través de blockchain.

5. Roadmap de implementación: de la teoría a la práctica

1. **Diagnóstico digital y gap analysis GISTM.**
2. **Sensórica inteligente e integración IoT.**
3. **Gemelo digital del TSF y analítica predictiva.**
4. **Automatización y control autónomo** de operaciones.
5. **Integración ESG y blockchain** para trazabilidad y gobernanza.

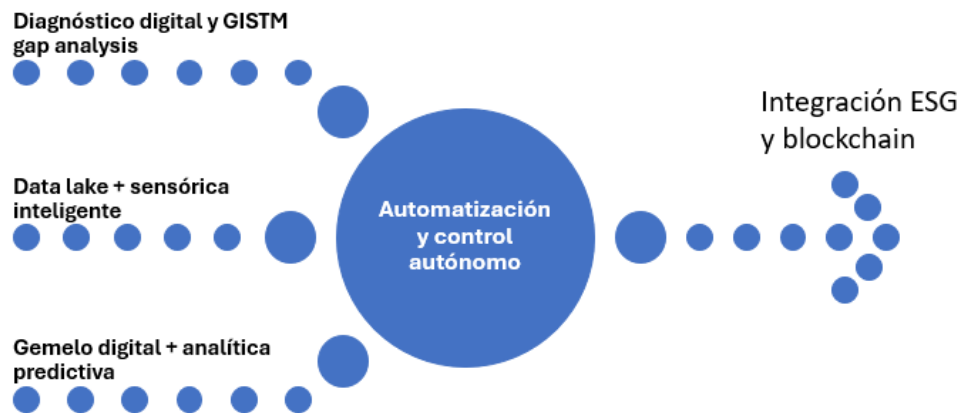


Figura 3: hoja de ruta para implementar Tailings 5.0 – elaboración propia.

6. Discusión

La adopción de IA y ML en depósitos de relaves presenta oportunidades y desafíos:

- **Oportunidades:**
 - Prevención de fallas y accidentes.
 - Optimización de costos operativos y CAPEX.
 - Acceso a financiamiento verde (ej. *The Copper Mark*).
- **Desafíos:**
 - Calidad y continuidad de datos.
 - Ciberseguridad en sistemas críticos.
 - Capacitación de ingenieros en ciencia de datos.
 - Adaptación de normativas nacionales a estándares GISTM.

Comparado con experiencias internacionales en Canadá, Chile y Australia, el Perú tiene la oportunidad de **posicionarse como líder regional** en minería digital y responsable.

7. Conclusiones

- La gestión de relaves debe evolucionar hacia un enfoque predictivo, apoyado en IA y ML.
- El modelo *Tailings 5.0* ofrece un marco robusto para integrar sensórica, analítica avanzada y gobernanza ESG.
- La minería peruana tiene la oportunidad de liderar la transición hacia relaves inteligentes, seguros y sostenibles.
- El mayor riesgo no es adoptar nuevas tecnologías, sino mantener esquemas tradicionales que no previenen catástrofes.

8. Agradecimientos

Frame Limited, empresa dedicada a la digitalización y transformación tecnológica en minería, info@frame.pe; [linkedin.com/in/equiroz75](https://www.linkedin.com/in/equiroz75)

9. Bibliografía

1. Global Tailings Review. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*.
2. ANCOLD. (2019). *Guidelines on Tailings Dams*.
3. Villavicencio, G., et al. (2014). *Tailings Dam Failures in Chile: Lessons Learned*. Minerals.
4. McCarthy, D., et al. (2023). *Machine Learning in Geotechnical Engineering*. ASCE.
5. Quiroz Villón, E. (2024). *AI and ML for Predictive Risk Management in TSF*. Robotics Mining Conf., Madrid.
6. ICMM. (2021). *Tailings Governance Framework*.
7. Foster, M., Blight, G., & Fourie, A. (2019). *Tailings Dam Safety: Learning from Failures*.