



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y SU INFLUENCIA EN LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE OPERACIONES MINERAS, CAJAMARCA, 2024”

**Trabajo de suficiencia profesional para optar al título
profesional de:**

Ingeniero de Minas

Autor:

Danit Soliz Infante Valdez

Asesor:

Dr. Ing. Miriam Bravo Orellana

<https://orcid.org/0000-0001-9971-6874>

Cajamarca - Perú

2025

Informe de Similitud






Página 2 of 74 - Integrity Overview

Identificador de la entrega IncoId::1-3240374125

15% Overall Similarity

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

Top Sources

- 14%  Internet sources
- 8%  Publications
- 10%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

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

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

Tabla de contenido

Índice de tablas	6
Índice de Figuras	7
RESUMEN EJECUTIVO	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	13
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA	21
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	42
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS	48
ANEXOS.....	53

Índice de tablas

Tabla 1	Fragmentación (P80), impactos en las voladuras analizadas	22
Tabla 2	Pérdidas anuales por fragmentación subóptima	22
Tabla 3	Proceso de Carguío y Acarreo - Eficiencia Actual vs. Ideal	23
Tabla 4	Cálculo de pérdidas por turno de Trabajo (9.2 horas)	23
Tabla 5	Datos históricos recopilados, 35 de 150 voladuras realizadas en la operación minera.25	
Tabla 6	Motor de Inferencia de ajuste de parámetros	27
Tabla 7	Análisis comparativo de voladuras tradicionales vs. voladuras con sistema experto ...	28
Tabla 8	Datos recopilados, 35 de 300 ciclos de carguío y acarreo realizados en la operación .	29
Tabla 9	Pesos de cada neurona de la Capa Oculta 1	31
Tabla 10	Pesos de cada neurona de la Capa Oculta 2	31
Tabla 11	Cálculo de salida Capa Oculta 1	32
Tabla 12	Cálculo de salida Capa Oculta 2	32
Tabla 13	Cálculo del error cuadrático medio (MSE)	33
Tabla 14	Evolución del MSE en 100 Épocas	33
Tabla 15	Análisis de Reducción de tiempos de Ciclo	34
Tabla 16	Cronograma de Actividades 2024	36
Tabla 17	Volumen de producción diaria por periodos del año 2024.....	37
Tabla 18	Horas efectivas laboradas por día.....	37
Tabla 19	Parámetros de perforación.....	38
Tabla 20	Parámetros de voladura	39
Tabla 21	Parámetros del Carguío	40
Tabla 22	Parámetros del acarreo	41
Tabla 23	Costo total del proceso productivo.....	41
Tabla 24	Evaluación de la aplicación de Sistemas Expertos en los procesos de Perforación y Voladura.....	42
Tabla 25	Análisis comparativo de los parámetros de Perforación y Voladura antes y después del Sistema Experto.....	43
Tabla 26	Evaluación de la aplicación Redes Neuronales Artificiales en los procesos de Carguío y Acarreo.....	44
Tabla 27	Estimación de volumen de material transportado Con IA y Sin IA	44
Tabla 28	Cálculo del % de Optimización del proceso de Perforación y Voladura	45
Tabla 29	Pesos asignados por parámetro. Proceso de Perforación y Voladura.....	46
Tabla 30	Cálculo del % de Optimización del proceso de Carguío y Acarreo	46
Tabla 31	Reducción de Costos por proceso luego de la aplicación de la IA.....	46

Índice de Figuras

Figura 1	Diagrama de flujo del proceso de perforación y voladura	10
Figura 2	Diagrama de flujo del proceso de carguío y acarreo.....	11
Figura 3	Gráfico de dispersión Diámetro de taladro vs. Fragmentación P80	21
Figura 4	Esquema para implementación de la propuesta	24
Figura 5	Diagrama de Flujo de la validación, implementación y monitoreo	35
Figura 6	Volumen transportado (tn) Sin IA vs. Con IA.....	45

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo nace como necesidad de mejorar la gestión de operaciones mineras, con el objetivo de optimizar los procesos de Perforación, Voladura (fragmentación de material), Carguío y Acarreo (traslado de material) realizados por la empresa Consorcio Cerro Dorado SAC en una operación minera en la región de Cajamarca, los objetivos incluyen medir la influencia de la aplicación de técnicas de la inteligencia artificial como los Sistemas Expertos y las Redes Neuronales Artificiales.

La metodología empleada consistió en la recopilación de datos históricos de procesos realizados previamente, con los cuales se estructuró bases de conocimiento que permitió desarrollar algoritmos, utilizando lenguaje de programación Python, para realizar estimaciones que nos permitan determinar la mejora de estos procesos en la operación minera.

Tras el estudio realizado, se concluyó que la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en los procesos mineros de perforación y voladura, se optimizaron en un 28.04 %, en tanto los procesos de carguío y acarreo, se optimizaron en 11.17%, respecto al método tradicional, calculando una reducción total que incluye ambos procesos de hasta el 13.80%.

NOTA

El contenido de la investigación no se encuentra disponible en **acceso abierto** por determinación de los propios autores, en concordancia con en el Texto Integrado del Reglamento RENATI (artículo 12), la Directiva N°048-2020-CONCYTEC-P que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto (ALICIA) administrado por el pliego Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC y la Ley N° 29733, Ley de Protección de Datos Personales.

REFERENCIAS

- Aybar, C. (2013). Alineamiento Estratégico De La Gestión Del Capital Humano En El Sector Minero Metalúrgico. *Industrial Data*, Vol. 16, núm. 2, pp. 50-58.
- Bardales, C., & Zamora, C. (2019). *Evaluación de los criterios de selección de un método de explotación mediante la inteligencia artificial. caso práctico yacimiento de hierro en ventanillas, Yonán, Cajamarca, 2019.* (Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte), Cajamarca, Perú.
- Bascetin, A., & Kesimal, A. (1999). The application of expert systems in the design of blasting operations. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 47(9), 274-278.
- Bishop, C. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- Branch, J., Jaramillo, G., & Franco, G. (2012). El planeamiento minero en Colombia: Hacia lo Estocástico. *Dyna*, Vol. 79, núm. 175, pp. 17-19.
- Carrión, C. (2018). *Aplicación de redes neuronales artificiales para la predicción de la recuperación de planta concentradora en Minsur S.A. – Unidad San Rafael.* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú.
- Caterpillar Inc. (2013). *Handbook of Mining Equipment*. Caterpillar.
- Chairez, M., & Muñoz, E. (2015). Plataforma de monitoreo de recursos basada en gestión del conocimiento dentro de la industria minera. *ReCIBE. Revista electrónica de Computación, Informática Biomédica y Electrónica*, Año 4 No. 1.
- Chillcce, V., & Rojas, R. (2012). *Implementación del sistema experto en molinos para optimizar la molienda del circuito de cobre en la planta concentradora de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú.
- Coello, C. (2006). Evolutionary multi-objective optimization: A historical view of the field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(1), 28-36.
- Dagdelen, K. (1993). Expert systems for open-pit mine design and planning. *Mining Engineering*, 45(5), 525-530.

- Dagdelen, K. (2018). Optimization of open-pit mining operations using artificial intelligence. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), 215-222.
- Darling, P. (2011). *ME Mining Engineering Handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook (3rd ed.)*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
- Delgado, C., Arango, S., & Romero, A. (2015). Una propuesta sistémica para el análisis de la productividad de un proceso minero aurífero. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, núm. 72, pp. 173-185.
- Dick, R., Fletcher, L., & D'Andrea, D. (1983). *Explosives and Blasting Procedures Manual*. US Bureau of Mines.
- Estevez, P., Held, C., & Perez, C. (2012). Prevención de fraude en suscripciones en telecomunicaciones utilizando reglas difusas y redes neuronales. *Expert Systems with Applications* 39(1), 186-194.
- Evangelista, D., Ryan, R., & Bandala, A. (2019). Use of Artificial Neural Network in the Estimation of Detonation Velocity for Tetranitromethane-Nitrobenzene Mixture. *IEEE Xplore*, 978-1-7281-3044-6/19.
- Galvis, L., Ochoa, C., Arguello, H., Carvajal, J., & Calderón, Z. (2011). Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial. *Ingeniería y Ciencia*, Vol. 7, núm. 14, pp. 83-103.
- Giarratano, J., & Riley, G. (2005). *Expert Systems: Principles and Programming (4th ed.)*. Thomson Course Technology.
- Gil, M., López, G., Molina, C., & Bolio, C. (2011). La gestión de la información como base de una iniciativa de gestión del conocimiento. *Ingeniería Industrial*, Vol. XXXII, núm. 3, pp. 231-237.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- Hartman, H., & Mutmanský, J. (2002). *Introductory Mining Engineering (2nd ed.)*. Wiley.

- Haykin, S. (1999). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall. 2da ed.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A.
- Hustrulid, W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Balkema.
- Jackson, P. (1999). *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley 3ra ed.
- Jimeno, C., Jimeno, E., & Carcedo, F. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. CRC Press.
- Konya, C., & Walter, E. (1990). *Surface Blast Design*. Prentice Hall.
- Lagos, G. (2018). Innovación y Tecnología en la Minería Chilena. *Centro de Minería, Pontificia Universidad Católica de Chile*.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- León, R. (2019). *Determinación de índices técnicos de gestión en el desarrollo de labores mineras subterráneas en la Mina San Salvador*. (Tesis de pregrado, Universidad del Azuay), Cuenca, Ecuador.
- López, R., & Castillo, H. (2018). Sistema experto para optimización de voladuras en minas de cobre en Chile. *Revista Minería y Energía*, 12(2), 45-60.
- Lopez, V. (2013). *Diseño de Operaciones Mineras a Cielo Abierto*. México: UNAM.
- Maque, R. (2020). *Desarrollo de un sistema autónomo con inteligencia artificial para el monitoreo continuo de riesgos posturales en tiempo real en minería*. (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú), Lima, Perú.
- Martí, L., & de Castro, L. (2018). Swarm intelligence for dynamic optimization problems. *Swarm Intelligence*, 12(2), 1-25.
- McCulloch, W., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *he Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115-133.
- Norvig, P., & Russell, S. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson: 4ta.
- Orellana, P. (30 de 12 de 2019). *Economipedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/gestion-de-procesos.html>
- Otero, M., & Torres, K. (2016). (Tesis de posgrado, Universidad del Pacífico), Lima, Perú.

- Peña, H. (2019). Tecnologías Emergentes en la Minería Peruana. *Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP)*.
- Perez, C., & Estévez, P. (2017). Automated mineral classification using deep learning. *Minerals Engineering, 110*, 1-8.
- Petteri, L. (2018). *Inteligencia Artificial. 101 cosas que debes saber sobre nuestro futuro*. Barcelona, España: Planeta.
- Portal Minero. (2010). *Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras I: Tecnología y Procesos Productivos*. Santiago de Chile: Portal Minero.
- Quiquia, M., & William, G. (2015). *Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca*. (Tesis de posgrado, Universidad Nacional de Ingeniería), Lima, Perú.
- Ramirez, W., & Sandoval, J. (2020). *Evaluación técnica de perforación y voladura para reducir costos operativos de una mina en Cajamarca – 2020*. (Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte), Cajamarca, Perú.
- Rosales, J., Saenz, R., Rojas, U., & Castillo, J. (2020). Design of a Predictive Model of Rock Breakage by Blasting Using Artificial Neural Networks. *Symmetry, 12*(9), 1405. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/sym12091405>.
- Rumelhart, D., Hinton, G., & Williams, R. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature, 323*(6088), 533-536.
- Russell, S., & Norvig, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson 4ta ed.
- Sevilla, A. (5 de 11 de 2016). *Economipedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/productividad.html>
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2016). *Operations Management*. Pearson (8th ed).
- Soderberg, A., & Wigstrom, L. (1990). Expert systems in mine planning and design. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 4*(2), 89-95.

- Soderberg, A., & Wigstrom, L. (1990). Expert systems in mine planning and design. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 4(2), 89-95.
- Srinivasan, S., & Navathe, S. (2019). Application of machine learning in mineral resource estimation. *Mining Engineering*, 71(8), 45-52.
- Villada, F., Muñoz, N., & Garcia, E. (2016). Redes Neuronales Artificiales aplicadas a la Predicción del precio del oro. *Información Tecnológica*, Vol. 27(5), 143-150 (2016), doi: 10.4067/S0718-07642016000500016.
- Villar, L. (2020). *Uso de sistemas expertos en el ciclo de carguío y acarreo y su influencia en el proceso de mejora continua y gestión de costos operativos*. (Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte), Cajamarca, Perú.
- Wang, J., & Li, X. (2021). Artificial intelligence for safety monitoring in underground mines. *Safety Science*, 134, 105-112.
- Westreicher, G. (07 de 08 de 2020). *Economipedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/gestion.html>
- Zhang, Z., & Zhang, X. (2020). Predictive maintenance in mining using IoT and machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(4), 987-1001.