

## Detección y predicción en tiempo real de gases tóxicos en minas de carbón subterráneas de Norte de Santander

Pablo Gómez-Monsalve  
Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA.

**Resumen:** Se realiza una búsqueda de las técnicas de detección y predicción en tiempo real a través de diferentes métodos de aprendizaje automático en una red inalámbrica de sensores.

**Palabras claves:** Detección y predicción, gases tóxicos, red inalámbrica.

### Desarrollo:

En las minas de carbón subterráneas se producen atmósferas altamente tóxicas y explosivas debido a la presencia de diversos gases (UNECE - United Nations Economic Commission for Europe (Methane to Markets Partnership, 2010), entre los que se encuentra: el Monóxido de Carbono(CO), Dióxido de Carbono(CO<sub>2</sub>), Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), Dióxido de Nitrógeno (CO<sub>2</sub>) y Metano (CH<sub>4</sub>) algunos de estos gases no presentan olor ni color, lo que dificulta a los mineros la detección de estos a través de sus sentidos, esto ocasiona que estén expuestos y puedan presentar síntomas tales como, dolores de cabeza, náuseas, fatiga, pérdidas del conocimiento y hasta la muerte.(Ministerio de minas y energía República de Colombia, 2015).

Según los datos presentados por La Agencia Nacional Minera(ANM) de Colombia, en el periodo comprendido entre el año 2005 y julio del año 2019 se presentaron 1272 emergencias mineras de las cuales el 61.39% (Agencia Nacional de Minería, 2019) fueron reportadas por las minas legales (para este caso la agencia se refiere a aquellas que tienen títulos mineros vigentes), mientras las ilegales registran 28,06%, de estas, el 15,17% son resultados de atmósferas viciadas (Suceso ocasionado por insuficiencia de oxígeno o concentración de gases fuera de límites

permisibles) y 13,05% de explosiones; por otra parte, se presentaron 1448 casos de fatalidad de los cuales 15,95% fueron por atmósferas viciadas y 24,79% por explosión, de estos casos de fatalidad 60,54% fueron reportados por minas legales y 28,81% de la minería ilegal (Agencia Nacional de Minería, 2019). Es preocupante saber que la ANM admite que estos datos pueden ser mayores ya que muchas de las minas trabajan sin título minero ni permisos al día y no reportan los accidentes en los casos que no hallan muertos por miedo a sanciones (Celedón, 2015).

El departamento de Norte de Santander cuenta con 281 títulos mineros de carbón. La producción de este mineral proviene principalmente de los municipios de Sardinata, El Zulia, Durania, Cúcuta, Bochalema, San Cayetano y Salazar de las Palmas. De las emergencias y fatalidades presentadas durante el periodo 2005 y julio del año 2019 el departamento registra el 14.85% en ambos casos. Teniendo en cuenta los datos anteriores, Norte de Santander se posiciona en el cuarto puesto de los departamentos con mayor fatalidad y emergencias minera a nivel nacional (Agencia Nacional de Minería, 2019).

Gran parte de las minas de carbón en Norte de Santander realiza la detección de concentración de gases por medio de un dispositivo portátil multisensorial, este es operado por un trabajador capacitado el cual recorre la mina tomando los niveles de concentración de los gases (Clavijo, 2016), llevando una bitácora de los diferentes puntos donde los mineros van a estar trabajando, este proceso es peligroso para el trabajador, debido a que los niveles de gases cambian repentinamente; otra de las tareas a realizar por esta persona, es activar el proceso de extracción o ventilación de las turbinas para conseguir una atmósfera adecuada para las labores de operación, la duración de este es entre 2 y 3 horas dependiendo de la distancia que se tenga que recorrer, lo que conlleva un retraso en el proceso de la extracción del mineral (Albarracín & Gutierrez, 2014).

Por otro lado, las pocas minas que tienen los recursos para realizar un monitoreo continuo cuentan con sistemas que están diseñados para analizar los niveles de concentración de un gas en específico, además, la transmisión de estos datos se hace por cableado y son procesados en una central, lo cual genera altos costos en la implementación de este tipo de tecnología ya que en las minas se produce más de un tipo de gas tóxico y en diferentes concentraciones, lo que hace necesario un dispositivo adaptable y entrenable a las necesidades de detección de cada mina (Alvarado Ostos, 2014).

### **JUSTIFICACIÓN:**

Hoy en día, en las minas de carbón subterráneas son críticos los sistemas de ventilación para suministrar niveles de oxígeno adecuados, manteniendo ambientes no peligrosos y no letales, así como la falta de dispositivos portátiles los cuales puede ayudar a identificar atmósferas de alto riesgo. Es por esta razón que con la implementación de nuevos sistemas de monitoreo y detección de gases, junto con el control apropiado de la ventilación se lograrían realizar acciones rápidas para el control de ambientes letales, así como la transmisión de la información a la superficie de la mina.

En la última década, el avance tecnológico ha permitido que las técnicas de monitoreo de minas se vuelvan más sofisticadas, pero aún ocurren accidentes en las minas de carbón subterráneas (Society of Mining Professors, 2019). Las minas se han convertido gradualmente en una gran preocupación para la familia de los trabajadores, empleadores y el país. Las ocurrencias de los desastres en las minas de carbón se deben principalmente al entorno hostil y la variabilidad de condiciones de trabajo; esto, hace que la implementación de sistemas de detección de gases tóxicos en de minas de carbón sea esencial para la seguridad. (Muduli, Mishra, & Jana, 2018) Los sistemas de redes cableados son una tendencia para las minas tradicionales, que realmente juegan un papel importante en la producción segura en minas de carbón, pero los altos costos de tender el cableado y el tiempo de ejecución de estos proyectos

dificultan su implementación, por lo tanto, es esencial tener una red inalámbrica de sensores inteligentes para la detección de gases tóxicos en minas de carbón, que mantengan un ambiente seguro para el trabajador(Srivastava, 2015).

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) han ganado una atención mundial significativa en diferentes escenarios. Un WSN es una red especial ad-hoc, multi-hop y auto organizada que consiste en un gran número de nodos dispuestos en un área amplia para monitorear los fenómenos de interés. Puede ser útil para aplicaciones médicas, ambientales, científicas y militares(Cicioğlu & Çalhan, 2019). Las redes de sensores inalámbricas consisten principalmente en nodos de sensores responsables de detectar un fenómeno y nodos repetidores, que son responsables de administrar la red y recopilar datos de los nodos remotos. El diseño de la red de sensores está influenciado por muchos factores, incluidos la escalabilidad, el sistema operativo, la tolerancia a fallas, la topología de la red de sensores, las restricciones de hardware, medios de transmisión y consumo de energía.

La implementación de este tipo de sistemas tiene la ventaja que son fáciles de instalar no necesitan cableado lo que reduce su costo, el número de nodos puede aumentar para eliminar áreas ciegas y aptos para realizar monitoreo en tiempo real.

Con este proyecto se busca que cada nodo pueda determinar los niveles de concentración de los gases tóxicos sin necesidad de tener sensores específicos o conexión con el exterior, esto se logra gracias a que cada nodo va a tener una matriz de sensores los cuales van a tomar la datos del ambiente que posteriormente serán procesados utilizando técnicas de inteligencia artificial para determinar sus niveles de concentración esto da una gran ventaja con los sistemas actuales ya que una actualización en la base de datos, se lograría identificar nuevos gases sin la necesidad de modificaciones físicas. Además de dar cumplimiento al Decreto 1886 de 2015 (Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas), que establece los lineamientos básicos para el control en labores subterráneas, una de estas, el sistema de

monitoreo permanente; “Las labores mineras subterráneas de carbón de la Categoría III establecidas en el artículo 58 de este Reglamento, además de contar con el equipo o equipos de medición, deben implementar un sistema de monitoreo permanente y continuo de metano y oxígeno, en las vías principales de transporte y ventilación, en Los frentes de avance y de explotación; Los trabajos comunicados con el circuito de ventilación de la mina; y, Las vías de circulación de personal”.

Con la implementación de estos sistemas se espera una reducción de sucesos fatales y de emergencia tanto a nivel nacional como regional y de esta manera dar cumplimiento al Decreto 1886 de 2015 mediante una tecnología de bajo costo para los empresarios.

#### **MARCO CONCEPTUAL:**

Colombia cuenta con grandes reservas de carbón, las cuales ascienden a 6.747 millones de toneladas, que representan el 53.9 % de las reservas de Sur y Centroamérica. Debido a este gran potencial, esta actividad ocupa lugares de privilegio dentro de la economía colombiana representando el 2.3 % del PIB nacional. (Salamanca, Avendaño Fernández, Albarracín C., & Gutiérrez P., 2014) En la actualidad, la minería es una labor que cobra anualmente muchas vidas humanas. El ministerio de minas y energía de Colombia establece que los valor límite permisible de tiempo promedio ponderado(VLP –TWA) para una jornada de ocho (8) horas diarias y cuarenta (40) horas a la semana de trabajo para gases contaminantes en la atmósfera de cualquier labor subterránea durante no deben ser: Dióxido de Carbono(CO<sub>2</sub>) 5000 partes por millón (ppm), Monóxido de Carbono(CO) 25 ppm, Ácido Sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) 1 ppm , Óxido Nítrico(NO) 25 ppm, Dióxido de Nitrógeno (CO<sub>2</sub>) 0.2 ppm (Ministerio de minas y energía República de Colombia, 2015).La gran mayoría de empresas que practican esta labor no cuentan con medios de detección que garanticen la seguridad de los trabajadores al interior de la mina. Las medidas de alerta permiten evitar accidentes fatales (Positiva Compañía de Seguros, 2017) que terminan con una gran suma de pérdidas humanas, materiales, daños sociales y un sinfín de

problemas consecutivos a una catástrofe de esta magnitud. En la actualidad, el 95% de las minas subterráneas de carbón en Colombia no cuenta con un sistema de detección de las atmosferas en tiempo real. (Restrepo Echeverri, Ríos Cano, & Jiménez Builes, 2012)

Los gases tóxicos son producidos por el yacimiento dentro de la mina de carbón, por lo general solo son liberados por la explotación (Zheng et al., 2019). Estos gases al ingresar al cuerpo humano pueden causar graves trastornos o la muerte, donde los más comunes son: monóxido de carbono (CO), humos nitrosos (olor y sabor ácidos – NO<sub>x</sub>), sulfuro de hidrogeno – ácido sulfhídrico H<sub>2</sub>S (olor podrido) y anhídrido sulfuroso SO<sub>2</sub> (cuando la concentración es mayor a 15% en volumen es mortal) (Ministerio de minas y energía República de Colombia, 2015). Cada uno de estos gases tiene un límite permisible de exposición, pueden ser letales incluso en mínimas concentraciones sin importar que el nivel del oxígeno de la atmosfera sea el óptimo (21%). El metano es un hidrocarburo de formula CH<sub>4</sub>, este es un gas incoloro e inodoro, debido a sus principales características es utilizado como una fuente de energía pese a sus aplicaciones se encuentra en la lista de sustancias peligrosas, por ser altamente inflamable y explosivo. (Bonetti, Abruzzi, Peglow, Pires, & Gomes, 2019) explican que para la detección de estos volátiles se utilizan sensores denominados transductores que se utilizan para medir gases y vapores; utilizan propiedades físicas (gases), mecánicas, térmicas, magnéticas, para la conversión en una señal normalmente eléctrica de dicha magnitud. En la evolución de la tecnología se han destacado tres principios para la detección de gases en la industria: Sensores Electroquímicos, Sensores de Perla Catalítica y Sensores Infrarrojos (Zrelli & Ezzedine, 2018).

Para optimizar el uso de estos se componentes se implementan en una red de sensores inalámbricos (WSN -Wireless Sensor Network) la cual está compuesta de un gran número de nodos sensores desplegados (Troya, 2019), donde el número de dispositivos puede ser del orden de cientos o miles y tienen dimensiones reducidas y bajo consumo de energía. Estos nodos son dispositivos inalámbricos auto configurables capaces de detectar eventos o capturar

señales por ejemplo contaminación del aire, temperatura ambiente, presión, señales cardíacas, etc. (Alfonso, Gómez, Garcés, & Chavarriaga, 2018). Los nodos se despliegan en distintos ambientes como la tierra, el aire, en vehículos, dentro de las edificaciones, etc., para captar datos y transmitirlos utilizando un canal de comunicación inalámbrico hasta una estación base (Chen et al., 2013). La estación base recolecta la información de todos los sensores, luego una aplicación los analiza y puede tomar decisiones en base a estos datos. A su vez, esta información puede ser accedida a través de otro tipo de redes (ejemplo Internet) y utilizada para múltiples propósitos. Por otro lado, los nodos generalmente utilizan tecnologías de bajo consumo para comunicarse entre sí.

Para realizar el procesamiento de los datos obtenidos se pueden utilizar diferentes técnicas para identificar las concentraciones presentes en los gases una de esta es el uso de la Inteligencia Artificial (Qian et al., 2019), y más concretamente el Aprendizaje Automático (Manogaran, Chilamkurti, & Hsu, 2019), ya que se han desarrollado algoritmos de aprendizaje basados en los sistemas nerviosos naturales que permiten “emular” el comportamiento biológico de los procesos de reconocimiento, aprendizaje y generalización (Mouriño, 2017). También es posible explotar la información contenida en las bases de datos (Ali, Hayat, Alagha, & Molatlhegi, 2018) y obtener, de manera automática (Ni, Yang, Yao, Li, & Qin, 2019), conocimiento útil para determinar los gases presentes en la atmósfera (Pavón Pérez, 2016).

#### Conclusiones:

La implementación de diferentes algoritmos de aprendizaje automatizado en una red inalámbrica de sensores mejora la detección y predicción de gases tóxicos generados en las minas de carbón subterránea en Norte de Santander.

## Referencias:

- AB Niño., (2018), Micro turbina Peltón, una solución real de energía para zonas no interconectadas (ZNI). Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, ISSN: 1692-7257.
- Agencia Nacional de Minería. (2019). Emergencias Mineras. Recuperado el 12 de diciembre de 2019, de [https://www.anm.gov.co/?q=emergencias\\_mineras](https://www.anm.gov.co/?q=emergencias_mineras)
- Albarracin, M., & Gutierrez, G. (2014). Monitoreo Inalambrico De Gases En Minería Con Servicio Web En Tiempo Real Fase Ii. tesis de pregrado, Universidad Pedagógica Y Tecnológica De Colombia.
- Alfonso, I., Gómez, C., Garcés, K., & Chavarriaga, J. (2018). Lifetime optimization of Wireless Sensor Networks for gas monitoring in underground coal mining. 2018 7th International Conference on Computers Communications and Control, ICCCC 2018 - Proceedings, (Iccccc), 224–230. <https://doi.org/10.1109/ICCC.2018.8390462>
- Ali, D., Hayat, M. B., Alagha, L., & Molatlhegi, O. K. (2018). An evaluation of machine learning and artificial intelligence models for predicting the flotation behavior of fine high-ash coal. *Advanced Powder Technology*, 29(12), 3493–3506. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.09.032>
- Alvarado Ostos, J. S. (2014). Sistema de supervisión y control para los gases de la mina de carbon Gaia. *Development*, 134(4), 635–646. Recuperado de [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/780/sistema de supervisión y control de gases de la mina de carbon gaia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/780/sistema%20de%20supervision%20y%20control%20de%20gases%20de%20la%20mina%20de%20carbon%20gaia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Bonetti, B., Abruzzi, R. C., Peglow, C. P., Pires, M. J. R., & Gomes, C. J. B. (2019). CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> monitoring in the air of underground coal mines in southern Brazil and GHG emission estimation. *REM - International Engineering Journal*, 72(4), 635–642. <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720105>
- Celedón, N. (2015, julio 3). Colombia es un país de alta accidentalidad minera. EL TIEMPO. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/DR-918848>
- Chen, W., Jiang, X., Li, X., Gao, J., Xu, X., & Ding, S. (2013). Wireless Sensor Network nodes

- correlation method in coal mine tunnel based on Bayesian decision. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 46(8), 2335–2340.  
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.018>
- Cicioğlu, M., & Çalhan, A. (2019). Performance analysis of IEEE 802.15.6 for underground disaster cases. *Computer Standards and Interfaces*, 66(June).  
<https://doi.org/10.1016/j.csi.2019.103364>
- Clavijo, J. A. (2016). Monitoreo de gases en minería. *Instrumentación especializada higiene y seguridad*, 1–32.
- Ferrin, C. & Magdalena, X. (2013). Sistema de extracción automática de parámetros morfológicos de la huella plantar mediante técnicas de visión por computador en un sistema embebido. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, ISSN: 1692-7257, 1(23), pp 80-86.
- Manogaran, G., Chilamkurti, N., & Hsu, C. H. (2019). Machine learning algorithms towards merging of mobile edge computing and Internet of Things. *Computer Networks*, 161, 249–250. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.07.014>
- Ministerio de minas y energía República de Colombia. (2015). Decreto 1886. (21,septiembre,2015) Reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas. 82.
- Mouriño, A. (2017). Clasificación multilingüe de documentos utilizando machine learning y la Wikipedia. 31–32. Recuperado de [http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/928/clasificación\\_multilingüe\\_documentos\\_utilizando\\_machine\\_learning\\_wikipedia\\_%28AA%29.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/928/clasificación_multilingüe_documentos_utilizando_machine_learning_wikipedia_%28AA%29.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- Muduli, L., Mishra, D. P., & Jana, P. K. (2018). Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review. *Journal of Network and Computer Applications*, 106(September 2017), 48–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.12.022>
- Ni, J., Yang, H., Yao, J., Li, Z., & Qin, P. (2019). Toxic gas dispersion prediction for point source emission using deep learning method. *Human and Ecological Risk Assessment*, 0(0), 1–14.

<https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1526632>

- Pavón Pérez, F. (2016). Generación de Conocimiento basado en Aprendizaje Automático y Aplicación en Diferentes Sectores. 92. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=66958>
- Positiva Compañía de Seguros. (2017). Guía de seguridad para ventilación de minas subterráneas. Guía de Seguridad para ventilación, I(1ra Edición), 1–40.
- Qian, F., Chen, L., Li, J., Ding, C., Chen, X., & Wang, J. (2019). Direct prediction of the toxic gas diffusion rule in a real environment based on LSTM. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph16122133>
- Restrepo Echeverri, D., Ríos Cano, S. H., & Jiménez Builes, J. A. (2012). Detección y control de atmósferas explosivas en minas subterráneas de carbón usando programación estructurada. *Revista Educación en Ingeniería*, 7, 10–21. Recuperado de <http://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/240%5Cn>
- Salamanca, J. M., Avendaño Fernández, E., Albarracín C., M. E., & Gutiérrez P., G. A. (2014). Sensado inalámbrico de gases en minería con servicio web en tiempo real. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 14(2), 24. <https://doi.org/10.19053/1900771x.3447>
- Society of Mining Professors. (2019). *Mines of the future?* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1088/2058-7058/4/8/28>
- Srivastava, S. K. (2015). Real Time Monitoring System for Mine Safety using Wireless Sensor Network ( Multi-Gas Detector ).
- T Velásquez, E Espinel, G Guerrero (2016). Estrategias pedagógicas en el aula de clase. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, ISSN: 1692-7257.
- Troya, M. L. G. (2019). Diseño y simulación de red de sensores inalámbricos para detección de incendio en Bosque Protector Cerro Blanco de la cordillera Chongón- Colonche. Tesis de maestría, Universidad católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador.
- UNECE - United Nations Economic Commission for Europe (Methane to Markets Partnership). (2010). *Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines*. En

The ECE Energy Series No.31. Recuperado de

[http://www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/pub/BestPractGuide\\_MethDrain\\_es31.pdf](http://www.unece.org/energy/se/pdfs/cmm/pub/BestPractGuide_MethDrain_es31.pdf)

Zheng, Y., Li, Q., Yuan, C., Tao, Q., Zhao, Y., Zhang, G., & Liu, J. (2019). Influence of temperature on adsorption selectivity: Coal-based activated carbon for CH<sub>4</sub> enrichment from coal mine methane. *Powder Technology*, 347, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.042>

