

ARTICULO ORIGINAL

Redes Neuronales para el reconocimiento de patrones no tradicionales en la predicción de accidentes fatales en la industria minera peruana

Neural networks for pattern recognition of fatal accidents in Peruvian mining industry

Schwarz, M.¹

Universidad de Lima. Lima, Perú

RESUMEN

La investigación propone utilizar redes neuronales para el reconocimiento de patrones no tradicionales en la predicción de accidentes fatales en la industria minera peruana para lo cual explora 6,568 reportes y 239 Informes de Investigación del Ministerio de Energía y Minas reportados entre 2010-2015. La investigación concluye con un error de precisión de 0.0761% la existencia de patrones no tradicionales como la complejidad operacional, experiencia laboral o disponibilidad de equipos que presentan alta influencia en la accidentabilidad y desarrolla un instrumento para predecirla con fines académicos e industriales.

Palabras clave: Seguridad minera; niveles de riesgo; accidente; índice de frecuencia; índice de severidad; índice de accidentabilidad

ABSTRACT

The research proposes use neural networks for the recognition of nontraditional patterns in the prediction of fatal accidents in the Peruvian mining industry for which explores 6,568 reports and 239 Audits of the Ministry of Energy and Mines reported between 2010-2015. The research concludes with an accuracy error of 0.0761% the existence of non-traditional patterns such as operational complexity, work experience or availability of equipment that have a high influence on accidentability and develops an instrument to predictit for academic and industrial purposes.

Keywords: Mining safety; risk levels; accident; frequency index; severity index; accidentability index

INTRODUCCIÓN

La predicción de la accidentabilidad en la actividad industrial y minera es un problema complejo de permanente preocupación para la gerencia y de alto impacto en el modelo de negocio extractivo que se presenta fuertemente influenciado por múltiples factores humanos, tecnológicos, operacionales, económicos y de gestión que han sido ampliamente tratados en la literatura en la búsqueda permanente de reducir los niveles de riesgo asociados a la seguridad de la operación industrial. Los trabajos de Badri et al (2011), Chen et al (2007), Utembe et al (2015) resaltan factores que afectan la accidentabilidad y los registros oficiales del MINEM-Perú (2015) dan cuenta de la ocurrencia de 50 accidentes fatales por año en la industria minera a pesar de los esfuerzos de

***Autor Correspondiente: Max Schwarz.** Universidad de Lima. Lima, Perú

Correo electrónico: mschwarz@ulima.edu.pe

Fecha de recepción: junio 2017; Fecha de aceptación: julio 2017

las compañías mineras por implementar sistemas de gestión y de la legislación minera que acompaña a la industria desde inicios de 1990. En este contexto, tradicionalmente la medición de la accidentabilidad se ha basado principalmente en la frecuencia de eventos y su correspondiente severidad utilizando relaciones causa-efecto de manera discreta dejando de lado la compleja dinámica de sistemas que altera el entorno de la gestión que requiere el desarrollo de un trabajo seguro bajo determinadas condiciones de riesgo. Los trabajos de Long, R., Sun K., Neitsel R., (2015) y Lixia Q, (2015) nos muestran la existencia de factores complejos que no necesariamente participan en la evaluación tradicional de los indicadores para estimar la accidentabilidad. El trabajo de Lixia Q (2015) incorpora un mecanismo original para la medición de la accidentabilidad a partir de ecuaciones de estado incorporando parámetros como el grado de control y la complejidad de la operación para el análisis de la accidentabilidad en la industria minera acercándose más a la compleja realidad de las operaciones industriales.

1. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Las redes neuronales constituyen una técnica de la inteligencia artificial que permite predecir determinadas salidas de un sistema a partir de sus parámetros de entrada mediante el aprendizaje y reconocimiento de patrones en las condiciones de entrada desarrolladas durante el proceso de entrenamiento de manera tal que se pueden predecir salidas con errores cada vez más pequeños a medida que la red aprende y se ajusta para obtener mayor precisión. El avance de la capacidad de cómputo nos permite trabajar sobre grandes conjuntos de datos logrando este aprendizaje con mayor celeridad. En materia de redes neuronales los trabajos desarrollados por McCulloch y Pitts (1943), Rosenblatt (1958), Kohonen (1998), Hopfield (1985), Chiou (2006) y Krielsel (2015) dan cuenta de una evolución en el desarrollo de las redes neuronales, de los procesos de aprendizaje y del reconocimiento de patrones en su utilización como herramientas para predecir eventos a partir de patrones que lo puedan originar siempre que exista la base de datos suficiente para poder entrenar y controlar la configuración de red para reducir al máximo el error de predicción que pueda lograrse.

La aplicación de la técnica de redes neuronales a la gestión de la seguridad minera no es nueva y es un campo de permanente investigación empresarial y académica que ha sido tratado en la literatura desde diversos enfoques tanto en materia de seguridad como en salud ocupacional, sin embargo el análisis específico de las causas de la accidentabilidad desarrollado en la literatura aún no contempla con suficiencia la incorporación de factores no tradicionales en la predicción de accidentes ni establece los patrones recurrentes que pueden causar accidentes fatales en la industria a partir de los reportes que la industria genera en su desempeño de gestión laboral reportada ante las autoridades locales. En este contexto las redes neuronales pueden ser utilizadas como una herramienta eficaz para intentar predecir la accidentabilidad industrial y sus efectos tal como lo demuestran las investigaciones desarrolladas por Nickens, T. et al (2009), Thakur, K. A., Sawhney, R., & Balestrassi, P. P. (2011), Ceylan, H. (2014) y el trabajo desarrollado por Van Den Honert, A. F., & Vlok, P. J. (2015) quienes aplican diferentes configuraciones de redes neuronales artificiales para la predicción de las probabilidades de ocurrencia de accidentes fatales aplicados a casos particulares en distintos contextos industriales y mineros.

2. EXPERIMENTACIÓN, TÉCNICAS Y MÉTODOS

El experimento utilizó la herramienta Neural Tools® de Palisade para desarrollar una red neuronal artificial capaz de predecir la ocurrencia de accidentes a partir del reconocimiento de patrones no tradicionales que normalmente son escasamente estudiados pero cuyo efecto conducen a la ocurrencia de accidentes incapacitantes o fatales en la industria minera tomando en consideración aspectos vinculados como horas de sueño, niveles de remuneración, horas de trabajo, tamaño de operación, índices de frecuencia y severidad, número de incidentes, grado de control, complejidad de la operación, tasa de rotación de personal, calificación-competencia de los trabajadores, estado de ánimo de los involucrados, clima laboral, disponibilidad de equipos, productividad, rentabilidad, confiabilidad, uso de equipos de protección personal, calificación de contratistas y proveedores, antigüedad laboral, temperatura de la zona de trabajo, altura de la operación, nivel de ruido, nivel de colesterol de los involucrados, edad, número de dependientes y la existencia o no de un seguro privado complementario al seguro público.

Para la investigación se ha utilizado una base de datos normalizada con 190,472 registros especificados con la información proveniente de 6,568 reportes de incidentes y accidentes, así como el análisis de 239 Informes de Investigación de Accidentes Fatales documentados en fuentes oficiales del Ministerio de Energía y Minas del Perú, OSINERGMIN y OEFA-Perú entre los años 2010 y 2015. Para el experimento se utilizó la herramienta Neural Tools® de Palisade sobre la base de datos especificada con la selección aleatoria de 5254 casos como grupo de entrenamiento, 1314 casos como grupo de control.

Las especificaciones de las variables de entrada Neural Tools®, denominación, criterios de especificación, valores promedio y desviación estándar de 6568 reportes de incidentes y accidentes ocurridos entre el año 2010-2015 se pueden apreciar en la Tabla 1 adjunta.

Tabla 1. Especificaciones Accidentes fatales Data Set-DB Excel RNA

| Variable | Criterio de especificación | X promedio | σ desviación estándar |
|------------------------------|--|-------------------|------------------------------|
| Horas de sueño | Horas | 7.63 | 0.96 |
| Remuneración | P/Q Respecto sueldo mínimo legal peruano | 5.48 | 2.59 |
| Horas de trabajo | Horas | 11.95 | 0.95 |
| Número de incidentes | Incidentes-operación/año | 2486 | 860 |
| Índice de frecuencia | (Accid. Incap + fatal) x 10 ⁶ /H-H trabajadas | 16.35 | 10.4 |
| Índice de severidad | (horas perdidas. Accx 10 ⁶ /H-H trabajadas | 161.79 | 112.36 |
| Grado de Control | Inteligente 100%, MPM 80%, SGI 50%, Solo Reglamento 30%, Sin Control 0-30% | 56.54% | 26.35% |
| Grado de Complejidad | Extrema 100% Compleja 50-80%, Intermedia 30-50%, No compleja 0-30% | 67.19% | 10.71% |
| Tasa de rotación de personal | Porcentaje de personal retirado/Total de personal de la empresa | 23.9% | 14.1% |
| Competencia | Evaluación % (0-100%) | 65.8% | 12.3% |
| Estado de ánimo | Bueno >80%, Regular 50-80%, | 37.4% | 16.4% |

| | | | |
|------------------------------|---|--------|--------|
| al inicio del turno | Malo 30-50%, Muy malo <30% | | |
| Clima Laboral | Encuesta de Clima (%) | 56.11% | 8.81% |
| Disponibilidad Equipo | (MTBF+MTTR)/MTBF | 57.52% | 21.2% |
| Productividad | TM/Hombre-Guardia | 28.18 | 62.51 |
| Confiabilidad | $e^{(-Tiempo_Ciclo/MTBF)}$ | 53.13% | 24.8% |
| Rentabilidad | ROA (ROI) | 62.39% | 26.9% |
| Protección (EPPs) | Porcentaje (%) de personal que usa EPPs | 60.84% | 30.13% |
| Calificación de Contratistas | Homologados>80%, Marca conocida 50-80%, Sin calif. 30-50%, Informales 0-30% | 55.24% | 23.38% |
| Calificación de Proveedores | Certificados-homologados 100%, Marca conocida 50-80%, Sin calificación 30-50%, Informales 0-30% | 54.72% | 23.5% |
| Antigüedad Laboral | Años | 4.81 | 2.34 |
| Temperatura de trabajo | Grados centígrados | 22 | 2.5 |
| Altura de la operación | Metros sobre el nivel del mar (msnm) | 4000 | 825 |
| Nivel de ruido | Decibeles (dB) | 72 | 13.9 |
| Nivel de Colesterol | Valor en sangre-Reporte médico | 215 | 10 |
| Edad | Años | 43 | 4.5 |
| Dependientes | Personas que dependen del accidentado | 5 | 1 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Reportes MEM Data Base 2010-2015

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del análisis de sensibilidad de Neural Tools® sobre la base de datos normalizada de la investigación definida a partir de los registros del Ministerio de Energía y Minas (MINEM-Perú) correspondientes a los años 2010-2015 y los datos de los 239 informes de accidentes fatales reportados oficialmente a las autoridades peruanas muestran que las principales variables de impacto que influyen en la determinación de accidentes fatales son el grado de complejidad de la operación (26.02%), la antigüedad laboral del involucrado (25.92%), la disponibilidad de equipos y controles (24.28%), la frecuencia de accidentes de la operación (19.22%) y el clima laboral (4.53%) conformando el 99.97% de los factores que explican la accidentabilidad en la industria minera en el período 2010-2015.

La configuración de red PR/GRN Net Neural Tools® ha sido desarrollada sobre la base de 5254 casos de entrenamiento provenientes de la base de datos integrada de los incidentes y accidentes ocurridos en la minería peruana en el período 2010-2015 muestra un total de 1314 pruebas de control en las cuales se ha detectado un error máximo de 0.0761% con una probabilidad de desviación media de 0.0758% y una desviación estándar de 2.7483% sobre los casos analizados.

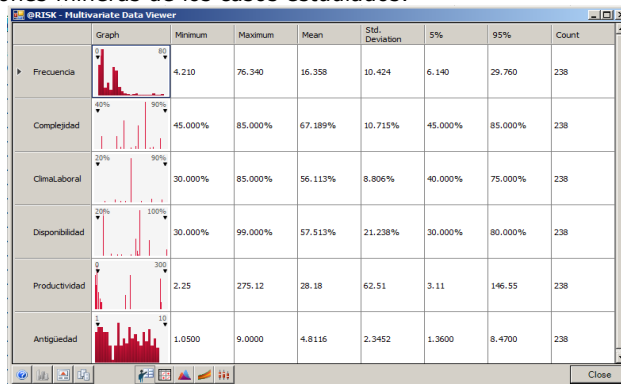
Los resultados del análisis de sensibilidad con la herramienta Neural Tools® pueden apreciarse en la Tabla 1 donde se especifica resultados alcanzados en la etapa de entrenamiento, control y predicción, así como las principales variables de impacto que influyen en la determinación de accidentes fatales para la red neuronal lograda sobre la base de datos de aplicación.

Tabla 1. Summary Neural Tools® Palisade

| Nombre | RNA Neural Tools | Variable Impacto | Peso |
|------------------------|------------------------|------------------|----------|
| Configuración | PNN Category Predictor | Complejidad | 26.0228% |
| Variable Independiente | 25 | Antigüedad | 25.9241% |
| Variable Dependiente | Accidente Fatal | Disponibilidad | 24.2846% |
| Tipo | 0 / 1 | Frecuencia | 19.2267% |
| Casos entrenamiento | 5254 | Clima Laboral | 4.5324% |
| Casos Control | 1314 | Productividad | 0.0094% |
| Tiempo entrenamiento | 00:06:00 | Competencia | 0.0000% |
| Cantidad intentos | 123 | Remuneración | 0.0000% |
| Razón de parada | Autoparada | Contratistas | 0.0000% |
| % Predicciones malas | 0.0000% | Proveedores | 0.0000% |
| Casos Totales | 6568 | Altura | 0.0000% |
| % Error | 0.0761% | Otros | 0.0000% |

Fuente: Neural Tools® Palisade, (2015). Elaboración Propia

El estudio de las características dinámicas para los casos de las variables con mayor sensibilidad identificadas por la red neuronal lograda en la investigación se ha realizado con el uso de @Risk en la Universidad de Lima, luego de la normalización de la base de datos que integra la información proveniente del Ministerio de Energía y Minas peruano (MINEM-Perú) y los informes oficiales y partes médicos anexos de accidentes fatales 2010-2015 (239 casos) la misma que puede revisarse en la Figura 1. Los resultados muestran mayor variabilidad en las frecuencias y en la antigüedad laboral asociada a la experiencia en la operación del colaborador involucrado en la actividad minera durante el período estudiado al igual que distribuciones intensas entre las variables de grado de complejidad-grado de control y disponibilidad de equipos para el desarrollo de las operaciones mineras de los casos estudiados.



Fuente: Neural Tools® Palisade, (2015). Elaboración propia

Figura 1. Summary Multivariate Data Viewer Neural Tools® Palisade

CONCLUSIONES

1. La investigación demuestra la existencia de patrones no tradicionales de alta correlación e influencia como el grado de complejidad de la operación, la antigüedad laboral, la disponibilidad de equipos y controles, la frecuencia de incidentes y accidentes y el clima laboral de la organización que explican el 99.97% las causas de accidentes fatales en la industria minera peruana entre los años 2010-2015.
2. La complejidad de la operación y su relación directamente proporcional al grado de control que deba aplicarse para mantener niveles de riesgo razonables en la operación es la principal variable de influencia en la determinación de accidentes fatales, sin embargo es necesario precisar que se trata de una variable naturalmente compleja que incluye aspectos geotécnicos y geomecánicos directamente proporcionales a la estabilidad y características particulares del macizo rocoso en el cual se desarrolla una operación minera, mostrando una fuerte correlación de riesgo entre los resultados encontrados en el análisis y los tipos de accidentes registrados en el MINEM Perú donde la caída de rocas es el principal tipo de accidente que se presenta en la industria.
3. Los resultados demuestran que las combinaciones de mayor riesgo en los 239 informes de accidentes fatales ocurridos entre el 2010 y 2015 son principalmente las asociadas a alta complejidad-bajo grado de control ($r^2=0.9346$), alta complejidad-poca experiencia ($r^2=0.8345$), alta complejidad-poca competencia ($r^2=0.7245$), alta complejidad-alta frecuencia de accidentes ($r^2=0.7241$), alta complejidad-baja disponibilidad de equipos ($r^2=0.7514$) y alta complejidad-bajo nivel de clima laboral ($r^2=0.6145$).
4. La antigüedad laboral muestra una fuerte correlación en la ocurrencia de accidentes.
5. fatales en particular en dos grupos claramente definidos entre personal con poca antigüedad laboral (0-2años) y personal con una antigüedad mayor a 5 años en el puesto de trabajo, lo cual puede explicarse por falta de experiencia y conocimiento en el caso de la escasa antigüedad y por exceso de confianza en el caso de personal con antigüedades mayores a 5 años. Esta información coincide con las conclusiones de la mayoría de los reportes de accidentes fatales del período estudiado (239 Informes revisados 2010-2015).
6. El Índice de Frecuencia de las operaciones mineras muestra la intensidad de la accidentabilidad en términos de accidentes incapacitantes y fatales por cada millón de horas-hombre laboradas (MINEM-Perú) en cada operación minera, sin embargo, la cifra resultante suele ser más una consecuencia de factores previos que lo determinan por lo que en futuras investigaciones esta variable más bien puede usarse como variable de control y comparación de resultados. Los resultados muestran que la accidentabilidad tiene una correlación definida con la intensidad de accidentes previos que se presentan en la operación minera.
7. La investigación demuestra que la disponibilidad de equipos y la existencia de controles tiene una fuerte influencia en la ocurrencia de accidentes fatales en la industria minera explicando cerca del 25% de la relación causa-efecto para mantener un nivel de riesgo razonable lo cual puede explicarse por el elevado nivel de riesgo que supone no contar con los equipos apropiados, utilizar equipos inadecuados o no disponer de equipos y

controles apropiados en una actividad considerada de alto riesgo como la minería.

8. El clima laboral y las condiciones del ambiente laboral en las cuales se desarrolla la operación minera generan una influencia concreta superior a otros factores tradicionales e incluye aspectos como la carga laboral, la relación jefe-supervisor, las remuneraciones y otras variables de compleja medición y registro que no necesariamente son reportadas de manera apropiada a las entidades regulatorias en el Perú pero que sin embargo determinan la presencia de aspectos emocionales de la vinculación persona-trabajo y determinan factores personales que exceden al alcance del análisis presentado y que requieren ser estudiadas con mayor extensión en futuras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Badri, A., Nadeau, S., & Gbodossou, A. (2011). Integration of OHS into risk management in an open-pit mining project in Quebec (Canada). *Minerals*, 1(1), 3-29.
- Ceylan, H. (2014). An artificial neural networks approach to estimate occupational accident: A national perspective for turkey. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-10. doi:10.1155/2014/756326
- Chen, K., Xu, L., Yang, R., & Bi, Z. (2013). Safety culture assessment of petroleum enterprises based on SMART. *Chinese Journal of Geochemistry*, 32(3), 273-280. doi:http://dx.doi.org/10.1007/s11631-013-0633-3
- Chiou Y.C. (2006). An artificial neural network-based expert system for the appraisal of two-car crash accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 38 (4), 777-785.
- Hopfield, J.J. & Tank, D.W. (1985). Neural computation of decisions in optimization problems. *Biological cybernetics*, 52(3), 141-152.
- Kohonen T. (1998). The self-organizing map. *Neurocomputing*, 21(1-3), 1-6.
- Long, R., Sun K., & Neitsel R. (2015). Injury risk factors in a small-scale gold mining community in Ghana's upper east region. *International Journal of Environmental Research and Public Health* (12), 8744-8761.
- Lixia, Q. (2015). A calculation model of coal mine safety management based on Kalman filter Algorithm. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(3), 1204-1209.
- Manuele, F.A. (2014). Incident investigation our methods are flawed. *Professional Safety*, 59(10), 34-43.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biology*, 5(4), 115-133.
- McCulloch, W.S. & Pitts, W. (1947) How we know universals the perception of auditory and visual forms. *Bulletin of Mathematical Biology*, 9(3):127-147.
- Neural Tools® Versión 7.0.0 Industrial Edition B 289 Palisade Corporation - Licencia 7078620 Universidad de Lima 2015.
- Nickens, T., Liu, D., Boquet, A., Pang, S., & Vincenzi, D.A. (2009). Investigating factors related to fatalities in general aviation using neural network. *IIE Annual Conference. Proceedings*, 991-996.
- Rosenblatt. F. (1958) The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65, 386-408.
- Thakur, K.A., Sawhney, R., & Balestrassi, P.P. (2011). Assessment of construction fatalities to predict cause factors by neural network analysis. *IIE Annual Conference. Proceedings*, 1.
- Utembe, W., Faustman, E. M., Matatiele, P., & Gulumian, M. (2015). Hazards identified and the need for health risk assessment in the south african mining industry. *Human and Experimental Toxicology*, 34(12), 1212-1221.
- Van Den Honert, A. F., & Vlok, P.J. (2015). Estimating the continuous risk of accidents occurring in the mining industry in south Africa. *South African Journal of Industrial Engineering*, 26(3), 71-85. doi:10.7166/26-3-1121.