

**REVISIÓN LITERARIA DE LOS EFECTOS A LA SALUD DEL MONÓXIDO DE
CARBONO (CO), METANO (CH₄) Y ÁCIDO SULFHÍDRICO (H₂S) EN LOS
TRABAJADORES DE SECTOR MINERO SUBTERRÁNEO DURANTE LOS AÑOS
2013 A 2023**

**PRESENTADO POR
DINA LUZ OVALLE PINZÓN**

**DIRIGIDO POR
FREDY JAVIER GODOY VANEGAS**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA POLITÉCNICO GRANCOLOMBIANO
FACULTAD DE SOCIEDAD, CULTURA Y CREATIVIDAD
ESCUELA DE PSICOLOGÍA, TALENTO HUMANO Y SOCIEDAD
PROFESIONAL EN GESTIÓN DE LA SEGURIDAD Y SALUD LABORAL
NOVIEMBRE 2023**



AGRADECIMIENTOS

En este trabajo de grado agradezco a Dios principalmente, quien me brinda cada día la oportunidad de crecer a nivel personal y profesional, a mi mamá Fabiola, mi hija Valeria y mi esposo Christian, quienes siempre han estado para mí apoyando cada paso que doy en búsqueda del cumplimiento de mis metas.

Agradezco a la Universidad Politécnico-Grancolombiano por permitirme ser parte de su grupo estudiantil y al Docente Fredy quien como tutor guía la correcta ejecución del presente proyecto.

“Quien no vive para servir... No sirve para vivir...” Madre Teresa de Calcuta

Dina Luz Ovalle Pinzón



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. <i>Presupuesto para el cumplimiento de proyecto de grado</i>	32
Tabla 2. <i>Cronograma de cumplimiento de proyecto de grado</i>	32
Tabla 3. <i>Justificación de la exclusión de las investigaciones recuperadas de las bases de datos.</i>	35
Tabla 4. <i>Criterios de inclusión de las investigaciones recuperadas de las bases de datos.</i>	38



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. *Proceso de selección de los artículos vinculados al proceso de revisión sistemática.*

..... 34



LISTADO DE ANEXOS

Anexo A. <i>Diagrama de flujo sobre la identificación y método de cribado de los artículos empleados para la revisión en función de los establecido por PRISMA 2020</i>	60
---	----



CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 SITUACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2 JUSTIFICACIÓN	14
1.3 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS.....	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1 MARCO TEÓRICO	18
2.1.1 Antecedentes de accidentes en Colombia.....	19
2.1.2 Riesgos de la actividad minera subterránea	20
2.1.3 Desafíos que presenta la minería subterránea en Colombia.....	21
2.1.4 Efectos de la exposición a gases tóxicos.....	22
2.1.5 Control y prevención de riesgos en minería subterránea.....	23
2.1.6 Normatividad y regulaciones para la minería subterránea	25
2.2 ESTADO DEL ARTE	26
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
3.2 TÉCNICA	31
3.4 PRESUPUESTO.....	32
3.5 CRONOGRAMA	32

3.6 DIVULGACIÓN.....	33
4. RESULTADOS.....	34
4.1 Selección de los estudios.....	34
4.2 Características de los estudios seleccionados.....	38
5. ASPECTOS ESPECÍFICOS	42
6. CONCLUSIONES	44
7. RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS	47
ANEXOS	60



RESUMEN

La minería subterránea en Colombia es una actividad esencial para la economía del país, la cual se enfrenta a un dilema de gran envergadura: el riesgo para la salud de los trabajadores debido a la exposición a gases tóxicos como el metano, el monóxido de carbono y el ácido sulfhídrico. Esta exposición conlleva efectos adversos que abarcan desde intoxicaciones agudas hasta enfermedades crónicas. A pesar de la existencia de regulaciones normativas para garantizar la seguridad de los trabajadores, en la última década se han registrado accidentes mortales, lo que resalta la urgente necesidad de mejorar la gestión de riesgos en esta industria.

En el presente proyecto se llevará a cabo una revisión sistemática con el objetivo de analizar minuciosamente los efectos en la salud de los trabajadores de la minería subterránea, específicamente durante el período de 2013 a 2023. Para abordar esta revisión sistemática, se han seguido los lineamientos establecidos por PRISMA 2020 (Ver Anexo A). La búsqueda abarca fuentes de información diversas, entre las que se incluyen bases de datos electrónicas como *Pubmed*, *Scopus*, *Web of Science*, *Science Direct* y *Google Scholar*. Además, se han considerado otros tipos de documentos que permitan explorar tanto los aspectos médicos relacionados con la exposición a estos gases tóxicos como las medidas de prevención y control implementadas en la industria minera.

El desarrollo del proyecto busca contribuir a la comprensión de los efectos a la salud asociados a la exposición de gases tóxicos generados en la industria minera subterránea, a saber, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S), en el periodo de tiempo de 2013 a 2023, considerando los desafíos que enfrenta la gestión de gases en la minería subterránea colombiana, generando conocimiento para promover la salud de los trabajadores y mejorar la sostenibilidad de la industria minera.



Palabras Clave: Ácido sulfhídrico, gases tóxicos, minería subterránea, monóxido de carbono, metano.

ABSTRACT

In Colombia, underground mining is an essential activity for the country's economy and faces a major dilemma: the risk to workers' health due to exposure to toxic gases such as methane, carbon monoxide and hydrogen sulfide. This exposure leads to adverse effects ranging from acute intoxication to chronic diseases. Despite the existence of normative regulations to ensure worker safety, fatal accidents have been recorded in the last decade, highlighting the urgent need to improve risk management in this industry.

In the present project, a systematic review will be carried out with the objective of thoroughly analyzing the effects on the health of underground mining workers, specifically during the period from 2013 to 2023. To approach this systematic review, the guidelines established by PRISMA 2020 have been followed (See Annex A). The search encompassed diverse sources of information, including electronic databases such as *Web of Science*, *Pubmed*, *Scopus*, *Google Scholar* and *Science Direct*. In addition, other types of documents have been considered to explore both the medical aspects related to exposure to these toxic gases and the prevention and control measures implemented in the mining industry.

The development of the project seeks to contribute to the understanding of the health effects associated with the exposure of toxic gases generated in the underground mining industry, i.e. carbon monoxide (CO), methane (CH₄) and hydrogen sulfide (H₂S), in the time period from 2013 to 2023, considering the challenges faced by the management of gases in Colombian underground mining, generating knowledge to promote the health of workers and improve the sustainability of the mining industry.



Keywords: Hydrogen sulfide, toxic gases, subway mining, carbon monoxide, methane.



1. INTRODUCCIÓN

La minería subterránea es una actividad económica importante en Colombia la cual genera cerca de 254.000 empleos directos. Lo anterior ha generado un aporte al país de cerca de USD11.700 millones en la última década dentro del concepto de impuestos y regalías al país (Agencia Nacional de Minería, 2021). Sin embargo, esta actividad también conlleva riesgos significativos para la salud de los trabajadores, entre los que se encuentran la exposición a gases tóxicos.

Los principales gases de preocupación en la minería subterránea colombiana son el metano (CH_4), el monóxido de carbono (CO) y el ácido sulfhídrico (H_2S). Estos gases son inflamables, tóxicos o asfixiantes en concentraciones elevadas, lo que los convierte en una amenaza constante para la seguridad de los mineros (Torres & Murcia, 2021).

La exposición a estos gases puede causar una variedad de problemas de salud, desde leves hasta graves, e incluso la muerte. Los efectos a la salud más comunes incluyen:

- Intoxicación aguda: pérdida del conocimiento, convulsiones y muerte (Díaz, 2009).
- Intoxicación crónica: problemas respiratorios, neurológicos y cardiovasculares (Díaz, 2009).
- Enfermedades profesionales como daños al sistema nervioso central, neumonitis, así como neurotoxicidad, insuficiencia respiratoria aguda e irritación respiratoria y oculares generados por la exposición a CO , CH_4 y H_2S , respectivamente (Gozubuyuk et al., 2017; Jo et al., 2013; Saeedi et al., 2015)

En los últimos 10 años, se han registrado en Colombia 1.218 accidentes relacionados con gestiones inadecuadas del ejercicio laboral en la minería, que han causado la muerte de 1.306 trabajadores, según la Agencia Nacional de Minería (ANM) (García, 2022). De los accidentes mineros, se ha destacado que la minería subterránea conlleva a la mayor cantidad de

accidentes y muertes durante la década, siendo aproximadamente 1.143 según datos de la ANM. Estos accidentes ponen de manifiesto la necesidad de mejorar las medidas de prevención y control de los riesgos asociados a la exposición a gases tóxicos (Vanegas, 2023).

Los resultados de la revisión bibliográfica permitirán arrojar tener mayor claridad sobre la magnitud de la exposición de los trabajadores de la industria minera subterránea a estos gases tóxicos a lo largo de la última década. Se espera que los hallazgos identifiquen tendencias en la prevalencia de la exposición a metano, monóxido de carbono y ácido sulfhídrico en diferentes subsectores de la industria minera y en diversas regiones geográficas.

Además, esta revisión bibliográfica proporcionará una visión detallada de los riesgos para la salud asociados con la exposición a estos gases tóxicos. Se anticipa que se identificarán y describirán las afecciones y enfermedades más comunes relacionadas con la exposición a estos agentes, así como los efectos a corto y largo plazo en la salud de los trabajadores. En última instancia, los resultados servirán de base para la formulación de recomendaciones destinadas a mejorar la gestión de gases tóxicos en la industria minera subterránea.



TITULO DEL PROYECTO

Revisión literaria de los efectos a la salud del monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) en los trabajadores de sector minero subterráneo durante los años 2013 a 2023

1.1 SITUACIÓN DEL PROBLEMA

La minería subterránea es una actividad de alto riesgo laboral, ya que implica la extracción de minerales y recursos naturales desde el interior de la Tierra. Durante este proceso, se pueden liberar una variedad de gases tóxicos, como el dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el metano y otros compuestos peligrosos. Estos gases pueden ser liberados de forma natural o como resultado de las operaciones mineras (Domínguez et al., 2019)

En Colombia, la adecuada gestión de los gases provenientes de la minería subterránea se encuentra actualmente enfrentando grandes desafíos que generan impactos directos en salud y seguridad del capital humano asociado a estas actividades comerciales, así como en las comunidades aledañas (Mejía et al, 2023).

Dentro de los desafíos más destacados se encuentra que las condiciones geológicas de las minas subterráneas colombianas son muy variables, lo que puede dar lugar a concentraciones impredecibles de gases (Shahriar & Bakhtavar, 2009). A su vez, se destaca que existen minas colombianas que son pequeñas empresas que carecen de recursos que le permitan implementar diferentes medidas de prevención como alta tecnología que logren la detección y ventilación, lo que lleva a que los trabajadores diariamente se expongan a diferentes condiciones de trabajo peligrosas, ante la deficiente gestión efectiva de estos gases tóxicos. Finalmente, los trabajadores mineros a menudo no están adecuadamente capacitados sobre los riesgos de los gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y el ácido sulfhídrico (H₂S), de manera que puedan identificar, analizar y definir medidas de prevención

ante situaciones en donde se ven involucrados estos gases tóxicos y así poder disminuir las consecuencias que puedan generarse en la salud y la seguridad de los trabajadores.

En este contexto, se ha encontrado que la mortalidad laboral en el sector minero en Colombia ha crecido en un 53 % durante el año 2021, en donde las enfermedades laborales registraron un crecimiento del 33 % entre el periodo de 2020 a 2021, lo cual señala a la minería como una de las industrias con elevados índices de accidentalidad y enfermedad para los trabajadores asociados (País Minero, 2022). A su vez, gases como CO, CH₄ y H₂S generados durante la actividad minera han representado una amenaza que requiere atención prioritaria debido a la magnitud del daño que pueden causar a la salud y seguridad de los trabajadores. A pesar de la existencia de normativas aplicables en el sector, continúan ocurriendo accidentes relacionados con gases inflamables, tóxicos o asfixiantes en las minas colombianas (Gallo & Pico, 2017).

Por lo tanto, es fundamental cuestionarnos ¿Cuáles son los efectos a la salud del metano, el monóxido de carbono y el ácido sulfhídrico en los trabajadores del sector minero subterráneo durante los años 2013 a 2023, teniendo en cuenta los desafíos que enfrenta la gestión de gases en la minería subterránea?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La gestión de gases en la minería subterránea en Colombia es una cuestión de suma importancia que requiere una colaboración activa entre la industria minera y el gobierno (Karacan et al., 2011). A pesar de los riesgos inherentes en esta actividad, es esencial que se aborden de manera proactiva para garantizar tanto la seguridad de los trabajadores como la sostenibilidad a largo plazo de una de las principales actividades económicas del país. Para lograrlo, se deben considerar varios aspectos cruciales.



En primer lugar, la inversión en tecnología, capacitación y regulación se presenta como una necesidad imperante. La implementación de tecnologías avanzadas de detección y ventilación, así como la formación adecuada de los trabajadores, son pasos esenciales para mitigar los riesgos asociados a la exposición a gases tóxicos en las minas subterráneas. Además, contar con regulaciones efectivas y su cumplimiento garantiza un marco de trabajo seguro y confiable (Wang et al., 2022).

La prevención en la minería subterránea no solo encierra un imperativo ético, sino que también constituye un pilar en el desarrollo de la industria. Reducir la probabilidad de accidentes y lesiones graves no solo protege la vida y salud de los trabajadores, sino que también contribuye a minimizar costos operativos significativos. Los accidentes mineros pueden acarrear considerables gastos médicos, interrupciones en la producción y posibles consecuencias legales que ponen en jaque la viabilidad económica de las empresas mineras (Aguilar, 2018).

Además, una operación minera segura y responsable desempeña un papel crucial en la reputación de la empresa, tanto a nivel local como internacional. Una buena reputación se convierte en una clave para atraer inversiones, obtener licencias y mantener relaciones positivas con las comunidades locales, elementos que, a su vez, contribuyen a la viabilidad a largo plazo de la industria minera en Colombia.

La urgencia de abordar esta problemática se ilustra con claridad al examinar las estadísticas recientes de accidentes laborales en el sector minero y en Colombia, según la Federación de Aseguradores Colombianos (2023). Estas cifras revelan un número significativo de accidentes laborales (21,935), enfermedades laborales (352), y lamentablemente, muertes (1,134) ocurridas durante el año 2022 en todos los departamentos que conforman el territorio



nacional. Estos datos ponen de manifiesto la necesidad apremiante de tomar medidas concretas para abordar los riesgos relacionados con la exposición a gases en la minería subterránea.

En consecuencia, la exposición a gases como el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄) y el ácido sulfhídrico (H₂S) en la minería subterránea representa un desafío crítico para la salud y seguridad de los trabajadores, así como para la sostenibilidad de la industria. Es imperativo unir esfuerzos para comprender a fondo esta problemática y adoptar medidas efectivas de prevención y control, ya que, con el continuo desarrollo de la minería subterránea, el número de trabajadores afectados podría aumentar si no se implementan las medidas de seguridad adecuadas.

1.3 OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Conocer los efectos generados por el monóxido de carbono, metano y ácido sulfhídrico en la salud de los trabajadores de la industria minera subterránea durante el periodo comprendido entre el año 2013 al 2023.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y seleccionar las fuentes bibliográficas y científicas más pertinentes relacionadas con la exposición a monóxido de carbono, metano y ácido sulfhídrico en la industria minera subterránea, durante el período 2013-2023.
- Describir detalladamente los resultados y hallazgos relevantes de la literatura científica seleccionada, enfocados en la prevalencia de la exposición a gases tóxicos, así como los riesgos para la salud de los trabajadores y las medidas de prevención y control en la industria minera subterránea.



- Formular recomendaciones basadas en la evidencia encontrada en la revisión bibliográfica, con el fin de mejorar la gestión de gases tóxicos en la industria minera subterránea.



2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 MARCO TEÓRICO

La minería, con una larga tradición en Colombia, desempeña un papel esencial en su economía y ha tenido un impacto considerable en el desarrollo del país. Esta actividad se centra en la extracción de minerales y recursos valiosos de las profundidades de la tierra. La riqueza de Colombia en recursos minerales ha sido un motor clave del crecimiento sostenido de la industria minera a lo largo de los años (Carmona et al., 2015; Rodríguez & Ruíz, 2021).

La minería subterránea es una modalidad de extracción que implica la excavación de túneles en el subsuelo para acceder a depósitos minerales. A medida que los depósitos superficiales se agotan, la minería subterránea se ha vuelto esencial para la continuación de la extracción de minerales valiosos. Esta técnica se utiliza en la explotación de una variedad de minerales, como carbón, oro, plata, cobre y otros metales preciosos (Alpay & Yavuz, 2009).

La minería subterránea en Colombia no solo desempeña un papel fundamental en la economía del país, contribuyendo con aproximadamente el 1.3% del Producto Interno Bruto (PIB) y generando una considerable cantidad de empleos directos, sino que también ejerce una influencia relevante en el desarrollo regional y la inversión en infraestructura (Agencia Nacional de Minería, 2021). A pesar de estos beneficios, esta actividad se enfrenta a desafíos únicos y riesgos considerables.

Entre estos desafíos, la exposición a gases tóxicos, como el metano, el monóxido de carbono y el ácido sulfhídrico, se erige como uno de los problemas más críticos que afrontan los trabajadores en la minería subterránea (Sánchez et al., 2022). Estos gases tienen la capacidad de acumularse en espacios confinados, lo que constituye una amenaza constante para la salud y seguridad de los mineros.



El equilibrio entre la importancia económica de la minería subterránea y la necesidad de salvaguardar la vida y la salud de los trabajadores es un tema central en esta industria. La gestión efectiva de los riesgos relacionados con la exposición a gases tóxicos es esencial para garantizar que la minería subterránea en Colombia continúe siendo una actividad segura y sostenible.

2.1.1 Antecedentes de accidentes en Colombia

En los últimos años, Colombia ha sido testigo de una serie de trágicos accidentes mortales en minas subterráneas relacionados con la presencia de gases tóxicos. Estos incidentes han arrojado luz sobre la urgente necesidad de revisar y mejorar las medidas de prevención y control en la industria minera del país.

En 2017, un suceso tuvo lugar en el municipio de Anserma, Caldas, cuando cuatro trabajadores perdieron la vida al inhalar gas metano en una mina subterránea de extracción de oro. Estos mineros se dedicaban a la explotación de oro de forma artesanal, y lamentablemente, no se habían implementado las medidas de seguridad adecuadas (Acosta, 2017).

En 2021, otro incidente fatal ocurrió en La Uvita, Boyacá, donde dos trabajadores fallecieron en un socavón destinado a la extracción de carbón debido a una deficiencia de oxígeno y un aumento del dióxido de carbono. Este trágico evento resultó en la suspensión inmediata de todas las operaciones mineras en la Mina Los Turpiales, ya que no contaba con la aprobación de la autoridad minera (Romero, 2021). Al año siguiente, en el mismo municipio de La Uvita, se registró la lamentable pérdida de dos mineros en la Mina El Ventarrón (Boyacá Sie7e Días, 2022).

En marzo de 2023, una explosión en minas de carbón en Satatúasa, Cundinamarca, debido a la acumulación de gas, resultó en la trágica muerte de 11 mineros (Portafolio, 2023).



Y en junio de ese mismo año, en el municipio de Barranco de Loba, Bolívar, dos mineros perdieron la vida y otros siete resultaron intoxicados al inhalar gases tóxicos en una mina (SWI, 2023).

Estos incidentes han enfatizado la necesidad apremiante de revisar y fortalecer las medidas de prevención y control en la industria minera subterránea de Colombia, con el fin de garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores y prevenir futuras tragedias.

2.1.2 Riesgos de la actividad minera subterránea

La minería subterránea se destaca por la extracción de minerales y recursos valiosos a partir de las profundidades de la tierra mediante la excavación de túneles y pozos (Sánchez et al., 2022). Aunque es una actividad esencial para la obtención de minerales y metales preciosos, presenta riesgos inherentes que pueden afectar la salud y seguridad de los trabajadores en múltiples dimensiones.

Los trabajadores en la minería subterránea suelen desempeñar sus labores en espacios estrechos y confinados, lo que aumenta el riesgo de accidentes y lesiones debido a la mayor probabilidad de derrumbes y colapsos, además de generar dificultades en la evacuación en situaciones de emergencia (Liu et al., 2019; Domínguez et al., 2019).

Adicionalmente, existe una preocupación significativa relacionada con la exposición a gases tóxicos, incluyendo el metano (CH_4), el monóxido de carbono (CO) y el ácido sulfhídrico (H_2S). Estos gases pueden liberarse durante las operaciones de extracción y tener la capacidad de acumularse en las cuevas subterráneas, presentando amenazas a la salud de los trabajadores (Zheng et al., 2019).

Por lo tanto, aunque la minería subterránea es esencial en la extracción de minerales y metales preciosos, representa un riesgo sustancial en la salud de los trabajadores, siendo



necesaria la comprensión y gestión adecuada de los riesgos para lograr la protección de la salud y seguridad de los trabajadores asociados a esta industria.

2.1.3 Desafíos que presenta la minería subterránea en Colombia

En la industria minera subterránea de Colombia, se enfrentan diversos desafíos que requieren atención y soluciones efectivas. Estos obstáculos, aunque diversos, convergen en la búsqueda de un entorno laboral más seguro para los trabajadores.

Uno de los principales obstáculos es la falta de recursos, especialmente en las minas de pequeña escala. Estas operaciones a menudo carecen de los recursos financieros necesarios para adquirir y mantener tecnologías avanzadas de seguridad y salud ocupacional. La falta de inversión en equipos y sistemas de monitoreo puede resultar en una deficiencia crítica en la prevención y el control de la exposición a gases tóxicos (Yang et al., 2021).

La capacitación inadecuada es otro desafío crucial. A pesar de la importancia de educar a los trabajadores sobre la identificación y gestión de riesgos relacionados con gases tóxicos, algunas operaciones mineras subterráneas carecen de programas de formación efectivos. Esto puede dejar a los trabajadores mal preparados para enfrentar situaciones de exposición a gases peligrosos y aumentar el riesgo de incidentes (Mejía et al., 2023).

La variabilidad geológica en las minas subterráneas colombianas presenta un tercer obstáculo. Las condiciones geológicas cambiantes pueden dar lugar a concentraciones impredecibles de gases tóxicos, lo que complica aún más la implementación de medidas de control efectivas. La necesidad de adaptarse rápidamente a condiciones cambiantes agrega una capa adicional de complejidad a la gestión de riesgos (Shahriar & Bakhtavar, 2009).

Finalmente, la falta de una sólida cultura de seguridad en algunas operaciones mineras es un desafío que no debe subestimarse. La conciencia insuficiente sobre los riesgos y la falta



de compromiso con la seguridad pueden erosionar la aplicación efectiva de las normativas y regulaciones de seguridad existentes, exponiendo a los trabajadores a peligros innecesarios (Yang et al., 2021).

Estos desafíos destacan la importancia de un enfoque constante en la mejora de la seguridad y la salud ocupacional en la industria minera subterránea de Colombia. Es crucial abordar estas barreras para garantizar un entorno laboral más seguro para los trabajadores y cumplir con las regulaciones de seguridad existentes.

2.1.4 Efectos de la exposición a gases tóxicos

La exposición a gases tóxicos en la minería subterránea plantea una amenaza significativa y multifacética para la salud de los trabajadores. Esta actividad, que implica la extracción de minerales y recursos naturales desde las profundidades de la tierra, conlleva riesgos sustanciales, particularmente en lo que respecta a la exposición a gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO), el ácido sulfhídrico (H₂S) y el metano (CH₄) (Zheng et al., 2019).

La exposición crónica a estos gases puede tener graves consecuencias para la salud de los trabajadores, especialmente en el sistema respiratorio. Esta exposición prolongada puede desencadenar problemas respiratorios crónicos, como dificultades para respirar, tos crónica y un mayor riesgo de infecciones respiratorias debido a la falta de oxígeno en los tejidos (Ryter et al., 2018).

Además, estos gases ejercen un impacto negativo en el sistema nervioso central. Concentraciones elevadas de CH₄ y CO pueden causar daño cerebral, pérdida de coordinación motora, problemas de memoria y alteraciones cognitivas. En contraste, el ácido sulfhídrico puede provocar síntomas como mareos, pérdida de conciencia y trastornos neurológicos permanentes (Zheng et al., 2019).



La inhalación de concentraciones elevadas de estos gases puede resultar en intoxicación aguda, siendo el CO y el CH₄ los más peligrosos en este aspecto debido a su afinidad por la hemoglobina. Esto reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que lleva a síntomas graves como pérdida de conocimiento, confusión, náuseas, vómitos y convulsiones, y en casos extremos, puede conducir a la asfixia y la muerte al desplazar al oxígeno en el ambiente (Olson & Smollin, 2008). Sin embargo, el H₂S no genera intoxicación aguda.

En particular, el CO afecta el sistema cardiovascular al disminuir la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, lo que puede aumentar la presión arterial y el riesgo de enfermedades cardiovasculares, como enfermedad coronaria y accidente cerebrovascular (Lee et al., 2015). No obstante, no se han señalado efectos similares por parte del CH₄ y el H₂S.

En consideración, la exposición a gases tóxicos en la minería subterránea representa una amenaza seria y multifacética para la salud de los trabajadores. Comprender estos riesgos es esencial para la seguridad y la salud de quienes trabajan en esta industria, y subraya la importancia de implementar medidas de prevención y control eficaces para minimizar estos riesgos y asegurar un entorno laboral más seguro en la minería subterránea.

2.1.5 Control y prevención de riesgos en minería subterránea

La prevención y el control de los riesgos relacionados con la exposición a gases tóxicos en la minería subterránea son de vital importancia para garantizar la salud y seguridad de los trabajadores (Badri et al., 2013).

La implementación de sistemas de detección de gases desencadena una protección continua y efectiva para los trabajadores. Estos sistemas utilizan sensores especializados para monitorear constantemente la concentración de gases en el ambiente laboral. Cuando se detectan niveles peligrosos, los sistemas activan alarmas inmediatas que alertan a los



trabajadores y permiten tomar acciones correctivas de forma rápida. La presencia de monitores de gases, como los detectores de monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S), desempeña un papel esencial en la identificación temprana de riesgos y la prevención de exposiciones no deseadas (Chen et al., 2022).

Por otro lado, garantizar una ventilación adecuada en las minas subterráneas es fundamental para reducir la concentración de gases tóxicos. Los sistemas de ventilación deben ser meticulosamente diseñados y mantenidos para asegurar un flujo de aire constante que minimice la acumulación de gases nocivos. La ventilación efectiva no solo reduce los riesgos relacionados con gases tóxicos, sino que también contribuye a eliminar partículas y polvo en suspensión, lo que disminuye el riesgo de enfermedades respiratorias en los trabajadores (Mon, 2022).

Además, en áreas donde existe riesgo de exposición a gases tóxicos, es imperativo que los trabajadores utilicen equipos de protección personal apropiados, como máscaras respiratorias y otros dispositivos que filtran el aire inhalado. Estos equipos reducen significativamente la exposición a gases peligrosos (Kursunoglu, et al., 2022).

Por lo tanto, una capacitación adecuada de los trabajadores es esencial para que comprendan plenamente los riesgos asociados con la exposición a gases tóxicos y sepan cómo responder en situaciones de emergencia. Los programas de formación deben abordar la identificación de gases peligrosos, el uso correcto de equipos de monitoreo y la aplicación de protocolos adecuados en caso de fugas o acumulaciones de gases (Bahn, 2013).

Además, es necesario establecer procedimientos de emergencia claros y efectivos, acompañados de un monitoreo continuo con supervisión y manteniéndose al día en las normas y regulaciones vigentes en seguridad y salud ocupacional. Estos aspectos son fundamentales para reaccionar eficazmente ante situaciones de exposición a gases tóxicos. Esto incluye la



evacuación segura de áreas afectadas, la prestación inmediata de atención médica y la notificación oportuna de incidentes a las autoridades pertinentes (Bahn, 2013).

La prevención y el control de riesgos representan un enfoque integral para minimizar la exposición a gases tóxicos en la minería subterránea. Estas medidas combinadas contribuyen significativamente a reducir los riesgos asociados con la exposición constante a gases tóxicos y a garantizar un entorno de trabajo más seguro para los mineros subterráneos.

2.1.6 Normatividad y regulaciones para la minería subterránea

En Colombia, las actividades mineras subterráneas están sujetas a un marco regulatorio compuesto por un conjunto de normativas y regulaciones destinadas a garantizar condiciones de trabajo seguras y adecuadas para los trabajadores. Estas normativas establecen los requisitos mínimos para la prevención de accidentes laborales y enfermedades profesionales, y su cumplimiento es obligatorio para todos los titulares de concesiones mineras.

Entre las regulaciones más relevantes se encuentra la Resolución 2400 establecida en el 1979 por parte del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de Colombia, en la que se señalan las normas de seguridad industrial y salud ocupacional en el país. Aunque esta resolución no se enfoca exclusivamente en la minería, proporciona directrices generales para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores en todas las industrias, incluida la minería subterránea.

Adicionalmente, el Código de Minas o la Ley 685 de 2001 establece las condiciones generales para la exploración y explotación de minerales y recursos naturales, incluyendo las actividades en minas subterráneas. Esta legislación define los derechos y obligaciones de los titulares de concesiones mineras y aborda aspectos relacionados con la seguridad y la salud ocupacional.



El Decreto 1072 de 2015 compila los lineamientos que las empresas deben seguir en torno a la seguridad, así como la salud en el trabajo, incluyendo aspectos como evaluación y prevención de riesgos laborales.

Así mismo, el Decreto 944 de 2022 modifica parcialmente el Decreto 1886 de 2015, estableciendo capacitaciones en las labores mineras subterráneas, actividades de formación de entrenadores en seguridad minera, así como planes de prevención, preparación y respuesta ante emergencias.

Además, la Resolución 40209 de 2022 actualiza y expande la Política de Seguridad Minera, definiendo cuatro objetivos orientados a la entrega de instrumentos al personal de trabajo para identificar y manejar los riesgos, a la promoción de una cultura de autocuidado, a la instrumentación de acciones para el manejo de riesgos y a la prevención de accidentes y enfermedades laborales.

A pesar de contar con esta sólida base normativa y reguladora destinada a preservar la salud de los trabajadores en la minería subterránea en Colombia, la implementación efectiva de estas medidas se enfrenta a una serie de desafíos de importancia significativa.

2.2 ESTADO DEL ARTE

La revisión de la literatura sobre los efectos a la salud del monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) en los trabajadores del sector minero subterráneo entre los años 2013 y 2023 ha evidenciado una evolución en la comprensión de estos riesgos y las medidas preventivas adoptadas a lo largo del tiempo.

Inicialmente, Donoghue (2004) destacó la preocupación por los problemas respiratorios en la industria minera y enfatizó la importancia de la ventilación adecuada y el uso de equipos de protección personal (EPP) para prevenir enfermedades respiratorias graves. Asimismo,



resaltó la necesidad de capacitar a los trabajadores sobre los riesgos respiratorios y el uso efectivo del EPP, lo que constituye un enfoque integral para la protección de la salud de los trabajadores mineros.

Luego, Vearrier y Greenberg (2011) pusieron énfasis en la prevención de afecciones respiratorias en altitudes elevadas. Destacaron la importancia de la evaluación previa a la colocación, la aclimatación y la vigilancia continua como estrategias vitales para minimizar los riesgos en trabajadores expuestos a la altitud. Estas medidas de prevención se dirigen a salvaguardar la salud de los trabajadores mineros en estas condiciones.

Cabrera et al. (2014) resaltaron la importancia de medidas preventivas como la ventilación adecuada y el uso de respiradores para proteger a los trabajadores de afecciones respiratorias en la minería. También enfatizaron la necesidad de educar y capacitar a los trabajadores sobre los riesgos respiratorios y el uso efectivo del EPP, lo que contribuye a la reducción significativa del riesgo de enfermedades respiratorias graves.

En este contexto, Ngombe et al. (2016) informaron sobre una alta prevalencia de síntomas respiratorios en trabajadores mineros, relacionándola con la exposición a los gases derivados de la actividad minera. Destacaron la importancia de medidas preventivas como la ventilación adecuada y el uso de respiradores, junto con la educación de los trabajadores para mitigar estos riesgos en los mineros artesanales.

Por su parte, Gutiérrez (2018) reveló una baja pero significativa prevalencia de síntomas respiratorios en trabajadores mineros en Socotá, Boyacá. Se identificó que el tiempo de exposición a los gases generados en la industria se relaciona con un mayor riesgo de síntomas respiratorios. Este estudio subraya la relevancia de medidas preventivas, como la ventilación adecuada y el uso de respiradores, junto con la educación y capacitación de los trabajadores para prevenir enfermedades respiratorias.



Rusibamayila et al. (2018) señalaron una alta prevalencia de discapacidad respiratoria en mineros de oro en Tanzania y la necesidad de medidas preventivas como la ventilación adecuada y el uso de respiradores. Destacaron que la exposición personal al polvo respirable es mayor en mineros subterráneos. Además, enfatizaron la importancia de educar y capacitar a los trabajadores sobre los riesgos respiratorios y la correcta utilización del EPP en este entorno laboral.

Estos estudios han demostrado un creciente reconocimiento de los riesgos respiratorios en la minería subterránea y han enfocado sus esfuerzos en medidas preventivas clave, como la ventilación adecuada, el uso de respiradores y la educación de los trabajadores, con el objetivo de proteger la salud de los trabajadores y reducir el riesgo de enfermedades respiratorias graves.

En cuanto a la exposición a gases tóxicos en la minería subterránea, es importante destacar que varios estudios han resaltado la gravedad de los riesgos asociados a esta actividad. En este sentido, Bejarano y Prieto (2014) informaron sobre la intoxicación por monóxido de carbono y otros gases en Colombia, relacionándolos con la minería ilegal y la falta de programas de salud ocupacional. Es relevante señalar que el monóxido de carbono se destacó como el principal responsable de hospitalizaciones debido a su toxicidad.

Albarracín y Gutiérrez (2014) identificaron al metano y el monóxido de carbono como gases altamente inflamables y explosivos generados durante la extracción minera, además de ser tóxicos por inhalación. Es importante subrayar que incluso concentraciones por debajo de 400 ppm de monóxido de carbono pueden causar intoxicación crónica, lo que destaca la gravedad de estos riesgos.

Por otro lado, Bolaños & Chacón (2017) resaltaron que las intoxicaciones agudas generadas por el monóxido de carbono son una causa relevante de morbilidad y mortalidad en los trabajadores mineros. Esto es de gran importancia ya que los síntomas, como cefalea, vértigo



y mareos, señalan la necesidad de abordar este riesgo de manera efectiva. Estas afirmaciones son corroboradas por La Rotta y Torres (2017), quienes resaltaron los impactos en la salud y el medio ambiente causados por la explotación minera, incluyendo enfermedades respiratorias derivadas de la exposición a gases tóxicos.

Por su parte, Acosta (2016) resaltó la relación entre la emisión de gases contaminantes por la actividad minera y los problemas de salud en la población cercana a las zonas de explotación, lo que incluye enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Es relevante destacar que Gómez (2018) señaló que la minería subterránea genera elevadas concentraciones de gases como metano, CO y H₂S, que pueden ser letales para los trabajadores en el interior de la mina. Sin embargo, al exteriorizarse, estos gases no causan impactos significativos en la atmósfera superficial.

El estudio de Mayorga (2019) reveló las alteraciones clínicas y neuropsicológicas causadas por la exposición al monóxido de carbono en trabajadores de minas subterráneas de carbón, resaltando que la hipoxia tisular, resultante de la exposición, afecta al cerebro y al corazón, y los trabajadores muestran un alto nivel de carboxihemoglobina en sangre, lo que indica una exposición significativa al gas tóxico.

Además, Orche (2020) señaló que la actividad minera comúnmente se asocia con problemas de calidad del aire, particularmente en minas subterráneas donde gases como el monóxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno son liberados naturalmente. Estos gases son altamente peligrosos y pueden generar graves alteraciones en la salud de los trabajadores. A su vez, Lago (2020) destacó la letalidad del monóxido de carbono al sustituir el oxígeno en la hemoglobina de la sangre. Además, mencionó los efectos adversos del ácido sulfhídrico en los ojos, la piel y el sistema nervioso, subrayando la importancia de abordar estos riesgos en el entorno minero.



En el contexto de la minería, Mariño et al. (2021) destacaron la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano, por parte de minas en el altiplano cundiboyacense en Colombia. Esto contribuyó significativamente a las emisiones totales del país asociadas con la minería de carbón. Además, Ortega y colaboradores (2018) advirtieron sobre los riesgos de explosividad generados por el gas metano en la minería subterránea en Colombia.

Por último, Torres & Murcia (2021) identificaron que en el 20% de las minas de carbón ubicadas en Tópaga, Colombia se superan los valores máximos permitidos para la concentración de monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, lo que aumenta el riesgo de enfermedades y fatalidades entre los trabajadores. Es importante destacar que las explosiones y las atmósferas viciadas son las principales causas de muerte en la minería, subrayando la necesidad de medidas preventivas efectivas.

Por lo tanto, la revisión de la literatura demuestra que la exposición a gases como el monóxido de carbono, metano y ácido sulfhídrico en la minería subterránea es una preocupación importante para la salud de los trabajadores. Se han propuesto diversas medidas preventivas a lo largo del tiempo, pero los riesgos siguen siendo significativos, lo que subraya la necesidad de un conocimiento integral de estos peligros en el entorno minero.



3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de investigación empleado en este proyecto es de carácter cualitativo, mediante una revisión sistemática de la literatura. Esta elección se fundamenta en la revisión y análisis exhaustivo de diversas fuentes de información, incluyendo literatura académica, informes gubernamentales, investigaciones previas, entrevistas y estadísticas disponibles, sin ningún tipo de experimentación o intervención de variables. El propósito fundamental de esta metodología es alcanzar una comprensión en profundidad de los efectos que la exposición a gases nocivos, mencionados previamente, tiene sobre la salud de los trabajadores en la industria minera subterránea.

3.2 TÉCNICA

Para establecer el diseño metodológico se aplicó la metodología PRISMA (Ver Anexo A), para la realización del flujograma en la selección de los registros y la lista de verificación de 2020. Por lo tanto, durante la revisión bibliográfica se extrajo información de bases de datos electrónicas como *Pubmed*, *Scopus*, *Science Direct* y *Google Scholar*, de igual manera de disertaciones universitarias, informes gubernamentales relacionados con la minería subterránea en Colombia y literatura gris de organizaciones relevantes en el ámbito de la salud y seguridad ocupacional.

Para la revisión se utilizaron términos de búsqueda relacionados con la exposición a CO, CH₄ y H₂S en la minería subterránea y sus efectos en la salud. Por lo tanto, para identificar estudios relacionados con la exposición a gases tóxicos se hacen uso de los descriptores: *mining*, *underground mining*, *miners*, *mineworkers*, *toxic gases*, *gas exposure*, *air contaminants*, *carbon monoxide*, *methane*, *hydrogen sulfide*, *health effects*, *respiratory diseases* y



occupational health. Con el fin de mejorar la sensibilidad y especificidad de la búsqueda se empleó el uso de “entry terms” (sinónimos), así como los operadores booleanos AND y OR. A su vez, la búsqueda incluyó publicaciones en idioma inglés y español.

Para la selección de los artículos se contemplan los siguientes criterios de inclusión; estudios y documentos publicados entre 2013 y 2023, investigaciones que analicen los efectos de la exposición a monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) en trabajadores de la minería subterránea, documentos que proporcionen información sobre riesgos relacionados con la exposición a los gases, enfermedades, síntomas y consecuencias médicas mencionados e investigaciones en idioma español e inglés. Además, se consideran como criterios de exclusión a los estudios y documentos que no se centren en la temática de interés y documentos no accesibles.

3.4 PRESUPUESTO

Tabla 1. *Presupuesto para el cumplimiento de proyecto de grado*

Rubro	Descripción	Valor
Personal	1 investigador, estudiante en gestión de la seguridad laboral	\$700.000
	1 director de proyecto de investigación	
Equipos	Equipo de cómputo personal	\$500.000
Bibliografía	Acceso a bases de datos institucionales	\$100.000
Personal de Apoyo	1 profesional en manejo de normas APA y modelo PRISMA para el cribado de artículos.	\$400.000
Software	Acceso a herramientas ofimáticas como Word, Excel y PowerPoint	\$350.000
Gastos de Operación	Gastos relacionados con acceso a servicios públicos como energía para el funcionamiento de los equipos de cómputo.	\$200.000
	Total	\$2.250.000

3.5 CRONOGRAMA

Tabla 2. *Cronograma de cumplimiento de proyecto de grado*

[illegible]

4	Recolección de información de inicio del proyecto	E	E						
5	Entrega 2		E						
6	Análisis de información y resultados			E	E				
7	Entrega 3					E			
8	Correcciones y revisión						P	P	P
9	Sustentación de proyecto								P
								Programado	P
								Ejecutado	E

3.6 DIVULGACIÓN

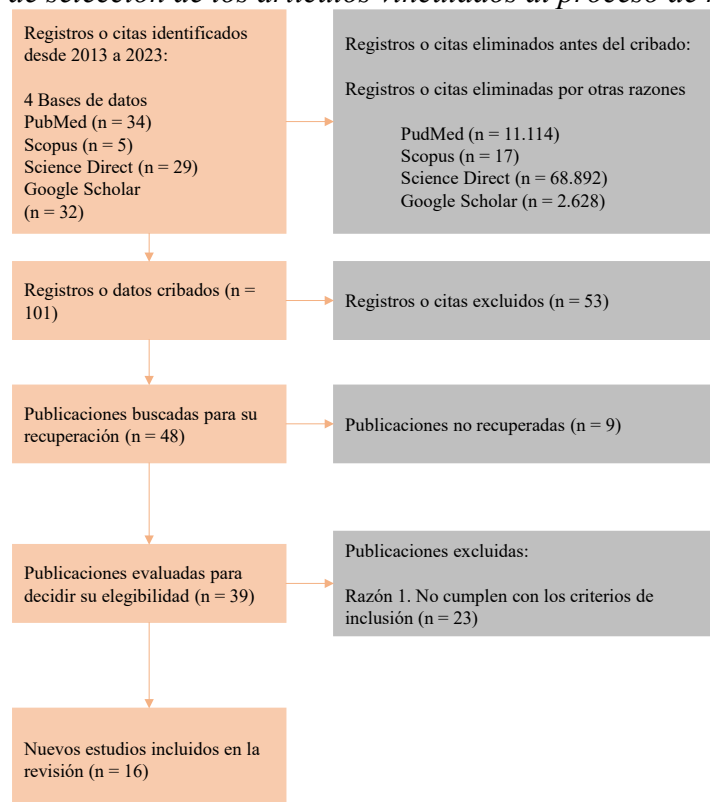
Los resultados de la investigación se difundirán mediante estrategias diseñadas para maximizar su alcance y utilidad. En consideración, se opta por la divulgación del trabajo de grado mediante el Repositorio Alejandría de la Institución Politécnico Gran Colombiano, de tal forma que se garantice el acceso a un público amplio, incluyendo estudiantes, docentes y profesionales interesados en el tema.

4. RESULTADOS

4.1 Selección de los estudios

La revisión bibliográfica fundamentada en la identificación de los nuevos estudios mediante las bases de datos y registros permitió identificar con fecha de corte a 6 de noviembre de 2023 82.737 documentos relacionados con la minería y la emisión de gases tóxicos que abarcan el periodo de 2013 a 2023. Sin embargo, según la finalidad del estudio fueron seleccionados para continuar con su evaluación 100 artículos, descartando 9 citas las cuales no pudieron ser recuperadas debido al carácter cerrado de las publicaciones. Finalmente, de los 92 artículos restantes 53 fueron excluidos debido a que no cumplían con los criterios de inclusión señalados en la metodología, obteniendo la selección de 39 documentos, distribuidos entre las cuatro bases de datos evaluadas. El diagrama de flujo representado en la Figura 1 presenta el proceso empleado en la selección de los estudios.

Figura 1. *Proceso de selección de los artículos vinculados al proceso de revisión sistemática.*



Por su parte, en la Tabla 3 se encuentran un resumen de los estudios que fueron considerados inicialmente para la revisión sistemática pero que no fueron incluidos debido a que no cumplían con los criterios de inclusión.

Tabla 3. *Justificación de la exclusión de las investigaciones recuperadas de las bases de datos.*

Base de Datos	Autores	Año de Publicación	Título	Justificación de Exclusión
Scopus	Danish E & Onder M	2020	Application of Fuzzy Logic for Predicting of Mine Fire in Underground Coal Mine	Se relaciona con la combustión espontanea del carbón como factor relevante en la explosión de minas. Si bien trabajan con el CO, el enfoque del estudio es la predicción de incendios de carbón.
	Bissen, R, Pumjan, S., Numprasanthai, A. & Chwchai, S.	2017	Green Mining in Thailand: Alternatives to Traditional Methods	El estudio se enfoca principalmente en las alternativas sostenibles para sustituir el uso de la voladura como técnica de excavación en la minería.
Science Direct	Suzuki, Y., Saito, J., Munakata, M. & Shibata, Y.	2020	Hydrogen sulfide as a novel biomarker of asthma and chronic obstructive pulmonary disease	Se enfoca en las aplicaciones de señalización que tiene el H ₂ S en el cuerpo humano y la posibilidad de emplearlo como un biomarcador inflamatorio convencional para la identificación de asma y EPOC.
	Banash, J., Yalley, A. & Dupey, D.	2016	The hazardous nature of small-scale underground mining in Ghana	Es un estudio que busca reconocer las implicaciones de la minería subterránea a pequeña escala en Ghana, enfocándose en las condiciones inseguras como el derrumbe de pozos, elección inadecuada de herramientas de trabajo y degradación del terreno.
	Citi, V., Martelli, A., Gorica, E., Brogi, S., Testai, L. Calderone, V.	2020	Role of hydrogen sulfide in endothelial dysfunction: Pathophysiology and therapeutic approaches	El estudio se encuentra enfocado en la revisión bibliográfica sobre el papel que tiene el H ₂ S en las enfermedades de tipo cardiovascular que se relacionan con la disfunción endotelial, principalmente en las actividades de relajación vascular y regulación de la funcionalidad del endotelio.
	Da Silva, L., de Almeida, L. & Gaparotto, J.	2022	Toxicological effects of mining hazard elements	Corresponde a un artículo de revisión enfocado en los efectos toxicológicos que tiene la exposición a los residuos mineros, así como el impacto de estos al ecosistema. Sin embargo, se enfoca en los residuos de metales pesados como hierro, plomo, zinc, silicio, entre otros.
	Dugbartey, G.	2023	Physiological role of hydrogen sulfide in the kidney and its therapeutic implications for kidney diseases	El estudio se encuentra enfocado en el estudio de la producción renal de H ₂ S y su papel en la fisiología renal, destacando como podría ser empleado como un agente terapéutico en patologías renales relacionadas con la insuficiencia renal.
	Haouzi, P., Sonobe, T. & Judenherc, A.	2019	Hydrogen sulfide intoxication induced brain injury and methylene blue	Corresponde a un artículo de revisión en el que se analizan los síntomas y lesiones a nivel neurológico que deja la exposición aguda a niveles letales o subletales de H ₂ S, sin embargo, su enfoque principal corresponde al uso del azul de metileno como colorante

Base de Datos	Autores	Año de Publicación	Título	Justificación de Exclusión
	Paul, B., Snyder, S. & Kashfi, K.	2021	Effects of hydrogen sulfide on mitochondrial function and cellular bioenergetics	potencial empleado para el tratamiento de las implicaciones que deja el H ₂ S El estudio relaciona los efectos beneficiosos que tienen concentraciones bajas de H ₂ S sobre la función mitocondrial, así como los efectos que este tiene en la fisiología celular.
	Saini, V., Gupta, R. & Arora, M.	2016	Environmental impact studies in coalfields in India: A case study from Jharia coalfield	Se relaciona con una revisión sobre el impacto ambiental que genera la extracción minera en India, principalmente relacionados con afectaciones en agua, suelo, tierras agrícolas, vegetación y topografía.
	Tato, M.	2020	European legal framework related to underground mining and tunnelling concerning commission directive (EU) 2017/164, 31 January establishing a fourth list of indicative occupational exposure limit values	Corresponde a un documento el cual relaciona los beneficios que ofrece la cuarta lista de valores límite de exposición profesional (VLEPI) indicativos de la directiva (EU) 2017/164. Además, plantea los retos que se encuentran en el entorno minero sobre la disponibilidad de metodologías que pueden ser empleadas para la medición del cumplimiento de los VELPI en la emisión y exposición a NO ₂ .
	Sun, H., Wu, Z., Nie, X., Wnag, X. & Bian, J.	2020	Implications of hydrogen sulfide in liver pathophysiology: Mechanistic insights and therapeutic potential	Es un artículo el cual estudia las funciones fisiológicas que tiene el H ₂ S en los sistemas de los mamíferos, destacando los acontecimientos celulares desencadenados por este compuesto en las enfermedades hepáticas y los efectos terapéuticos que brinda.
Google Scholar	Mohsin, M., Zhu, Q., Naseem, S., Sarfraz, M. & Ivascu, L.	2021	Mining Industry Impact on Environmental Sustainability, Economic Growth, Social Interaction, and Public Health: An Application of Semi-Quantitative Mathematical Approach	Se enfoca en la revisión de los impactos que tiene la minería de carbón en Sindh Engro – Pakistan, señalando los efectos que tienen gases como pueden ser el CO ₂ , CH ₄ y azufre, en los componentes ambientales relacionados con las capas externas de la tierra, a saber, hidrósfera, atmósfera, entre otros.
PubMed	Du, J., Jin, H. & Yang, L.	2017	Role of Hydrogen Sulfide in Retinal Diseases	Corresponde al estudio del H ₂ S como gasotransmisor y su papel en la fisiología y fisiopatología de los sistemas nervioso, cardiovascular, respiratorio y gastrointestinal. El documento se enfoca principalmente en el papel del H ₂ S como protector en la patogénesis de las enfermedades que se generan en la retina.
	Jung, Y., Lee, J. Min, Y., Park, J., Jeon, W., Park, E., Shin, J., Oh, S. & Choi, S.	2014	Carbon Monoxide-Induced Cardiomyopathy – Epidemiology, Clinical Characteristics and Prognosis	El artículo se enfoca en investigar la cardiomiopatía inducida por CO, así como su epidemiología y características clínicas. Su exclusión se generó debido a que no hace enfoque en los efectos que se genera en los pacientes, sino que los

Base de Datos	Autores	Año de Publicación	Título	Justificación de Exclusión
	Lee, K., Spath, N., Miller, M., Mills, N. & Shah, A.	2020	Short-term exposure to carbon monoxide and myocardial infarction: A systematic review and meta-analysis	pronósticos no son críticos en torno a la intoxicación aguda por CO. Corresponde a una revisión sistemática que se enfoca en la evaluación de las pruebas actuales para apoyar la actualización de las directrices sobre la calidad del aire de la OMS. Se descartó el estudio debido a que únicamente se encontró enfocado en la incidencia del incremento de la concentración ambiental de monóxido de carbono en el infarto de miocardio.
	Levy, R.	2015	Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern	Si bien se relaciona con la toxicidad del CO en el ser humano, se enfoca en las políticas que regulan la exposición al CO y la relación que existe la contaminación del aire asociado al CO, el humo del tabaco, las anomalías del aprendizaje y el comportamiento de los niños.
	Megas, I., Beier, J. & Grieb, G.	2021	The History of Carbon Monoxide Intoxication	El artículo de revisión se centra en las estrategias de diagnóstico y tratamiento de la intoxicación por monóxido de carbono, más no hace especial énfasis en los efectos que este genera,
	Murphy, B., Bhattacharya, R., Mukherjee, P.	2019	Hydrogen sulfide signaling in mitochondria and disease	La revisión se encuentra centrada en documentar el conocimiento sobre la producción, metabolismo y mecanismos de señalización del H ₂ S, así como los efectos positivos mitocondriales en diversas condiciones patológicas.
	Queiroga, C., Vercelli, A. & Vieira, H.	2014	Carbon monoxide and the CNS: challenges and achievements	El documento se centra en los mecanismos y procesos celulares como citoprotección y muerte celular, en donde se enfocan en el análisis de métodos y estrategias que permiten administrar el Co exógeno como fármaco para el tratamiento de patologías cerebrales.
	Rose, J., Wang, L., Xu, Q., McTiernan, C., Shiva, S., Tejero, J. & Gladwin, M.	2016	Carbon Monoxide Poisoning: Pathogenesis, Management, and Future Directions of Therapy	El estudio se encuentra centrado en los métodos que se pueden aplicar para combatir la toxicidad del CO, enfocándose en sus agentes secuestrantes.
	Ryter, S. & Choi, A.	2013	Carbon monoxide in exhaled breath testing and therapeutics	Corresponde a un artículo enfocado en la monitorización de gases volátiles como el CO y el NO, así como la ventaja que tiene sobre otras pruebas clínicas que se basa en biomarcadores. Por lo tanto, se centra en el diagnóstico de la intoxicación por estos gases.

4.2 Características de los estudios seleccionados

En la Tabla 4 se identifican los 16 estudios seleccionados para la realización de la revisión sistemática de los efectos a la salud por gases tóxicos en los trabajadores del sector minero. Los artículos fueron seleccionados considerando la contextualización que brindaban sobre el gas, su toxicología, toxicocinética, los efectos que podrían presentar a la salud de las personas, así como su presencia y prevalencia en la minería.

Tabla 4. *Criterios de inclusión de las investigaciones recuperadas de las bases de datos.*

Estudio	Gas Tóxico	Generalidades	Efectos a la Salud	Toxicología	Toxicocinética	Presencia en la Minería
(Albarracín & Gutiérrez, 2014)	CO	Se puede generar en la combustión de diésel, detonación de explosivos e incendios provocados.	No señala	No señala	No señala	No señala
	CH ₄	Fuente significativa de energía, caracterizado por su inflamabilidad y explosividad.	Ardor en la piel con exposiciones a concentraciones de un 4 %.	No señala	No señala	No señala
(Bejarano & Prieto, 2014)	H ₂ S	No señala	Asfíxia celular o hipoxia. Edemas pulmonares. Mareos. Náuseas. Acidosis láctica severa. Arritmias cardíacas. La muerte	Irrupción de la fosforilación oxidativa.	Adsorción por la piel, vía respiratoria y el revestimiento del tracto digestivo. No se acumula en el cuerpo. Se oxida y es excretado por los riñones	No señala
	CH ₄	No señala	Hipoxemia. Disfunción cerebral.	Reduce la ventilación alveolar y la presión de oxígeno en la sangre.	No señala	No señala
(Cardiga et al., 2015)	CO	No señala	Hipoxia. Isquemia tisular. Daño tisular celular.	No señala	No señala	No señala
(Davies et al., 2020)	CO	No señala	No señala	No señala	La afinidad del gas con la hemoglobina es 200 veces superior a la que tiene con el oxígeno, favoreciendo la	No señala

EFFECTOS A LA SALUD DE TRABAJADORES DEL SECTOR MINERO POR GASES TÓXICOS 39

Estudio	Gas Tóxico	Generalidades	Efectos a la Salud	Toxicología	Toxicocinética	Presencia en la Minería
					formación de carboxi hemoglobina.	
(De Gregorio et al., 2019)	CO	No señala	Desmielinización reversible del sistema nervioso central. Daño oxidativo celular. Lesión de reperusión. Lesiones miocárdicas. Desregulación en el sistema nervioso autónomo.	Induce la peroxidación lipídica, descomponiendo ácidos grasos insaturados.	No señala	No señala
(Duda & Valverde, 2020)	CH ₄	No señala	No señala	No señala	No señala	Resalta que no hay estudios sobre los riesgos a la salud que presentan los trabajadores mineros por la exposición a este gas. Sin embargo, resalta su potencial explosivo, señalando la necesidad de implementar medidas preventivas para mitigar el riesgo.
(Dursun, 2020)	CH ₄	No señala	No señala	No señala	No señala	Riesgo letal por la posibilidad de combustión espontánea, generando la pérdida de vidas humanas
(Kanburoglu et al., 2014)	CO	No señala	Afectaciones en el sistema nervioso central y el corazón. Cefalea progresiva. Mareos. Náuseas. Pulsación de las arterias temporales.	El gas genera el incremento de lípidos plasmáticos, lo que incrementa la probabilidad de episodios trombóticos.	Vida media en el ser humano de 4 a 8 horas, metabolizándose hepáticamente el 1 % a CO ₂	Los diagnósticos por intoxicación con el gas requieren un elevado índice de sospecha. Se ha confirmado que el 14,6 % de quienes acuden a revisión por síntomas como dolores de cabeza y mareos cuentan con una intoxicación insospechada por CO.

Estudio	Gas Tóxico	Generalidades	Efectos a la Salud	Toxicología	Toxicocinética	Presencia en la Minería
(Kinoshita et al., 2020)	CO	Gas tóxico e inodoro que se genera por la combustión incompleta de compuestos carbonados.	Daño tisular	Reduce la capacidad celular para la generación de energía, por lo tanto, se promueve la producción de moléculas de tipo oxidante, que afectan a las biomoléculas que componen el cuerpo humano, favoreciendo implicaciones como apoptosis, así como acidosis láctica.	Ingresa al organismo por vía respiratoria, difundiéndose mediante las membranas alveolares, combinándose con la hemoglobina. Se une al citocromo C oxidasa de la cadena respiratoria mitocondrial.	No señala
(Malone et al., 2017)	H ₂ S	Exposiciones comunes en seres humanos es de 0,005 a 0,3 ppm. El tracto respiratorio y el sistema nervioso son sensibles a los efectos de la exposición de este gas.	Parálisis cardiopulmonar	Fatiga olfativa. Náuseas. Irritación respiratoria. Intoxicación aguda (Concentración mayor a 300 ppm)	Ingresa del gas mediante inhalación, contacto dérmico, ocular, ingestión o inyección.	Señala la falta de datos o tendencias clara sobre las muertes y lesiones laborales generados por el gas en Estados Unidos. En países como Canadá, se señala que no se han revelado secuelas neurológicas en trabajadores afectados por envenenamiento con el gas.
			Dificultad para respirar. Edemas pulmonares no cardiogénicos. Cianosis. Coma.	Intoxicación pos-aguda (Concentración entre 10 y 300 ppm)		
			Fatiga olfativa. Náuseas. Irritación respiratoria. Dolores de cabeza.	Intoxicación Crónica (Concentración inferior a 1 ppm).		
(Mayorga, 2019)	CO	No señala	Arritmia. Dificultad respiratoria. Dolor torácico. Visión borrosa. Taquicardia. Hipotensión. Pérdida de conciencia. Convulsiones. Arritmias. Isquemia miocárdica.	El gas se une a la mioglobina cardíaca, reduciendo la disponibilidad de oxígeno en las células cardíacas. Genera intoxicación aguda e intoxicación crónica.	La afinidad del gas con la hemoglobina es 200 veces superior a la que tiene con el oxígeno, favoreciendo la formación de carboxi hemoglobina.	De 122 trabajadores mineros el 76,23 % contaron con una intoxicación leve mientras que el 4,10 % mostró una intoxicación moderada. El 20,47 % a su vez, presento una presión arterial superior a la normal 120/80 mmHg. Los trabajadores

Estudio	Gas Tóxico	Generalidades	Efectos a la Salud	Toxicología	Toxicocinética	Presencia en la Minería
						exhibían alteraciones en su ritmo cardiaco como taquicardias.
(Mazo et al., 2020)	CO	No señala	Déficits cognitivos Incidencia en la enfermedad de Parkinson Síndrome neurológico tardío.	Es un gas que genera lesiones en la corteza cerebral, hipocampo, los ganglios basales, el cerebelo y el globo pálido.	No señala	No señala
(Moberg et al., 2023)	CO	Es un gas que se genera por fuentes naturales y antropogénicas, el ser humano genera CO como producto del catabolismo de la hemoglobina.	Efectos neurológicos, alteraciones del lenguaje, atención, memoria y funciones ejecutivas.	No señala	No señala	No señala
(Ryter et al., 2018)	CO	No señala	Estrés oxidativo Dalo mitocondrial y endotelial	No señala	Unión del gas con los grupos heme de las proteínas de las plaquetas.	No señala
(Saji et al., 2022)	CO	No señala	Estrés oxidativo	No señala		No señala
(Sharma et al., 2018)	CO	No señala	Hipoxia celular	No señala	La afinidad del gas con la hemoglobina es 300 veces superior a la que tiene con el oxígeno, favoreciendo la formación de carboxi hemoglobina.	No señala
	H ₂ S	Máxima exposición de 0,02 % por 8 horas.	No señala	No señala	No señala	No señala

5. ASPECTOS ESPECÍFICOS

La revisión sistemática de la literatura pertinente durante el periodo de 2013 a 2023 ha permitido arrojar luz sobre la complejidad inherente a la exposición de los trabajadores del sector minero subterráneo a gases tóxicos como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S). Los resultados derivados de la selección de 16 estudios destacan aspectos cruciales de la toxicidad, los efectos y la presencia de estos gases en la industria minera, proporcionando así una visión profunda y perspicaz.

En este contexto, surge una disparidad significativa en la atención prestada a cada uno de estos gases. El monóxido de carbono, siendo objeto de una extensa investigación, revela un cuerpo sustancial de conocimiento relacionado con sus efectos en la salud de los trabajadores mineros. Estos estudios han contribuido a esclarecer la gama de impactos, desde la hipoxia hasta los daños celulares, brindando una comprensión más completa de los riesgos asociados con la exposición al CO en entornos subterráneos.

Sin embargo, esta amplia cobertura contrasta notablemente con la falta de atención dedicada a los efectos directos en la salud de los mineros subterráneos expuestos a CH₄ y H₂S. A pesar de que el CH₄ se destaca principalmente por su potencial explosivo, su influencia específica en la salud de los trabajadores mineros ha recibido una atención limitada en la literatura revisada. De manera similar, el H₂S, cuyo papel terapéutico en concentraciones bajas ha sido objeto de interés reciente, carece de una exploración exhaustiva de sus efectos negativos en la salud de los mineros subterráneos.

Esta disparidad en la atención a los diferentes gases plantea interrogantes significativas sobre la integralidad de la investigación en salud ocupacional en la minería subterránea. La focalización predominante en el CO puede haber conducido a un desequilibrio en la comprensión de los riesgos laborales totales asociados con la exposición a gases tóxicos en este



sector específico. La falta de un enfoque equitativo podría traducirse en estrategias de prevención y mitigación de riesgos insuficientes para aquellos gases que han recibido una atención limitada, comprometiendo así la seguridad y bienestar de los trabajadores mineros.

En consecuencia, el análisis destaca la necesidad urgente de una investigación más equitativa y completa que aborde los vacíos existentes en la literatura. La salud de los trabajadores en la minería subterránea requiere una consideración holística de los riesgos asociados con la exposición a CO, CH₄ y H₂S para desarrollar estrategias de gestión efectivas y garantizar entornos laborales seguros y saludables para todos los involucrados.

A su vez, es necesario destacar que una de las limitaciones claves en el proceso corresponde a que el desarrollo metodológico de la revisión fue llevado a cabo de forma manual, sin el respaldo de algún software especializado. Por lo tanto, debido a la ausencia de un enfoque automatizado, es posible que se hallan excluido potenciales contribuciones relevantes que podrían haberse pasado por alto en la exhaustividad de la revisión. Es por lo anterior que la falta de un sistema automatizado y organizado para la gestión y selección eficiente de artículos podría haber resultado en la omisión de investigaciones pertinentes. Además, el volumen considerable de documentos identificados inicialmente, 82,737 en total, influyó en la capacidad de revisar minuciosamente cada artículo, lo que podría haber llevado a la exclusión involuntaria de contribuciones valiosas.



6. CONCLUSIONES

La revisión sistemática llevada a cabo según la metodología PRISMA ha arrojado una perspectiva detallada sobre los impactos del monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) en la salud de los trabajadores de la industria minera subterránea en el periodo comprendido entre 2013 y 2023. A pesar de revelar resultados esclarecedores, la investigación ha destacado notables disparidades en la atención científica y académica asignada a cada uno de los gases evaluados.

Si bien se ha logrado un avance significativo en la identificación de los efectos del CO en la salud de los mineros, la revisión resalta la imperiosa necesidad de un enfoque más equitativo y exhaustivo hacia el CH₄ y el H₂S. La falta de estudios específicos sobre estos dos últimos gases subraya las lagunas existentes en la investigación actual y sugiere que la comprensión completa de los riesgos laborales asociados con su exposición requiere una atención sustancialmente mayor.

En este sentido, resulta evidente que la comunidad científica y académica debería dirigir esfuerzos adicionales para abordar las brechas de conocimiento identificadas en relación con el metano y el ácido sulfhídrico. La falta de atención a estos gases no solo limita la comprensión integral de los riesgos laborales, sino que también puede afectar la implementación de medidas preventivas y la formulación de políticas de salud ocupacional eficaces.

Por lo tanto, aunque la revisión ha proporcionado información valiosa sobre los efectos del CO, destaca la urgente necesidad de un enfoque más equilibrado y exhaustivo en la investigación de los impactos del CH₄ y el H₂S en la salud de los trabajadores mineros. Esta llamada a la acción busca impulsar la investigación, promover la equidad en la atención científica y mejorar la seguridad laboral en la industria minera subterránea.



7. RECOMENDACIONES

La revisión sistemática de la literatura sobre los efectos a la salud de los trabajadores de la industria minera subterránea expuestos a monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) ha revelado un panorama complejo de riesgos y lagunas en el conocimiento. En este contexto, se derivan recomendaciones cruciales basadas en la evidencia recopilada, con el objetivo de fortalecer la gestión de gases tóxicos y mejorar las condiciones de seguridad y salud ocupacional en la minería subterránea.

En primer lugar, la gestión eficaz de gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) requiere la implementación de programas de monitoreo exhaustivo. Estos programas deben centrarse en la medición constante de las concentraciones de gases en las áreas mineras subterráneas, respaldándose en la evidencia que destaca la importancia crítica de la detección temprana para prevenir efectos adversos a la salud.

Dada la falta de conciencia identificada en algunos estudios sobre los riesgos directos asociados con la exposición a CH₄ y H₂S, es necesario desarrollar estrategias educativas integrales. Estas estrategias deben abordar de manera específica los riesgos, efectos y medidas preventivas relacionadas con cada gas tóxico. La capacitación continuada de los trabajadores es esencial para cultivar una cultura de seguridad proactiva.

Con base en las lagunas de conocimiento identificadas, se recomienda una inversión significativa en investigación específica sobre los efectos a la salud derivados de la exposición al CH₄ y al H₂S en entornos mineros subterráneos. La financiación y apoyo a estudios detallados contribuirán a una comprensión más completa de los riesgos y efectos asociados con estos gases, respaldando así la toma de decisiones basada en evidencia.

La innovación tecnológica es esencial para mitigar los riesgos asociados con la extracción y manipulación de minerales en entornos ricos en CH₄. Se recomienda la



investigación y desarrollo de tecnologías más seguras que reduzcan los riesgos de explosiones, preservando no solo la seguridad de los trabajadores sino también optimizando los procesos mineros.

Finalmente, la revisión y mejora continua de las políticas de seguridad en la minería subterránea son esenciales. La evaluación regular de las normativas relacionadas con la gestión de gases tóxicos, integrando hallazgos recientes y mejores prácticas, garantiza un enfoque holístico y eficaz en la gestión de riesgos. La colaboración entre entidades gubernamentales, empresas mineras y expertos en salud ocupacional es clave para implementar políticas dinámicas que se adapten a las realidades cambiantes de la industria.

Por lo tanto, las recomendaciones respaldadas por la evidencia obtenida de la revisión bibliográfica constituyen un enfoque integral para mejorar la gestión de gases tóxicos en la industria minera subterránea, buscando proteger la salud y seguridad de los trabajadores de manera efectiva y sostenible.



REFERENCIAS

- Acosta, D. (2016). Impactos ambientales de la minería de carbón y su relación con los problemas de salud de la población del municipio de Samacá (Boyacá), según reportes ASIS 2005-2011. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/4130>
- Acosta, L. J. (2017, septiembre 19). Mueren cuatro personas al inhalar gas metano en mina de oro en Colombia. *Reuters*. <https://www.reuters.com/article/colombia-accidente-idLTAKCN1BU010-OUSLD>
- Agencia Nacional de Minería (2023). *Minería en Colombia. Minería para la vida*. <https://mineriaencolombia.anm.gov.co/contenido/mineria-para-la-vida>
- Albarracín, M. & Gutiérrez, G. (2014). Monitoreo inalámbrico de gases en minería con servicio web en tiempo real fase II. Tesis de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1620>
- Ali, M., & Pal, I. (2022). Assessment of workers' safety behavior in the extractive industries: The case of underground coal mining in Pakistan. *The Extractive Industries and Society*, 10(101087), 101087. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101087>
- Alpay, S., & Yavuz, M. (2009). Underground mining method selection by decision making tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.07.003>
- Ayaaba, E., Li, Y., Yuan, J., & Ni, C. (2017). Occupational respiratory diseases of miners from two gold mines in Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(3), 337. <https://doi.org/10.3390/ijerph14030337>
-
-

- Badri, A., Nadeau, S., & Gbodossou, A. (2013). A new practical approach to risk management for underground mining project in Quebec. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(6), 1145–1158. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.04.014>
- Bahn, S. (2013). Workplace hazard identification and management: The case of an underground mining operation. *Safety Science*, 57, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.01.010>
- Bansah, K. J., Yalley, A. B., & Dumakor-Dupey, N. (2016). The hazardous nature of small scale underground mining in Ghana. *Journal of Sustainable Mining*, 15(1), 8–25. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.04.004>
- Baraza, X., Cugueró-Escofet, N., & Rodríguez-Elizalde, R. (2023). Statistical analysis of the severity of occupational accidents in the mining sector. *Journal of Safety Research*, 86, 364–375. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.07.015>
- Bejarano, M., & Prieto, F. (2014). Estudio de la intoxicación por monóxido de carbono y otros gases en Colombia notificados al sivilga en 2010 y 2011. *Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales*. <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/245>
- Bolaños, P. & Chacón, C. (2017). Intoxicación por monóxido de carbono. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1), 137-146. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152017000100137&lng=en&tlng=es.
- Boyacá Siete Días. (2022, noviembre 6). *Dos mineros de Chita fallecieron en accidente en un socavón del municipio de La Uvita*. Boyacá Siete Días; Boyaca Siete Dias. <https://boyaca7dias.com.co/2022/11/06/dos-mineros-de-chita-fallecieron-en-accidente-en-un-socavon-del-municipio-de-la-uvita/>
-
-

- Cabrera-Marutz, C. D., Velásquez-Alcalá, S., & Vrhovac-Biljesko, J. (2014). Enfermedades profesionales en la industria del cobre: extracción, manufactura y reciclaje. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 60(237), 756–778. <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2014000400010>
- Cardiga, R., Proença, M., Carvalho, C., Costa, L., Botella, A., Marques, F., Paulino, C., Carvalho, A., & Fonseca, C. (2015). What do we know about carbon monoxide poisoning and cardiac compromise? Treatment and prognosis. *Revista Portuguesa de Cardiologia (English Edition)*, 34(9), 557.e1-557.e5. <https://doi.org/10.1016/j.repce.2015.07.002>
- Carmona, L., Whiting, K., Valero, A., & Valero, A. (2015). Colombian mineral resources: An analysis from a Thermodynamic Second Law perspective. *Resources Policy*, 45, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.03.005>
- Chen, Y., Silvestri, L., Lei, X., & Ladouceur, F. (2022). Optically powered gas monitoring system using single-mode fibre for underground coal mines. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00496-y>
- Costello, S., Attfield, M. D., Lubin, J. H., Neophytou, A. M., Blair, A., Brown, D. M., Stewart, P. A., Vermeulen, R., Eisen, E. A., & Silverman, D. T. (2018). Ischemic heart disease mortality and diesel exhaust and respirable dust exposure in the diesel exhaust in miners study. *American Journal of Epidemiology*, 187(12), 2623–2632. <https://doi.org/10.1093/aje/kwy182>
- Davies, V., Turner, J., & Greenway, M. (2020). Toxic inhalational injury. *BMJ Case Reports*, 13(3), e232875. <https://doi.org/10.1136/bcr-2019-232875>
- De Gregorio, M. G., Olivotto, I., Migliorini, A., Vergara, R., Buonamici, P., Marchionni, N., & Valenti, R. (2019). Life-threatening acute pulmonary thromboembolism following
-

severe carbon monoxide poisoning. *JACC. Case Reports*, 1(2), 208–212.

<https://doi.org/10.1016/j.jaccas.2019.05.024>

Decreto 1072 de 2015 [Presidente de la República de Colombia] Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. 26 de mayo de 2015

Decreto 1886 de 2015 [Presidente de la República de Colombia] Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. 21 de septiembre de 2015

Decreto 944 de 2022 [Presidente de la República de Colombia] Por el cual se modifica el Decreto 1886 de 2015. 01 de junio de 2022

Díaz, M. (2009) Manual de salud y seguridad en trabajos de minería; con colaboración de Alejandro Tesoro... [et.al.]; dirigido por Gustavo Gándara; ilustrado por Julia Irulegui.

- 1a ed. - Buenos Aires: Aulas y Andamios, 120 p.

https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/salud_seg_mineria.pdf

Domínguez, C. R., Martínez, I. V., Piñón Peña, P. M., & Rodríguez Ochoa, A. (2019). Analysis and evaluation of risks in underground mining using the decision matrix risk-assessment (DMRA) technique, in Guanajuato, Mexico. *Journal of Sustainable Mining*, 18(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.01.001>

Domínguez, C. R., Martínez, I. V., Piñón Peña, P. M., & Rodríguez Ochoa, A. (2019). Analysis and evaluation of risks in underground mining using the decision matrix risk-assessment (DMRA) technique, in Guanajuato, Mexico. *Journal of Sustainable Mining*, 18(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2019.01.001>

Donoghue, A. M. (2004). Occupational health hazards in mining: an overview. *Occupational Medicine (Oxford, England)*, 54(5), 283–289. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqh072>



- Duda, A. & Valverde, G. (2020) Environmental and Safety Risks Related to Methane Emissions in Underground Coal Mine Closure Processes. *Energies*. 13(21). 6312. <https://doi.org/10.3390/en13236312>
- Dursun, A. E. (2020). Statistical analysis of methane explosions in Turkey's underground coal mines and some recommendations for the prevention of these accidents: 2010–2017. *Natural Hazards (Dordrecht, Netherlands)*, 104(1), 329–351. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04170-x>
- Engström, K. G., Angrén, J., Björnstig, U., & Saveman, B.-I. (2018). Mass casualty incidents in the underground mining industry: Applying the Haddon matrix on an integrative literature review. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 12(1), 138–146. <https://doi.org/10.1017/dmp.2017.31>
- Federación de Aseguradores Colombianos (2023). *Riesgos Laborales*. *Geográfico* <https://sistemas.fasecolda.com/rldatos/Reportes/xGeografico.aspx>
- Gallo, Ó., & Pico, C. (2017). No 108 La salud laboral en el sector minero – La invisibilidad de las enfermedades laborales en el Cerrejón. <https://www.ens.org.co/wp-content/uploads/2017/03/108-La-salud-laboral-en-el-sector-minero.pdf>
- García, M. (2022). *Minería en Colombia: oficio mortal que ha dejado 1.306 muertes en 10 años*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/mineria-en-colombia-victimas-departamentos-y-accidentes-laborales-674165>
- Gómez, T. (2018). Análisis de riesgos e impactos de la minería del carbón y producción de coque en zona de Cundinamarca, Colombia. Universidad de Los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/39042>
-

- Gözübüyük, A. A. (2017). Carbon monoxide intoxication epidemiology, pathophysiology, clinical evaluation and treatment during childhood, in newborn and fetus. *Northern Clinics of Istanbul*. <https://doi.org/10.14744/nci.2017.49368>
- Gutiérrez-Alvarado, N. C. (2018). Prevalencia de la sintomatología respiratoria en trabajadores mineros del municipio de Socotá, Boyacá, 2017. *Revista investigación en salud Universidad de Boyacá*, 5(1), 99–124. <https://doi.org/10.24267/23897325.301>
- Hernández, S. (2023). Práctica empresarial en la empresa SERMECOL LTDA apoyando al desarrollo y organización de proyectos de sistemas fijos de detección y monitoreo de gases para implementar en la industria minera y petrolera en Colombia. Universidad Santo Tomás. Recuperado de: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/49175>
- Jo, J. Y., Kwon, Y. S., Lee, J. W., Park, J. S., Rho, B. H., & Choi, W.-I. (2013). Acute respiratory distress due to methane inhalation. *Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 74(3), 120. <https://doi.org/10.4046/trd.2013.74.3.120>
- Kanburoglu, M. K., Cizmeci, M. N., & Akelma, A. Z. (2014). A rare cause of chronic headache that may be misdiagnosed as migraine: Chronic carbon monoxide poisoning. *Turkish Journal of Emergency Medicine*, 14(3), 132–134. <https://doi.org/10.5505/1304.7361.2014.00868>
- Karacan, C. Ö., Ruiz, F. A., Cotè, M., & Phipps, S. (2011). Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. *International Journal of Coal Geology*, 86(2–3), 121–156. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.02.009>
- Kinoshita, H., Türkan, H., Vucinic, S., Naqvi, S., Bedair, R., Rezaee, R., & Tsatsakis, A. (2020). Carbon monoxide poisoning. *Toxicology Reports*, 7, 169–173. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.01.005>
-

- Kowalski-Trakofler, K. M., & Vaught, C. (2012). Psycho-social issues in mine emergencies: The impact on the individual, the organization and the community. *Minerals* (Basel, Switzerland), 2(2), 129–168. <https://doi.org/10.3390/min2020129>
- Kursunoglu, N., Onder, S., & Onder, M. (2022). The evaluation of personal protective equipment usage habit of mining employees using structural equation modeling. *Safety and Health at Work*, 13(2), 180–186. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.03.004>
- Lago, R. (2019) Boletín Informativo No. 4. Riesgos Laborales en Minería Subterránea de Carbón. Dräger. <https://hidroprob.com/wp-content/uploads/2020/06/Boletin-Riesgos-minas-subterraneas-copia-002.pdf>
- Lago, R. (2020) Monitoreo de gases en minería subterránea de carbón. II Congreso Nacional de Gestión del Riesgo en Seguridad Minera. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/presentacion_multidetectors_ibrid-mx6.pdf
- Lat Rotta, Á. & Torres, M. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde em Debate*, 41, 77-91. <https://doi.org/10.1590/0103-1104201711207>
- Lee, F.-Y., Chen, W.-K., Lin, C.-L., & Kao, C.-H. (2015). Carbon monoxide poisoning and subsequent cardiovascular disease risk: A nationwide population-based cohort study. *Medicine*, 94(10), e624. <https://doi.org/10.1097/md.0000000000000624>
- Ley 685 de 2001 [Congreso de Colombia] Por la cual se expide el código de minas y se dictan otras disposiciones. 15 de agosto de 2001
- Liu, Q., Meng, X., Li, X., & Luo, X. (2019). Risk precontrol continuum and risk gradient control in underground coal mining. *Process Safety and Environmental Protection* :

- Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, 129, 210–219.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.06.031>
- Malone Rubright, S. L., Pearce, L. L., & Peterson, J. (2017). Environmental toxicology of hydrogen sulfide. *Nitric Oxide: Biology and Chemistry*, 71, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.niox.2017.09.011>
- Mariño, J., Chanci, R. & Orjuela, A. (2021) Emisiones de metano asociado a la minería subterránea del carbón en el altiplano cundiboyacense (Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 45(176):864-874, <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1372>
- Mayorga, L. A. (2019). Exposición a Monóxido de Carbono, alteraciones clínicas y funcionamiento neuropsicológico en trabajadores de minas de carbón subterráneas en Cundinamarca, 2018. Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/75588>
- Mazo, J., Mukhtar, E., Mazo, Y., Nagaraj, A., & Mantello, M. T. (2020). Delayed brain injury post carbon monoxide poisoning. *Radiology Case Reports*, 15(10), 1845–1848.
<https://doi.org/10.1016/j.radcr.2020.07.048>
- Mejía, G., Baquero, H. & Corredor, L. (2023). Estudio de las principales causas en la accidentalidad minera subterránea de carbón reportado a la Agencia Nacional de Minería en Colombia. Universidad ECCI. Recuperado de:
<https://repositorio.ecci.edu.co/handle/001/3535>
- Moberg, M. E., Hamilton, E. B., Zeng, S. M., Bryazka, D., Zhao, J. T., Feldman, R., Abate, Y. H., Abbasi-Kangevari, M., Abdurehman, A. M., Abedi, A., Abu-Gharbieh, E., Addo, I. Y., Adepoju, A. V., Adnani, Q. E. S., Afzal, S., Ahinkorah, B. O., Ahmad, S., Ahmed, D., Ahmed, H., ... Ong, K. L. (2023). Global, regional, and national mortality due to unintentional carbon monoxide poisoning, 2000–2021: results from the Global Burden
-
-

- of Disease Study 2021. *The Lancet. Public Health*, 8(11), e839–e849.
[https://doi.org/10.1016/s2468-2667\(23\)00185-8](https://doi.org/10.1016/s2468-2667(23)00185-8)
- Mon. (2022, julio 21). The importance of underground mining ventilation. Minetek.
<https://minetek.com/importance-of-underground-mining-ventilation/>
- Ngombe, L. K., Ngatu, N. R., Christophe, N. M., Ilunga, B. K., Okitotsho, S. W., Sakatolo, J.-
B. K., Danuser, B., & Numbi, O. L. (2016). Respiratory health of artisanal miner of
Iwisha in Katanga/DR Congo. *OAlib*, 03(12), 1–10.
<https://doi.org/10.4236/oalib.1103233>
- Olson K, Smollin C (2008) Carbon monoxide poisoning (acute). *BMJ Clin Evid*. 23. 2103.
PMID: 19445736; PMCID: PMC2907971.
- Orche, E. (2020). Calidad del aire en las minas museo subterráneas. Propuesta de índices de
referencia. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(2), 37-58.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522020000200005&lng=es&tlng=es.
- Ortega, C., Franco, T., Blandón, A. & Molina, J. (2018). Evaluación del riesgo de explosividad
del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná,
Colombia. *Boletín de Geología*, 40(1), 83-91. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018005>
- País Minero (2022). *Informe: “La mortalidad laboral en el sector minero creció en 53 %
durante 2021”*. Minería - Petróleo - Energía - Gas y Medio ambiente de Colombia y el
Mundo; <https://www.paisminero.com/mineria/mineria-colombiana/25167-informe-la-mortalidad-laboral-en-el-sector-minero-crecio-en-53-durante-2021>
- Poplin, G. S., Miller, H. B., Ranger-Moore, J., Bofinger, C. M., Kurzius-Spencer, M., Harris,
R. B., & Burgess, J. L. (2008). International evaluation of injury rates in coal mining: A
-

- comparison of risk and compliance-based regulatory approaches. *Safety Science*, 46(8), 1196–1204. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.06.025>
- Portafolio. (2023, otoño 3). *Explosión en minas de carbón en Sutatausa deja 11 mineros muertos*. Portafolio.co. <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/explotaron-cinco-minas-de-carbon-en-sutatausa-579930>
- Resolución 2400 de 1979 [Ministerio de trabajo y seguridad social]. Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. 22 de mayo de 1979
- Resolución 40209 de 2022 [Ministerio de minas y energía]. Por medio de la cual se actualiza la Política Nacional de Seguridad Minera. 10 de junio de 2022.
- Rodríguez-Zapata, M. A., & Ruiz-Agudelo, C. A. (2021). Environmental liabilities in Colombia: A critical review of current status and challenges for a megadiverse country. *Environmental Challenges*, 5(100377), 100377. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100377>
- Romero, J. H. (2021, agosto 14). *Dos personas murieron en nuevo accidente minero en La Uvita*. Caracol Radio. https://caracol.com.co/emisora/2021/08/15/tunja/1628979644_535996.html
- Rusibamayila, M., Meshi, E., & Mamuya, S. (2018). Respiratory impairment and personal respirable dust exposure among the underground and open cast gold miners in Tanzania. *Annals of Global Health*, 84(3), 419–428. <https://doi.org/10.29024/aogh.2323>
- Ryter, S. W., Ma, K. C., & Choi, A. M. K. (2018). Carbon monoxide in lung cell physiology and disease. *American Journal of Physiology. Cell Physiology*, 314(2), C211–C227. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00022.2017>
-
-

- Ryter, S. W., Ma, K. C., & Choi, A. M. K. (2018). Carbon monoxide in lung cell physiology and disease. *American Journal of Physiology. Cell Physiology*, 314(2), C211–C227. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00022.2017>
- Saeedi, A., Najibi, A., & Mohammadi -Bardbori, A. (2015). Effects of long-term exposure to hydrogen sulfide on human red blood cells. *The International Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 6(1), 20–25. <https://doi.org/10.15171/ijoem.2015.482>
- Saji, A. S., Raza, M. H., Anjum, A. S., Maqsood, H., Yousaf, J., & Saleem, S. (2022). Carbon monoxide poisoning with an atypical presentation on MRI: Case report and literature review. *Annals of Medicine and Surgery* (2012), 82. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2022.104655>
- Sánchez-Squella, A., Fernández, D., Benavides, R., & Saldias, J. (2022). Risk analysis, regulation proposal and technical guide for pilot tests of hydrogen vehicles in underground mining. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(43), 18799–18809. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.080>
- Shahriar, K., & Bakhtavar, E. (2009). Geotechnical Risks in Underground Coal Mines. *Journal of applied sciences (Faisalabad, Pakistan)*, 9(11), 2137–2143. <https://doi.org/10.3923/jas.2009.2137.2143>
- Sharma, V., Taksh, Srivastav, K., Priyam, & Siddiqui, N. A. (2018). A critical study on role of sensor-based electronic system for toxic gas identification in the mining (coal) industry. En *Advances in Intelligent Systems and Computing* (pp. 1511–1521). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5903-2_157
- SWI. (2023, junio 14). *Mueren dos mineros al inhalar gases tóxicos en una mina del norte de Colombia*. swissinfo.ch. https://www.swissinfo.ch/spa/colombia-mina_mueren-dos-
-

[mineros-al-inhalar-gases-t%C3%B3xicos-en-una-mina-del-norte-de-colombia/48590390](https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.7108)

Torres, F. & Murcia, D. (2021) Riesgo por exposición a agentes químicos y atmósferas explosivas en minas de carbón de Tópaga, Colombia. *Entramado*. 17(2), p. 292-304
<https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.7108>

Vanegas, G. (2023). *La minería subterránea en Colombia: el riesgo latente de morir bajo el suelo*. Ediciones El País S.L. <https://elpais.com/america-colombia/2023-03-16/la-mineria-subterranea-en-colombia-el-riesgo-latente-de-morir-bajo-el-suelo.html>

Vearrier, D., & Greenberg, M. I. (2011). Occupational health of miners at altitude: Adverse health effects, toxic exposures, pre-placement screening, acclimatization, and worker surveillance. *Clinical Toxicology (Philadelphia, Pa.)*, 49(7), 629–640.
<https://doi.org/10.3109/15563650.2011.607169>

Vélez, M. A. (2018). *Prevención y Control del Metano en Minería Subterránea de Carbón como Oportunidad de Proyectos Sostenibles en Colombia*. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/68985/43759886.2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wang, Y., Fu, G., Lyu, Q., Wu, Y., Jia, Q., Yang, X., & Li, X. (2022). Reform and development of coal mine safety in China: An analysis from government supervision, technical equipment, and miner education. *Resources Policy*, 77(102777), 102777.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102777>

Yang, L., Birhane, G. E., Zhu, J., & Geng, J. (2021). Mining employees safety and the application of information technology in coal mining: Review. *Frontiers in public health*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.709987>

Zaitseva, N. V., Nosov, A. E., Ivashova, J. A., Baidina, A. S., & Kostarev, V. G. (2019).

Endothelial dysfunction in workers in underground mining of chrome ores. *Meditina truda i promyshlennaia ekologiia*, 11, 914–919. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-11-914-919>

Zheng, C., Jiang, B., Xue, S., Chen, Z., & Li, H. (2019). Coalbed methane emissions and drainage methods in underground mining for mining safety and environmental benefits: A review. *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, 127, 103–124. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.05.010>



ANEXOS

Anexo A. Diagrama de flujo sobre la identificación y método de cribado de los artículos empleados para la revisión en función de los establecido por PRISMA 2020

